



**Universidade de Aveiro**  
**2012**

Departamento de Engenharia Civil

**Rute Natércia de  
Carvalho Abrantes**

**Caldas de injeção para revestimentos com perda  
de aderência**





**Rute Natércia de  
Carvalho Abrantes**

**Caldas de injeção para revestimentos com perda  
de aderência**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Víctor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação da Prof.<sup>a</sup> Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



Ao meu irmão e aos meus pais.



## **O júri**

Presidente

**Professor Doutor Carlos Daniel Borges Coelho**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga**

Investigadora Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

**Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira**

Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa**

Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

Ao Professor Doutor Victor Ferreira, pela disponibilidade, motivação e transmissão de conhecimentos no desenvolvimento do presente trabalho.

À Professora Doutora Ana Velosa, pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

À Liliana por toda a ajuda, sugestões, disponibilidade, cuidado, atenção e amizade.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil, Victor e João, pela disponibilidade na fase laboratorial.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, pelo incentivo e por me fazerem acreditar sempre, permitindo-me a concretização deste projeto.

Ao meu irmão, pela partilha de tantas vivências, conquistas e dificuldades ao longo deste percurso e de toda a vida, por tudo o que me ensinou desde pequenina, pelo exemplo e valores que sempre me transmitiu.

A toda a minha família sem exceção, especialmente à minha avó pelo carinho e pelo seu abraço sempre presente.

Às minhas pequeninas, prima e irmã pela alegria permanente.



**Palavras-chave**

Conservação, revestimentos antigos, cal aérea, caldas de injeção, aderência

**Resumo**

O presente trabalho decorre da importância crescente de restaurar e preservar o património edificado antigo, caracterizado por revestimentos tradicionais à base de cal aérea. Não raras vezes opta-se por estratégias de intervenção pouco eficazes e desajustadas face aos materiais originais que, mais tarde ou mais cedo, acabam por comprometer o desempenho destes revestimentos. Às argamassas de substituição são exigidos requisitos específicos que nem sempre são fáceis de alcançar e conjugar. A compatibilidade química, física e mecânica com o material pré-existente são características essenciais que ao serem asseguradas permitem minorar os efeitos de degradação de forma eficaz e duradoura quando se procede a uma intervenção.

Uma das principais formas de degradação destes revestimentos resulta na perda de aderência e consequente destacamento de material, ou mesmo perda de coesão da argamassa, provocando um efeito extremamente nefasto nos revestimentos exteriores. Importa desenvolver técnicas e materiais capazes de restituir ao revestimento a sua funcionalidade.

Como consequência desta necessidade, têm-se como objetivo essencial, neste trabalho, o desenvolvimento de caldas de injeção (*grouts*) para a consolidação de revestimentos antigos.

As caldas de injeção foram desenvolvidas tendo em conta o comportamento reológico das argamassas bem como as suas propriedades no estado endurecido. As composições estudadas encontram-se maioritariamente em conformidade com os requisitos especificados para rebocos de substituição em revestimentos antigos. A realização de ensaios de aderência, permitiu uma avaliação quantitativa da resistência de aderência à tração e ainda uma avaliação qualitativa face ao tipo de rotura observado. Constatou-se que os *grouts* apresentam, maioritariamente, rotura coesiva (no seio da camada da calda de injeção) o que é bastante satisfatório.



**Keywords**

Conservation, old coatings, lime, grout injection, adhesion

**Abstract**

This work stems from the growing importance of restoring and preserving the ancient architectural heritage, characterized by traditional coatings based on lime. Often, ineffective and inadequate strategies of intervention are chosen considering the original materials that, sooner or later, end up compromising the performance of these coatings.

It is demanded of the replacement mortars, specific requirements that are not always easy to reach and combine. Chemical, physical and mechanical compatibility with the pre-existing materials are essential characteristics that, being assured, allow for the reduction of the degradation effects in an effective and lasting way when it comes to an intervention.

One of the main forms of degradation of these coatings results in loss of adhesion and consequent detachment of material, or even loss of cohesion of the mortar, causing an extremely harmful effect on the external cladding. It matters to develop techniques and materials capable of returning functionality to the coatings. As a result of this need, the essential goal of this work was the development of grout injections (grouts) for the consolidation of old coatings.

The grout injections were developed taking into account the rheological behavior of mortar as well as their properties in the hardened state. The studied compositions are mostly in accordance with the requirements specified for plaster replacement for old coatings. The testing of adhesion, allowed a quantitative evaluation of the tensile bond strength and also a qualitative assessment based on the type of rupture observed. It appears that the grouts present mostly, a cohesive rupture (within the layer of slurry injection) which is quite satisfactory.



# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. MOTIVAÇÃO.....	3
1.3. OBJETIVOS .....	3
<b>2. CONSERVAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DE REVESTIMENTOS ANTIGOS.....</b>	<b>5</b>
2.1. A IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO DO PATRIMÓNIO ARQUITECTÓNICO .....	5
2.2. REVESTIMENTOS DE PAREDES .....	7
2.2.1. REVESTIMENTOS ANTIGOS.....	7
2.2.2. ESTADO DE CONSERVAÇÃO DOS REVESTIMENTOS ANTIGOS .....	8
2.2.3. DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO EM REVESTIMENTOS ANTIGOS.....	10
2.3. ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO TRADICIONAIS.....	12
2.3.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA .....	12
2.3.2. CONSTITUIÇÃO .....	13
2.3.2.1. LIGANTES .....	13
2.3.2.2. AGREGADOS .....	16
2.3.2.3. AREIAS.....	17
2.3.2.4. ÁGUA .....	17
2.3.2.5. ADJUVANTES.....	18
2.3.2.6. ADITIVOS .....	22
2.4. CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS DE SUBSTITUIÇÃO PARA EDIFÍCIOS ANTIGOS.....	24
2.4.1. COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS REBOCOS .....	26
2.5. AGENTES DE DEGRADAÇÃO / PRINCIPAIS ANOMALIAS DOS REBOCOS ANTIGOS .....	30
2.6. ADERÊNCIA .....	32
2.6.1. CONSOLIDAÇÃO DE REVESTIMENTOS COM PERDA DE ADERÊNCIA.....	36
2.6.2. <i>GROUTS</i> OU CALDAS DE INJEÇÃO.....	37
2.6.3. TÉCNICAS DE INJEÇÃO .....	37
2.6.4. EXIGÊNCIAS BÁSICAS DE UM <i>GROUT</i> .....	38
<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>41</b>
3.1. DESCRIÇÃO GERAL .....	41
3.2. FORMULAÇÕES DE <i>GROUTS</i> ESTUDADAS .....	41
3.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	46
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS .....	46
3.3.1.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	46
3.3.1.2. POZOLANICIDADE (CHAPELLE MODIFICADO) .....	47
3.4. CARACTERIZAÇÃO DAS CALDAS DE CAL ( <i>GROUTS</i> ).....	48
3.4.1. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS CALDAS NO ESTADO FRESCO .....	48
3.4.1.1. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO.....	48
3.4.1.2. RETENÇÃO DE ÁGUA .....	49
3.4.2. EXECUÇÃO DOS PROVETES PRISMÁTICOS ( <i>GROUTS</i> ) .....	50
3.4.3. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS <i>GROUTS</i> NO ESTADO ENDURECIDO .....	51
3.4.3.1. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO .....	51
3.4.3.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO .....	52
3.4.3.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	53
3.5. ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CONSOLIDAÇÃO DE REVESTIMENTOS.....	54
3.5.1. EXECUÇÃO DO SUPORTE .....	54
3.5.2. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE À ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO (TUBOS DE KARSTEN) .....	57
3.5.3. ENSAIOS DE ADERÊNCIA NO <i>GROUT</i> E NO REBOCO .....	58
3.5.3.1. ENSAIO DE ADERÊNCIA COM EQUIPAMENTO DE TRAÇÃO (PULL-OFF TEST) .....	58
3.5.3.2. ENSAIO ADERÊNCIA PELO MÉTODO EXPEDITO.....	60
3.5.3.3. AVALIAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE ROTURA DECORRENTES DOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA .....	62
3.5.4. AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA CARBONATAÇÃO DAS CALDAS DE INJEÇÃO.....	64
3.5.5. AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE (ULTRASSONS).....	65

---

<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>67</b>
4.1.	DESCRIÇÃO GERAL.....	67
4.2.	FORMULAÇÕES DE <i>GROUT</i> ESTUDADAS .....	67
4.3.	CARACTERIZAÇÃO DAS CALDAS DE CAL ( <i>GROUTS</i> ).....	69
4.3.1.	AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS CALDAS NO ESTADO FRESCO.....	69
4.3.1.1.	DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO .....	69
4.3.2.	AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS <i>GROUTS</i> NO ESTADO ENDURECIDO .....	70
4.3.2.1.	RESISTÊNCIA MECÂNICA À FLEXÃO E À COMPRESSÃO.....	70
4.3.2.2.	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	89
4.4.	ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CONSOLIDAÇÃO DE REVESTIMENTOS .....	95
4.4.1.	PERMEABILIDADE À ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO (TUBOS DE KARSTEN).....	95
4.4.2.	ADERÊNCIA DO <i>GROUT</i> E DO REBOCO.....	106
4.4.2.1.	AVALIAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE ROTURA DECORRENTES DOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA .....	118
4.4.2.2.	AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA CARBONATAÇÃO DAS CALDAS DE INJEÇÃO.....	121
4.4.3.	AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE (ULTRASSONS) .....	123
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>125</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>131</b>

---

## Índice de figuras

FIGURA 1 – ARGAMASSA SEM PLASTIFICANTE: PARTÍCULAS DE ARGAMASSA FLOCULADAS, AGLOMERADAS PELAS TENSÕES CAPILARES DEVIDAS À PRESENÇA DE AR E ÁGUA, ADAPTADO DE (CARDOSO, 2009). .....	20
FIGURA 2 – ARGAMASSA COM PLASTIFICANTE: PARTÍCULAS DE ARGAMASSA DISPERSAS, POIS AO ADICIONAR-SE O PLASTIFICANTE À ÁGUA, ESTE É ADSORVIDO PELA SUPERFÍCIE DAS PARTÍCULAS DA ARGAMASSA, EXPULSANDO O AR. ADAPTADO DE (PAIVA, 2005). .....	21
FIGURA 3 – ADERÊNCIA MECÂNICA DO REBOCO CONSOANTE SUCCÃO DO SUPORTE: A) FALTA DE ADERÊNCIA PELA BAIXA ABSORÇÃO DO SUPORTE; B) ADERÊNCIA ADEQUADA DEVIDO À LIGAÇÃO MECÂNICA CONFERIDA POR UMA ABSORÇÃO ADEQUADA; C) DESSECAÇÃO DA ARGAMASSA DEVIDO A UMA ABSORÇÃO EXCESSIVA. (VEIGA, 1997). .....	27
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO <i>PULL-OFF</i> (LNEC, 1986). .....	28
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ATUAÇÃO DOS AGENTES PROMOTORES DE DEGRADAÇÃO, MAIS COMUNS, NUMA FACHADA REBOCADA.....	30
FIGURA 6 – ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO A SUPORTES COM DISTINTOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO, ADAPTADO DE (FARIA, 1993). .....	33
FIGURA 7 – (A) DESTACAMENTO DO REBOCO NA FACHADA DE UM EDIFÍCIO ANTIGO; (B) PERDA DE COESÃO DA ARGAMASSA DE REBOCO. ....	35
FIGURA 8 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA SS-160) USADO NA FORMULAÇÃO DOS <i>GROUTS</i> . .....	46
FIGURA 9 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICAS DO METACAULINO (ARGICAL 1200) E DA DIATOMITE, RESPECTIVAMENTE. ....	46
FIGURA 10 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA DE RIO (MARTINS, 2008) USADA NA ELABORAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REBOCO DOS PROVETES CONSTITUÍDOS PARA SIMULAÇÃO DE PERDA DE ADERÊNCIA.....	47
FIGURA 11 – (A) MESA DE ESPALHAMENTO; (B) MOLDE TRONCO-CÔNICO. ....	48
FIGURA 12 – (A) MATERIAL ACONDICIONADO NO INTERIOR DO MOLDE; (B) ESPALHAMENTO INICIAL; (C) ESPALHAMENTO FINAL ....	49
FIGURA 13 – MOLDES PREENCHIDOS COM AS DIFERENTES FORMULAÇÕES DE <i>GROUT</i> . .....	50
FIGURA 14 – (A) PROVETES PRISMÁTICOS COLOCADOS NA VERTICAL DEVIDAMENTE REFERENCIADOS; (B) PROVETES PRISMÁTICOS NO INTERIOR DA SALA CONDICIONADA DURANTE O PROCESSO DE CURA. ....	51
FIGURA 15 – (A) MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS E CÉLULA DE CARGA DE 3kN; (B) ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO REALIZADO SOBRE OS PROVETES PRISMÁTICOS. ....	51
FIGURA 16 – RETA QUE CARACTERIZA O EQUIPAMENTO DE ENSAIOS PARA UMA CÉLULA DE CARGA DE 3kN E RESPECTIVA EQUAÇÃO. ..	52
FIGURA 17 – (A) MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS E CÉLULA DE CARGA DE 3kN; (B) ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO REALIZADO SOBRE OS MEIOS PROVETES RESULTANTES DO ENSAIO DE FLEXÃO. ....	53
FIGURA 18 – (A) DETERMINAÇÃO DO PESO SECO DE CADA PROVETE; (B) REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE CAPILARIDADE. ....	53
FIGURA 19 – EXECUÇÃO DA 1ª CAMADA DE EMBOÇO SOBRE O CHAPISCO. ....	55
FIGURA 20 – COLOCAÇÃO DAS PLACAS ACRÍLICAS SOBRE A 1ª CAMADA DE EMBOÇO. ....	55
FIGURA 21 – EXECUÇÃO DA 2ª CAMADA DE EMBOÇO. ....	55
FIGURA 22 – SIMULAÇÃO DE DESCONTINUIDADE ENTRE CAMADAS DE REBOCO. ....	56
FIGURA 23 – PREPARAÇÃO DA CAVIDADE PARA POSTERIOR INJEÇÃO DO <i>GROUT</i> . ....	56
FIGURA 24 – INJEÇÃO DO <i>GROUT</i> . ....	56
FIGURA 25 – REFERENCIAÇÃO DOS PROVETES E RESPECTIVA COLOCAÇÃO NO INTERIOR DA SALA CONDICIONADA A 21°C E 65% HR. ....	57
FIGURA 26 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO (TUBOS DE KARSTEN), NA ZONA DE REBOCO E NA ZONA COM INJEÇÃO DE <i>GROUT</i> . ....	57
FIGURA 27 – (A) COLA EPOXÍDICA USADA PARA A COLAGEM DAS PASTILHAS AO SUBSTRATO; (B) PASTILHA JÁ COLADA AO SUBSTRATO. ....	59
FIGURA 28 – ESQUEMA ALUSIVO AO ENSAIO DE TRAÇÃO REALIZADO SOBRE OS PROVETES PARA SIMULAÇÃO DE CONSOLIDAÇÃO ENTRE CAMADAS COM PERDA DE ADERÊNCIA. ....	59
FIGURA 29 – MÁQUINA DE TRAÇÃO USADA PARA O <i>PULL-OFF TEST</i> ; (B) PROVETE SUJEITO A ENSAIO <i>PULL-OFF</i> . ....	60
FIGURA 30 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DA ESTRUTURA DE ENSAIO (MÉTODO EXPEDITO). ....	60
FIGURA 31 – PASTILHAS COM AS FITAS COLADAS DE FORMA CRUZADA, PARA POSTERIOR SUSPENSÃO DO GANCHO. ....	61
FIGURA 32 – (A) MONTAGEM DA ESTRUTURA DE ENSAIO E POSICIONAMENTO DO PROVETE RELATIVAMENTE AO ORIFÍCIO CENTRAL DA MESA DE APOIO; (B) COLOCAÇÃO DA AREIA FINA, VERTIDA LENTAMENTE, PARA O INTERIOR DO BALDE QUE SE ENCONTRA SUSPENSO AO PROVETE ATRAVÉS DE UM GANCHO METÁLICO. ....	61
FIGURA 33 – FORMAS DE ROTURA DECORRENTES DO ENSAIO DE ADERÊNCIA REALIZADO SOBRE AS ZONAS DE INJEÇÃO DE <i>GROUT</i> : (A) ZONA DE INJEÇÃO DE <i>GROUT</i> ANTES DA ROTURA; (B) ROTURA NA INTERFACE SUPORTE/1ª CAMADA DE EMBOÇO; (C) ROTURA NO SEIO DA 1ª CAMADA DE EMBOÇO; (D) ROTURA NO SEIO DA CAMADA DE <i>GROUT</i> ; (E) ROTURA NA INTERFACE <i>GROUT</i> /2ª CAMADA DE EMBOÇO; (F) ROTURA PELA PASTILHA.....	63

---

FIGURA 34 – FORMAS DE ROTURA DECORRENTES DO ENSAIO DE ADERÊNCIA REALIZADO SOBRE AS ZONAS REBOCADAS: (A) ZONA REBOCADA ANTES DA ROTURA; (B) ROTURA NA INTERFACE SUPORTE/1ª CAMADA DE EMBOÇO; (C) ROTURA NO SEIO DA 1ª. CAMADA DE EMBOÇO; (D) ROTURA NA INTERFACE ENTRE CAMADAS DE EMBOÇO; (E) ROTURA PELA PASTILHA. ....	63
FIGURA 35 – FENOLFTALÉINA E MATRIZ DE COLORAÇÃO. ....	64
FIGURA 36 – (A) PULVERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE DESTACAMENTO COM SOLUÇÃO DE FENOLFTALÉINA A 0,2% DE CONCENTRAÇÃO; (B) COLORAÇÃO ROSA DAS ZONAS NÃO CARBONATADAS. ....	64
FIGURA 37 – MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE EMISSOR E RECETOR E REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS SOBRE A ZONA DE REBOCO E SOBRE A ZONA ONDE SE PROCEDE À INJEÇÃO DO <i>GROUT</i> . ....	65
FIGURA 38 - GRÁFICO GERAL DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS À FLEXÃO E COMPRESSÃO ENLOBANDO TODAS AS COMPOSIÇÕES TESTADAS REFERENTES AO GRUPO 1. ....	71
FIGURA 39 - EFEITO DA VARIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE METACAULINO (ARGICAL 1200) SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DE FLEXÃO E COMPRESSÃO PARA OS 28, 60 E 120 DIAS. ....	72
FIGURA 40 - EFEITO DA VARIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE DIATOMITE SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS À FLEXÃO E COMPRESSÃO PARA OS 28, 60 E 120 DIAS. ....	73
FIGURA 41 - EFEITO DO ÉTER DE CELULOSE SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO <i>GROUT</i> BASE. ....	74
FIGURA 42 – EFEITO DO ÉTER DE CELULOSE SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS COMPOSIÇÕES DE METACAULINO – GRUPO 1. ....	75
FIGURA 43 – EFEITO DO ÉTER DE CELULOSE SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS COMPOSIÇÕES DE DIATOMITE – GRUPO 1. ....	76
FIGURA 44 – GRÁFICO GERAL DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DE FLEXÃO E COMPRESSÃO ENLOBANDO TODAS AS COMPOSIÇÕES TESTADAS REFERENTES AO GRUPO 2. ....	76
FIGURA 45 – EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DE 10% DO AGREGADO, PELA MESMA PERCENTAGEM DE FILLER CALCÁRIO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS <i>GROUTS</i> DO GRUPO 2. ....	78
FIGURA 46 – EFEITO DA VARIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE METACAULINO (ARGICAL 1200) SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS À FLEXÃO E COMPRESSÃO PARA OS 28, 60 E 120 DIAS, REFERENTES AOS <i>GROUTS</i> DO GRUPO 1. ....	79
FIGURA 47 – EFEITO DA VARIAÇÃO DA PERCENTAGEM DE DIATOMITE SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DE FLEXÃO E COMPRESSÃO PARA OS 28, 60 E 120 DIAS, REFERENTES AOS <i>GROUTS</i> DO GRUPO 2. ....	80
FIGURA 48 – EFEITO DA INTRODUÇÃO DE ADJUVANTES SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO <i>GROUT</i> BASE COM 10 % DE FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO – GRUPO 2. ....	81
FIGURA 49 – EFEITO DA INTRODUÇÃO DE ADJUVANTES SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS COMPOSIÇÕES DE METACAULINO COM 10% DE FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO – GRUPO 2. ....	81
FIGURA 50 – EFEITO DA INTRODUÇÃO DE ADJUVANTES SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS COMPOSIÇÕES DE DIATOMITE COM 10% DE FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO NO AGREGADO – GRUPO 2. ....	82
FIGURA 51 – GRÁFICO GERAL DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS ENLOBANDO TODAS AS COMPOSIÇÕES TESTADAS REFERENTES AO GRUPO 3. ....	83
FIGURA 52 – EFEITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, DA SUBSTITUIÇÃO DO METACAULINO NO AGREGADO, CONSIDERANDO UMA ARGAMASSA BASE COM 10% DE FILLER CALCÁRIO. ....	84
FIGURA 53 – EFEITO DA INTRODUÇÃO DE ADJUVANTES NAS COMPOSIÇÕES DE METACAULINO SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS À FLEXÃO E COMPRESSÃO PARA OS 28, 60 E 120 DIAS – GRUPO 3. ....	85
FIGURA 54 – GRÁFICO GERAL DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS, AOS 28 DIAS, DAS COMPOSIÇÕES DO GRUPO 4. ....	86
FIGURA 55 – EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DE PARTE DO AGREGADO PELA MESMA PERCENTAGEM DE METACAULINO, SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS À FLEXÃO E À COMPRESSÃO DOS <i>GROUTS</i> DO GRUPO 4, AOS 28 DIAS. ....	87
FIGURA 56 – EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DE PARTE DO AGREGADO PELA MESMA PERCENTAGEM DE DIATOMITE, SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS À FLEXÃO E À COMPRESSÃO DOS <i>GROUTS</i> DO GRUPO 4, AOS 28 DIAS. ....	87
FIGURA 57 – EFEITO DA INTRODUÇÃO DE ADJUVANTES NAS COMPOSIÇÕES DE METACAULINO DO GRUPO 4 PARA OS 28 DIAS. ....	88
FIGURA 58 – EFEITO DA INTRODUÇÃO DE ADJUVANTES SOBRE AS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DAS COMPOSIÇÕES DE DIATOMITE DO GRUPO 4, PARA OS 28 DIAS. ....	89
FIGURA 59 – COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA AS DIFERENTES PERCENTAGENS DE METACAULINO E DIATOMITE – GRUPO 1. ....	90
FIGURA 60 – EFEITO DO FILLER CALCÁRIO SOBRE A CAPILARIDADE DO <i>GROUT</i> BASE - GRUPO 2. ....	91
FIGURA 61 – COEFICIENTE DE CAPILARIDADE PARA AS DIFERENTES PERCENTAGENS DE METACAULINO E DIATOMITE - GRUPO 2. ....	92
FIGURA 62 – EFEITO DOS ADJUVANTES SOBRE A CAPILARIDADE DOS <i>GROUTS</i> DE METACAULINO PERTENCENTES AO GRUPO 2. ....	93
FIGURA 63 - EFEITO DOS ADJUVANTES SOBRE A CAPILARIDADE DOS <i>GROUTS</i> DE DIATOMITE PERTENCENTES AO GRUPO 2. ....	93
FIGURA 64 – EFEITO DOS ADJUVANTES SOBRE A CAPILARIDADE DAS AMOSTRAS COM METACAULINO NO AGREGADO – GRUPO 3. ....	94
FIGURA 65 – EFEITO DOS ADJUVANTES SOBRE A CAPILARIDADE NAS AMOSTRAS DE METACAULINO E DIATOMITE EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO – GRUPO 4. ....	95
FIGURA 66 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE O <i>GROUT</i> BASE E O <i>GROUT</i> COM 10% DE METACAULINO, AOS 28, 60 E 120 DIAS (ZONA DE REBOCO E ZONA DE <i>GROUT</i> ). ....	97
FIGURA 67 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE O <i>GROUT</i> BASE E O <i>GROUT</i> COM 20% DE METACAULINO, AOS 28, 60 E 120 DIAS (ZONA DE REBOCO E ZONA DE <i>GROUT</i> ). ....	98
FIGURA 68 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE O <i>GROUT</i> BASE E O <i>GROUT</i> COM 30% DE METACAULINO, AOS 28, 60 E 120 DIAS (ZONA DE REBOCO E ZONA DE <i>GROUT</i> ). ....	98

---

FIGURA 69 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE O <i>GROUT</i> BASE E O <i>GROUT</i> COM 20% DE DIATOMITE, AOS 28, 60 E 120 DIAS (ZONA DE REBOCO E ZONA DE <i>GROUT</i> ). .....	99
FIGURA 70 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE O <i>GROUT</i> BASE E O <i>GROUT</i> COM 30% DE DIATOMITE, AOS 28, 60 E 120 DIAS (ZONA DE REBOCO E ZONA DE <i>GROUT</i> ). .....	100
FIGURA 71 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE <i>GROUTS</i> COM 20 E 30% DE METACAUULINO E 10% DE FILLER CALCÁRIO, PARA OS 28, 60 E 120 DIAS (ZONA DE REBOCO E DE <i>GROUT</i> ). .....	101
FIGURA 72 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE <i>GROUTS</i> COM 20 E 30% DE DIATOMITE E 10% DE FILLER CALCÁRIO, PARA OS 28, 60 E 120 DIAS (ZONA DE REBOCO E DE <i>GROUT</i> ). .....	102
FIGURA 73 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE <i>GROUTS</i> COM E SEM FILLER CALCÁRIO, PARA OS 28, 60 E 120 DIAS (ZONA DE REBOCO E <i>GROUT</i> ). .....	103
FIGURA 74 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE <i>GROUTS</i> COM DIATOMITE EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO AOS 28 E 60 DIAS (ZONA DE REBOCO E <i>GROUT</i> ). .....	104
FIGURA 75 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE <i>GROUTS</i> COM METACAUULINO EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO AOS 28 E 60 DIAS (ZONA DE REBOCO E <i>GROUT</i> ). .....	105
FIGURA 76 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE <i>GROUTS</i> COM METACAUULINO EM SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE OU NO AGREGADO (PERCENTAGENS MÍNIMAS TESTADAS). .....	105
FIGURA 77 – ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO: COMPARAÇÃO ENTRE <i>GROUTS</i> COM METACAUULINO EM SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE OU NO AGREGADO (PERCENTAGENS MÁXIMAS TESTADAS). .....	106
FIGURA 78 – ADERÊNCIA NA ZONA DE INJEÇÃO DO <i>GROUT</i> , COM DIFERENTES PERCENTAGENS DE METACAUULINO. ....	108
FIGURA 79 – ADERÊNCIA NA ZONA DE INJEÇÃO DO <i>GROUT</i> , COM DIFERENTES PERCENTAGENS DE DIATOMITE. ....	109
FIGURA 80 – EFEITO COMPARATIVO DA ADIÇÃO DE DIFERENTES PERCENTAGENS DE METACAUULINO E DE DIATOMITE NA ADERÊNCIA – GRUPO 1. ....	110
FIGURA 81 – EFEITO COMPARADO DA ADIÇÃO DE DIFERENTES PERCENTAGENS DE ÉTER DE CELULOSE NAS COMPOSIÇÕES DE METACAUULINO. ....	111
FIGURA 82 – EFEITO DE FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO NO AGREGADO NUMA CALDA DE CONSOLIDAÇÃO COM METACAUULINO. ....	112
FIGURA 83 – EFEITO NA ADERÊNCIA, DA ADIÇÃO DE DIFERENTES PERCENTAGENS DE METACAUULINO NUMA CALDA DE CONSOLIDAÇÃO COM COM 10% DE FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO. ....	113
FIGURA 84 – EFEITO NA ADERÊNCIA, DA ADIÇÃO DE DIFERENTES PERCENTAGENS DE DIATOMITE NUMA CALDA DE CONSOLIDAÇÃO COM 10% DE FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO. ....	114
FIGURA 85 – EFEITO COMPARATIVO SOBRE A ADERÊNCIA, DA ADIÇÃO DE DIFERENTES PERCENTAGENS DE METACAUULINO E DE DIATOMITE NAS CALDAS DE CONSOLIDAÇÃO COM 10% DE FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO NO AGREGADO. ....	115
FIGURA 86 – EFEITO NA ADERÊNCIA, DA INTRODUÇÃO DE ADJUVANTES NAS CALDAS DE CONSOLIDAÇÃO COM METACAUULINO E 10% DE FILLER CALCÁRIO. ....	115
FIGURA 87 – EFEITO NA ADERÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO METACAUULINO NO AGREGADO EM DIFERENTES PERCENTAGENS. ....	116
FIGURA 88 – EFEITO NA ADERÊNCIA, DA SUBSTITUIÇÃO DA DIATOMITE NO AGREGADO EM DIFERENTES PERCENTAGENS. ....	117
FIGURA 89 – EFEITO COMPARATIVO DA ADIÇÃO DE METACAUULINO OU DIATOMITE COMO SUBSTITUTOS DE PARTE DO AGREGADO, NA ADERÊNCIA – GRUPO 4. ....	118
FIGURA 90 – ZONA DE CONSOLIDAÇÃO: ROTURA ADESIVA NA INTERFACE <i>GROUT</i> /2ª CAMADA DE EMBOÇO. ....	119
FIGURA 91 – ZONA DE CONSOLIDAÇÃO: ROTURA COESIVA NO SEIO DA CAMADA DE <i>GROUT</i> . ....	119
FIGURA 92 – ZONA DE CONSOLIDAÇÃO: ROTURA MISTA. ....	120
FIGURA 93 – ZONA NÃO CONSOLIDADA: ROTURA A COESIVA NO SEIO DA 1ª CAMADA DE EMBOÇO. ....	121
FIGURA 94 – ZONA NÃO CONSOLIDADA: ROTURA ADESIVA NA INTERFACE ENTRE CAMADAS DE EMBOÇO. ....	121
FIGURA 95 – ZONA NÃO CONSOLIDADA: ROTURA ADESIVA NA INTERFACE SUPORTE/1ª CAMADA DE EMBOÇO. ....	121
FIGURA 96 – AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA CARBONATAÇÃO DAS CALDAS DESENVOLVIDAS, PARA OS 120 DIAS. ....	122

---



## Índice de tabelas

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO REVESTIMENTO, SEGUNDO (AGUIAR E VEIGA, 2003).....	9
TABELA 2 – CRITÉRIOS GERAIS DE DECISÃO SOBRE O TIPO DE INTERVENÇÃO (AGUIAR E VEIGA, 2003). ....	10
TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO DOS LIGANTES INORGÂNICOS (NERO,2001A).....	13
TABELA 4 – REQUISITOS ESTABELECIDOS PARA AS ARGAMASSAS DE SUBSTITUIÇÃO – CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E NÃO MECÂNICAS, ADAPTADO DE (VEIGA, 2002). ....	25
TABELA 5 – FONTES DE HUMIDADE MAIS COMUNS NOS EDIFÍCIOS ANTIGOS, ADAPTADO DE (MAGALHÃES, 2002). ....	31
TABELA 6 – FACTORES QUE RESULTAM NO APARECIMENTO DE FENDAS E FISSURAS NOS REBOCOS, ADAPTADO DE (MAGALHÃES, 2002). ....	33
TABELA 7 – CAUSAS DA PERDA DE ADERÊNCIA DOS REBOCOS, ADAPTADO DE (GASPAR ET AL., 2007) (MAGALHÃES, 2002).....	34
TABELA 8 – CAUSAS QUE PROMOVEM A PERDA DE COESÃO DOS REBOCOS, ADAPTADO DE (GASPAR ET AL., 2007).....	35
TABELA 9 – EXIGÊNCIAS BÁSICAS PARA UMA ARGAMASSA DE GROUT, ADAPTADO DE (TAVARES ET AL., 2007). ....	39
TABELA 10 – RESUMO DOS REQUISITOS A GARANTIR PARA AS CALDAS DE INJEÇÃO, ADAPTADO DE (LUSO ET AL., 2007).....	40
TABELA 11 – MATERIAIS APLICADOS NA FORMULAÇÃO DOS <i>GROUTS</i> . ....	42
TABELA 12 – <i>GROUTS</i> COM METACAULINO/DIATOMITE EM SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE(CAL AÉREA) E RESPECTIVA COMPOSIÇÃO. ....	44
TABELA 13 – <i>GROUTS</i> COM METACAULINO/DIATOMITE EM SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE(CAL AÉREA) E FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) E RESPECTIVA COMPOSIÇÃO. ....	44
TABELA 14 – <i>GROUTS</i> COM METACAULINO/DIATOMITE E FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO (CAL AÉREA).....	45
TABELA 15 – <i>GROUTS</i> COM METACAULINO/DIATOMITE E FILLER CALCÁRIO EM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO (CAL AÉREA).....	45
TABELA 16 – RESULTADOS OBTIDOS PELO ENSAIO MODIFICADO DE CHAPELLE (AZEITEIRO, 2011).....	47
TABELA 17 – <i>GROUTS</i> PERTENCENTES AOS 1º. GRUPO DE ANÁLISE E RESPECTIVA DESIGNAÇÃO.....	68
TABELA 18 – <i>GROUTS</i> PERTENCENTES AO 2º. GRUPO DE ANÁLISE E RESPECTIVA DESIGNAÇÃO.....	68
TABELA 19 – <i>GROUTS</i> PERTENCENTES AO 3º. GRUPO DE ANÁLISE E RESPECTIVA DESIGNAÇÃO.....	69
TABELA 20 – <i>GROUTS</i> PERTENCENTES AO 4º. GRUPO DE ANÁLISE E RESPECTIVA DESIGNAÇÃO.....	69

---



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

A longevidade das construções encontra-se associada, de forma inequívoca, a preocupações de reabilitação, manutenção e conservação, sendo a fachada um dos elementos que maior importância e atenção deverá merecer. É a fachada que transmite, em primeira instância, a identidade do edifício ao observador e é também nela que se encontra impressa a sua história.

Neste âmbito importa destacar o papel determinante dos revestimentos, que através das suas características estéticas e funcionais, vestem as alvenarias, protegem-nas da ação dos agentes externos promotores da sua degradação e condicionam fortemente o aspeto final dos edifícios, podendo ainda funcionar como incremento para a resistência mecânica de alvenarias mais fracas.

É essencial a conservação dos revestimentos exteriores, que sendo parte integrante da identidade arquitectónica de qualquer edifício, devem após ser alvo de intervenção, permitir a preservação da traça original do mesmo. Os revestimentos antigos conservam técnicas tradicionais outrora usadas, que embora atualmente tenham sido colocadas de parte, representam de forma fiel os processos de concepção e execução das gerações passadas, como as artes e as técnicas da cal.

Muitas vezes, em virtude da elevada exposição e vulnerabilidade a ações potencialmente destrutivas, os revestimentos, cedo indiciam manifestações de degradação, existindo uma enorme tendência para se proceder à sua remoção e substituição integral. Este facto decorre, frequentemente, do desconhecimento técnico acerca da viabilidade do seu restauro, ou por razões de cariz economicista ao pensar-se que é mais dispendioso proceder à sua reparação. A substituição indiscriminada dos materiais antigos por novos, supostamente mais resistentes e de maior durabilidade, e o recurso a técnicas modernas, decorre normalmente num resultado pobre e comprometedor. Perde-se não só um importantíssimo testemunho estético e tecnológico, marco de época e de contexto arquitectónico, descaracteriza-se também o edifício pela alteração de cor e textura dos novos revestimentos, que se torna mais evidente à medida que se processa o seu envelhecimento e pode alterar-se ainda, o funcionamento global da parede promovendo a sua rápida degradação, afetação dos movimentos da água e, conseqüentemente, dos sais entre suporte/revestimento. Daqui poderá resultar a perda dos revestimentos e em última análise do próprio edifício.

A degradação dos revestimentos, função do tempo, das ações externas e da eventual ausência de manutenção, conduz assim à necessidade de conservação, para a qual é fulcral reunir um conjunto de metodologias e técnicas a aplicar, capazes de restituir a sua funcionalidade e desempenho estético.

Deve ser privilegiada, sempre que possível, a reparação e manutenção dos revestimentos antigos. Não obstante, sempre que for necessário proceder à sua substituição, esta deve pautar-se, fundamentalmente, pela conservação das técnicas construtivas tradicionais e pelo recurso a materiais que apresentem compatibilidade com os pré-existentes, durabilidade satisfatória e a máxima similitude possível com os originais, assegurando um desempenho do conjunto idêntico ao original.

É o conhecimento cabal da constituição dos revestimentos, da respetiva composição e das diversas camadas que os constituem, que permite efetuar um planeamento correto e eficaz para a intervenção a realizar. Os revestimentos que mais vezes se identificam, como tendo sido aplicados noutras épocas, são constituídos por areia e cal aérea, sendo a cal o único ligante. Porém quando a cal (ligante único) se revelava incapaz de cumprir alguns dos requisitos exigidos aos revestimentos, nomeadamente relativos à hidraulicidade, era frequente recorrer-se a eventuais adições de pó de tijolo ou outros componentes pozolânicos.

O recurso sistemático a argamassas de cimento ou argamassas bastardas – adequadas para as técnicas construtivas modernas – em processos construtivos tradicionais é, ao contrário do que se pensa, errado. Este tipo de argamassas não oferece um comportamento flexível ao movimento dos outros materiais, originando roturas verticais que colocam em risco a própria construção, comprometendo a sua durabilidade. Por contraponto, as argamassas de cal conciliam como principais vantagens a flexibilidade, que lhe permite compatibilidade com todo o tipo de alvenarias, e a extrema dureza, justificando a excelente durabilidade das mesmas.

Os revestimentos exteriores com base em cal, apresentam como principal forma de degradação a perda de aderência. Desta resulta a consequente dissociação das diferentes camadas do reboco, ou entre o conjunto reboco/suporte. As principais anomalias verificadas neste domínio são o destacamento, o descolamento e o aparecimento de lacunas ao nível do revestimento. Este tipo de anomalias não é suscetível de reparação, através das técnicas correntes de construção, optando-se comumente por proceder à extração dos revestimentos e subsequente substituição.

Visando a restituição da aderência, estuda-se neste trabalho, com maior detalhe e enfoque a técnica de injeção de caldas de consolidação. Importa denotar que este tipo de tratamento de conservação, devido ao seu carácter praticamente irreversível, impõe a existência de compatibilidade mecânica, física e química das argamassas usadas com o revestimento original.

## **1.2. Motivação**

Nos últimos anos tem-se verificado um crescente interesse na conservação e reabilitação do edificado antigo, nomeadamente dos revestimentos, que devem ser preservados dentro dos conceitos fundamentais da conservação. Desta forma, a manutenção destes revestimentos passa pela conservação de técnicas construtivas tradicionais, pelo uso de materiais compatíveis e o mais idênticos possível com o original (à base de cal aérea e areia).

A perda de aderência entre as várias camadas do revestimento antigo ou entre o revestimento e o suporte, é a principal patologia observada, promovendo o descolamento, abaulamento e destacamento da camada de reboco. Importa pois, aprofundar o estudo de metodologias de restauro conservativas, tendo-se escolhido a técnica de consolidação através de *grout*.

Pretende-se aprofundar os conhecimentos nesta área, de forma a contribuir para uma melhoria das intervenções de conservação em revestimentos de paredes antigas, através do uso de materiais tradicionais.

## **1.3. Objetivos**

Através do desenvolvimento de uma calda de consolidação de revestimentos de paredes à base de cal (*grout*), passível de ser injetada, e que apresente compatibilidade física, química e mecânica com os materiais pré-existentes, visa-se, com este trabalho, estudar e analisar com pormenor a sua capacidade de restituição de aderência, no caso da ocorrência de eventuais destacamentos, formação de lacunas nos revestimentos, abaulamentos ou empolamentos.



## **2. CONSERVAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DE REVESTIMENTOS ANTIGOS**

### **2.1. A importância da conservação do património arquitectónico**

O parque edificado português apresenta atualmente níveis de degradação bastante significativos e que se estende não só pelos edifícios mais antigos, onde muitas vezes não existem condições mínimas de habitabilidade e segurança, mas também aos mais recentes, onde é notório o envelhecimento precoce dos elementos constituintes.

Para esta situação muito contribuiu a inexistência ou inadequabilidade de políticas de manutenção/reabilitação, associadas, durante muito tempo, a uma legislação generalista e nem sempre cumprida. Para efetivar a melhoria deste sector, urge reunir esforços no desenvolvimento e implementação de medidas de manutenção/reabilitação, promovendo intervenções mais eficazes e económicas, tendo em conta aspetos sociais, técnicos, económicos e tecnológicos. É, de igual forma, premente a mudança de mentalidades com a clarificação das responsabilidades de cada interveniente na implementação dessas metodologias (FLORES e BRITO, 2002).

Os edifícios representam e encerram em si, os materiais, as técnicas e os meios existentes na época e no local em que foram construídos. Épocas e locais de construção diferentes traduzem conhecimentos, hábitos socioculturais, métodos e materiais construtivos diferentes. Quando se intervém num edifício antigo quer seja considerado monumento ou não, esta consciência é de primordial importância.

A reabilitação, conservação ou manutenção a executar só poderá ser eficaz e durável se existir respeito e entendimento global do edifício. Não será necessário efetuar exatamente como à data da construção, mas exigirá uma adaptação do que hoje sabemos ao que antes se fazia, sob pena de se descaracterizar o edifício, perdendo-se a sua identidade, ou mesmo comprometendo-se a sua durabilidade (COUTO, 2007).

A envolvente vertical, sendo um elemento integrante do invólucro exterior do edifício, desempenha um papel principal ao nível da concepção arquitectónica, na medida em que é suscetível de afetar e valorizar os espaços que delimita (SILVA e HEITOR, 2001). Em virtude deste facto, a grande maioria das obras de conservação/reabilitação apresentam como principal vetor de investimento o tratamento e preservação da envolvente vertical, permitindo que o edifício apresente melhorias de comportamento global.

Pelo facto de estarem constantemente expostos a agentes de degradação, como as ações atmosféricas (alternância de humedificações e secagens), bem como, ao efeito nefasto da poluição atmosférica, os elementos de revestimento estão sujeitos a deterioração acelerada. Embora exterior, esta deterioração atinge muitas vezes o interior do edifício, através de infiltrações de água e humidades nos paramentos.

Ora, a manutenção preventiva é uma das formas de manutenção pró-ativa, que tem como principal objetivo atuar atempadamente antes da ocorrência de anomalias ou defeitos. Este tipo de manutenção deve iniciar-se na fase de projeto, com a elaboração de um planeamento das ações de manutenção, permitindo uma redução dos trabalhos extraordinários e menor interferência com a normal utilização do edifício (FLORES e BRITO, 2002).

Os revestimentos exteriores originais de paredes de edifícios antigos devem ser, tanto quanto possível, conservados, recorrendo a operações de manutenção, tais como: limpeza, tratamento com biocidas, correção de pontos de entrada de água, entre outros e, quando necessário, de consolidação e de reparação pontual (VEIGA et al., 2004). É possível assim, respeitar a identidade histórica e material do edifício e preservar técnicas construtivas já raras que, de outro modo, acabariam por ser esquecidas. Este é também o método mais seguro de evitar incompatibilidades entre materiais antigos e novos e, em geral e ao contrário do que muitas vezes se afirma, o processo menos oneroso de garantir o bom estado de conservação dos revestimentos e do edifício no seu todo.

Embora seja muitas vezes tida como primeira opção, a substituição deveria ser contemplada como um caminho último de ponderação, uma vez que a ética da conservação exige a preservação dos materiais e tecnologia antiga sempre que possível, mas também porque é difícil especificar argamassas de substituição compatíveis com os elementos pré-existentes. Por outro lado, a análise atenta do revestimento antigo mostra frequentemente que a degradação é superficial e que é possível evitar a sua substituição recorrendo a ações de preservação.

A opção sobre a estratégia de intervenção a adotar em revestimentos antigos deve basear-se em critérios científicos e histórico-estéticos, tendo em conta o seu valor, o seu estado de conservação real e a disponibilidade de meios, entre outros fatores. Assim, por razões históricas mas principalmente por razões técnicas, é muito mais razoável respeitar o funcionamento da parede: manter os revestimentos antigos, reparando-os, se possível; ou, se for necessário recorrer à substituição, usar revestimentos com características idênticas aos

antigos, compatíveis com os materiais pré-existentes e capazes de garantir um funcionamento conjunto semelhante ao que perdurou ao longo de séculos.

A reparação dos revestimentos de cal exige um domínio das técnicas da cal e uma mão-de-obra especializada, com recurso, muitas vezes, a conservadores e restauradores (AGUIAR, 1999) (TAVARES et. al, 2003).

O custo deste tipo de trabalho, minucioso e lento, de consolidação de revestimentos (recolagem, colmatação de fissuras, reintegração de lacunas, restituição da coesão) nem sempre é mais elevado que a extração de todo o revestimento antigo, às vezes difícil devido a uma dureza inesperada de cal transformada pelo tempo em rocha calcária, e execução de novo revestimento. Mas tem, naturalmente, que ser objeto de especificações detalhadas de caderno de encargos, para que o empreiteiro saiba a que tipo de trabalho está a concorrer, que materiais orçamentar e que equipas contratar. Quando a reparação não é viável, por mau estado de conservação generalizado do revestimento antigo, é necessário substituí-lo, se possível por outro idêntico e de durabilidade semelhante (VEIGA, 2006).

## **2.2. Revestimentos de paredes**

Os revestimentos de ligante mineral, conhecidos geralmente por rebocos, constituem a solução de revestimento mais usada em Portugal, devido essencialmente ao seu baixo custo inicial e à baixa complexidade construtiva necessária à sua aplicação (GASPAR e BRITO, 2003). Dos revestimentos com reboco, o reboco tradicional, doseado e preparado em obra de acordo com tecnologias tradicionais, tem sido a solução adotada na maioria das construções em Portugal, em especial nos edifícios de habitação, constituindo cerca de 62% do total de revestimentos exteriores existentes (GONÇALVES et al., 2007). Apesar disso, hoje em dia é cada vez mais comum o recurso a produtos não-tradicionais que, pela disponibilidade e rapidez de aplicação, se adaptam mais facilmente ao ritmo de construção que atualmente se pratica.

### **2.2.1. Revestimentos antigos**

Nas paredes antigas rebocadas os revestimentos eram geralmente constituídos pelas seguintes camadas principais: camadas de regularização, camadas de proteção, acabamento e decoração e pintura/ornamentação. As camadas de regularização e proteção eram constituídas por argamassas de cal e areia, eventualmente com adições minerais e aditivos orgânicos.

Normalmente, as camadas internas tinham granulometria mais grosseira que as externas e a deformabilidade e porosidade iam aumentando das internas para as externas, promovendo assim um bom comportamento às deformações estruturais e à água. Cada uma das camadas principais referidas podia, por sua vez, ser constituída por várias subcamadas. Com efeito, para a mesma espessura total, camadas finas em maior número permitiam uma melhor capacidade de proteção e uma durabilidade superior (VEIGA, 2000).

Os barramentos ou guarnecimentos (GONÇALVES, 1996) eram constituídos por massas finas de pasta de cal, ou de pasta de cal com pó de pedra, também geralmente aplicadas em várias subcamadas, com finura crescente das interiores para as mais exteriores. Estas camadas são muito importantes para a proteção do reboco, verificando-se que, quando se destacam, se assiste a uma degradação rápida do reboco subjacente.

A coloração das superfícies era conferida pela incorporação de agregados com cor selecionada, de terras ou de pigmentos minerais na última camada de barramento, ou por camadas posteriores de pintura, geralmente de cal, aditivada com pigmentos e outras adições minerais. Estes revestimentos, cuidadosamente executados tinham grande resistência e durabilidade (AGUIAR e VEIGA, 2003).

### **2.2.2. Estado de conservação dos revestimentos antigos**

O estado de conservação dos revestimentos existentes pode ser caracterizado pelos tipos de anomalias que revelam e pelo grau com que se manifestam (MAGALHÃES, 2002).

Com efeito, enquanto um revestimento fendilhado, mesmo que em grau elevado, pode ser reparado com alguma facilidade, recorrendo a técnicas bastante conhecidas, o mesmo não se passa quando há deficiência de aderência ao suporte ou de coesão entre as partículas, cuja preservação exige o emprego de técnicas mais caras e complexas.

Assim, surge o conceito de severidade da anomalia, que está relacionado, não só com o grau, mais ou menos elevado, da degradação provocada, mas também com a sua possibilidade de reparação (AGUIAR e VEIGA, 2003).

A tabela 1 estabelece uma classificação do estado de conservação do revestimento, relacionado com o tipo de intervenção mínimo, ou seja, respeitante à máxima preservação. Da leitura e análise da tabela 1 interessa destacar, neste âmbito, a perda de aderência. Deste modo, distinguem-se três graus de degradação do revestimento: elevado, médio e reduzido,

correspondendo cada um deles a uma estratégia de intervenção mínima, ou seja aquela que faculta a máxima preservação.

Tabela 1 – Classificação do estado de conservação do revestimento, segundo (AGUIAR e VEIGA, 2003).

Tipo de Anomalia	Grau de degradação	Intervenção mínima*	Classificação
<i>Fendilhação</i>	Elevado	Reparação localizada	Severidade 3
	Médio	Reparação localizada superficial	Severidade 2
	Reduzido	Manutenção	Severidade 1
<i>Eflorescências e Criptoflorescências</i>	Elevado	Substituição parcial	Severidade 4
	Médio	Reparação localizada	Severidade 3
	Reduzido	Reparação localizada superficial	Severidade 2
<i>Biodeterioração</i>	Elevado	Reparação localizada	Severidade 3
	Médio	Reparação localizada superficial	Severidade 2
	Reduzido	Manutenção com tratamento biocida	Severidade 1
<b><i>Perda de aderência</i></b>	<b>Elevado</b>	<b>Substituição parcial</b>	<b>Severidade 5</b>
	<b>Médio</b>	<b>Preenchimento de lacunas</b>	<b>Severidade 4</b>
	<b>Reduzido</b>	<b>Consolidação (recolagem ao suporte ou entre camadas)</b>	<b>Severidade 3</b>
<i>Perda de coesão ou desagregação</i>	Elevado	Substituição parcial	Severidade 5
	Médio	Substituição parcial	Severidade 4
	Reduzido	Consolidação	Severidade 3
<i>Erosão</i>	Elevado	Reparação localizada	Severidade 2
	Médio	Manutenção	Severidade 1
	Reduzido	Manutenção	Severidade 1

\*Após tratamento das causas

Dando enfoque à falta de aderência, alvo de estudo no presente trabalho, para um elevado grau de degradação do revestimento indica-se a substituição parcial; para um grau de degradação médio, sugere-se o preenchimento de lacunas e quando o grau de degradação é reduzido propõe-se como estratégia de intervenção a consolidação (através da recolagem ao suporte, ou entre camadas, consoante a necessidade).

A tabela 2 apresenta, ainda, os critérios gerais de decisão sobre o tipo de intervenção a realizar, de acordo com a classificação anterior e com o valor do edifício em causa.

Importa salientar que a interpretação, bem como a quantificação dos parâmetros em presença nestas tabelas não são estanques e exigem, como regra de bom senso, a análise atenta e ponderação adequada do técnico responsável. Para a falta de aderência, objecto de estudo do presente trabalho, encontram-se referenciados os graus de severidade 3,4 e 5, as respectivas opções de intervenção, forma de seleção de materiais, ou demais exigências a respeitar, sempre em função do valor do edifício sobre o qual se pretende intervir.

Tabela 2 – Critérios gerais de decisão sobre o tipo de intervenção (AGUIAR e VEIGA, 2003).

Estado de conservação	Valor do edifício	Opção de intervenção	Seleção de materiais	Seleção de técnicas	Outras exigências
<i>Severidade 1</i>	Elevado	Conservação e Manutenção	Compatíveis e Idênticos	Tradicionais e/ou Especializadas	Reversibilidade; Aspecto idêntico
	Reduzido	Conservação e Manutenção	Compatíveis	Regras de boa arte	Reparabilidade; Aspecto compatível
<i>Severidade 2</i>	Elevado	Consolidação e/ou Reparação localizada	Compatíveis e Idênticos	Tradicionais e/ou Especializadas	Reversibilidade; Aspecto idêntico
	Reduzido	Reparação localizada e/ou Substituição parcial	Compatíveis	Regras de boa arte	Reparabilidade; Aspecto compatível
<i>Severidade 3</i>	Elevado	Consolidação e/ou Reparação localizada	Compatíveis e Idênticos	Tradicionais e/ou Especializadas	Reversibilidade; Aspecto idêntico
	Reduzido	Substituição parcial	Compatíveis	Regras de boa arte	Reparabilidade; Aspecto compatível
<i>Severidade 4</i>	Elevado	Preenchimento de lacunas ou Substituição parcial	Compatíveis e Idênticos	Tradicionais e/ou Especializadas	Reversibilidade; Aspecto idêntico
	Reduzido	Substituição parcial ou integral	Compatíveis	Regras de boa arte	Reparabilidade; Aspecto compatível
<i>Severidade 5</i>	Elevado	Substituição parcial	Compatíveis e Idênticos	Tradicionais e/ou Especializadas	Reversibilidade; Aspecto idêntico
	Reduzido	Substituição integral	Compatíveis	Regras de boa arte	Reparabilidade; Aspecto compatível

### 2.2.3. Definição de estratégias de intervenção em revestimentos antigos

Muitas vezes, no âmbito de determinado processo de reparação de um revestimento, pensa-se de imediato na substituição do mesmo por um semelhante, ou seja, remove-se o revestimento antigo, perdendo irreversivelmente um testemunho valioso e irrepetível da sua estética e tecnologia. Esta substituição é, frequentemente, feita de forma irrefletida e inconsequente, desprezando quaisquer registos relativos à sua imagem ou mesmo à sua composição. Pensa-se dela resultar um revestimento novo, atual, mais homogêneo, mais impermeável, com maior resistência mecânica, portanto supostamente mais perfeito e mais durável. No entanto, a maioria das vezes, acaba por revelar-se anónimo e plastificado, por envelhecer precocemente e de forma drástica e, ironicamente, por acelerar a degradação do conjunto.

A primeira opção deve ser a conservação do revestimento antigo através de operações de manutenção e de reparação pontual (AGUIAR e VEIGA, 2003). Se tal for inviável, pode ser apropriada uma consolidação do revestimento existente ou pode ainda recorrer-se à substituição parcial em alguns paramentos, com recurso a revestimentos semelhantes aos antigos. Depois de devidamente analisadas e excluídas estas possibilidades, encara-se então a

possibilidade de remover e substituir o revestimento na sua totalidade. Caracterizam-se de seguida, sucintamente, quatro grandes opções possíveis de intervenção:

**Manutenção:** para prolongar a vida útil dos revestimentos é importante programar operações de manutenção periódicas, nomeadamente através de operações de limpeza e de tratamento (por exemplo com biocidas), da correção das situações que podem dar origem a infiltrações de água, que são causa de muitas outras anomalias e da reparação atempada das camadas de acabamento (barramentos e pinturas) que têm uma ação muito importante na proteção das camadas subjacentes. A colmatação de fendas superficiais pode também enquadrar-se em operações de manutenção.

**Reparações localizadas:** quando a severidade das anomalias o justifica devem fazer-se reparações localizadas nas zonas mais afectadas, por exemplo através do tratamento de fendas, da eliminação de sais ou do preenchimento de lacunas, com utilização de materiais semelhantes aos pré-existentes (AGUIAR, 1999).

**Consolidação:** há muito a fazer para adaptar esta técnica aos rebocos e torná-la viável, devido às grandes superfícies envolvidas e à heterogeneidade e friabilidade do material. No nosso país apenas recentemente se tentaram algumas experiências de preservação dos revestimentos existentes, em vez da sua substituição, tendo-se recorrido a reparações localizadas, aplicação de novas camadas de acabamento, entre outras. No entanto, quando as anomalias existentes consistem em perda de aderência ou de coesão, as soluções de maior preservação implicam o uso de consolidantes, sob a forma de pastas injetáveis (*grouts*), que promovam a recolagem entre camadas ou entre estas e o suporte (AGUIAR, 2000). Naturalmente, apenas se justifica recorrer à consolidação de rebocos quando o edifício, ou o revestimento é de valor elevado, quer por razões históricas ou artísticas, quer devido à raridade da técnica ou do material (AGUIAR e VEIGA, 2003).

**Substituição parcial e substituição total:** quando as anomalias existentes são de severidade elevada, pode ser necessário substituir parte do reboco ou a sua totalidade. Por vezes, basta substituir a última camada, mais fendilhada ou contaminada por micro-organismos, ou uma determinada zona do reboco. Nestes casos, é de primordial importância que os materiais de substituição sejam adequados, sob pena de se correr o risco de acelerar a degradação (VEIGA, 2001).

Segundo (AGUIAR e VEIGA, 2003) é necessário ter critérios bem definidos para decidir quando se justifica fazer opções mais dispendiosas e complexas, que devem basear-se, fundamentalmente, nos seguintes factores: valor do edifício em geral e do revestimento em

particular; estado de conservação do revestimento; disponibilidade de meios tecnológicos, mão-de-obra, tempo e verbas.

## **2.3. Argamassas de revestimento tradicionais**

### **2.3.1. Evolução histórica**

O reboco tradicional, tal como hoje é conhecido, foi desenvolvido pelos Romanos, que herdaram a técnica dos Etruscos (NERO, 2001b). As argamassas eram inicialmente em terra crua e argilosa, misturada com matérias vegetais. Este material era facilmente degradado pelos agentes atmosféricos, sendo necessário substituí-lo periodicamente (BOTELHO, 2003). Mais tarde, a invenção do fogo permitiu a descoberta dos efeitos do calor nos calcários e gessos, evidenciando, as suas características aglutinantes, em contacto com a água (PINTO et al., 2006).

Este facto permitiu a utilização, com funções de revestimento e de proteção das alvenarias e adobes, de argamassas formadas essencialmente por cal aérea, areia e água. As argamassas em causa foram sendo aperfeiçoadas ao longo dos tempos com a adição de outros produtos, tais como pozolanas, cinzas e aditivos orgânicos (por exemplo: sangue de animais, gorduras e leite para melhorar a trabalhabilidade ou óxidos para obter a coloração desejada) (GASPAR, 2002).

A partir do século XIX, com os estudos de Vicat e Feret, entre outros, paralelamente às conquistas tecnológicas da revolução industrial, as argamassas de reboco sofreram uma grande evolução. O surgimento da cal hidráulica, e posteriormente do cimento, levou à progressiva substituição da cal aérea, de tal modo que hoje em dia é mais difícil encontrar quem tenha conhecimentos suficientes para a utilizar (PINTO et al., 2006).

Nas últimas décadas, sempre que a opção de revestimento recaía sobre o reboco, tornou-se regra a utilização de argamassas de cimento. Contudo, devido à maior importância que hoje se dá à preservação da cultura e do património, a cal aérea e hidráulica têm sido objeto de estudo e a sua utilização tem sido novamente incentivada, nomeadamente na recuperação de edifícios antigos. As argamassas de revestimento são argamassas de ligante mineral, constituídas por uma mistura de vários materiais. Para compreendê-las melhor, é essencial conhecer as características dos materiais que as integram. Pretende-se apenas, aprofundar os aspetos que condicionam o seu comportamento.

## 2.3.2. Constituição

### 2.3.2.1. *Ligantes*

Os ligantes são substâncias que têm propriedades aglutinantes, conferindo coesão, ou seja, ligação entre as partículas que constituem a argamassa, permitindo também a ligação desta ao suporte. Para além da coesão, os ligantes devem, ainda, garantir que os rebocos apresentem estabilidade, quando em contacto com o meio ambiente em que se inserem.

Os ligantes utilizados mais frequentemente, no património edificado, apresentam-se sob a forma de pó fino, e têm capacidade de originar uma pasta quando misturados com água e desenvolver endurecimento. A pasta ganha presa e endurece através de reações de hidratação e/ou carbonatação (PAULO,2006).

Os ligantes podem ter várias origens, nomeadamente orgânica, mineral e sintética. Os ligantes de origem mineral podem ser classificados em dois grupos: aéreos e hidráulicos (CAVACO, 2005) e obtém-se a partir de pedras naturais (CAVACO, 2005). Reduz-se essa pedra a pó e fornece-se energia sob a forma de calor, para desequilíbrio das ligações químicas dos seus constituintes, resultando num produto que tende facilmente a combinar-se com elementos naturais, gerando produtos com composição química análoga às pedras que lhe deram origem (NERO, 2001a). Os principais tipos de ligantes inorgânicos encontram-se referenciados na tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos ligantes inorgânicos (NERO,2001a).

Tipos de ligantes	Exemplos
Aéreos	Cal aérea
Hidráulicos	Gesso
	Cal hidráulica (fracamente, medianamente, propriamente e eminentemente hidráulica)
	Cimentos tipo I, II, III, IV
	Escórias de alto-forno
<i>Materiais com comportamento ligante</i>	Terras argilosas
	Pozolanas naturais
	Cinzas volantes

Destacam-se, neste trabalho, os ligantes aéreos já que servirão de base à constituição das argamassas desenvolvidas.

Um ligante classifica-se como aéreo se, após ter atingido certo grau de endurecimento, o perder, total ou parcialmente, quando em contacto permanente com a água. Por oposição, um ligante será hidráulico quando, após ter atingido um determinado estágio de endurecimento, não o perde em contacto permanente com a água (NERO, 2001c).

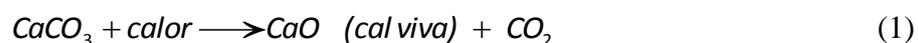
Os ligantes hidráulicos, nomeadamente a cal hidráulica e o cimento, são ligantes com compostos mais estáveis e de presa mais rápida do que a cal aérea pelo que rapidamente tenderam a substituí-la, generalizando-se a utilização de argamassas de reboco à base de cimento. No entanto, apesar de estas serem argamassas mais resistentes e mais compactas, são também mais rígidas, detentoras de uma retração elevada (logo mais suscetíveis à fendilhação) e possuidoras de sais prejudiciais para as alvenarias antigas. Estas razões tornam estas argamassas, muitas vezes, desadequadas ao suporte onde são aplicadas, devido às diferentes características dos materiais envolvidos.

### ***Cal aérea:***

A matéria-prima da cal aérea é o calcário puro, com mais de 95% de carbonato de cálcio ou carbonato de cálcio e magnésio. Consoante a sua composição, a cal pode ser cálcica ou magnésiana, sendo designada por cal magnésiana quando o teor em óxido de magnésio na matéria-prima for superior a 20% (BOTELHO, 2003).

Relativamente à cal cálcica, esta classifica-se em cal gorda e cal magra. A primeira obtém-se do calcário com um teor de carbonato de cálcio superior a 99%. Na cal magra, este teor, situa-se entre os 95% e os 99%, tendo menor resistência e brancura. Estes dois tipos de cal diferenciam-se também quanto à alteração do seu volume no processo de extinção, onde a cal gorda manifesta maior incremento de volume do que a cal magra (CAVACO, 2005). O processo de obtenção da cal aérea subdivide-se nas seguintes fases:

Calcinação: o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) da rocha decompõe-se em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), comumente conhecido por cal viva, e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), a uma temperatura da ordem de  $900^\circ\text{C}$  (FARIA, 2004). Esta reação traduz-se pela equação (1).



Refere-se ainda que, se em vez de rochas calcárias a matéria-prima for constituída por rochas dolomíticas, o processo de decomposição é semelhante, mas ocorre a temperatura inferior, dado que quanto menos pura for a rocha em decomposição, menor é a temperatura da reação (FARIA, 2004).

Hidratação: a hidratação do óxido de cálcio origina uma reação muito expansiva e exotérmica e dá origem ao hidróxido de cálcio (cal apagada ou cal hidratada,  $\text{Ca(OH)}_2$ ), que é utilizado como ligante (BOTELHO, 2003). As características desta reação obrigam à necessidade de manusear a cal viva com bastante cuidado e inviabiliza a possibilidade da sua utilização tal

qual como ligante (PINTO et al., 2006). A equação (2) traduz a reação de hidratação do óxido de cálcio.



No processo de extinção da cal, o aumento de volume da cal pode chegar até três a quatro vezes o volume inicial de óxido de cálcio. Esta reação será, tanto mais difícil de se desenvolver, quanto mais elevada for a temperatura da calcinação, e o produto final resultante pode apresenta-se sob a forma de pó seco ou em pasta, dependendo da quantidade de água envolvida na reação (FARIA, 2004), (BOTELHO 2003), (PINTO et al., 2006).

Carbonatação: durante o processo de endurecimento da cal apagada ocorre a reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono da atmosfera (carbonatação), a evaporação de água em excesso, a libertação de calor e a formação de carbonato de cálcio. O fenómeno de carbonatação pode ser traduzido pela equação (3).



Esta reação desenvolve-se durante vários meses do exterior para o interior da argamassa. Deste modo, para o adequado desenvolvimento do fenómeno de carbonatação, é necessário que o material seja suficientemente poroso para permitir a evaporação da água e a penetração do dióxido de carbono do ar para o seu interior (PINTO et al., 2006).

Resumindo, a cal aérea é constituída por óxidos ou hidróxidos de cálcio que, quando misturada com água, endurece lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono atmosférico. Salienta-se que a velocidade das reações e o processo de endurecimento são bastante influenciados pelas condições atmosféricas em que ocorrem.

Não obstante, atualmente, as argamassas constituídas exclusivamente por cal aérea são pouco usadas, justificando-se a sua utilização principalmente em situações de reabilitação do património. Constituem soluções compatíveis com as alvenarias antigas, não só em termos de resistência, mas também de deformabilidade, em virtude da boa interação entre os materiais e as soluções construtivas. Estas argamassas apresentam geralmente uma absorção capilar elevada mas, em contrapartida, têm uma elevada permeabilidade ao vapor de água, que facilita a evaporação de água que eventualmente se encontre no interior dos paramentos (CAVACO, 2005).

As argamassas de cal aérea apresentam um endurecimento lento, dificuldade de presa em ambientes húmidos e com fraca presença de CO<sub>2</sub>, uma vez que o seu endurecimento e desenvolvimento de resistência mecânica ocorrem através da carbonatação (BOTELHO 2003), (PINTO et. al., 2006). São bastante suscetíveis às condições do meio onde se inserem, podendo no entanto, se corretamente prescritas e executadas, atingir excelentes comportamentos. Este tipo de argamassas possui também baixa resistência à flexão, compressão e desgaste, razão pela qual têm vindo a ser substituídas nas construções recentes por argamassas mais “fortes”.

### **2.3.2.2. Agregados**

Os agregados usados na execução de rebocos tradicionais são geralmente areias naturais, extraídas de leitos de rios ou de areeiros (ANUNCIADA, 2004). Estas areias constituem-se como micro-agregados, à semelhança do que acontece com os agregados no betão (NERO, 2001a). Os agregados funcionam como “o esqueleto” da argamassa, e embora não sejam coesivos, contribuem para sua a compacidade e resistência, bem como para a retração das mesmas. A forma dos grãos e a sua curva granulométrica influenciam o aspeto, a porosidade e a trabalhabilidade da argamassa. Uma areia bem graduada com menor volume de vazios é adequada. As areias com maior volume de vazios afetam a estrutura porosa da argamassa e exigem, naturalmente traços mais ricos em ligante (MARGALHA et al., 2007).

Para além da granulometria, há ainda que ter em atenção a eventual presença de argilas ou sais. A percentagem de argila deverá estar abaixo de 5%, uma vez que teores superiores poderão conduzir a maiores retrações (ANUNCIADA, 2004). Quanto aos sais, a sua presença poderá acelerar a deterioração do revestimento, como é o caso dos sulfatos. Desta forma é de evitar a presença de agregados com sais ou matéria orgânica na formulação das argamassas.

A utilização de agregados com granulometria adequada contribui para o incremento da resistência mecânica e durabilidade das argamassas, bem como a possibilidade de obter soluções mais económicas dado que permite o recurso a menor dosagem de ligante. Note-se, que, para que esta contribuição seja eficaz, os agregados não devem conter sais ou matéria orgânica (CAVACO, 2005). Os agregados podem ser classificados de diversas formas, nomeadamente tendo em atenção a origem, a dimensão das partículas e a sua massa volúmica. Deste modo, os agregados podem ser naturais ou artificiais, grossos ou finos, leves ou de elevada massa volúmica (FARIA, 2004).

### **2.3.2.3. Areias**

As areias, são agregados de origem natural, compostos por partículas finas e granuladas. Em termos químicos, podem ser siliciosas (geralmente provenientes de rio ou de areeiro), ou calcárias (normalmente oriundas da britagem do material extraído de pedreiras). As areias grossas reduzem a tendência para a fendilhação, e as mais finas reduzem a porosidade e a absorção de água das argamassas (RATO, 2006). A granulometria das areias deve ser contínua e bem equilibrada, isto é, deve ser constituída por grãos de várias dimensões, mas sem excesso de grãos muito finos ou muito grossos, de modo a conferir uma melhor compactidade e trabalhabilidade às argamassas (FARIA, 2004), (RATO, 2006).

A seleção da granulometria das areias, a utilizar na formulação de argamassas, deve ser definida em função do tipo de acabamento pretendido. Para um acabamento mais rugoso devem utilizar-se areias de granulometria mais grossa, ao passo que para acabamentos lisos é exigida a utilização de areias finas (CAVACO, 2005). Quer a granulometria, quer a forma das partículas, deverão ser adequadas ao fim previsto para a argamassa. A porosidade das argamassas encontra-se assim influenciada por estas características, uma vez que, quanto mais equilibrada for a granulometria e mais angulosas as partículas, menor é a percentagem de vazios e conseqüentemente menor será também o teor em água e a dosagem de ligante necessário. Desta forma, minora-se igualmente a retração.

Segundo (RATO, 2006), em teoria, impedir-se-ia a retração, caso fosse possível maximizar a compactidade através da utilização de areias com granulometrias que permitissem que os espaços vazios deixados pelas partículas de areia fossem preenchidos com as partículas de cal. Para além de serem isentas de sais e de matéria orgânica, as areias devem também, ser inalteráveis ao ar, à água ou na presença de outros agentes externos e ainda estabelecer uma boa ligação e compatibilidade com o ligante e com os outros constituintes da argamassa, de modo a incrementar o desempenho da mistura (FARIA, 2004). No caso particular das argamassas de cal aérea sabe-se que, apesar das areias não reagirem diretamente com a cal, contribuem para o seu endurecimento e facilitam o processo de carbonatação (FARIA, 2004).

### **2.3.2.4. Água**

A água é um elemento fundamental no fabrico de argamassas, pois permite a formação da pasta e, no caso dos ligantes hidráulicos, também a hidratação do ligante. A quantidade de água utilizada na produção das argamassas condiciona a sua consistência, o processo de

endurecimento, a aderência ao suporte, as características no estado endurecido e a qualidade final dos revestimentos (CAVACO, 2005), (BOTELHO 2003).

Deve-se evitar especialmente o uso de água do mar pois esta possui um teor em sais bastante elevado. Também as águas minerais, mesmo as potáveis, devem ser evitadas porque têm maior dificuldade em atingir a saturação, retardando assim o processo de presa (CAVACO, 2005), (BOTELHO 2003). De uma forma geral, a água utilizada não deverá conter quaisquer contaminações suscetíveis de afetar a presa, o endurecimento e a durabilidade do revestimento, pelo que a utilização de água potável das redes de abastecimento público é geralmente adequada. Outro fator a considerar, é a temperatura da água, já que influi no tempo de endurecimento. De acordo com (ROJAS, 2002) se a temperatura da água for superior a 30°C o processo de endurecimento é acelerado, já para temperaturas inferiores a 7°C o processo é retardado.

Sendo um elemento bastante determinante das características das argamassas, é necessário estimar corretamente a quantidade de água a utilizar na amassadura. Esta condiciona significativamente o processo de aplicação e a qualidade final. Importa esclarecer que a quantidade de água não é imediata dependendo de vários fatores, nomeadamente: do tipo de ligante, do traço da mistura, entre outros. Um dos métodos para adequar esta quantidade refere-se ao controlo da consistência da mistura mantendo o traço constante, ou seja, a quantidade de água adicionada está diretamente relacionada com a consistência, dando origem a uma argamassa com maior ou menor fluidez. Deve-se, assim, utilizar o volume mínimo de água de amassadura necessário para garantir a consistência necessária para que a argamassa possa ser devidamente aplicada (CAVACO, 2005).

### **2.3.2.5. *Adjuvantes***

A utilização de adjuvantes é tão antiga como a do próprio cimento, ou mesmo dos ligantes hidráulicos. Também os romanos adicionavam elementos como o leite, o sangue, a banha, a clara de ovo ou o açúcar às argamassas, a fim de melhorar a sua trabalhabilidade. De facto, os adjuvantes são produtos orgânicos ou inorgânicos que podem ser adicionados aos componentes normais das argamassas, em pequena quantidade (geralmente entre 0,3 a 5% massa do ligante ou da massa dos constituintes secos), durante a amassadura, com o objetivo de modificar propriedades intrínsecas destes materiais. Estas alterações podem ocorrer quer no estado fluído, quer no estado sólido, ou ainda, na passagem de um estado para outro. Um mesmo produto pode, assim, desempenhar simultaneamente diversas funções.

Entre os adjuvantes aplicáveis a argamassas de reboco, destacam-se os promotores de aderência (melhoram a aderência, diminuindo a retração e a suscetibilidade à fendilhação), os hidrófugos de massa (melhoram a capacidade de impermeabilização pois obturam os capilares, impedindo a penetração e circulação de água no revestimento), os introdutores de ar (melhoram a capacidade de impermeabilização, a resistência ao gelo-degelo e aos sais pois as bolhas de ar introduzidas promovem um corte de capilaridade), os plastificantes (aumentam a trabalhabilidade da argamassa, permitindo a diminuição da quantidade de água de amassadura e, eventualmente, de ligante), os retentores de água (limitam o risco de uma dessecação prematura da argamassa, contribuindo para uma hidratação mais completa) e os fungicidas (impedem a fixação de micro-organismos nas argamassas) (MARTINS, 2008).

Deste modo, pode classificar-se os adjuvantes dependendo dos parâmetros sobre os quais atuam (COUTINHO, 1998):

- Reologia das argamassas e dos betões frescos;
- Teor em água das argamassas e betões;
- Presa e endurecimento;
- Resistência a ações químicas;
- Resistência a ações biológicas;
- Cor;
- Expansão;
- Resistência a ações físicas.

Com a adição de um determinado adjuvante, na formulação das argamassas ou dos betões, pretende-se sobretudo (COUTINHO, 1998):

- Melhorar a trabalhabilidade;
- Acelerar o endurecimento nas primeiras idades;
- Aumentar as tensões de rotura pelo menos nos primeiros meses;
- Aumentar a resistência aos ciclos gelo/degelo;
- Criar uma ligeira expansão nas argamassas ou nos betões;
- Produzir argamassas ou betões coloridos;
- Produzir propriedades fungicidas, germicidas e inseticidas;
- Acelerar a presa;
- Retardar a presa;
- Diminuir a permeabilidade aos líquidos;
- Impedir a sedimentação e a segregação do cimento nas caldas de injeção;
- Aumentar a aderência ao inerte e às argamassas e betões endurecidos;
- Produzir argamassa leve, celular;
- Inibir a corrosão das armaduras;
- Ajudar a bombagem de betões pobres.

***Plastificantes ou agentes redutores de água de amassadura:***

Os plastificantes, ou seja, os agentes redutores de água de amassadura, pertencem a uma categoria de substâncias tensoativas. Estas substâncias permitem, através das suas propriedades físico-químicas, alterar a tensão superficial do solvente, ou seja, neste caso, a água. As moléculas que caracterizam este tipo de substâncias apresentam forma alongada e detêm uma parte hidrófoba e outra hidrófila (CARDOSO, 2009).

A extremidade hidrófila é formada por grupos hidrocarboxílicos, por sais destes ácidos como os carboxilatos de sódio, cálcio ou outros, por grupos do ácido sulfónico, ou por sais destes ácidos tais como os sulfonatos de sódio. A outra extremidade, hidrófoba, pode ser constituída por uma cadeia alcalina simples, mais ou menos ramificada, podendo conter núcleos benzénicos, linhossulfónicos, naftalénicos, ou outros. Esta extremidade, quando em contacto com a água, ioniza-se fazendo baixar a tensão superficial da superfície onde a molécula tensoativa está adsorvida (COUTINHO, 1997).

Quando se procede à mistura de uma argamassa apenas com água, as partículas do material floculam e aglomeram-se devido às tensões capilares geradas pela presença da água e do ar arrastado pelos componentes da argamassa (figura 1).

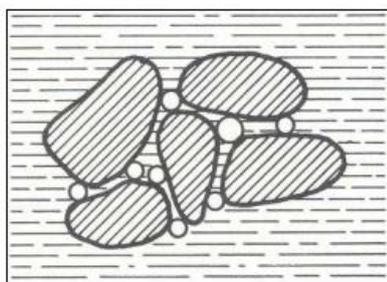


Figura 1 – Argamassa sem plastificante: partículas de argamassa floculadas, aglomeradas pelas tensões capilares devidas à presença de ar e água, adaptado de (CARDOSO, 2009).

Deste modo, na ausência de um agente plastificante, as partículas não ficam todas dispersas no líquido, floculando em associações de grãos com diversas dimensões, que aderem entre si através dos mecanismos da água, provocados pelo ar retido entre os grãos, resultando numa boa coesão capilar.

Ora, as partículas da argamassa, ao entrarem em contacto com a água, na qual se dissolveu ou dispersou um plastificante, são, mais eficazmente molhadas pelo líquido, devido à adsorção da parte hidrófoba da molécula de dispersante, de forma que a parte hidrófila, ionizada confere às partículas uma carga elétrica do mesmo sinal, criando um potencial e uma repulsão

electroestática. Como é perceptível na figura 2, este potencial orienta, por sua vez, os dipolos que constituem as moléculas de água, em torno das partículas, formando uma camada de moléculas de líquido que impede a aproximação entre as partículas e favorece a expulsão do ar presente (PAIVA, 2005).

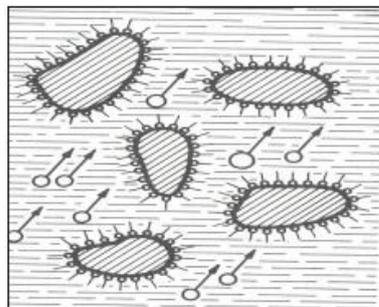


Figura 2 – Argamassa com plastificante: partículas de argamassa dispersas, pois ao adicionar-se o plastificante à água, este é adsorvido pela superfície das partículas da argamassa, expulsando o ar. Adaptado de (PAIVA, 2005).

Por conseguinte, a dispersão e a estabilidade dos grãos de material é obtida pela conjugação de três fatores:

- Redução da tensão intersuperficial;
- Aumento do potencial electrocinético e,
- Formação de uma camada protetora e aderente de moléculas de água.

Ressalva-se, ainda, que segundo (COUTINHO, 1998), a camada de ar em redor das partículas diminui o atrito entre as mesmas, resultando num melhoramento do fluxo do material, ou possibilitando a redução da própria água, sem alterar a trabalhabilidade do material. Daqui, advém a designação deste tipo de adjuvantes (redutores de água de amassadura). A adição dos plastificantes, gera no entanto, alguns efeitos secundários, entre os quais se destaca: o retardamento da presa e uma redução das resistências iniciais.

### ***Superplastificantes:***

Os superplastificantes, permitem aumentar a fluidez e a trabalhabilidade das argamassas, em maior escala do que os plastificantes, sendo por isso mais poderosos neste domínio. O mecanismo da sua atuação é idêntico ao dos plastificantes, mas é mais intenso, embora muito menos durável (COUTINHO, 1998).

O aumento das dosagens de plastificante no seio da argamassa, não é desejável, uma vez que, pode promover dificuldades nas reações de carbonatação da cal, comprometendo o endurecimento do material. Deste facto, decorre o uso de superplastificantes, que permitem ultrapassar esta limitação. Estes materiais podem ser usados com dosagens inferiores,

permitindo uma redução significativa da proporção de água, sem colocar em causa a trabalhabilidade. (PAIVA, 2005) Não obstante, os superplastificantes, apresentam igualmente alguns inconvenientes, de entre os quais se destaca: o facto de se tratar de materiais sintéticos de elevado custo; uma duração de apenas 30 minutos como fluidificante, necessitando de ser novamente adicionado após esse período.

### ***Espessantes ou agentes retentores de água:***

Nas argamassas é comum a utilização de agentes retentores de água. O valor da retenção de água de uma argamassa, é o teor de água que permanece na argamassa após desidratação capilar pelo substrato absorvente onde é aplicada, ou pelas condições atmosféricas (DIN 18555, 1987). Os agentes retentores de água são necessários para a retenção da água até à reação da presa, sendo responsáveis pelos elevados valores de retenção de água das argamassas recentes. São também conhecidos como agentes espessantes, pois aumentam a viscosidade e a coesão dos materiais. Este aumento é fundamental em sistemas fluídos para reduzir a segregação de materiais constituintes e melhorar a homogeneidade, a resistência mecânica e outras propriedades do produto endurecido (PAIVA, 2005).

### ***Agentes adesivos:***

Os agentes adesivos, são polímeros, que adicionados aos *grouts* lhes atribuem boa adesão, elevada resistência à compressão e reduzida viscosidade. Embora sejam usados em caldas de cal com fins estruturais, apresentam algumas limitações, como sejam: baixa permeabilidade à água e baixa expansão térmica (TAVARES et al., 2009). O acril 33 é exemplo de um agente adesivo, cuja respetiva base é um co-polímero ácido acrílico.

#### **2.3.2.6. Aditivos**

Os aditivos são materiais orgânicos finamente moídos, que são adicionados com o objetivo de obter ou melhorar propriedades físicas das argamassas. Como exemplo refere-se: as fibras (visam aumentar a resistência à tração e a ductilidade do revestimento, melhorando a resistência à fendilhação), as cargas leves (diminuem o módulo de elasticidade, permitindo uma maior capacidade de deformação) e as pozolanas (melhoram o comportamento aos sulfatos e às reações sílica-agregados) (VEIGA, 1997) (ANUNCIADA, 2004). O presente

estudo baseia-se essencialmente no uso de dois aditivos distintos: filler calcário e pozolanas (metacaulino e diatomite).

### ***Filler calcário:***

A utilização de agregados provenientes da britagem de rochas, na produção de argamassas, tem sido cada vez mais frequente, na medida em que as jazidas de areia natural ou se esgotam ou sofrem restrição para proteção ambiental (SILVA, 2005).

Segundo (CARASEK, 1999) os materiais finos, como os provenientes de materiais inertes, como por exemplo o pó calcário, têm devido à sua elevada superfície específica um papel plastificante sobre as argamassas. À medida que aumentam os finos inertes nas argamassas ganha-se em trabalhabilidade e perde-se pelo aumento da pulverulência e da fissuração dos revestimentos. É de extrema importância definir um valor ótimo para a introdução destes materiais nas argamassas. Ora, há medida que aumenta o teor de pó calcário no seio de uma argamassa e conseqüentemente o seu teor de finos, obtém-se uma redução na água unitária necessária para a obtenção da trabalhabilidade adequada. O aumento do teor de finos, proporciona também maior incidência de fissuras, embora haja redução da água unitária, devido à retração decorrente da granulometria do pó calcário. A areia contribui como estrutura para evitar a retração da argamassa, e quando se procede à sua substituição por um material mais fino facilita-se a fissuração, já que quanto menor é o diâmetro dos agregados, maior será a retração.

### ***Pozolanas:***

As pozolanas são produtos naturais ou artificiais utilizados desde a época Romana, constituídos essencialmente por, sílica e alumina, que apesar de não apresentarem por si só propriedades aglomerantes e hidráulicas, contêm constituintes que às temperaturas ordinárias se combinam, em presença de água, com o hidróxido de cálcio da cal aérea, formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. São substâncias dotadas de grande reatividade com o hidróxido de cálcio, mas insolúveis e inertes na água (COUTINHO, 1998).

De acordo com (ALMEIDA et al., 2007), distinguem-se desta forma, dois tipos de pozolanas: as naturais (materiais de origem vulcânica e rochas sedimentares com composição química apropriada) e as artificiais (caulinos ou outras argilas de qualquer tipo, depois de terem sido sujeitas a temperaturas suficientes para a sua desidratação). Existem ainda, alguns subprodutos industriais, provenientes das centrais termoelétricas com carvão mineral.

As principais pozolanas, resultantes do processamento térmico, podem obter-se a partir de: rochas siliciosas, como a diatomite (resultante da fossilização e constituída sobretudo por sílica hidratada, muito reativa com a cal, depois de sujeita a uma temperatura entre os 500 e os 900 °C); ou de rochas argilosas (silico-aluminosas), fundamentalmente as do grupo da montmorilonite, da ilite e da caulite). Exemplo destas últimas são, os caulinos, que através da cozedura, dão origem aos metacaulinos (FARIA, 2004). O metacaulino resulta, então, da cozedura do caulino a cerca de 750 a 800 °C.

O uso de pozolanas nas argamassas foi retomado a partir do Renascimento Europeu, após um decréscimo com a queda do Império Romano. Portugal apresenta registos da utilização de argamassas com adição de pozolanas, no final do século XIX, principalmente em obras ribeirinhas, devido às suas características particulares de endurecimento debaixo de água (VELOSA, 2002). As pozolanas eram adicionadas para combater algumas debilidades apresentadas pelas argamassas de cal, tais como a falta de durabilidade e a dificuldade de endurecimento em ambientes húmidos. As argamassas cujo único ligante é a cal endurecem por reação do hidróxido de cálcio, com o dióxido de carbono presente na atmosfera, formando carbonato de cálcio e água; enquanto os compostos siliciosos presentes nos materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio, na presença de água, formando silicatos e aluminatos. A existência destas reações paralelas permite o endurecimento ao ar e em contacto com a água, fazendo face à necessidade de aplicação de argamassas em ambientes húmidos ou molhados. Os silicatos e os aluminatos são responsáveis pelo aumento da durabilidade das argamassas (VELOSA, 2002).

#### **2.4. Características das argamassas de substituição para edifícios antigos**

Os revestimentos exteriores constituem a “pele” dos edifícios, assegurando a proteção contra os agentes de degradação de natureza física, mecânica, química e biológica (MAGALHÃES, 2002). Para que cumpram a sua função, os revestimentos devem assegurar a impermeabilização e proteção das paredes, acabamento dos paramentos e durabilidade face às ações externas e adequabilidade de uso (VEIGA, 2005). Assim, na reabilitação de edifícios antigos as argamassas de substituição aplicadas em rebocos assumem um papel de extrema importância, visto estes serem elementos sujeitos a intervenções frequentes. De um modo geral, as argamassas de substituição não devem contribuir para a degradação dos elementos pré-existentes, nem para a descaracterização do edifício, devendo apresentar propriedades adequadas para garantir durabilidade e máxima adequabilidade.

O cumprimento de tais funções expressa-se pela imposição de exigências funcionais ao revestimento, que traduzem o desempenho desejado, tanto ao nível do material como do seu comportamento conjunto com o suporte. A tabela 4 apresenta o conjunto de requisitos mínimos exigidos às argamassas de substituição para edifícios antigos.

Tabela 4 – Requisitos estabelecidos para as argamassas de substituição – características mecânicas e não mecânicas, adaptado de (VEIGA, 2002).

Argamassa	Características mecânicas aos 90 dias (MPa)			Aderência ao suporte (MPa)	Comportamento à água	
	Resistência à tração	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade	Resistência ao arrancamento	Permeabilidade ao vapor de água	Coefficiente de capilaridade
	$R_t$	$R_c$	$E$	$R_a$	(m)	( $kg/m^2 \cdot h^{0,5}$ )
<i>Reboco exterior</i>	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	2000 - 5000	0,1 - 0,3 ou com rotura coesiva pelo reboco	< 0,08	< 12; > 8
<i>Reboco interior</i>	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	2000 - 5000	0,1 - 0,3 ou com rotura coesiva pelo reboco	< 0,10	-
<i>Juntas</i>	0,4 - 0,8	0,6 - 3,0	3000 - 6000	0,1 - 0,5 ou com rotura coesiva pela argamassa	< 0,10	< 12; > 8

Embora existam normas e documentos, portugueses e estrangeiros, que definem métodos de ensaios para avaliar algumas características, são menos frequentes os documentos que estabelecem valores limites aceitáveis (VEIGA, 2001). Assim, se para algumas das características de desempenho anteriormente referidas existem os requisitos correspondentes, que permitem uma avaliação quantitativa, a maioria das características é ainda avaliada de forma qualitativa (FLORES-COLEN, 2009).

No decorrer do presente trabalho, nomeadamente no capítulo correspondente à apresentação e discussão de resultados, alguns destes valores serão confrontados com os obtidos nas diversas formulações concebidas, especificamente no que se refere às resistências mecânicas de flexão, compressão, aderência ao suporte e comportamento face à água.

Para que o revestimento tenha um desempenho adequado, deve ser relativamente deformável, apresentar características de permeabilidade compatíveis com o suporte e ter um bom comportamento face à presença de sais solúveis. Salienta-se que estas características devem ser cumpridas pelo revestimento no seu todo e não apenas por uma só camada de argamassa que é normalmente objeto de caracterização. A aplicação de camadas mais finas e em maior número conduzem normalmente a soluções de maior durabilidade. Assim, tanto o número de

camadas, como a sua espessura e composição, revelam ser tão importantes como a sua formulação e técnica de aplicação (VEIGA e CARVALHO, 1994).

Por estes fatores, revela-se ser bastante importante a conceção de argamassas cujo comportamento se aproxime o mais possível das antigas, para que as parcelas de reboco em bom estado se relacionem bem com o novo material a ser integrado no conjunto. Esta compatibilidade a nível de comportamento mecânico, revela melhor desempenho quando o módulo de elasticidade da argamassa de revestimento é mais baixo do que o do suporte e semelhante ao da argamassa original. Deste modo, garantem-se as condições de deformabilidade e minimizam-se as tensões internas (BOTELHO, 2003).

O comportamento do reboco desde a sua aplicação, até ao endurecimento, condiciona, desde logo, o seu comportamento futuro. Neste contexto, interessa avaliar características como a retenção de água, a retração ou o teor de ar incorporado. A avaliação destas características é feita através de ensaios de laboratório, que muitas vezes não traduzem as reais condições *in situ*. O comportamento em serviço da fachada rebocada depende não só do comportamento do reboco, mas também da influência dos restantes elementos. Esta influência faz-se sentir essencialmente pela compatibilidade mecânica, geométrica e química entre o reboco e o suporte. Mas é, sem dúvida, o comportamento do próprio reboco que mais influencia o desempenho da fachada rebocada. Já em termos de comportamento do material, importa definir características tendo em conta as ações a que este está sujeito.

Assim, podem distinguir-se duas ações principais que afetam o desempenho do reboco: as ações mecânicas e a ação da água. Em termos de ações mecânicas, é importante caracterizar a aderência, a capacidade de deformação e as resistências à compressão, flexão, ao impacto ou à fendilhação. Em relação ao comportamento face à água, são relevantes características como a permeabilidade à água líquida e capilaridade (FLORES-COLEN, 2009).

### **2.4.1. Comportamento mecânico dos rebocos**

De seguida atenta-se sobre as características gerais anteriormente citadas, e expõe-se aquelas que são mais relevantes para o comportamento mecânico: aderência, resistência mecânica interna, resistência superficial e capacidade de deformação.

Uma boa aderência ao suporte é fundamental para o cumprimento das funções de impermeabilização e proteção das paredes, sendo por isso condicionante para a durabilidade das construções. Além disso, influencia bastante a resistência à fendilhação, na medida em

que condiciona a distribuição de tensões na argamassa (VEIGA, 1997) (GASPAR et al., 2007).

Nos rebocos tradicionais não adjuvados, a aderência processa-se por penetração dos elementos finos da argamassa nos poros do suporte, constituindo-se assim um sistema de ancoragem mecânica (GOMES, 1995a). Deste modo, a aderência é influenciada pela argamassa e pelo suporte. Quanto mais rica em ligante e finos for a argamassa, maior será a sua aderência. Porém, tal dosagem conduz a uma maior fendilhação por retração, que só por si poderá causar falta de aderência (CARASEK, 1997). Pretende-se pois encontrar um equilíbrio entre estes dois fatores. É possível adicionar adjuvantes que funcionam como promotores de aderência.

Uma vez que a aderência depende da penetração da argamassa no suporte, parece natural que a porosidade e sucção capilar deste, exerça também influência. Assim, a aderência será melhor em suportes absorventes, pois permitem melhor ligação mecânica (VEIGA, 1997). Porém, uma capacidade de absorção exagerada tenderá a dessecar rapidamente o revestimento, impedindo a hidratação dos seus constituintes e favorecendo a formação de uma interface pulverulenta, como se pode constatar na figura 3. Esta eventualidade pode ser evitada com a humedificação prévia do suporte, sem que no entanto esta seja excessiva para não evitar que se estabeleça a aderência mecânica (VEIGA, 1997).

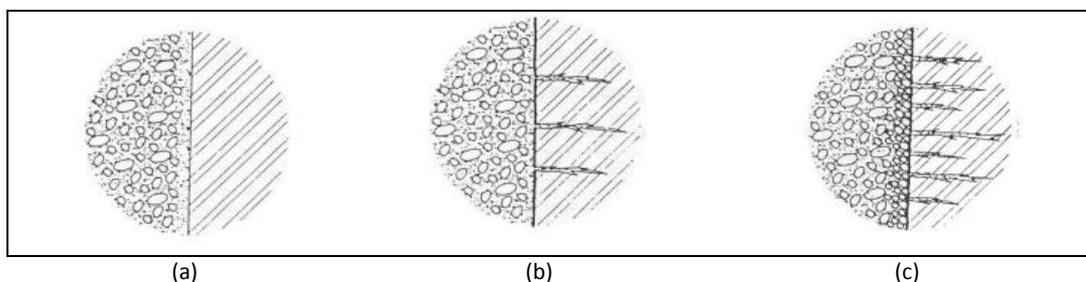


Figura 3 – Aderência mecânica do reboco consoante sucção do suporte: a) Falta de aderência pela baixa absorção do suporte; b) Aderência adequada devido à ligação mecânica conferida por uma absorção adequada; c) Dessecação da argamassa devido a uma absorção excessiva. (VEIGA, 1997).

Ainda em relação ao suporte, (MIRANDA, 2004) refere que as texturas rugosas conferem melhor aderência, pelo facto de aumentarem a área de contacto do reboco ao mesmo. A compatibilidade com o suporte, em termos de resistência e módulo de elasticidade, é também importante, para evitar que se gerem tensões na interface que prejudiquem a aderência.

Por último, também a cura do revestimento deve ser cuidada, de modo a evitar que se gerem tensões prejudiciais por retração (SCARTEZINI e CARASEK, 2003).

Um método expedito de se avaliar a aderência consiste em sondar por percussão a superfície, sendo que as zonas não aderentes soam a oco (GOMES, 1995a). No entanto, esta técnica é apenas qualitativa. Geralmente avalia-se a aderência através de ensaios de arrancamento por tração, também designados de *pull-off* e que se ilustram na figura 4.

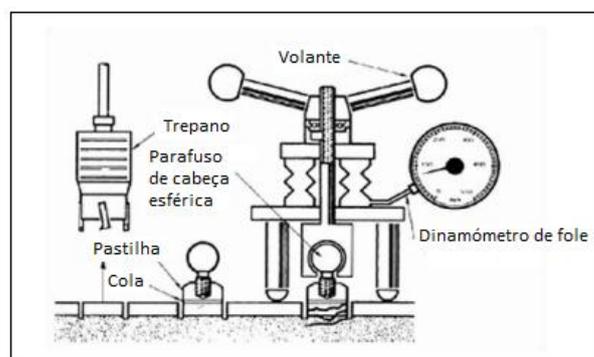


Figura 4 – Representação esquemática do equipamento utilizado no ensaio *pull-off* (LNEC, 1986).

Esta técnica tem o inconveniente de ser localmente destrutiva mas permite quantificar a tensão de aderência e avaliar depois o tipo de rotura. A rotura pode ser coesiva (pela argamassa ou pelo suporte, por falta de “coesão interna”) ou adesiva (pela interface entre ambos, por falta de “adesão”).

A resistência mecânica interna do reboco diz respeito à sua propriedade de possuir um estado de endurecimento interno capaz de suportar os esforços mecânicos e as tensões que lhe estão associadas (GOMES, 1995a). Ora, os rebocos estão sujeitos a inúmeras ações, tendo de resistir aos esforços e tensões que daí provêm. Assim, devem possuir características resistentes adequadas, para evitar a sua rápida degradação.

A resistência da argamassa é função tanto da intensidade das tensões que nela são introduzidas, como das características resistentes da própria argamassa. Em princípio, a argamassa será tanto mais resistente quanto maior for a dosagem de ligante. Porém, o excesso de ligante produzirá uma elevada retração, levando à fendilhação da argamassa. A resistência à fendilhação é, de resto, uma das propriedades mais importantes das argamassas de reboco, pois como foi dito, influi diretamente no seu desempenho. Para que a argamassa seja resistente à fendilhação, deve ter elevada resistência à tração e um módulo de elasticidade baixo, resistindo assim melhor às tensões instaladas (BOTELHO, 2003), (VEIGA, 1997).

A resistência mecânica do reboco está também diretamente relacionada com a sua compacidade. Quanto maior for a compacidade da argamassa que o constitui, maior será a sua resistência aos esforços e tensões a que está sujeito. A compacidade depende do teor de ar

incorporado. Como refere (CARNEIRO e CINCOTTO, 1995) quanto menor for o teor de ar incorporado mais compacta será a argamassa, pelo que maiores serão também a massa volúmica aparente, a resistência mecânica interna e o módulo de elasticidade. Por esta razão, a resistência mecânica pode ser estimada tendo em conta a massa volúmica e o módulo de elasticidade.

A resistência mecânica interna da argamassa de reboco é, geralmente, determinada em laboratório, utilizando provetes moldados previamente, ou através de amostras recolhidas *in situ*. São normalmente caracterizadas as resistências à compressão e à tração por flexão, por serem aquelas que mais influência têm, no comportamento do reboco.

A resistência superficial do reboco está relacionada com a sua capacidade de resistir, sem deterioração significativa, às ações de choque e de atrito inerentes à ocupação e circulação normais. A deficiente resistência superficial do reboco acelera o processo de degradação, conduzindo a uma descida significativa do nível de desempenho e ao não cumprimento das funções que lhe são atribuídas (FLORES-COLEN, 2006). A resistência superficial será tanto maior quanto mais coeso for o reboco. Em princípio, os revestimentos de argamassas tradicionais possuem resistência ao choque suficiente, para poder suportar ações decorrentes do uso normal (BOTELHO, 2003). Apenas quando os revestimentos são aplicados em camadas muito finas, como alguns revestimentos monocamada, ou sobre suportes muito deformáveis, há razões para questionar a sua resistência superficial.

A capacidade de deformação é a aptidão da argamassa de reboco para se deformar sem que ocorra rotura (GODOY e BARROS, 1999). Os revestimentos devem apresentar uma boa capacidade de deformação, para que se deformem sem ocorrência de fissuras ou microfissuras que comprometam a aderência, a estanqueidade e a durabilidade dos revestimentos. Esta capacidade de deformação do revestimento endurecido é caracterizada pelo módulo de deformação ou de elasticidade, o qual será tanto maior quanto mais rígido for o revestimento (CARNEIRO e CINCOTTO, 1995). No entanto, (GODOY and BARROS, 1999) referem que a avaliação da capacidade de deformação não se deve fazer apenas recorrendo ao módulo de elasticidade, uma vez que este só dá informação sobre a relação entre a tensão e deformação, não dando nenhuma indicação sobre a possível deformação na rotura. (VEIGA, 1997) manifesta a mesma opinião.

O módulo de elasticidade pode ser definido como a relação entre a tensão existente e a deformação produzida por essa tensão. Um módulo de elasticidade baixo significa que, para um dado valor de tensão, a argamassa apresenta um valor de deformação alto. A determinação

do módulo de elasticidade pode ser efetuada através de ensaios estáticos e dinâmicos, dependendo da velocidade de aplicação das solicitações e da forma de medir a resposta.

## 2.5. Agentes de degradação / principais anomalias dos rebocos antigos

Os rebocos de edifícios antigos apresentam, frequentemente, diversas formas de degradação que podem advir de origens distintas. Referem-se como principais agentes propulsores da degradação: o envelhecimento dos próprios materiais, a incompatibilidade dos mesmos, bem como, a presença de água e de sais solúveis.

A atuação desses agentes, normalmente de forma conjunta, resulta na evolução da degradação e na deterioração do desempenho, de tal modo que pode levar a uma rotura funcional e/ou física dos mesmos. Ilustra-se na figura 5, a atuação dos agentes de deterioração mais comuns numa fachada rebocada, descrevendo-se a forma de atuação dos mais relevantes.

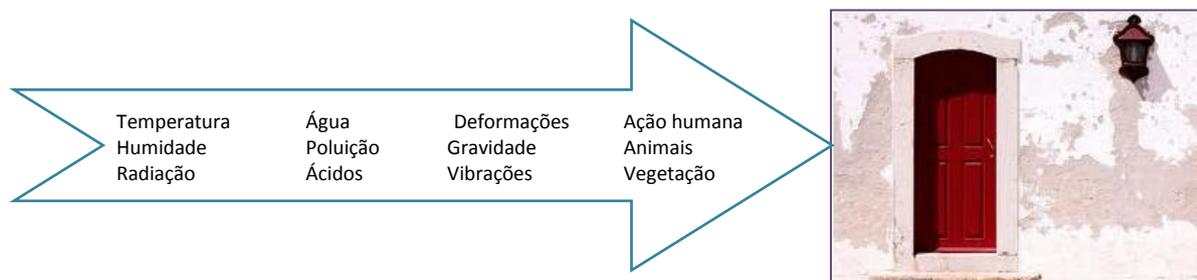


Figura 5 – Representação esquemática da atuação dos agentes promotores de degradação, mais comuns, numa fachada rebocada.

**Radiação solar** : está inevitavelmente ligada à exposição dos revestimentos exteriores. A sua absorção pelo revestimento aumenta a temperatura superficial em grande escala e resulta, muitas vezes na degradação superficial (perda de cor ou degradação da pintura) ou na perda de características do próprio revestimento, como o enfraquecimento e perda de elasticidade, diminuindo tanto a resistência mecânica como a resistência à penetração da água (GASPAR, 2002).

**Temperatura**: dependente da radiação solar, causa degradação dos revestimentos devido aos valores extremos que atinge e às suas variações bruscas (choque térmico). Tais variações originam contrações e dilatações diferenciadas nos diversos materiais, e mesmo entre as camadas do reboco, provocando tensões que levam à fendilhação e perda de aderência. Para além de ser um agente de degradação direto, a temperatura desempenha também um papel fundamental na atuação de outros agentes, ao influenciar o teor de humidade, a evolução das reações químicas ou o desenvolvimento de agentes biológicos (GASPAR, 2002).

**Água:** considerada aqui como fator químico apesar de poder ter ação física e mecânica, é o principal agente de degradação dos revestimentos (SOUSA et al., 2005) e da construção em geral. A sua presença está, normalmente associada à existência de humidade, e é tida como normal até certos níveis. Essa humidade pode ter diversas origens, sendo as mais comuns representadas na tabela 5.

Tabela 5 – Fontes de humidade mais comuns nos edifícios antigos, adaptado de (MAGALHÃES, 2002).

<b>Tipo de Humidade</b>	<b>Causas mais prováveis</b>
<i>De obra ou de construção</i>	Tem origem na água utilizada na execução do revestimento ou do suporte.
<i>De terreno</i>	Existência de zonas de parede em contacto com a água do solo;
	Existência de materiais de elevada capacidade de absorção de água por capilaridade nas paredes;
	Inexistência ou deficiente posicionamento de barreiras estanques nas paredes.
<i>De precipitação</i>	Revestimentos com elevada permeabilidade à água.
<i>De condensação</i>	Ocorrência de condensações geralmente quando a temperatura superficial das paredes, em contacto com o ar húmido, atinge o ponto de orvalho.
<i>Devida a higroscopicidade</i>	Existência de sais higroscópicos no interior dos revestimentos que fixam a água em grandes quantidades, constituindo uma espécie de depósito de água, permitindo a dissolução de mais sais, resultando num fenómeno em cadeia.
<i>Devida a causas fortuitas</i>	Humidade com origens acidentais, tais como: roturas de canalizações em redes de água e esgotos;
	Entupimento de caleiras, algerozes, tubos de queda;
	Corrosão de canalizações metálicas;
	Deficiência de remates da cobertura;
	Entre outras.

A entrada de água na fachada, seja por gravidade, capilaridade ou por pressão da chuva e do vento potencia o surgimento e desenvolvimento de diversas anomalias, uma vez que altera o comportamento físico, químico e mecânico do revestimento. O aparecimento de eflorescências, o desenvolvimento de colonização biológica, a fissuração pelo gelo/degelo ou a lixiviação e deposição de sujidade devido à circulação de água são exemplos de anomalias criadas pela presença de água no revestimento. A acumulação de água pode ser evitada, através da escolha de materiais e pormenores construtivos adequados, reduzindo assim a exposição a este agente agressivo (GASPAR e BRITO, 2003).

**Vento:** a ação do vento nas construções faz-se sentir através da ação combinada com a chuva, potenciando a entrada de água no revestimento, ou através da erosão devida às partículas que arrasta consigo, provocando o desgaste do reboco, tornando-o mais rugoso e menos resistente. Para além disso, o vento atua também como meio de transporte de sais e agentes poluentes, que se depositam e deterioram o reboco (FLORES-COLEN, 2009).

**Agentes químicos:** provenientes do ar, como sais, ácidos e agentes poluentes, tendem a combinar-se com a humidade, formando soluções que se depositam e atacam o reboco. As principais fontes destes agentes são os sais marinhos e os poluentes resultantes da atividade do Homem, pelo que esta ação é mais visível em zonas particularmente industrializadas e poluídas.

**Agentes biológicos:** os rebocos constituem também um meio propício à fixação de diversos agentes de natureza biológica (bactérias, fungos, vegetação parasita). Estes provêm do solo, do ar ou da água e fixam-se no reboco se estiverem reunidas as condições de humidade, temperatura, luz e nutrientes necessárias (FLORES-COLEN, 2009).

**Ação humana:** influencia o desempenho dos rebocos desde o início, através da escolha, da mistura e aplicação dos materiais. Os rebocos, pela sua função de proteção das alvenarias, funcionam muitas vezes como camada de sacrifício, sendo afetados por ações de choque e atrito, inerentes à ocupação normal ou mesmo a ações de vandalismo. A ausência de manutenção, deficientes intervenções ou a poluição atmosférica, são exemplos a referir.

## 2.6. Aderência

A literatura específica define aderência, como o termo genérico usado para descrever tanto a resistência mecânica, como a extensão do espalhamento ou contato entre a argamassa de substituição no estado endurecido e o substrato poroso. É a propriedade, responsável pelas restrições às deformações, sendo o mecanismo que permite a transferência de tensões na interface, fazendo com que o conjunto apresente deformações homogêneas e compatíveis.

A aderência é, desta forma, muito importante no âmbito de qualquer intervenção sobre um revestimento pois a deficiência desta propriedade compromete toda a eficácia da intervenção, tornando os elementos vulneráveis à permeabilidade, o que facilita o acesso dos agentes de degradação à estrutura. Se a aderência entre o material pré-existente, e o material de substituição for estabelecida de forma eficaz, este torna-se parte integrante do conjunto.

A aderência da argamassa aos elementos da alvenaria antiga (normalmente tijolo ou blocos de pedra) é bastante importante, quer no domínio estrutural, quer no que se refere à durabilidade. (FARIA, 2004). Traduz, então, a resistência às tensões normais e tangenciais que atuam na interface revestimento/suporte. É essencialmente mecânica, ou seja, ocorre pela ancoragem da argamassa nas reentrâncias e saliências macroscópicas da superfície, e principalmente pela ancoragem microscópica da pasta aglomerante (água e partículas finas dos ligantes) nos

interstícios da base, que ao cristalizar no seu interior assegura a colagem. A figura 6 ilustra este fenómeno e refere-se a suportes com coeficientes de absorção distintos.

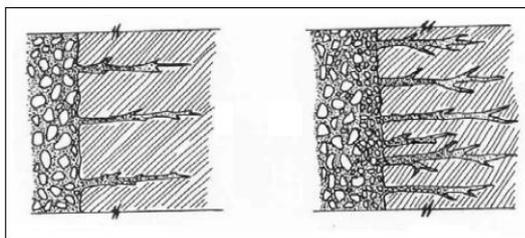


Figura 6 – Aderência de argamassas de revestimento a suportes com distintos coeficientes de absorção, adaptado de (FARIA, 1993).

O revestimento deve ser aderente ao suporte de modo a não se descolar quando sujeito a trações e compressões geradas por variações diferenciais entre si e o suporte; choques ou pressões de vapor; bem como, não conduzir a concentrações de tensões em pontos localizados.

Diversos estudos comprovam que a aderência depende diretamente da trabalhabilidade da argamassa e da técnica de execução, bem como, da natureza do substrato e limpeza do mesmo. Deve, então, garantir-se que este se encontra isento de poeiras, fungos, eflorescências, ou outros fatores que minorem a aderência. Ela será tanto mais forte, quanto maior for a adequabilidade da argamassa ao substrato sobre o qual é aplicada. Pode ainda referir-se como fator determinante neste domínio, as condições atmosféricas que ocorrem durante a aplicação e secagem da argamassa.

De seguida, na tabela 6, descrevem-se as causas que promovem o aparecimento de fissuração e fendas nos rebocos, e que em casos mais extremos, podem levar a situações de perda de aderência.

Tabela 6 – Fatores que resultam no aparecimento de fendas e fissuras nos rebocos, adaptado de (MAGALHÃES, 2002).

<b>Causas promotoras de fissuras e fendas que podem resultar em perda de aderência dos rebocos</b>	
1.	Retração do reboco quando o suporte em que é aplicado tem uma rigidez superior;
2.	Dilatações e contrações higrotérmicas, associadas à falta de continuidade construtiva entre o reboco e o suporte onde está aplicado;
3.	Variações de volume resultantes da água absorvida no interior dos poros do reboco;
4.	Deficiente dosagem de ligante usada na formulação das argamassas;
5.	Espessura inadequada do revestimento;
6.	Deslocamentos do suporte, frequentemente provocados por assentamentos diferenciais das fundações ou de outros elementos estruturais;
7.	Ciclos de cristalização / dissolução de sais contidos no suporte que, através da percolação da água, podem ser transportados para o revestimento e provocam fendilhação do mesmo;
8.	Absorção excessiva do suporte que pode consumir grande parte da água de amassadura.

**Perda de aderência:** pode manifestar-se quer através do descolamento entre o reboco e o suporte, quer por abaulamento, ou ainda destacamento da camada de reboco. As causas imediatas deste tipo de anomalia, encontram-se referenciadas sumariamente na tabela 7.

Tabela 7 – Causas da perda de aderência dos rebocos, adaptado de (GASPAR et al., 2007) (MAGALHÃES, 2002).

<b>Causas da perda de aderência</b>	
<i>Decorrentes do descolamento ou da retração da argamassa</i>	Presença de humidade prolongada na parede.
	Presença de sais infiltrados na zona de interface.
	Dilatações e contrações térmicas que geram variações dimensionais do reboco.
	Movimentos diferenciais entre o suporte e o revestimento.
	Erros de execução do revestimento.
	Deficiente aderência da argamassa ao suporte devido a uma má cura na fase de aplicação, conduzindo a: dessecação do suporte e criação de uma superfície pulverulenta entre a argamassa e a base de assentamento; chapisco com hidratação excessiva ou deficiente; excesso de água na amassadura.
	Deficiente preparação do suporte: falta de rugosidade ou de limpeza (por vezes decorra da aplicação de um revestimento sobre outro existente).
	Elevada impermeabilidade à água, do suporte.
	Insuficiente permeabilidade ao vapor de água do revestimento.
	Espessura excessiva do reboco.
<i>Decorrentes do destacamento ou abaulamento da argamassa</i>	Aplicação de rebocos demasiado rígidos, sobre suportes não homogéneos ou constituídos por camadas com menor capacidade de aderência entre si e que são arrancadas à própria parede.
	Dosagem inapropriada do traço da argamassa (pouco ligante), sobretudo quando associada à sua aplicação em tempo seco.
	Deformações do suporte, especialmente devidas ao aumento do volume de elementos metálicos, por corrosão dos mesmos.
	Ocorrência de tensões de corte na argamassa, ou na interface entre esta e o suporte.
	Combinação das causas anteriores que conduza ao agravamento das situações de deslocamento e de deformação da argamassa.

A perda de aderência representa o final de vida útil do reboco, pois: deixa de cumprir a função de proteção do suporte, que fica sujeito à ação direta dos agentes atmosféricos; existe perigo decorrente da queda de partes da argamassa suscetíveis de colocar em causa a segurança dos utentes; ocorre também, degradação da qualidade visual e do aspeto estético não só da fachada, mas do meio onde se integra o edifício.

De acordo com (MAGALHÃES, 2002), o deslocamento caracteriza-se pelo afastamento do reboco face ao suporte subjacente, e é possível identifica-lo através do som cavo emitido quando percutido, sendo nestes casos, a tensão superficial da argamassa que a mantém a coesão. Se para além do afastamento do reboco, se constata o aparecimento de convexidades, identifica-se essa anomalia como abaulamento do reboco. O destacamento acontecerá pela separação definitiva do reboco do seu suporte, e representa-se pela respetiva ausência deste na fachada. Segundo (GASPAR et al., 2007) o efeito da gravidade e as deformações do material originam fraturas na argamassa, por incapacidade de funcionamento aos esforços de flexão e

torção que ocorrem na camada rígida do revestimento, particularmente nos casos da ocorrência de abaulamentos no reboco. Como consequência, dá-se a queda do reboco, sob a forma de placas rígidas de geometria irregular. Contrariamente ao que sucede no caso de manchas ou fissuras, constata-se que os destacamentos raramente ocorrem de forma isolada, resultando de estados patológicos, normalmente complexos (figura 7 a). Estas causas podem dar origem à perda de coesão do reboco (figura 7 b) e consequente desagregação (MAGALHÃES, 2002).



Figura 7 – (a) Destacamento do reboco na fachada de um edifício antigo; (b) Perda de coesão da argamassa de reboco.

FORNE: (GUERRA e ASSUNÇÃO, 2010)

**Perda de coesão:** consiste na desunião dos componentes do reboco seguida por uma considerável perda das partículas que o compõe, convertendo-o num material frágil e susceptível à degradação (MAGALHÃES, 2002). A perda de coesão, é por isso, predominante em argamassas antigas, sobretudo após o destacamento da camada superficial do reboco (mais endurecida) e que, ao desaparecer, deixa expostas ao ambiente as camadas interiores do reboco. A perda de coesão manifesta-se comumente através dos seguintes fenómenos: pulverização (a argamassa desagrega-se e esfarela, conduzindo ao desprendimento do material sob a forma de pó ou grânulos); arenização (perda, ou lavagem das partículas finas da argamassa); erosão (perda localizada da massa de superfície do material, pela ação dos agentes atmosféricos, podendo originar escavação na argamassa) (GASPAR et al., 2007).

Tabela 8 – Causas que promovem a perda de coesão dos rebocos, adaptado de (GASPAR et al., 2007)

Causas da perda de coesão	
1.	Humidade seguida da cristalização de sais.
2.	Reboco fraco sem dureza superficial.
3.	Ação dos micro-organismos e organismos.
4.	Reação química entre os materiais que constituem os revestimentos e os compostos naturais ou artificiais (poluição) contidos na atmosfera.
5.	Esforços mecânicos de natureza diversa (atritos, golpes, entre outros).

Os materiais encontrados em edifícios antigos são extremamente porosos e favorecem a penetração e permanência da água e dos sais solúveis no interior das paredes, sendo a cristalização desses sais um dos principais fatores contributivos para a ocorrência de destacamentos. Embora os processos de deterioração deste tipo sejam complexos, as anomalias associadas a este fenómeno correspondem a eflorescências e criptoflorescências. Estas são caracterizadas pela formação de cristais de sais, respetivamente no exterior e interior do revestimento. É, essencialmente, a presença prolongada de humidade, a existência de sais solúveis nos materiais constituintes do reboco, ou do suporte e a cristalização/dissolução de cal não carbonatada existente nos revestimentos ou suporte, que agindo simultaneamente levam à formação destes depósitos (MAGALHÃES, 2002).

Apesar de existirem diversas anomalias e agentes de degradação, os supramencionados têm-se como os mais relevantes para o tema da perda de aderência dos rebocos antigos. A perda de aderência, ou seja a separação das várias camadas de reboco, ou entre o reboco e a estrutura de suporte, é uma das principais formas de degradação dos revestimentos, justificando-se assim a necessidade de efetuar um estudo mais aprofundado acerca do tema, no presente trabalho.

### **2.6.1. Consolidação de revestimentos com perda de aderência**

Embora os compostos sintéticos se apresentem mais fáceis de aplicar, mais flexíveis e com melhor aderência, não podem ser considerados satisfatórios na consolidação de revestimentos históricos com base em cal, já que revelam falta de compatibilidade com o substrato. Deste modo, os consolidantes inorgânicos são preferíveis, dado a sua compatibilidade e durabilidade. Visando uma consolidação eficiente é premente considerar algumas propriedades dos produtos escolhidos, tais como: a capacidade de penetração, a dimensão das partículas, a capacidade consolidante e a compatibilidade. Um consolidante deve primeiramente apresentar fluidez, baixa viscosidade, por forma a assegurar uma distribuição capilar homogénea no material. Refere-se também a importância de manter uma adequada permeabilidade entre as camadas consolidadas e a parte mais interna, evitando assim tensões internas, muitas vezes, responsáveis por destacamentos (BORSOI et al., 2012).

No presente estudo, desenvolver-se-ão caldas de consolidação com recurso a dois materiais pozolânicos distintos, nomeadamente o metacaulino e a diatomite, que apresentam

características pozolânicas podendo assim, facultar um aumento da resistência mecânica das superfícies tratadas.

### **2.6.2. Grouts ou caldas de injeção**

Uma calda de injeção, também designada por *grout*, é uma argamassa com características específicas para o preenchimento, homogeneização, consolidação e melhoria das propriedades mecânicas de um revestimento que apresente descontinuidades, cavidades, vazios ou fendas decorrentes de perda de aderência ou falta de coesão dos materiais. Ao longo dos últimos anos, têm sido realizados estudos acerca do desenvolvimento de composições mais eficazes, integrando aditivos e adjuvantes na formulação das argamassas base.

Pressupõe-se o respeito pelas técnicas construtivas tradicionais, onde haja uma intervenção mínima, utilizando materiais compatíveis com os originais. Deste modo, para restituir a aderência perdida recorre-se à técnica de consolidação através de *grout*. A argamassa de *grout* é injetada no vazio decorrente das anomalias referidas e deve ser mecânica, física e quimicamente compatível com o revestimento original, pois é um tratamento praticamente irreversível, já que engloba trabalhos que não poderão ser removidos ou substituídos (TAVARES et al., 2007).

### **2.6.3. Técnicas de injeção**

A injeção de determinada calda de cal, com propriedades fluidas, em orifícios ou vazios existentes nas paredes, pretende preencher cavidades, sejam elas fissuras, fendas ou vazios interiores. De facto, a técnica de injeção de *grout*, torna-se bastante mais eficiente se os elementos no qual é aplicada apresentarem porosidade aberta, ou seja, uma rede comunicante entre os diversos vazios.

O procedimento de injeção deve ser adequado, caso se trate de uma estrutura mais vulnerável sob o ponto de vista mecânico. Nestas situações é de todo o interesse, que a injeção das caldas seja realizada a uma altura inferior a 1m/dia, evitando a ocorrência de pressões hidrostáticas excessivas das caldas, que poderão danificar gravemente a estrutura.

A técnica de injeção de *grout* baseia-se num procedimento manual, recorrendo ao uso de seringas, que podem eventualmente ser adaptadas com um tubo em látex, caso se deseje um processo de gotejamento adequado a situações em que é requerida pouca pressão. A injeção deve ser efetuada por gravidade, e sempre que possível, é aconselhada a sua realização

relativamente a ambas as faces da parede, no sentido vertical e com inclinação mínima (TAVARES et al., 2009). É aconselhável utilizar (APPLETON, 2003):

- misturas de injeção com desenvolvimento das resistências mecânicas lento e gradual e que após o endurecimento completo possuam módulos de elasticidade baixos;
- misturas de injeção compatíveis com os materiais constituintes da estrutura de alvenaria sem desenvolvimento de reações de cristalização expansivas ou outras formas de rejeição;
- misturas de injeção com elevada capacidade de penetração através de fissuras ou poros de dimensões reduzidas de forma a garantir um reequilíbrio estrutural bem distribuído.

A graduação da pressão de injeção é definida em função (APPLETON, 2003):

- dos resultados de ensaios prévios que permitam caracterizar a resistência e a permeabilidade da alvenaria;
- das tentativas durante a execução, começando por pressões muito baixas, avaliando os resultados obtidos (ou seja, a efetiva capacidade de colmatação de vazios) e corrigindo iterativamente.

#### **2.6.4. Exigências básicas de um *grout***

Quando se pretende proceder a uma intervenção deste tipo, é inquestionável a necessidade de realizar previamente um estudo acerca do estado em que se encontra a estrutura afetada, bem como das dimensões e geometria das cavidades e fissuras existentes, identificação e caracterização dos materiais existentes (granulometria e demais características físicas e químicas). Só assim, será possível assegurar que a intervenção realizada será eficaz e adequada à individualidade de cada caso.

As propriedades mais relevantes quando se procede à caracterização de uma calda de cal constam da tabela 9, e devem sempre ser asseguradas ao serem executados trabalhos de consolidação.

Tabela 9 – Exigências básicas para uma argamassa de *grout*, adaptado de (TAVARES et al., 2007).

Propriedades	Exigências
<i>Consistência</i>	Suficientemente fluida para injetar
<i>Tempo de presa</i>	Não menos do que 48 horas
<i>Módulo de elasticidade</i>	Menor do que o do substrato (< 80%)
<i>Resistência à compressão</i>	Menor do que a do substrato (< 60%)
<i>Contração e dilatação da argamassa na secagem</i>	O mínimo possível (< 4%)
<i>Coefficiente de dilatação térmica</i>	Similar ao original
<i>Permeabilidade ao vapor de água</i>	Preferencialmente alta
<i>Coefficiente de capilaridade</i>	Valor do coeficiente de capilaridade entre 50 - 100% do valor do substrato original
<i>Teor de sais</i>	Possuir o mínimo possível (a quantidade de iões de sódio e de potássio não deve ser superior a 120 mg/kg de argamassa)
<i>Força de arrancamento - aderência</i>	$\geq 0,1\text{N/mm}^2$

**Fluidez:** permite ao *grout* a capacidade de se manter no estado fluído o tempo necessário, enquanto se vai difundindo homogeneamente pelas cavidades. Segundo (VINTZILEOU, 2006) a fluidez é determinada pela quantidade de água de amassadura, pela distribuição granulométrica dos grãos, bem como da natureza, forma e superfície específica das partículas constituintes da argamassa de *grout*. O método utilizado para proceder à mistura de todos os elementos é também determinante.

**Estabilidade:** permite ao *grout* manter-se homogéneo, previamente à exsudação e à segregação. Esta propriedade é influenciada pela velocidade usada na conceção da mistura, e varia com a introdução de elementos com características fluidificantes, retentoras de água ou introdutoras de ar. Ao introduzir materiais mais finos nos *grouts*, como a cal, é melhorada a estabilidade dos mesmos (TOUMBAKARI, 2002).

**Exsudação:** traduz a migração da água para a superfície e caracteriza-se pela formação de uma película neste local. Este fenómeno pode ser prejudicial para a qualidade e eficácia da injeção, visto impedir que a parte superior de um vazio injetado não fique consolidada, em virtude da migração de água em excesso para esta zona. A exsudação depende da relação água-ligante e é influenciada pela distribuição granulométrica deste último.

**Injetabilidade:** permite efetuar o escoamento fácil da mistura durante um dado período de tempo. (MILTADOU, 2000) refere que a capacidade de injeção do *grout* depende da morfologia do suporte (capacidade de absorção e adsorção) e ainda, da forma, dimensão, superfície específica e granulometria das partículas sólidas.

**Segregação:** é influenciada pela quantidade de água usada na amassadura, pela forma, densidade e dimensão das partículas sólidas, e, traduz a tendência dos materiais para se depositarem de forma estratificada.

**Características mecânicas:** estas propriedades devem apresentar a máxima concordância possível com as do meio onde se irão integrar os *grouts*. Interessa que contribuam de forma significativa não só para a melhoria da coesão, mas também para o aumento da resistência mecânica do conjunto.

(LUSO et al., 2007) resume uma série de especificidades, em termos qualitativos, que devem ser respeitadas pelos *grouts* a desenvolver.

Expõe, assim, um elenco de requisitos reológicos, químicos, físicos, mecânicos e térmicos adequados para estes materiais e que se encontram na tabela 10. Importa também salientar que a reologia fornece dados extremamente importantes, já que acabará por influir diretamente na qualidade da técnica de injeção manual, neste domínio destacam-se parâmetros como: a viscosidade, a fluidez, a trabalhabilidade e a retenção de água.

Tabela 10 – Resumo dos requisitos a garantir para as caldas de injeção, adaptado de (LUSO et al., 2007).

Requisitos	Descrição
<i>Reológicos</i>	Fluidez durante tempo suficiente e capacidade de penetração uniforme, por forma a que, os vazios se preencham de igual modo (injetabilidade);
	Ausência de segregações, evitando heterogeneidades;
	Exsudação mínima, para diminuir a presença de vazios no estado endurecido.
<i>Químicos</i>	Características químicas estáveis no tempo, capazes de proporcionar reações químicas fortes com o material original (irreversíveis);
	Resistência aos sais de sulfato, evitando eflorescências e a formação de produtos expansivos;
	Teor de álcalis minimizado.
<i>Físicos</i>	Tempo de início de presa adequado àquele que é necessário para efetuar a injeção;
	Insolubilidade na água e estabilidade volumétrica na presença de humidade;
	Baixa retração da calda;
<i>Mecânicos</i>	Características semelhantes aos materiais originais ou ligeiramente superiores;
	Boa e adequada aderência ao suporte para otimizar o funcionamento do conjunto.
<i>Térmicos</i>	Baixa teor de hidratação para evitar o desenvolvimento de gradientes térmicos que sejam prejudiciais à aderência do suporte.

Face ao exposto, pretende-se desenvolver uma metodologia de restauro conservativa, usando estratégias de manutenção dos revestimentos e das técnicas construtivas tradicionais, aprofundando os conhecimentos nesta área, contribuindo assim, para uma melhoria das intervenções de conservação em revestimentos de paredes antigas.

## 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1. Descrição geral

Neste capítulo, procede-se à descrição da metodologia utilizada para a concretização experimental do presente trabalho, à apresentação dos diversos materiais utilizados, assim como, do processo de preparação das amostras sujeitas a análise através das diferentes técnicas experimentais de caracterização. Expõem-se também os métodos experimentais e respetivos procedimentos.

Visando, fundamentalmente, o desenvolvimento e conceção de uma calda de cal – *grout*, passível de injeção, compatível química, física e mecanicamente com os materiais pré-existentes e que permita a consolidação dos revestimentos com perda de aderência - é essencial o estudo prévio do comportamento do *grout* no estado fresco permitindo, assim, obter a fluidez adequada para proceder à injeção do mesmo.

### 3.2. Formulações de *grouts* estudadas

Pretendendo desenvolver uma calda de cal aérea para consolidação de revestimentos antigos, detentora de características de trabalhabilidade e um desempenho eficaz face aos requisitos estabelecidos para os *grouts*, opta-se, no âmbito do presente trabalho, pela utilização de materiais pozolânicos, nomeadamente metacaulino e diatomite, bem como, pela introdução de alguns adjuvantes, designadamente éter de celulose, gluconato de sódio e acril 33.

Os materiais pozolânicos (metacaulino e diatomite) figuram nas diferentes formulações de forma distinta, fazendo-se variar não só o seu teor, mas também a sua forma de atuação no seio da calda de cal. Para tal, procede-se à introdução dos mesmos como parte integrante do agregado, ou, em alternativa, como parte integrante do ligante. É possível assim perceber, de acordo com o seu efeito sobre as propriedades e características dos *grouts* desenvolvidos, de que forma influem mais positivamente quando aplicados numa calda de consolidação.

No presente estudo, é também avaliado o papel interventivo dos adjuvantes (éter de celulose, gluconato de sódio e acril 33) no âmbito das caldas de injeção, tendo em conta as propriedades específicas de cada um: retentor de água, fluidificante e agente adesivo, respetivamente.

O *grout* base, é composto por cal aérea, farinha de sílica e água, tendo-se recorrido para a sua formulação a uma razão volumétrica, ligante:agregado, de 1:3. Todos os *grouts* de

consolidação estudados, foram desenvolvidos tendo por base estes três componentes, aos quais se adicionaram diferentes percentagens de aditivos e adjuvantes, recorrendo-se de igual modo a razão volumétrica ligante:agregado, de 1:3.

Na tabela 11 figuram os materiais utilizados, bem como, a respetiva designação comercial e função dos mesmos. Estes materiais apresentam propriedades distintas no seio da calda de consolidação: agregados, ligantes, pozolanas, agentes adesivos, fluidificantes/plastificantes e agentes retentores de água.

Tabela 11 – Materiais aplicados na formulação dos *grouts*.

Material	Designação comercial	Função	Teores usados (%)*
Cal aérea (CA)	Calcidrata	Ligante	variável
Farinha de sílica (fs)	SS-160 (Sifucel-Sílicas, SA)	Agregado	variável
Filler calcário (FCA)	Weber	Agregado	0 e 10
Metacaulino (Mk)	Argical 1200	Pozolana	10 ; 20 ; 30
Diatomite (Dia)	-	Pozolana	10 ; 20 ; 30
Éter de celulose (EC)	Walocel MK 100000PF30	Agente retentor de água	0; 0,4 e 0,5
Gluconato de sódio (GS)	PRS - CODEX (Marca Panreac)	Fluidificante / Plastificante	0 e 1
Acril 33 (A <sub>33</sub> )	-	Agente adesivo	0 e 0,5

\* % Face à massa total de sólidos

Como já foi referido, um dos principais objetivos do presente estudo é avaliar o efeito da introdução do metacaulino e da diatomite nas caldas de consolidação sob duas formas distintas: em substituição de parte do ligante, ou seja, da cal aérea, e em substituição de parte do agregado, isto é, da farinha de sílica. Paralelamente a este estudo é avaliada também a influência da introdução de filler calcário em substituição de parte do agregado, já que se trata de um material mais fino.

Deste modo, para simplificar a apresentação das diferentes amostras estudadas, constituíram-se quatro grandes grupos que visam elencar os *grouts* tendo em conta a forma como os referidos materiais neles figuram e o efeito que se pretende avaliar, designadamente:

**Grupo 1.** Avaliar o efeito da substituição de parte do ligante – cal aérea (10, 20 e 30%) pela mesma quantidade de Metacaulino e Diatomite.

**Grupo 2.** Avaliar o efeito da substituição de parte do ligante – cal aérea (10, 20 e 30%) pela mesma quantidade de Metacaulino e Diatomite e ainda de parte do agregado – farinha de sílica (10%) pela mesma quantidade de filler calcário.

**Grupo 3.** Avaliar o efeito da substituição de parte do agregado – farinha de sílica, por (1,5 e 3%) de Metacaulino e Diatomite e ainda por 10% de filler calcário.

**Grupo 4.** Avaliar o efeito da substituição de parte do agregado – farinha de sílica, por (1,5 e 3%) de Metacaulino e Diatomite sem introdução de filler calcário.

As tabelas 12, 13, 14 e 15 correspondem a cada um dos grupos de amostras supracitados e incluem todas as informações relativas à composição das mesmas.

A designação das amostras inclui o grupo à qual pertencem (*G1, G2, G3 e G4*) e o número de série para sua identificação (de *I a XII*). O *grout* base é designado por *AB*.

As referidas tabelas contêm ainda uma formulação tipo para cada grupo de amostras que inclui os diferentes componentes (exemplo, **Grupo 1:** *GCA\_13\_W\_MK/Dia\_EC\_GS\_A33*). Quer isto dizer, que se trata de um *grout* de cal aérea (GCA), com traço na razão volumétrica de 1:3, cujas percentagens de água (W), de metacaulino (MK), de diatomite (Dia), e de adjuvantes (*EC\_GS\_A33*) figuram nas referidas tabelas.

Encontram-se também assinaladas quais as amostras usadas para a conceção dos provetes prismáticos (destinados à realização dos ensaios de resistência mecânica e capilaridade), e quais as amostras sujeitas a injeção (destinadas aos ensaios de simulação de consolidação de revestimentos com perda de aderência).

Importa referir, neste domínio, que para a conceção dos provetes prismáticos foi utilizado 50% de água face ao peso total de sólidos, já para a conceção das caldas de injeção propriamente ditas, esta percentagem de água foi aumentada para 60% face ao peso total de sólidos. Desta forma, é possível obter *grouts* mais fluidos e com melhor capacidade de injeção.

Tabela 12 – Grouts com Metacaulino/Diatomite em substituição do ligante (cal aérea) e respetiva composição.

Grupo 1: Metacaulino/Diatomite em substituição do ligante (cal aérea)								
Grouts							Aplicação	
Designação	GCA_13_W (*)_MK/Dia_EC_GS_A33						Provetes prismáticos	Injeção
	Teores usados (%)							
	W (*)	MK	Dia	EC	GS	A33		
G1_AB	50/60	0	0	0	0	0	x	x
G1_I	50	10	0	0,4	1	0,5	x	x
G1_II	50	10	0	0,5	1	0,5	x	
G1_III	50/60	20	0	0,4	1	0,5	x	x
G1_IV	50/60	20	0	0,5	1	0,5	x	x
G1_V	50/60	30	0	0,4	1	0,5	x	x
G1_VI	50/60	30	0	0,5	1	0,5	x	x
G1_VII	50	0	10	0,4	1	0,5	x	
G1_VIII	50	0	10	0,5	1	0,5	x	
G1_IX	50/60	0	20	0,4	1	0,5	x	x
G1_X	50	0	20	0,5	1	0,5	x	
G1_XI	50/60	0	30	0,4	1	0,5	x	x
G1_XII	50	0	30	0,5	1	0,5	x	

Tabela 13 – Grouts com Metacaulino/Diatomite em substituição do ligante(cal aérea) e filler calcário em substituição do agregado (farinha de sílica) e respetiva composição.

Grupo 2: Metacaulino/Diatomite em substituição do ligante (cal aérea) e filler calcário em substituição do agregado (farinha de sílica)									
Grouts								Aplicação	
Designação	GCA_13_W (*)_FCA_MK/Dia_EC_GS_A33							Provetes prismáticos	Injeção
	Teores usados (%)								
	W (*)	FCA	MK	Dia	EC	GS	A33		
G2_AB	50	10	0	0	0	0	0	x	
G2_II	50/60	10	20	0	0	0	0	x	x
G2_III	50/60	10	0	20	0	0	0	x	x
G2_IV	50	10	0	0	0,5	1	0,5	x	
G2_V	50	0	0	0	0,5	1	0,5	x	
G2_VI	50	10	20	0	0,5	1	0,5	x	
G2_VII	50	10	0	20	0,5	1	0,5	x	
G2_VIII	50/60	10	30	0	0	0	0	x	x
G2_IX	50/60	10	0	30	0	0	0	x	x
G2_X	50/60	10	30	0	0,5	1	0,5	x	x
G2_XI	50	10	0	30	0,5	1	0,5	x	

Tabela 14 – Grouts com Metacaulino/Diatomite e filler calcário em substituição do agregado (farinha de sílica).

Grupo 3: Metacaulino/Diatomite e filler calcário em substituição do agregado (farinha de sílica)									
Grouts								Aplicação	
Designação	GCA_13_W <sup>(*)</sup> _FCA_MKfs/Diafs_EC_GS_A <sub>33</sub>							Provetes prismáticos	Injeção
	Teores usados (%)								
	W <sup>(*)</sup>	FCA	MKfs	Diafs	EC	GS	A <sub>33</sub>		
G3_I	50/60	10	1,5	0	0	0	0	x	x
G3_II	50/60	10	3	0	0	0	0	x	x
G3_V	50/60	10	1,5	0	0,5	1	0,5	x	x
G3_VI	50/60	10	3	0	0,5	1	0,5	x	x

Tabela 15 – Grouts com Metacaulino/Diatomite e filler calcário em substituição do agregado (farinha de sílica).

Grupo 4: Metacaulino/Diatomite em substituição do agregado (farinha de sílica)									
Grouts								Aplicação	
Designação	GCA_13_W <sup>(*)</sup> _FCA_MKfs/Diafs_EC_GS_A <sub>33</sub>							Provetes prismáticos	Injeção
	Teores usados (%)								
	W <sup>(*)</sup>	FCA	MKfs	Diafs	EC	GS	A <sub>33</sub>		
G4_I	50/60	0	1,5	0	0	0	0	x	x
G4_II	50/60	0	3	0	0	0	0	x	x
G4_III	50/60	0	0	1,5	0	0	0	x	x
G4_IV	50/60	0	0	3	0	0	0	x	x
G4_V	50/60	0	1,5	0	0,5	1	0,5	x	x
G4_VI	50/60	0	3	0	0,5	1	0,5	x	x
G4_VII	50	0	0	1,5	0,5	1	0,5	x	
G4_VIII	50	0	0	3	0,5	1	0,5	x	

## NOTAS:

GCA\_13: grout de cal aérea com traço 1:3 em volume

W (\*): % de água de amassadura (50% para os provetes prismáticos e 60% para as caldas de injeção propriamente ditas)

MK/Dia: % de metacaulino e de diatomite em substituição do ligante (cal aérea)

MKfs/Diafs: % de metacaulino e de diatomite em substituição do agregado (farinha de sílica)

FCA: % de filler calcário em substituição do agregado (farinha de sílica)

EC: % de éter de celulose (agente retentor de água)

GS: % de gluconato de sódio (fluidificante/plastificante)

A<sub>33</sub>: % de acril 33 (agente adesivo)

### 3.3. Ensaio de caracterização

#### 3.3.1. Caracterização das matérias-primas

##### 3.3.1.1. Distribuição granulométrica

Para a formulação dos *grouts* foi utilizada como agregado a farinha de sílica, cuja designação comercial é SS-160 (Sifucel-Sílicas, SA), com curva granulométrica representada na figura 8. Trata-se de um agregado com granulometria bastante fina.

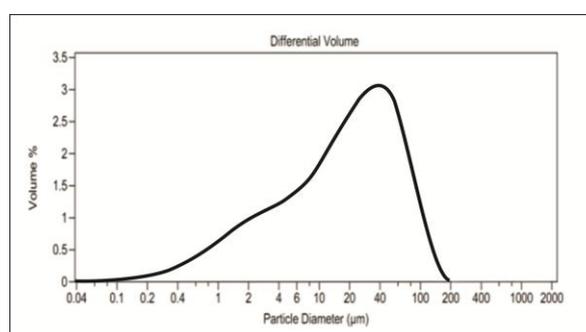


Figura 8 – Curva de distribuição granulométrica do agregado (Farinha de sílica SS-160) usado na formulação dos *grouts* (AZEITEIRO, 2011).

Como aditivos recorreu-se ao metacaulino (Argical 1200) e à diatomite, cujas respetivas curvas de distribuição granulométricas se expõem de seguida, na figura 9. São ambos aditivos pozolânicos, cujo grau de pozolanicidade se indicará mais à frente na secção 3.3.2. Estes são adicionados para combater algumas debilidades apresentadas pelas argamassas de cal, tais como: falta de durabilidade, e dificuldade de endurecimento em ambientes húmidos.

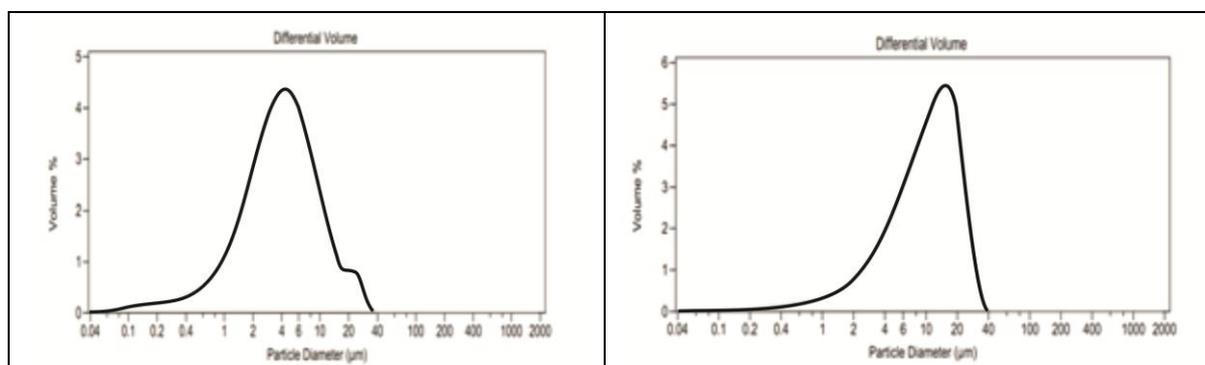


Figura 9 – Curvas de distribuição granulométricas do metacaulino (Argical 1200) e da diatomite, respetivamente (AZEITEIRO, 2011).

Para a execução das argamassas de reboco a ser aplicadas sobre os suportes de tijolo furado corrente - simulação de provetes com perda de aderência entre camadas - foi usada uma areia de rio, constando a sua curva de distribuição granulométrica da figura 10.

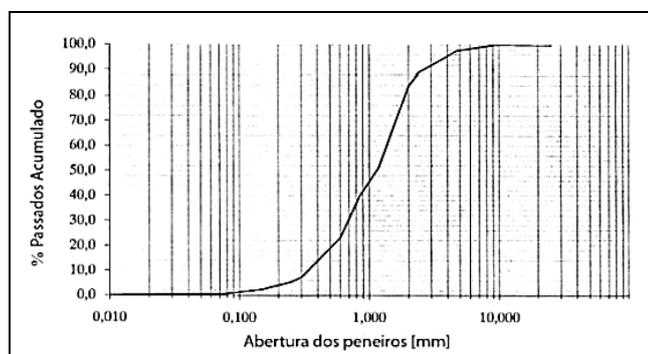
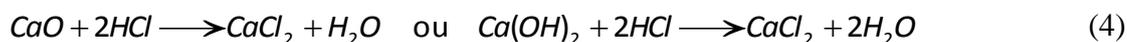


Figura 10 – Curva de distribuição granulométrica da areia de rio (MARTINS, 2008) usada na elaboração das argamassas de reboco dos provetes constituídos para simulação de perda de aderência.

### 3.3.1.2. Pozolanicidade (*Chapelle modificado*)

O ensaio de pozolanicidade visa a determinação da quantidade de hidróxido de cálcio fixado, permitindo assim inferir acerca da atividade pozolânica de um dado material. A caracterização da pozolanicidade dos materiais aplicados foi já efetuada em estudo prévio (AZEITEIRO, 2011). Introduziu-se num frasco de Erlenmeyer a pozolana finamente moída, à qual se adicionou de seguida óxido de cálcio e água. Após a introdução de um magnete no frasco, sujeitou-se o mesmo à ação térmica de uma placa de aquecimento ajustada a  $90 \pm 1^\circ\text{C}$ , com agitação. Ao ser atingida a temperatura pretendida, manteve-se a agitação e o aquecimento por cerca de 16 h. De seguida a amostra foi arrefecida, adicionou-se-lhe sacarose, agitou-se durante 15 min e por fim foi ainda filtrada. Titulou-se 25 ml de solução límpida com HCl 0,1N, na presença do indicador fenolftaleína, até se observar a passagem de cor rosa para incolor. A reação de dosagem é dada pela equação (4).



Os resultados obtidos encontram-se sumariados na tabela 16 e são expressos em [mg Ca (OH)<sub>2</sub>] fixados por grama de pozolana.

Tabela 16 – Resultados obtidos pelo ensaio modificado de Chapelle (AZEITEIRO, 2011).

Matéria - prima	Grau de pozolanicidade [mg Ca (OH) <sub>2</sub> / g pozolana]
Cal aérea (branco)	32,8
Metacaulino (Argical 1200)	1317
Diatomite	1442

Da análise dos resultados da tabela 16 é possível verificar que o valor de pozolanicidade da cal aérea é praticamente insignificante, ou seja esta não apresenta atividade pozolânica representativa. A diatomite, quando comparada com o metacaulino (Argical 1200) apresenta maior grau de pozolanicidade.

### 3.4. Caracterização das caldas de cal (*grouts*)

Para a execução das caldas de cal, que integram os provetes prismáticos, procede-se primeiramente à pesagem de todos os sólidos a ser usados em cada formulação específica. De seguida, no recipiente da misturadora, pesa-se a água. No caso das composições que incluem Acril 33 como agente adesivo, este é diretamente adicionado à água pesada, permitindo a sua dissolução. Ao recipiente que contém a água é adicionado gradualmente o volume de sólidos, misturando-se todo o seu conteúdo a fim de evitar a formação de grumos, garantindo a sua completa envolvência. Este é depois colocado na misturadora mecânica durante cerca de 90 segundos, de modo a garantir condições normalizadas para a conceção de argamassas. Após cada amassadura, procedeu-se à avaliação das características das argamassas no estado fresco através da determinação da consistência por espalhamento e da retenção de água.

#### 3.4.1. Avaliação das características das caldas no estado fresco

##### 3.4.1.1. Determinação da consistência por espalhamento

A avaliação da consistência das caldas de cal foi efetuada através do ensaio de espalhamento, cujo procedimento é semelhante ao descrito na norma EN 1015-3:1999. A avaliação da consistência foi realizada imediatamente após a produção das caldas. Este ensaio é realizado sobre uma mesa de espalhamento (figura 11 a), cujo tampo se encontra marcado por circunferências concêntricas de diâmetro conhecido. Sobre esta mesa é posicionado um molde tronco-cónico, cujo diâmetro interno da base é de 100 mm, tendo o cuidado de o colocar devidamente centrado relativamente às marcas existentes (figura 11 b).

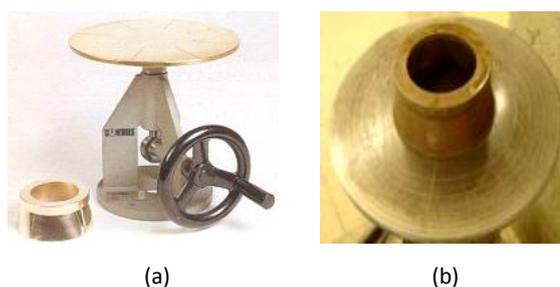


Figura 11 – (a) Mesa de espalhamento; (b) Molde tronco-cónico.

De seguida, efetua-se o enchimento do molde em duas camadas, com a mistura fresca, correspondendo cada uma delas a cerca de metade da capacidade do molde. Cada uma destas camadas foi apiloada com recurso a um varão de 15 mm de diâmetro, compactando-se o seu conteúdo através de 10 pancadas. O material foi então rasado pelo nível máximo do molde com auxílio de uma espátula (figura 12 a). Imediatamente após a retirada do copo, o material apresenta um espalhamento inicial (figura 12 b) sendo este valor registado como o resultado do ensaio para o momento zero. Submeteu-se, depois, a amostra à ação de 15 ressaltos que originam o espalhamento do material sobre a mesa, sendo este valor registado como o resultado final do ensaio (figura 12 c).

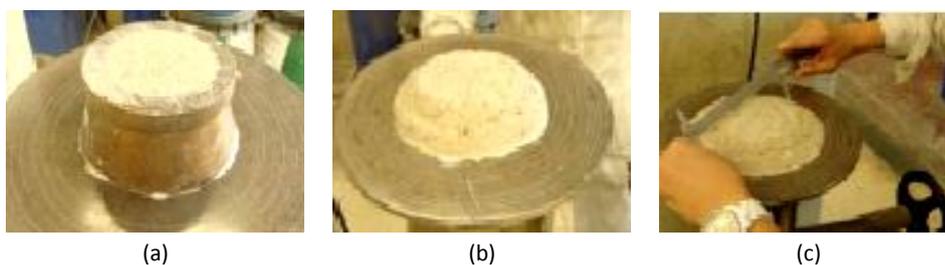


Figura 12 – (a) Material acondicionado no interior do molde; (b) Espalhamento inicial; (c) Espalhamento final

Este ensaio foi realizado para todas as formulações de *grout* desenvolvidas, quer para a conceção dos provetes prismáticos destinados aos ensaios mecânicos e de capilaridade (50% de água, face ao peso total de sólidos), quer para as caldas de injeção realizadas para os ensaios de simulação de consolidação de revestimentos com perda de aderência (60% de água, face ao peso total de sólidos).

**NOTA:** as argamassas de reboco de cal aérea, desenvolvidas para a execução dos provetes que visam simular a perda de aderência entre camadas, são também sujeitas a ensaio de espalhamento através de um procedimento em tudo semelhante ao descrito para os *grouts*.

#### 3.4.1.2. Retenção de água

O ensaio de retenção de água é usado para determinar a água que se mantém na argamassa para as reações de hidratação, após a sucção inicial do suporte, no momento em que a calda de cal é injetada. A determinação da quantidade de água de amassadura a utilizar na execução dos provetes prismáticos, foi feita em estudos preliminares (AZEITEIRO, 2011), onde se retiraram pequenas amostras passados 30 minutos de se proceder à injeção dos *grouts* nos provetes de simulação de consolidação entre camadas com perda de aderência. Estas amostras foram pesadas e colocadas na estufa durante um período de 48 horas. Decorrido este tempo, pesaram-se novamente as amostras, e registou-se a quantidade de água absorvida. Chegou-se,

assim, a uma percentagem de água de amassadura de 50% do seu peso em sólidos para a execução dos provetes prismáticos, e de 60% para a conceção das caldas de injeção propriamente ditas.

### 3.4.2. Execução dos provetes prismáticos (*grouts*)

Os provetes prismáticos, foram realizados segundo a norma NP EN 1015-11 para argamassas de cal aérea, exceto quanto à utilização de gaze no fundo do molde. Para a realização destes provetes recorreu-se à utilização de moldes metálicos que foram previamente limpos e oleados. Cada molde permite executar três provetes, uma vez que possuem paredes internas divisórias, apresentando cada provete as seguintes dimensões (40×40×160)mm.

O preenchimento dos moldes com o *grout* é feito em duas fases, sendo que entre elas se realiza compactação manual com um pilão através de pancadas uniformemente distribuídas. Para além da compactação, o molde é também sujeito à ação de uma mesa vibratória durante cerca de 20 segundos. Este procedimento visa minorar a criação de vazios no interior do *grout*, permitindo uma boa compactação do mesmo, homogeneizando o conteúdo do provete. Vertida a segunda camada de *grout*, sujeita-se novamente o molde a vibração.

Com o auxílio de uma régua metálica, retira-se o excesso de argamassa da superfície, criando uma face perfeitamente lisa (figura 13).

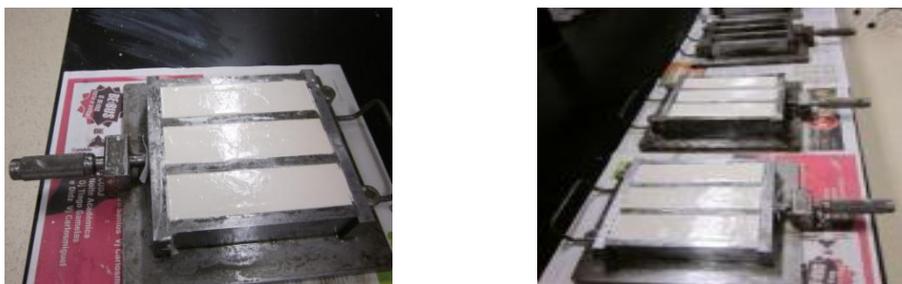


Figura 13 – Moldes preenchidos com as diferentes formulações de *grout*.

Decorridos três dias, desapertaram-se os moldes e foi aliviada a pressão a que os provetes estavam sujeitos. Alvo de observação frequente, ao manifestarem alguma rigidez, os provetes foram totalmente desmoldados e colocados numa sala condicionada a 21°C e 65%HR na posição vertical e devidamente referenciados (figura 14 a). Aqui permanecem até atingirem três tempos de cura, nomeadamente: 28, 60 e 120 dias (figura 14 b).

**NOTA:** Após a desmoldagem dos provetes, os moldes foram devidamente limpos e oleados evitando a sua corrosão.



Figura 14 – (a) Provetes prismáticos colocados na vertical devidamente referenciados; (b) Provetes prismáticos no interior da sala condicionada durante o processo de cura.

### 3.4.3. Avaliação das características físicas dos *grouts* no estado endurecido

#### 3.4.3.1. Determinação da Resistência mecânica à flexão

A avaliação da resistência mecânica à flexão dos *grouts*, sobre os provetes prismáticos, foi realizada segundo os procedimentos preconizados pela norma EN 1015-11:1999.

Para este ensaio utilizou-se uma máquina universal de ensaios (figura 15 a), em conformidade com os requisitos da norma, equipada com uma célula de carga de 3kN. Cada provete foi colocado na máquina, centrado e com o eixo longitudinal perpendicular aos apoios, descendo-se de seguida, o cutelo da máquina até este estar em contacto com a face superior do provete (figura 15 b). Seguiu-se a aplicação de cargas gradualmente crescentes, a meio vão, até ocorrer a rotura, registando-se o valor lido para a respetiva força. A força de rotura à flexão é aquela que corresponde à máxima força registada pela máquina de ensaios.



Figura 15 – (a) Máquina universal de ensaios e célula de carga de 3kN; (b) Ensaio de resistência à flexão realizado sobre os provetes prismáticos.

A máquina universal de ensaios, faculta a visualização dos deslocamentos à medida que a carga vai sendo aplicada. Quando ocorre a rotura, regista-se o valor do deslocamento

correspondente, que será depois convertido no valor de carga máxima ( $F_f$ ) de acordo com a reta que caracteriza o equipamento de ensaio para o anel de 3kN (figura 16).

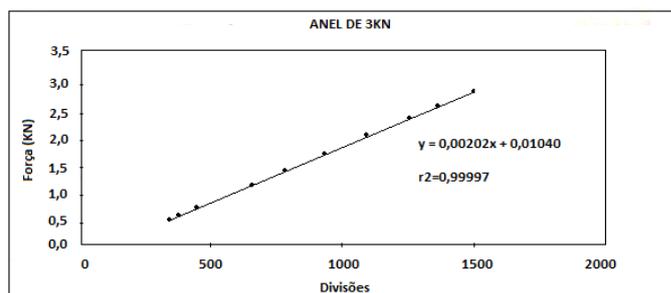


Figura 16 – Reta que caracteriza o equipamento de ensaios para uma célula de carga de 3kN e respetiva equação.

A tensão de rotura à flexão, ou seja, a resistência máxima de flexão, é dada pelo quociente que relaciona a carga máxima ( $F_f$ ) e a distância entre os apoios ( $L$ ), com as dimensões laterais do provete, perpendicular ( $b$ ) e paralela ( $h$ ), ao sentido da carga aplicada. Deste modo, constitui-se a equação (5).

$$\sigma_{\max,f} = R_f = \frac{3 \times F_f \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (5)$$

Onde,

$\sigma_{\max,f} = R_f$  - tensão de rotura à flexão, ou resistência de flexão (MPa)

$F_f$  - força máxima aplicada ao centro do prisma na rotura (N)

$L$  - distância entre os apoios inferiores (=100mm)

$b$  - comprimento do provete (mm)

$h$  - largura do provete (mm)

#### 3.4.3.2. Determinação da Resistência mecânica à compressão

O ensaio de determinação da resistência à compressão foi realizado sobre os meios provetes resultantes do ensaio de flexão, recorrendo-se a uma máquina universal de compressão, dando cumprimento aos requisitos da norma, equipada com uma célula de carga de 3kN (figura 17 a). Colocaram-se, então, os meios prismas na máquina de ensaio.

O seu posicionamento foi efetuado por forma a assegurar uma área de contato de (40×40)mm com as superfícies que efetuam a transmissão da carga que é perpendicular ao eixo da base de apoio (figura 17 b). A carga foi aplicada de forma gradual e crescente, até se dar a rotura, para a qual foi registada a respetiva força, isto é a força de rotura à compressão ( $F_c$ ).



Figura 17 – (a) Máquina universal de ensaios e célula de carga de 3kN; (b) Ensaio de resistência à compressão realizado sobre os meios provetes resultantes do ensaio de flexão.

Deste modo, a tensão de rotura à compressão, ou seja a resistência máxima de compressão, é dada pelo quociente entre a carga máxima ( $F_c$ ) e a área da seção transversal onde foi aplicada a força ( $AC$ ), expressa na equação (6).

$$\sigma_{\max,c} = R_c = \frac{F_c}{AC} \quad (6)$$

Onde,

$\sigma_{\max,c} = R_c$  - tensão de rotura à compressão, ou resistência de compressão (MPa)

$F_c$  - carga máxima de rotura (N)

$AC$  - área de contacto ( $\text{mm}^2$ )

### 3.4.3.3. Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade, foi realizado de acordo com os procedimentos constantes na norma EN 1015-18:2002, tendo sido efetuadas algumas adaptações. Este ensaio visa determinar a capacidade de absorção de água do *grout* por mecanismos capilares. Por cada composição de *grout* e para cada uma das três idades (28, 60 e 120 dias), foram ensaiados 3 provetes provenientes do ensaio de flexão. Antes de se iniciar o ensaio, foi registado o peso seco de cada provete (figura 18 a).



Figura 18 – (a) Determinação do peso seco de cada provete; (b) realização do ensaio de capilaridade.

Estes foram, então, posicionados ao alto num tabuleiro com fundo revestido a esfregão verde, permitindo a sua entrada em contato com uma altura constante de água de cerca de 2 mm. Durante o ensaio procedeu-se ao registo da massa dos provetes de minuto a minuto, até aos 10 min, e de cinco em cinco minutos, até aos 60 min (figura 18 b). Embora a norma indique os 90 min como tempo padrão de registo, foram utilizados os 60 min, já que os provetes saturam algum tempo antes.

A absorção de água por capilaridade traduz-se pela curva de absorção capilar. Esta exprime-se através do gráfico que relaciona a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do provete, em ordenadas [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ], com a raiz quadrada do tempo decorrido, em abcissas [ $\text{min}^{1/2}$ ]. A massa de água absorvida por unidade de tempo, através da superfície unitária de uma amostra seca, quando esta se encontra em contato com uma camada de água, traduz o coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $C$ ), expresso em [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ]. Este coeficiente advém da relação dada pela equação 7, que se apresenta de seguida.

$$\frac{m}{A} = C \times t^{0.5} \quad (7)$$

Onde,

$m$  - massa de água absorvida (kg)

$A$  - área de contacto entre a amostra e a camada de água ( $\text{m}^2$ )

$t$  - tempo de duração do ensaio (min)

### 3.5. Ensaio de simulação de consolidação de revestimentos

#### 3.5.1. Execução do suporte

Pretendendo simular o descolamento entre camadas, foram criados suportes com base em tijolo furado corrente, rebocados numa das faces com duas camadas de argamassa de reboco em cal aérea, perfazendo uma espessura de cerca de 25 mm. A falta de aderência foi simulada através da execução de um vazio entre as referidas camadas, onde se irá proceder posteriormente à injeção das caldas de cal. Este processo baseia-se na metodologia desenvolvida por Martha Tavares.

A argamassa de reboco é constituída por cal aérea e areia de rio numa razão volumétrica ligante:agregado de 1:3, tendo sido efetuado o teste de espalhamento de acordo com o especificado na norma EN 1015-3. Para a argamassa de reboco obteve-se então um espalhamento padrão de 210 mm. A fim de conferir alguma rugosidade ao suporte, para garantir uma maior aderência camadas, efetuou-se primeiramente uma camada de chapisco

nos tijolos que foram previamente limpos. Prossegue-se então, com a aplicação da primeira camada de emboço ao traço 1:3 em volume, cuja espessura é de aproximadamente 1 cm, tendo-se obtido um valor para o espalhamento de 210 mm. A superfície desta camada deve apresentar rugosidade suficiente para que a camada seguinte adira bem à já existente (figura 19). Importa ainda ressaltar que antes da aplicação do emboço os tijolos foram humedecidos com água.



Figura 19 – Execução da 1ª camada de emboço sobre o chapisco.

Decorridos alguns dias, a primeira camada de emboço foi igualmente limpa e humedecida, tendo sido aplicadas sobre ela três placas acrílicas de dimensões (200×60×4)mm que visam simular o hiato entre emboços (figura 20). Estas placas foram devidamente oleadas com óleo descofrante e foi-lhes ainda aplicado pó de pedra granítica, permitindo posteriormente removê-las com maior facilidade.



Figura 20 – Colocação das placas acrílicas sobre a 1ª camada de emboço.

De seguida aplica-se a segunda camada de emboço igualmente ao traço 1:3 em volume, com 210 mm de espalhamento, e espessura de cerca de 1,5 cm. Esta camada é executada cuidadosamente por forma a garantir o alinhamento das placas acrílicas, impedindo o seu deslocamento face ao suporte (figura 21).



Figura 21 – Execução da 2ª camada de emboço.

Aos três dias de cura, colocaram-se os provetes numa sala condicionada a 21°C e 65% HR, onde permaneceram cerca de trinta dias. Decorrido este tempo, procedeu-se à remoção cuidadosa das placas acrílicas (figura 22).



Figura 22 – Simulação de descontinuidade entre camadas de reboco.

Posteriormente efetuou-se a raspagem da cavidade formada (figura 23). Este procedimento é essencial, uma vez que promove, assim, uma melhor aderência entre as faces internas da superfície oca e a calda a injetar.



Figura 23 – Preparação da cavidade para posterior injeção do *grout*.

Com o intuito de proceder à injeção da calda de cal, a zona de descolamento foi humedecida com uma solução de água e álcool numa proporção de 1:1, para facilitar a penetração da calda (figura 23). A injeção deve ser realizada de forma lenta e constante a partir de um dos vértices da superfície oca, por forma a não permitir a formação de bolhas de ar (figura 24). Deverá também ser realizada a uma altura inferior a 1m/dia para que as pressões hidrostáticas da calda não afetem a estrutura (TAVARES et al., 2009).



Figura 24 – Injeção do *grout*.



Figura 25 – Referenciação dos provetes e respetiva colocação no interior da sala condicionada a 21°C e 65% HR.

Após a injeção os provetes permanecem na sala condicionada a 21°C e 65% HR até perfazerem três tempos de cura distintos: 28, 60 e 120 dias (figura 25).

Salienta-se, ainda, que para cada composição de *grout*, foram realizados três provetes para simulação de consolidação entre camadas de reboco com perda de aderência, que serão posteriormente ensaiados a cada uma das três idades anteriormente referidas.

### 3.5.2. Ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão (Tubos de Karsten)

Baseado na metodologia preconizada pela RILEM (RILEM, 1980), este ensaio permite a medição da quantidade de água absorvida por uma determinada superfície do reboco ou acabamento. Primeiramente fixa-se um pequeno tubo de vidro graduado (escala de 0 a 4 cm<sup>3</sup>), em forma de cachimbo, à zona que se pretende estudar.

A fixação pode ser feita com silicone, no entanto, devido a algumas desvantagens como tempo despendido na sua aplicação e dificuldade na limpeza final da superfície, optou-se por efetuar a fixação do tubo com plasticina.



Figura 26 – Ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão (Tubos de Karsten), na zona de reboco e na zona com injeção de *grout*.

Foram, deste modo, ensaiadas duas zonas distintas do provete de tijolo: uma em que existe apenas reboco, e outra, onde foi injetado o *grout*. Mede-se assim, o abaixamento do nível de água no tubo em função do tempo, permitindo efetuar a avaliação da quantidade de água

absorvida pelo revestimento. A medida da permeabilidade à água com recurso a este método, pode ser utilizada para caracterizar qualitativamente o estado do reboco e da zona onde se procedeu à injeção da calda de cal. É possível também estimar o seu grau de degradação através de comparações e analisando as alterações verificadas pela absorção de água.

O ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão foi realizado para cada formulação de *grout* e para cada área de reboco, em provetes de tijolo com idades de 28, 60 e 120 dias (figura 26).

### 3.5.3. Ensaio de aderência no *grout* e no reboco

Pretende-se com o ensaio de aderência avaliar a resistência de aderência dos *grouts*, em provetes com simulação de descolamento entre camadas e também das respetivas argamassas de reboco. A aderência foi avaliada através de um equipamento de tração (*pull-off test*) e através de um método expedito desenvolvido durante o trabalho. De seguida, expõem-se os referidos métodos.

#### 3.5.3.1. Ensaio de aderência com equipamento de tração (*pull-off test*)

Em Portugal a norma EN 1015-12: 2000 é o documento de referência para a realização de ensaios de arrancamento por tração em laboratório. Para a realização deste ensaio procedeu-se primeiramente à delimitação da área de ensaio. A norma considera duas possibilidades para a limitação da área circular a ensaiar, nomeadamente:

- *Com o reboco no estado fresco* - através da introdução de um anel de 50 mm de diâmetro interior, de modo a cortar em círculo toda a espessura do revestimento;
- *Com o reboco no estado endurecido* - usando uma caroteadora sendo que o rasgo deve ter a profundidade do revestimento mais 2 mm do suporte.

Assim, a fim de se garantir que o arrancamento ocorre apenas sobre a área da pastilha, e de gerar o menor esforço possível sobre o reboco, optou-se numa primeira fase pela limitação da área circular de ensaio com a argamassa de reboco ainda no estado fresco, através da introdução de um anel metálico com 50 mm de diâmetro, que foi depois removido e que cortou toda a espessura do revestimento (este processo foi realizado aquando a execução de cada uma das camadas de reboco). Não obstante, durante o processo de cura na sala condicionada a 21°C e 65% HR, observou-se que algum material havia preenchido o corte criado pelo anel, causando alguma obstrução. Com o auxílio de uma lima estreita realizou-se,

então, cuidadosamente, uma incisão em toda a profundidade da argamassa, solicitando-se o menos possível a área de arrancamento. O material remanescente e escavado foi removido com um aspirador. A distância mínima proposta pela norma EN 1015-12: 2000, entre cortes individuais, ou entre estes e os bordos livres do suporte, foi respeitada, não sendo nunca inferior a 50 mm. Este foi o processo escolhido, uma vez que, se pensou ser o menos invasivo para os provetes em causa, já que o uso de uma caroteadora iria gerar tensões internas bastante significativas e prejudiciais para estrutura dos mesmos.

Após a limitação da área de ensaio, limpou-se todo o pó da superfície dos provetes e procedeu-se à colagem das pastilhas. A colagem da pastilha metálica circular ( $\varnothing$  de 5 cm) ao provete, é feita com auxílio de uma cola epoxídica (figura 27 a), evitando que esta penetre nos cortes de limitação da área de ensaio. Exerce-se durante alguns minutos pressão sobre a pastilha para garantir a eficaz colagem da mesma ao substrato. Decorridas cerca de 24 horas (tempo de cura total da cola) pode realizar-se o ensaio de aderência. Refere-se, ainda, que por cada provete, foram coladas duas pastilhas, a fim de ensaiar duas zonas distintas: zona que só se encontra rebocada e zona com injeção de *grout* entre camadas de emboço (figura 27 b).



Figura 27 – (a) Cola epoxídica usada para a colagem das pastilhas ao substrato; (b) Pastilha já colada ao substrato.

A aderência do reboco ao suporte é determinada como a tensão de tração máxima aplicada por uma carga perpendicular à superfície do reboco. A tensão de aderência é obtida como o quociente entre a força de rotura e a área de ensaio e expressa-se em MPa. Representa-se de seguida, na figura 28, o esquema subjacente ao ensaio de tração. O ensaio foi realizado aos 28, 60 e 120 dias de idade.

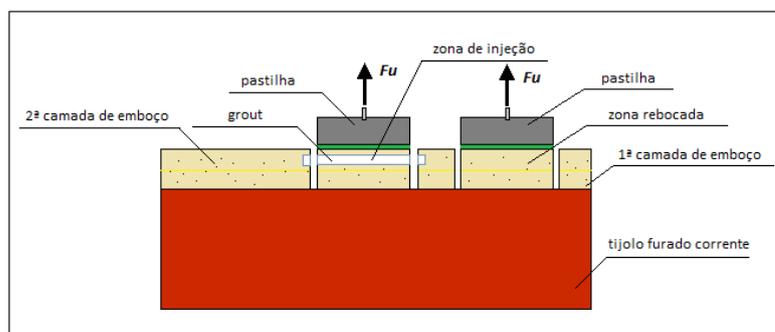


Figura 28 – Esquema alusivo ao ensaio de tração realizado sobre os provetes para simulação de consolidação entre camadas com perda de aderência.

O ensaio propriamente dito consistiu na extração, com a máquina *pull-off*, das pastilhas (figura 29 a). O provete foi colocado de forma estratégica, permitindo o seu enquadramento na máquina de ensaios, por forma a centrar a pastilha (figura 29 b).

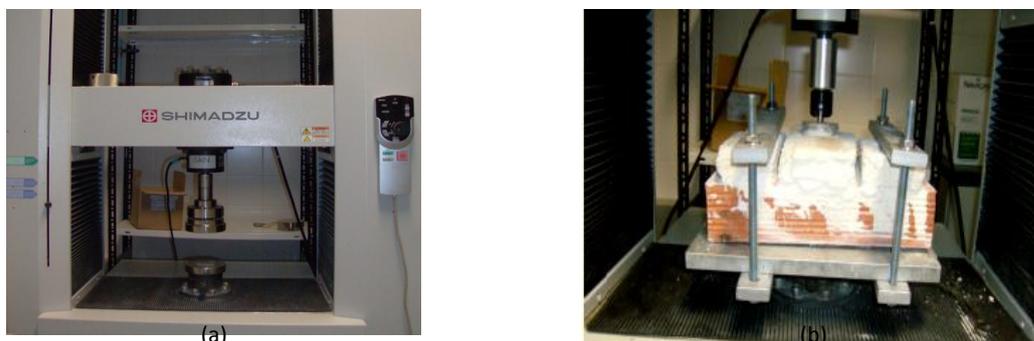


Figura 29 – Máquina de tração usada para o *pull-off test*; (b) Provete sujeito a ensaio *pull-off*.

Aplicou-se então, uma força perpendicular, sem choque e com uma velocidade uniforme possibilitando a rotura num intervalo de tempo entre os 20 e os 60 segundos. Antes de iniciar o arrancamento verifica-se o zero do equipamento. Inicia-se, depois, a medição até se verificar a rotura, registando a força máxima obtida ( $F_u$ ).

### 3.5.3.2. *Ensaio aderência pelo método expedito*

Neste trabalho, para além da avaliação da aderência do reboco ao suporte, seguindo as considerações da norma EN 1015-12: 2000, complementou-se o estudo com o desenvolvimento de um ensaio baseado num método expedito. A realização do ensaio de aderência, segundo este processo, baseia-se na montagem de uma estrutura (figura 30) constituída pelos seguintes elementos: mesa de suporte em madeira, cuja horizontalidade é garantida através de um nível de bolha; balde, para comportar os sólidos; calços, ou seja, tijolos que suportam a mesa e permitem a elevação da estrutura face à mesa de trabalho; esponja, que visa amortecer o impacto da queda do balde após a rotura; gancho em metal, que estabelece a ligação entre a pastilha metálica, colada ao provete, e o balde através de uma fita de nastro.

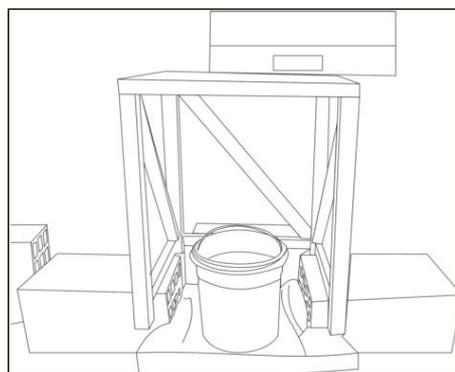


Figura 30 – Esquema representativo da estrutura de ensaio (método expedito).

A limitação da área a ensaiar (ainda com a argamassa no estado fresco) e a colagem das pastilhas, é comum ao exposto no ponto anterior para o ensaio mecânico de tração (*pull-off*). Ressalva-se apenas o facto de, ao colar as pastilhas no suporte, ter de se inserir a fita de nastro (cruzada), cuja espessura e peso são praticamente insignificantes (figura 31).



Figura 31 – Pastilhas com as fitas coladas de forma cruzada, para posterior suspensão do gancho.

Atentando no ensaio propriamente dito, é montada a estrutura e de seguida colocado sobre a mesa de apoio o provete, com a face rebocada voltada para baixo. Esta possui já a pastilha e fitas devidamente coladas. Importa salientar que, a mesa de suporte possui um orifício central circular, cujo diâmetro é ligeiramente superior ao da pastilha (cerca de 7 cm) e que permitirá a passagem da mesma ao dar-se a rotura (figura 32 a).

Ao provete encontra-se suspenso, através das fitas de nastro, um gancho metálico que sustenta o balde. Este irá comportar os sólidos, que serão lentamente colocados, até se dar a rotura. Inicialmente colocaram-se pequenas peças metálicas de chumbo no balde até se alcançar um valor mínimo de peso.

De seguida, verte-se cuidadosa e lentamente areia fina (figura 32 b), até ocorrer a rotura, que é indiciada precocemente pela soltura de pequenos fragmentos da argamassa de reboco (figura 32 c).



(a)



(b)

Figura 32 – (a) Montagem da estrutura de ensaio e posicionamento do provete relativamente ao orifício central da mesa de apoio; (b) Colocação da areia fina, vertida lentamente, para o interior do balde que se encontra suspenso ao provete através de um gancho metálico.

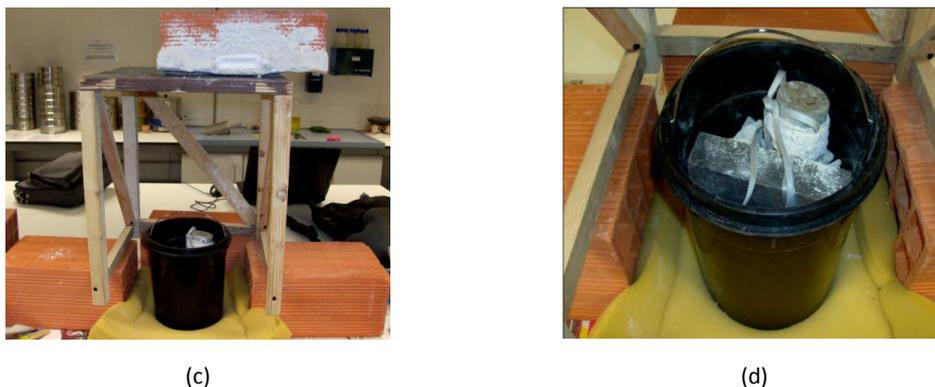


Figura 32 – (c) Momento da rotura; (d) Sólidos no interior do balde, perfazendo a massa total que origina o destacamento.

Após a rotura coloca-se o balde, com toda a massa que contém (figura 32 d), sobre a balança e regista-se o valor total do conjunto, entenda-se [pastilha + cola epóxi + fitas + gancho metálico + balde + sólidos adicionados + areia fina]. Obtém-se, deste modo, um valor de massa total. O peso correspondente, ou seja, a força máxima de tração ( $Fu$ ), é dada pela expressão (8).

$$P = Fu = m_{total} \times g \quad (8)$$

Onde,

$P = Fu$  - peso total, ou força máxima de tração (N)

$m_{total}$  - massa total do conjunto [pastilha+cola+fitas+gancho+balde+sólidos adicionados] (kg)

$g$  - aceleração da gravidade ( $ms^{-2}$ )

Deste modo, a aderência do reboco ao suporte é determinada como a tensão de tração máxima ( $\sigma_{máx,adr}$ ) aplicada por uma carga perpendicular à superfície do reboco, traduzida pela expressão (9).

$$\sigma_{máx,adr} = \frac{Fu}{A_{pastilha}} \quad (9)$$

Onde,

$\sigma_{máx,adr}$  - tensão de tração máxima, ou tensão de aderência (MPa)

$Fu$  - força máxima de tração (N)

$A_{pastilha}$  - área da pastilha ( $mm^2$ )

### 3.5.3.3. Avaliação das superfícies de rotura decorrentes dos ensaios de aderência

No âmbito dos ensaios de aderência, é ainda realizada, uma análise qualitativa face ao modo de rotura da superfície de arrancamento. É examinada e registada a forma de rotura do provete ensaiado, quer para a zona de injeção (figura 33), quer para a zona rebocada (figura 34).

Deste modo, é possível designar o tipo de rotura de três formas distintas e inferir acerca da capacidade aderente da área ensaiada, assim:

- **Rotura coesiva** - se ocorre no seio da camada de reboco ou da camada de grout;
- **Rotura adesiva** - se ocorre na interface entre o suporte/1ª camada de emboço, na interface entre camadas de emboço, ou, na interface grout/2ª camada de emboço;
- **Rotura mista** - se ocorrem as duas situações acima referidas para a mesma área de destacamento.

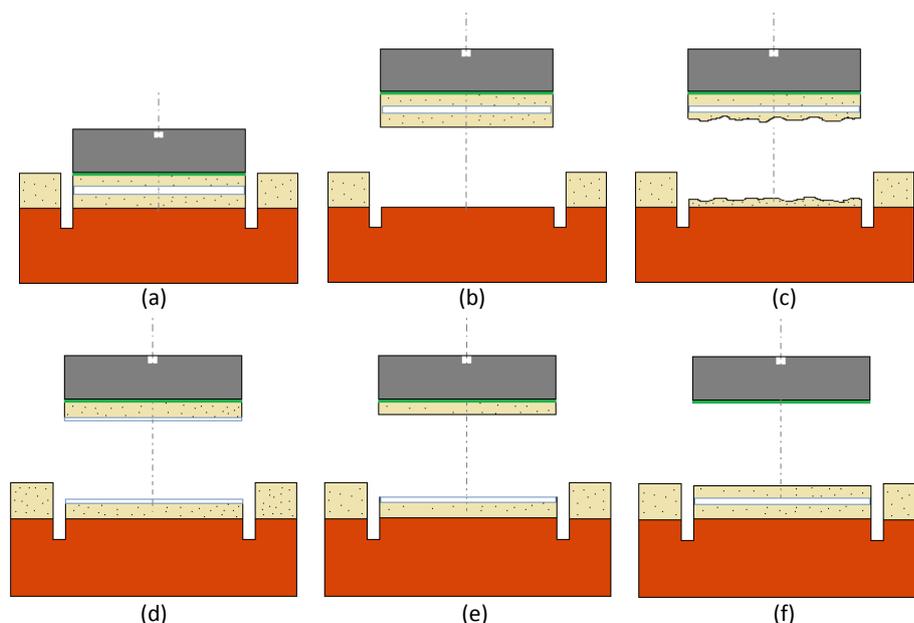


Figura 33 – Formas de rotura decorrentes do ensaio de aderência realizado sobre as zonas de injeção de *grout*: (a) zona de injeção de *grout* antes da rotura; (b) rotura na interface suporte/1ª camada de emboço; (c) rotura no seio da 1ª camada de emboço; (d) rotura no seio da camada de *grout*; (e) rotura na interface *grout*/2ª camada de emboço; (f) rotura pela pastilha.

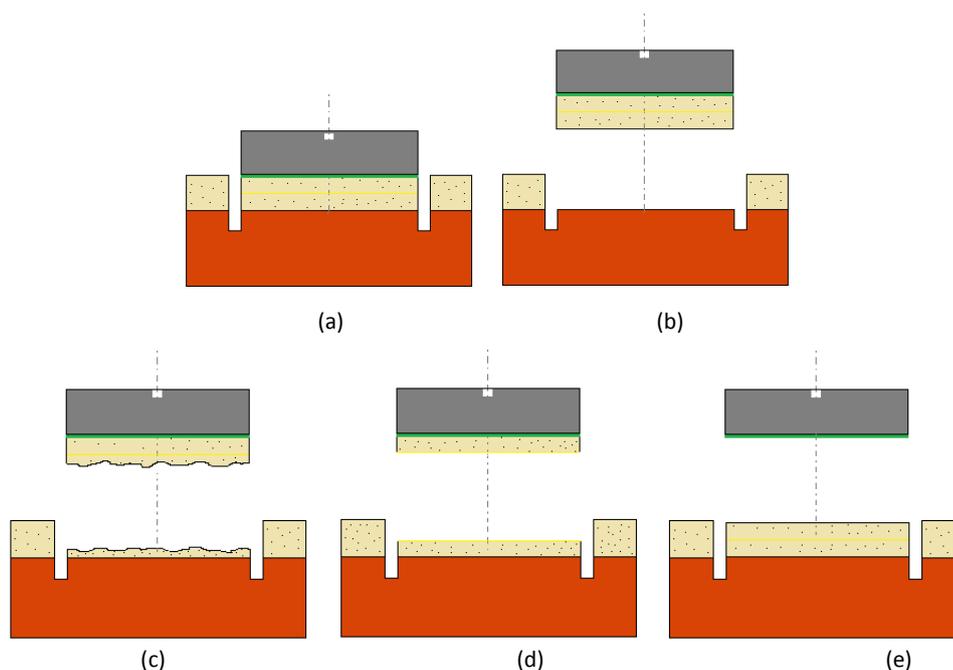


Figura 34 – Formas de rotura decorrentes do ensaio de aderência realizado sobre as zonas rebocadas: (a) zona rebocada antes da rotura; (b) rotura na interface suporte/1ª camada de emboço; (c) rotura no seio da 1ª. camada de emboço; (d) rotura na interface entre camadas de emboço; (e) rotura pela pastilha.

### 3.5.4. Avaliação qualitativa da carbonatação das caldas de injeção

As argamassas de cal aérea têm os seus processos de cura e ganho de presa dependentes da carbonatação. De acordo com o exposto na secção 2.3.2.1., sabe-se que, a carbonatação é uma reação química da cal hidratada com o dióxido de carbono presente no ar. Deste modo a calda de injeção vai desenvolvendo a sua resistência mecânica de forma lenta e gradual. O ensaio de carbonatação é uma forma simples e prática, embora não totalmente exata, de controlar e avaliar o processo de carbonatação do grout ao longo do seu tempo de cura.

Procedeu-se, assim, à avaliação qualitativa do grau de carbonatação dos *grouts* desenvolvidos aos 120 dias e logo após a ocorrência do destacamento decorrente da realização do ensaio de aderência. Para a realização do referido ensaio, utiliza-se a fenolftaleína como reagente. A fenolftaleína é um indicador químico que adquire cor rosa intensa em meio alcalino (pH superior a 8), ficando incolor em meio neutro ou ácido (figura 35). Num grout mais fresco predominará a cal hidratada, já num grout com maior tempo de cura predominará a cal carbonatada.



Figura 35 – Fenolftaleína e matriz de coloração.

Pulveriza-se, então, a superfície de destacamento com uma solução de fenolftaleína a 0,2% de concentração, por se considerar que 1% é uma concentração demasiado elevada para este tipo de material (figura 36 a). Uma vez que, o processo de carbonatação leva à redução do pH do grout, observam-se as alterações de cor, entre as zonas carbonatadas e não carbonatadas (figura 36 b).



Figura 36 – (a) Pulverização da superfície de destacamento com solução de fenolftaleína a 0,2% de concentração; (b) Coloração rosa das zonas não carbonatadas.

### 3.5.5. Avaliação da homogeneidade (Ultrassons)

O ensaio de ultrassons baseia-se numa técnica totalmente não destrutiva, e por isso muito útil. Traduz-se, essencialmente, na determinação da velocidade de propagação de um impulso ultrassónico, entre dois pontos, permitindo avaliar o comportamento mecânico do material ensaiado, o seu desempenho e a localização de eventuais zonas degradadas (existência de zonas ocas, com fissuras, fendas ou outras anomalias). É possível deste modo concluir acerca da homogeneidade interna do mesmo.

Sendo que a velocidade de propagação das ondas depende das propriedades elásticas do meio (GOMES, 1995b), esta será tanto maior quanto mais denso for o material, uma vez que estas se propagam através da vibração das partículas sólidas que o constituem.

No ensaio foi utilizado um equipamento do tipo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), que é responsável por emitir um impulso elétrico de baixa frequência ultrassónica. O impulso é, então, conduzido até um transmissor emissor e, depois de atravessar o provete, é captado por outro transmissor, este, recetor. Aqui é transformado novamente num impulso elétrico e conduzido de volta à unidade central.

Antes de se realizar o ensaio procedeu-se à calibração do aparelho utilizando uma barra padrão para a qual o tempo de propagação é conhecido. Esta operação consistiu em fazer coincidir a leitura do mostrador digital com o valor de referência para a barra padrão, através do botão de ajuste do aparelho. No caso do aparelho utilizado neste trabalho, o tempo de transição da barra padrão foi de 26.0 $\mu$ s.



Figura 37 – Medição da distância entre emissor e recetor e realização do ensaio de propagação de ondas ultrassónicas sobre a zona de reboco e sobre a zona onde se procede à injeção do *grout*.

O ensaio iniciou-se com a colocação dos transdutores sobre o provete, seguindo o método de transmissão indireta ou superficial. Foram sujeitas a análise duas zonas distintas do mesmo provete: uma sobre a área que apenas possui reboco, e outra sobre a área onde se procedeu à injeção do *grout*. A distância estabelecida entre emissor e recetor foi, para ambos os casos, de aproximadamente 13 cm (figura 37).

Salienta-se, ainda, que embora através do método de transmissão direta se consiga medir com maior exatidão o comprimento do percurso da onda, uma vez que a máxima energia do impulso é transmitida segundo a direção normal ao transdutor emissor; opta-se pelo método de transmissão indireta (NEPOMUCENO, 1999).

O tempo gasto no percurso é medido pela unidade central, permitindo assim calcular a velocidade já que a distância percorrida é conhecida pela equação (10).

$$v = \frac{t}{d} \quad (10)$$

Onde,

$v$  - velocidade aparente de propagação (km/s)

$d$  - distância entre transdutores (=130 mm, neste caso)

$t$  - tempo de transição entre transdutores ( $\mu$ s)

Os provetes foram ensaiados aos 28, 60 e 120 dias, tendo sido registados os respetivos tempos de propagação para as duas zonas supracitadas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Descrição geral

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos no decurso do processo experimental, relativamente aos *grouts* desenvolvidos, objeto de estudo da presente dissertação. É realizada uma análise detalhada sobre os parâmetros de caracterização dos *grouts* no estado fresco e no estado endurecido. São analisados os resultados decorrentes dos ensaios de consolidação de revestimentos com perda de aderência e também os que se referem à aferição do comportamento mecânico e capilaridade dos *grouts*.

### 4.2. Formulações de *grout* estudadas

De acordo com o exposto na secção 3.2 do presente trabalho, e no que diz respeito às formulações de *grout* estudadas, distinguem-se essencialmente quatro grandes grupos de amostras. Como já foi referido, este agrupamento foi estabelecido tendo em conta não só a composição das amostras, mas também os teores em que os diferentes materiais constituintes nelas figuram. Deste modo, e tendo como objetivo fundamental a análise do efeito da introdução de dois materiais pozolânicos (metacaulino e diatomite) e de um material mais fino (filler calcário) na composição dos *grouts* para consolidação de revestimentos com perda de aderência entre camadas, desenvolveu-se o estudo em quatro segmentos de análise:

- **AMOSTRAS DO GRUPO 1** - Estudo da influência da substituição do ligante (cal aérea) por 10, 20 e 30 % de Metacaulino / Diatomite.
- **AMOSTRAS DO GRUPO 2** - Estudo da influência da substituição do ligante (cal aérea) por 20 e 30 % de Metacaulino / Diatomite, e ainda, da influência da substituição do agregado (farinha de sílica) por 10% de filler calcário.
- **AMOSTRAS DO GRUPO 3** - Estudo da influência da substituição do agregado (farinha de sílica) por 1,5 e 3% de Metacaulino / Diatomite, e ainda, da influência da substituição do agregado por 10% de filler calcário.
- **AMOSTRAS DO GRUPO 4** - Estudo da influência da substituição do agregado (farinha de sílica) por 1,5 e 3% de Metacaulino / Diatomite, sem adição de filler calcário.

Este estudo comparativo permite inferir acerca dos efeitos dos aditivos pozolânicos (metacaulino e diatomite) nas composições deste tipo de *grouts*, quando são introduzidos em substituição de parte do agregado (farinha de sílica) ou de parte do ligante (cal aérea). As amostras de *grout* pertencentes aos grupos 2 e 3 permitem ainda concluir acerca da influência da substituição de parte do agregado (farinha de sílica) por 10% de filler calcário e da viabilidade de reduzir a percentagem de adjuvantes neste tipo de caldas de consolidação. As tabelas 17, 18, 19 e 20 contêm a apresentação de todas as formulações de *grout* desenvolvidas no âmbito do presente estudo, bem como a respetiva designação e teores dos elementos constituintes.

Tabela 17 – *Grouts* pertencentes aos 1º. Grupo de análise e respetiva designação.

Grupo 1: Metacaulino/Diatomite em substituição do ligante (cal aérea)						
Designação	Padrão	Componentes adicionados		Aplicação		
				Provetes prismáticos	Injeção	
<i>G1_AB</i>	GCA_13_50/60W	+		-	x	x
<i>G1_I</i>	GCA_13_50W			10MK_0,4EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	x
<i>G1_II</i>	GCA_13_50W			10MK_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	
<i>G1_III</i>	GCA_13_50/60W			20MK_0,4EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	x
<i>G1_IV</i>	GCA_13_50/60W			20MK_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	x
<i>G1_V</i>	GCA_13_50/60W			30MK_0,4EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	x
<i>G1_VI</i>	GCA_13_50/60W			30MK_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	x
<i>G1_VII</i>	GCA_13_50W			10Dia_0,4EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	
<i>G1_VIII</i>	GCA_13_50W			10Dia_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	
<i>G1_IX</i>	GCA_13_50/60W			20Dia_0,4EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	x
<i>G1_X</i>	GCA_13_50W			20Dia_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	
<i>G1_XI</i>	GCA_13_50/60W			30Dia_0,4EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	x
<i>G1_XII</i>	GCA_13_50W	30Dia_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x			

Tabela 18 – *Grouts* pertencentes ao 2º. Grupo de análise e respetiva designação.

Grupo 2: Metacaulino/Diatomite em substituição do ligante (cal aérea) e filler calcário em substituição do agregado (farinha de sílica)							
Designação	Padrão	Componentes adicionados		Aplicação			
				Provetes prismáticos	Injeção		
<i>G2_AB</i>	GCA_13_50W	+	+	10 FCA	-	x	
<i>G2_II</i>	GCA_13_50/60W			10 FCA	20MK	x	x
<i>G2_III</i>	GCA_13_50/60W			10 FCA	20Dia	x	x
<i>G2_IV</i>	GCA_13_50W			10 FCA	0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	
<i>G2_V</i>	GCA_13_50W			-	0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	
<i>G2_VI</i>	GCA_13_50W			10 FCA	20MK_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	
<i>G2_VII</i>	GCA_13_50W			10 FCA	20Dia_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	
<i>G2_VIII</i>	GCA_13_50/60W			10 FCA	30MK	x	x
<i>G2_IX</i>	GCA_13_50/60W			10 FCA	30Dia	x	x
<i>G2_X</i>	GCA_13_50/60W			10 FCA	30MK_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	x
<i>G2_XI</i>	GCA_13_50W			10 FCA	30Dia_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x	

Tabela 19 – Grouts pertencentes ao 3º. Grupo de análise e respetiva designação.

Grupo 3: Metacaulino/Diatomite e filler calcário em substituição do agregado (cal aérea)					
Designação	Padrão	Componentes adicionados		Aplicação	
				Provetes prismáticos	Injeção
G3_I	GCA_13_50/60W	10FCA		1,5MKfs	x x
G3_II	GCA_13_50/60W	10FCA		3MKfs	x x
G3_V	GCA_13_50/60W	10FCA	+	1,5MKfs_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x x
G3_VI	GCA_13_50/60W	10FCA		3MKfs_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x x

Tabela 20 – Grouts pertencentes ao 4º. Grupo de análise e respetiva designação.

Grupo 4: Metacaulino/Diatomite em substituição do agregado (cal aérea) sem adição de filler calcário					
Designação	Padrão	Componentes adicionados		Aplicação	
				Provetes prismáticos	Injeção
G4_I	GCA_13_50/60W			1,5MKfs	x x
G4_II	GCA_13_50/60W			3MKfs	x x
G4_III	GCA_13_50/60W			1,5Diafs	x x
G4_IV	GCA_13_50/60W			3Diafs	x x
G4_V	GCA_13_50/60W		+	1,5MKfs_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x x
G4_VI	GCA_13_50/60W			3MKfs_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x x
G4_VII	GCA_13_50W			1,5Diafs_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x
G4_VIII	GCA_13_50W			3Diafs_0,5EC_1GS_0,5A <sub>33</sub>	x

## NOTAS:

GCA\_13: grout de cal aérea com traço 1:3 em volume

W (\*): % de água de amassadura (50% para os provetes prismáticos e 60% para as caldas de injeção propriamente ditas)

MK/Dia: % de metacaulino e de diatomite em substituição do ligante (cal aérea)

MKfs/Diafs: % de metacaulino e de diatomite em substituição do agregado (farinha de sílica)

FCA: % de filler calcário em substituição do agregado (farinha de sílica)

EC: % de éter de celulose (agente retentor de água)

GS: % de gluconato de sódio (fluidificante/plastificante)

A<sub>33</sub>: % de acril 33 (agente adesivo)

### 4.3. Caracterização das caldas de cal (grouts)

#### 4.3.1. Avaliação das características das caldas no estado fresco

##### 4.3.1.1. Determinação da consistência por espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado para as diferentes formulações dos grouts pertencentes aos grupos de amostras 1 e 2. Pretendeu-se com este ensaio, avaliar unicamente se as caldas de injeção desenvolvidas se encontram dentro dos parâmetros de trabalhabilidade

exigidos para as argamassas de substituição utilizadas na reabilitação de edifícios antigos. Partindo de uma quantidade de água de amassadura pré-definida em estudos reológicos preliminares (AZEITEIRO, 2011), correspondente a 50% do peso total de sólidos, é possível obter os valores de espalhamento que constam das tabelas do Anexo A. Da análise dos resultados obtidos, pode concluir-se que os *grouts* apresentam espalhamentos finais situados no intervalo de 230 a 260 mm. Com espalhamentos dentro destes intervalos, foi possível obter *grouts* homogêneos, coesos e com boa trabalhabilidade, comprovando, por isso, que a quantidade de água de amassadura inicialmente usada é adequada. A necessidade de tornar estes *grouts* mais fluidos e com melhor capacidade de injeção para a realização dos ensaios de consolidação de revestimentos, resultou no aumento da percentagem da água de amassadura de 50 para 60%. Assim, foi possível assegurar condições de injetabilidade bastante satisfatórias, dando cumprimento aos requisitos especificados para este tipo de caldas.

### **4.3.2. Avaliação das características físicas dos *grouts* no estado endurecido**

#### **4.3.2.1. Resistência mecânica à flexão e à compressão**

Os resultados obtidos para a resistência mecânica à flexão e à compressão dos quatro grupos de amostras constam das tabelas do Anexo B. Segundo (VEIGA, 2003) a resistência à flexão deve estar compreendida entre 0,2 e 0,7 MPa e a resistência à compressão deve situar-se entre 0,4 e 2,5 MPa. Importa ainda referir que não foi possível realizar estes ensaios sobre alguns provetes uma vez que fraturaram previamente não apresentando comprimento mínimo. Este facto decorre da presença de uma grande percentagem de água nas composições. De seguida far-se-á uma análise detalhada para cada um dos grupos em estudo nos pontos 1, 2, 3 e 4.

#### **1. Grupo 1 - SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE (CAL AÉREA) POR METACAULINO E DIATOMITE (10, 20 e 30%)**

##### ***Resultados gerais – grupo 1:***

Através da análise gráfica dos resultados obtidos para os ensaios mecânicos de resistência à compressão e à flexão (figura 38), é possível constatar que os valores de resistência à flexão se encontram maioritariamente dentro do intervalo pretendido, ou seja, entre os 0,2 e os 0,7 MPa. Excetuam-se as formulações (G1\_III; G1\_VII; G1\_X e G1\_XI) que aos 120 dias revelam ainda valores abaixo dos 0,2 MPa.

Relativamente à compressão é possível constatar, pela análise da mesma figura, que os valores de resistência tendem a decrescer com o aumento da idade dos provetes, registando-se um valor máximo, maioritariamente, aos 60 dias. Para esta idade todos os provetes apresentam resistência mecânica à compressão dentro dos limites pretendidos, ou seja, entre 0,4 e 2,5 MPa.

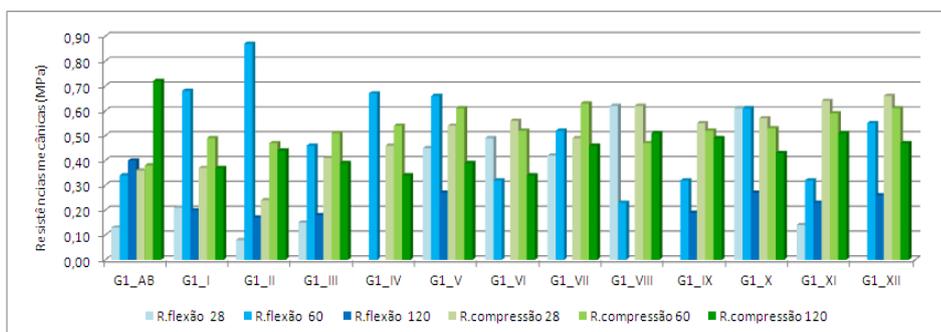


Figura 38 - Gráfico geral de resistências mecânicas à flexão e compressão englobando todas as composições testadas referentes ao Grupo 1.

### ***Efeito do metacaulino e da diatomite sobre a resistência mecânica à flexão e à compressão – grupo 1:***

Nos gráficos das figuras 39 e 40, mostra-se o efeito da variação do teor de metacaulino e de diatomite em (10, 20 e 30%), sobre a resistência mecânica à flexão e à compressão das formulações de *grout* pertencentes ao primeiro grupo de amostras.

Observando particularmente a figura 39, é possível constatar que a resistência mecânica à flexão e à compressão, para as composições de metacaulino, aumenta genericamente com o aumento da percentagem deste aditivo até aos 60 dias de idade.

Aos 120 dias verifica-se um decréscimo das resistências mecânicas de flexão e compressão, à medida que aumenta a percentagem de metacaulino.

É interessante observar este facto, já que evidencia o efeito tardio desta pozolana sobre as resistências mecânicas que serão potenciadas para idades de cura mais avançadas. Seria, por isso, de todo o interesse prolongar esta análise para tempos de cura superiores a 120 dias em estudos posteriores.

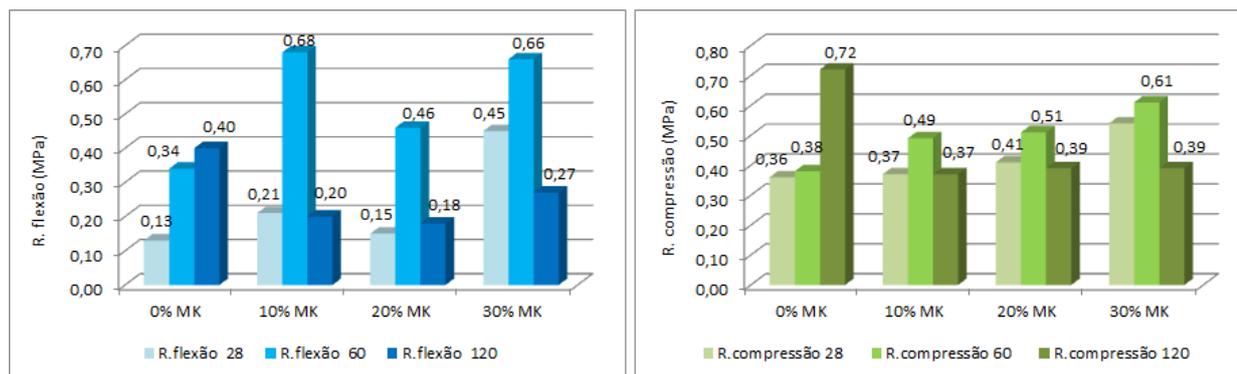


Figura 39 - Efeito da variação da percentagem de metacaulino (Argical 1200) sobre as resistências mecânicas de flexão e compressão para os 28, 60 e 120 dias.

A título comparativo, e para melhor perceber o efeito destas pozolanas nos *grouts* como substitutas de parte do ligante, analisaram-se as resistências mecânicas de flexão e compressão do *grout* base (G1\_AB). Neste, não existe qualquer percentagem de aditivos pozolânicos (0% de Metacaulino e 0% de Diatomite). Observa-se, então, que a resistência mecânica de compressão e flexão, para o *grout* base se revela sempre crescente ao longo do tempo. O *grout* base apresenta, assim, aos 120 dias de cura, uma resistência mecânica de flexão máxima igual a 0,40 MPa e de compressão igual a 0,72 MPa. Estas resistências estão dentro do intervalo pretendido para uma argamassa de substituição (VEIGA, 2003).

O *grout* que revela maior resistência à flexão face à base é aquele em que a percentagem de metacaulino ronda os 10% (G1\_I) e verifica-se para os 60 dias de idade, atingindo os 0,68 MPa. Para maiores percentagens desta pozolana, as resistências mecânicas à flexão decrescem relativamente à base.

Observando agora a figura 40, referente às composições em que a diatomite é a pozolana escolhida como aditivo, constata-se que, para uma percentagem igual a 10% (G1\_VII), a resistência mecânica à flexão é mais elevada, atingindo os 0,52 MPa aos 60 dias. É possível ainda verificar, que de uma forma geral, a resistência de flexão é máxima para as composições de diatomite aos 60 dias de idade tal como acontecia para as composições de metacaulino. Alcançam-se, deste modo, resistências à flexão, de 0,32 MPa para os *grouts* com 20 e 30% de diatomite em substituição do ligante (cal aérea), formulações (G1\_IX e G1\_XI, respetivamente).

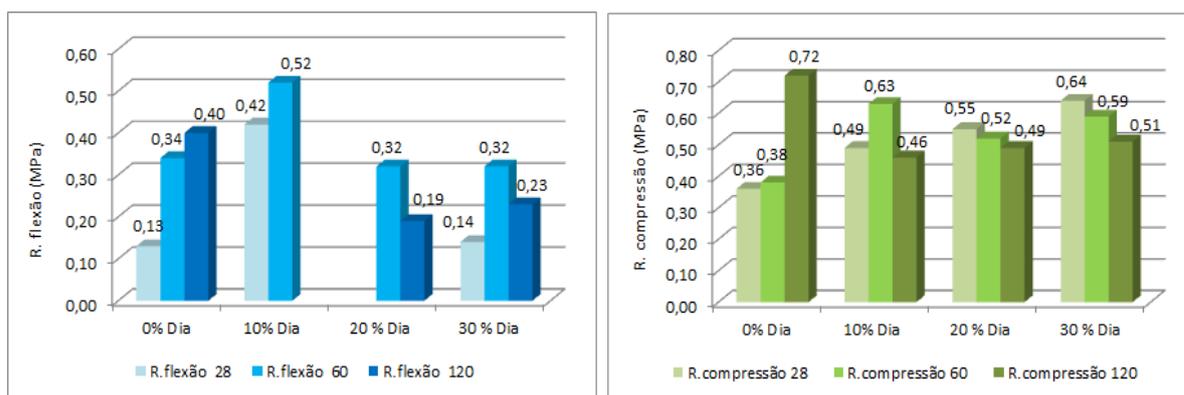


Figura 40 - Efeito da variação da percentagem de diatomite sobre as resistências mecânicas à flexão e compressão para os 28, 60 e 120 dias.

Salienta-se ainda, da análise da figura 40, que todos os *grouts* têm a sua resistência mecânica à compressão melhorada à medida que a percentagem de aditivo pozolânico (diatomite) aumenta de 10 para 30%. Regista-se ainda um ligeiro decréscimo desta resistência dos 60 para os 120 dias de cura. Seria interessante realizar ensaios mecânicos sobre estas composições para idades de cura superiores, a fim de perceber se a atividade pozolânica deste aditivo não tem o seu efeito esgotado. A resistência máxima de compressão é obtida para o *grout* com 30% de diatomite (G1\_XI) sendo de 0,51 MPa para os 120 dias de idade.

#### ***Efeito do éter de celulose sobre a resistência mecânica à flexão e à compressão – grupo 1:***

Neste item, pretende avaliar-se o efeito dos adjuvantes, nomeadamente de um agente retentor de água sobre as propriedades mecânicas dos *grouts* pertencentes ao primeiro grupo de amostras, ou seja, para os *grouts* em que o metacaulino e a diatomite foram introduzidos como substitutos de parte do ligante.

O agente retentor de água utilizado foi o Walocel MK 100000PF30, que é um derivado do metilhidroxipropil de celulose (MHPC), aqui abreviadamente designado por éter de celulose.

Para fins comparativos, foi adicionado ao *grout* base uma percentagem de éter de celulose correspondente a 0,5%, em comunhão com 1% de gluconato de sódio (agente plastificante) e 0,5% de acril 33 (agente adesivo).

A figura 41 permite estabelecer a comparação entre um *grout* base sem qualquer percentagem de adjuvantes (G1\_AB) e um *grout* ao qual foi adicionado o conjunto de adjuvantes, nas percentagens supracitadas (G2\_V).

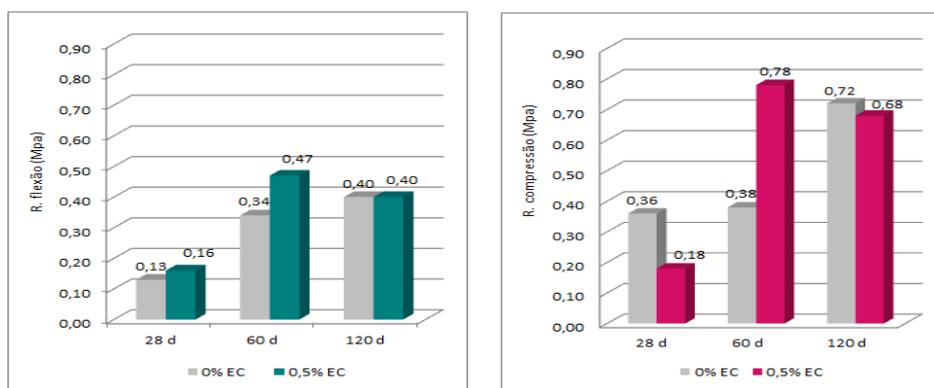


Figura 41 - Efeito do éter de celulose sobre as propriedades mecânicas do *grout* base.

É possível constatar que a adição de um agente retentor de água, como é o caso do éter de celulose, numa percentagem de 0,5%, sobre a base permite obter uma majoração da resistência mecânica à flexão para as três idades de ensaio (28, 60 e 120 dias). Este aumento é mais significativo para os 60 dias e bastante mais ténue para os 28 e 120 dias. Aos 60 dias o éter de celulose proporciona um aumento do valor da resistência mecânica de flexão de 0,34 MPa para os 0,47 MPa, logo correspondente a um incremento de 0,13 MPa.

No que respeita à resistência mecânica à flexão é possível verificar que a adição de 0,5% de éter de celulose ao *grout* base (sem adjuvantes), resulta numa melhoria da mesma, apenas para os 60 dias de idade, já que para os 28 e 120 dias o seu efeito é minorativo. Percebe-se ainda, pela análise da figura 41 que o valor de resistência máxima à compressão ocorre também para os 60 dias de cura, onde a introdução do agente retentor de água facultava um aumento da mesma, dos 0,38 para os 0,78 MPa. Conclui-se, assim, que a adição de 0,5% de éter de celulose sobre o *grout* base analisado, traduz um incremento de 0,40 MPa, sobre a sua resistência mecânica de compressão, o que bastante assinalável.

Complementando o estudo do efeito deste agente retentor de água, sobre os *grouts* desenvolvidos no âmbito do presente grupo de amostras, é possível inferir, também, acerca da influência da adição de diferentes percentagens de éter de celulose sobre as composições de metacaulino e diatomite. Fez-se, então, variar as percentagens de éter de celulose de 0,4 para 0,5%, por forma a perceber se esta variação é perceptível nas propriedades mecânicas dos *grouts* analisados.

Segue-se uma análise do efeito gerado sobre as composições de metacaulino (figura 42) e sobre as composições de diatomite (figura 43).

Atentando nos gráficos da figura 42, é perceptível que a adição de maior percentagem de éter de celulose (de 0,4 para 0,5%), sobre as diferentes composições em que o metacaulino figura como substituto de parte do ligante, permite obter um aumento das resistências mecânicas à

flexão para os *grouts* com 10 e 20% de metacaulino, aos 60 dias de cura (composições G1\_I/G1\_II e G1\_III/G1\_IV, designadamente).

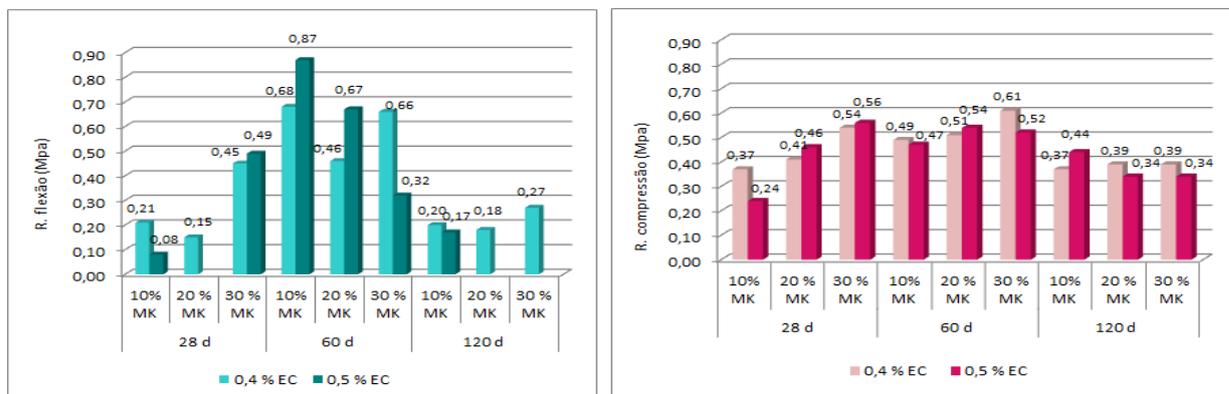


Figura 42 – Efeito do éter de celulose sobre as propriedades mecânicas das composições de metacaulino – grupo 1.

O valor máximo registado para a flexão, diz respeito ao *grout* com 10% de metacaulino no ligante e 0,5% de éter de celulose (G1\_II) aos 60 dias de cura e é de 0,87 MPa. Este valor encontra-se acima do limite máximo desejado, ou seja acima dos 0,7 MPa. Destaca-se, por isso, a composição com 20% de metacaulino no ligante e 0,5% de éter de celulose (G1\_IV), que aos 60 dias de cura, apresenta um valor de resistência à flexão de 0,67 MPa, já aceitável face ao pretendido.

No domínio da resistência mecânica à compressão e, pela análise da figura 42, entende-se que o efeito do aumento da percentagem de éter de celulose de 0,4 para 0,5%, não surte um efeito relevante.

Da análise da figura 43, é possível observar que para as composições diatomíticas a resistência mecânica à flexão aumenta na generalidade das amostras com o acréscimo das percentagens de éter de celulose de 0,4 para 0,5%. Para os 60 dias de cura, a influência desta variação é bastante mais notória, nomeadamente para os *grouts* com 20 e 30% de diatomite em substituição do ligante (G1\_IX/G1\_X e G1\_XI/G1\_XII, respetivamente). O aumento da percentagem do agente retentor de água de 0,4 para 0,5 % permite obter uma majoração da resistência à flexão de 0,32 para 0,61 MPa para o grout com 20% de diatomite (G1\_IX/G1\_X), mantendo-o ainda em conformidade com parâmetros exigidos, ou seja até aos 0,7 MPa. Relativamente à resistência à compressão, a variação da percentagem deste agente retentor de água, de 0,4 para 0,5 %, parece não ser um elemento determinante, já que as variações observadas são muito ténues, tal como acontecia para o metacaulino.

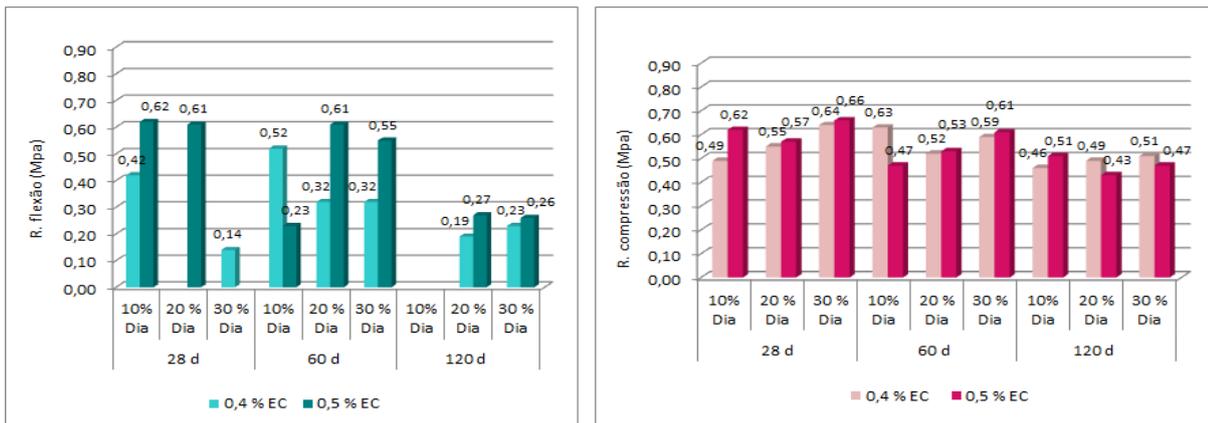


Figura 43 – Efeito do éter de celulose sobre as propriedades mecânicas das composições de diatomite – grupo 1.

## 2. Grupo 2 - SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE (CAL AÉREA) POR METACAULINO E DIATOMITE (20 e 30%) E DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR FILLER CALCÁRIO (10%)

### Resultados gerais – grupo 2:

Os *grouts* desenvolvidos no âmbito do presente grupo de análise, encontram como elemento de diferenciação face ao primeiro grupo, o facto de se ter introduzido 10% de filler calcário em substituição da mesma percentagem do agregado, ou seja, da farinha de sílica. Pretende-se, neste ponto, perceber quais foram as alterações geradas, em virtude desta substituição, nas propriedades resistentes dos *grouts*, já que o filler calcário se caracteriza por uma granulometria mais fina do que a farinha de sílica. O gráfico da figura 44 apresenta os resultados gerais das propriedades resistentes de todas as composições de *grouts* ensaiadas neste grupo, referentes aos 28, 60 e 120 dias de cura.

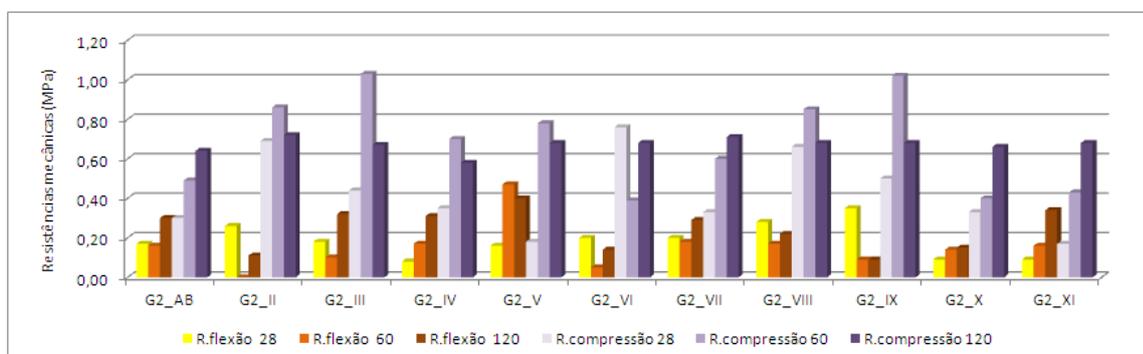


Figura 44 – Gráfico geral de resistências mecânicas de flexão e compressão englobando todas as composições testadas referentes ao Grupo 2.

Através de uma leitura geral do mesmo gráfico percebe-se claramente que os resultados de resistência mecânica à flexão para este tipo de composições são bastante baixos, sendo a

composição que apresenta melhores resultados neste domínio a G2\_V (0% de filler calcário) aos 60 e 120 dias de idade. A maioria das composições revela uma resistência à compressão abaixo da mínima estabelecida para as argamassas de substituição, ou seja dos 0,2 MPa. No que se refere à compressão alcançam-se para este grupo, resistências mais elevadas (comparativamente com o 1º grupo de amostras). A grande maioria revela, já aos 60 dias de cura, ter alcançado os 0,4 MPa, o que é um bom indicador. De seguida faz-se uma análise detalhada do efeito de cada elemento sobre as propriedades mecânicas destes *grouts*.

***Efeito do filler calcário em substituição do agregado sobre as resistências mecânicas de flexão e compressão – grupo 2:***

De facto ao introduzir o elemento filler na formulação das amostras deste grupo, em substituição de parte do agregado (10%), aumenta-se a percentagem de finos na mistura. O filler calcário, em virtude de ser constituído por partículas de menor dimensão (face à farinha de sílica), possui uma elevada superfície específica que poderá resultar num efeito plastificante sobre os *grouts*. Ora, à medida que aumenta a percentagem de agregados finos nestas misturas, ganha-se em trabalhabilidade, mas perde-se notoriamente na fissuração dos provetes. Este facto, foi bastante evidente no decorrer dos ensaios de resistência mecânica, visto os provetes fissurarem muito facilmente com a sua simples manipulação, ou ainda durante o processo de cura no interior da sala de condicionamento.

Visando efetuar uma análise comparativa, entre um *grout* base (sem qualquer adição de filler calcário) e outro equivalente (no qual este elemento figure como substituto de parte do agregado, 10%) sugere-se a análise da figura 45. Pela sua observação, constata-se que a resistência mecânica à flexão do *grout* com 10% de filler calcário no agregado (G2\_AB), parece aumentar, ainda que ligeiramente aos 28 dias, face à formulação base, na qual este material não foi utilizado (G1\_AB). No entanto, com o avanço do processo de cura, esta tendência reverte-se claramente. Assim, o *grout* base sem filler calcário apresenta valores de resistência mecânica à flexão superiores, sendo o seu máximo alcançado aos 120 dias de cura e igual a 0,40 MPa. Ressalva-se ainda que, o *grout* com 10% de filler calcário no agregado, respeita o limite mínimo de resistência à flexão, apenas para os 120 dias de idade, onde atinge os 0,30 MPa.

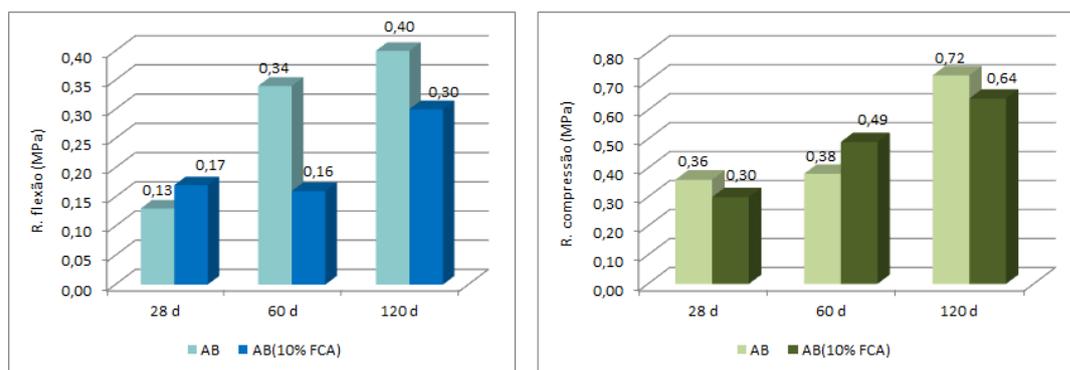


Figura 45 – Efeito da substituição de 10% do agregado, pela mesma percentagem de filler calcário sobre as propriedades mecânicas dos *grouts* do grupo 2.

O efeito do filler calcário em substituição do agregado, sobre a capacidade resistente à compressão, não é tão notório visto, não provocar variação significativa nos resultados obtidos face ao *grout* na qual a substituição de parte do agregado por um material de menor granulometria não foi feita. É de notar ainda que para os 60 e 120 dias de cura, se alcançam os requisitos mínimos neste âmbito, ou seja os 0,4MPa. A resistência máxima de compressão é registada para os 120 dias, e é de cerca de 0,60 MPa, sendo satisfatória mas algo baixa.

### ***Efeito do metacaulino e da diatomite sobre a resistência mecânica de flexão e compressão – grupo 2:***

Pretende-se, neste item, efectuar uma análise do efeito da variação das percentagens de metacaulino e diatomite em 20 e 30 % no ligante, quando se procede simultaneamente à substituição de parte do agregado (10%), por um material mais fino, como é o caso do filler calcário. Para tal procede-se, nas figuras 46 e 47, à análise comparativa das amostras representativas neste domínio.

Para os *grouts* de metacaulino (figura 46), o aumento das percentagens desta pozolana de 20 para 30%, provoca um acréscimo da resistência mecânica de flexão. O valor máximo desta resistência é alcançado pelo *grout* com 30% de metacaulino em substituição do ligante e 10% de filler calcário em substituição do agregado (G2\_VIII), sendo de 0,28 MPa aos 28 dias, e de 0,22 MPa aos 120 dias. É interessante observar, mais uma vez, o efeito tardio da atividade pozolânica do metacaulino, que após um decréscimo da resistência mecânica para os 60 dias, volta a proporcionar o seu aumento para os 120 dias de cura.

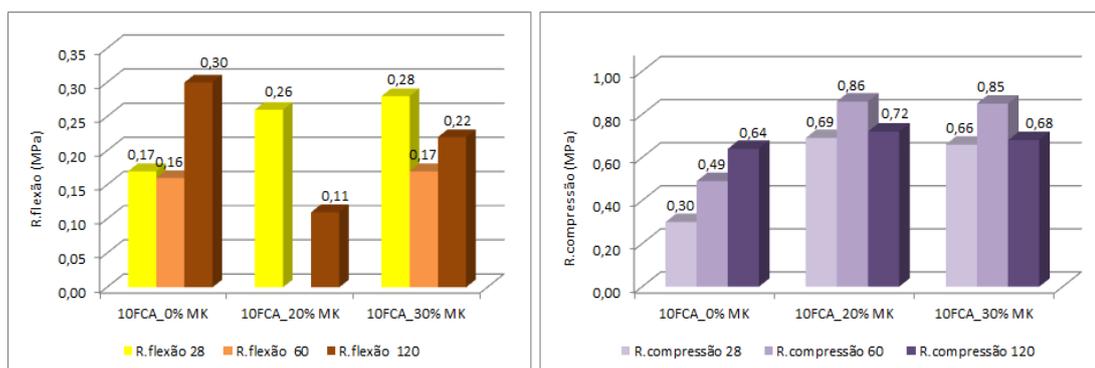


Figura 46 – Efeito da variação da percentagem de metacaulino (Argical 1200) sobre as resistências mecânicas à flexão e compressão para os 28, 60 e 120 dias, referentes aos *grouts* do grupo 1.

No que concerne à capacidade resistente de compressão, e ainda para os *grouts* com metacaulino (figura 46), percebe-se que, o aumento da percentagem deste aditivo (de 0 a 30%) resulta num aumento das propriedades resistentes durante a evolução do processo de cura.

Refere-se ainda, que este efeito é bastante notório até aos 60 dias de idade e existe depois uma estagnação do mesmo. O valor máximo de resistência à compressão destes *grouts*, regista-se para aquele em que o metacaulino substitui 20% do ligante, com 10% de filler calcário no agregado (G2\_II) aos 60 dias, e é de 0,86 MPa, estando em conformidade com o intervalo de valores tido como aceitável (VEIGA, 2003).

Atentando agora sobre os *grouts* com 10% de filler calcário no agregado e 20% (G2\_III) a 30% (G2\_IX) de diatomite no ligante (figura 47), é possível perceber que o aumento da percentagem desta pozolana em substituição do ligante de (0 para 30%) se traduz num aumento da resistência mecânica à flexão para os 28 dias de idade.

À medida que o processo de cura do *grout* vai decorrendo, este efeito reverte-se. Assim, aos 60 dias de cura, os *grouts* diatomíticos apresentam menores resistências mecânicas com o aumento da percentagem deste aditivo.

Neste domínio, destaca-se a composição com 10% de filler calcário e 20% de diatomite (G2\_III), que apresenta um notório ressaltado na sua resistência de flexão dos 60 para os 120 dias, alcançando um valor satisfatório para a mesma, correspondente a 0,32 MPa. Este fenómeno prende-se mais uma vez com o efeito tardio da atividade pozolânica deste aditivo nas resistências mecânicas.

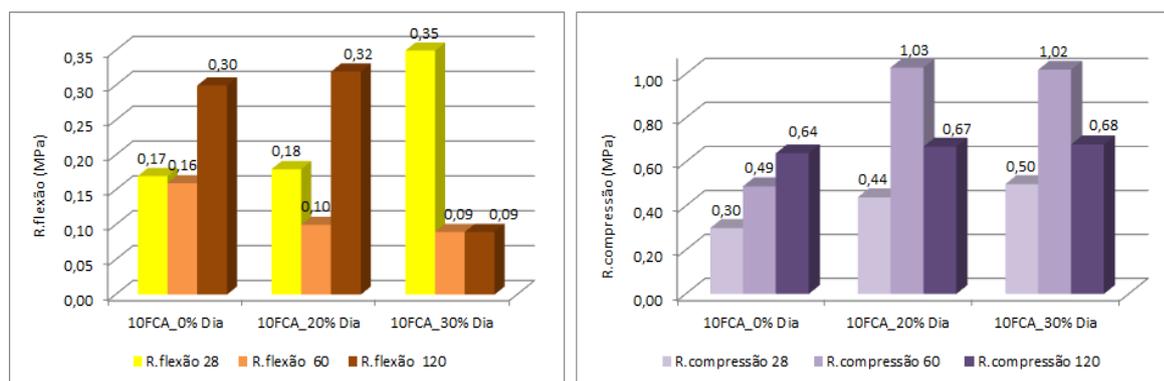


Figura 47 – Efeito da variação da percentagem de diatomite sobre as resistências mecânicas de flexão e compressão para os 28, 60 e 120 dias, referentes aos *grouts* do grupo 2.

Pela interpretação dos resultados nos ensaios de resistência à compressão sobre os *grouts* diatomíticos do grupo 2 (figura 47), é possível verificar que o aumento da percentagem de diatomite em substituição do ligante de (0 para 30%) num *grout* com 10% de filler calcário no agregado, se traduz num aumento significativo das resistências mecânicas de compressão até aos 60 dias de cura, onde se registam os valores máximos de 1,03 e 1,02 MPa para os 20 e 30% de diatomite, respetivamente. Estes valores encontram-se dentro do intervalo definido como aceitável para as argamassas de substituição (VEIGA, 2003).

#### ***Efeito dos adjuvantes sobre a resistência mecânica de flexão e compressão – grupo 2:***

Pretendendo efetuar uma análise comparativa das características mecânicas entre um *grout* base, sem qualquer introdução de adjuvantes (G2\_AB), e outro, idêntico (G2\_IV), ao qual foi adicionado um agente retentor de água (0,5% de éter de celulose), um agente plastificante (1% de gluconato de sódio) e um agente adesivo (0,5% de acril 33), procede-se à interpretação dos resultados patentes na figura 48.

É notório, que os adjuvantes referidos, não surtem qualquer efeito benéfico na resistência mecânica à flexão quando adicionados ao *grout* base com 10% de filler calcário (G2\_AB). Para ambos os *grouts* comparados (com e sem adjuvantes), percebe-se que, apenas para os 120 dias de cura é que se atingem as resistências mínimas de flexão estabelecidas para as argamassas de substituição, designadamente, os 0,2 MPa.

No entanto, a introdução destes adjuvantes, nestas percentagens, parece fomentar o acréscimo da resistência mecânica à compressão aos 28 e 60 dias de cura, ainda que de forma ligeira. Importa também referir, que o valor da resistência mínima de compressão exigido (0,4MPa), é cumprido pelas duas composições para os 60 e 120 dias de cura, sendo que o valor máximo é registado para o *grout* com adjuvantes aos 60 dias (G2\_IV) e é de 0,70 MPa.

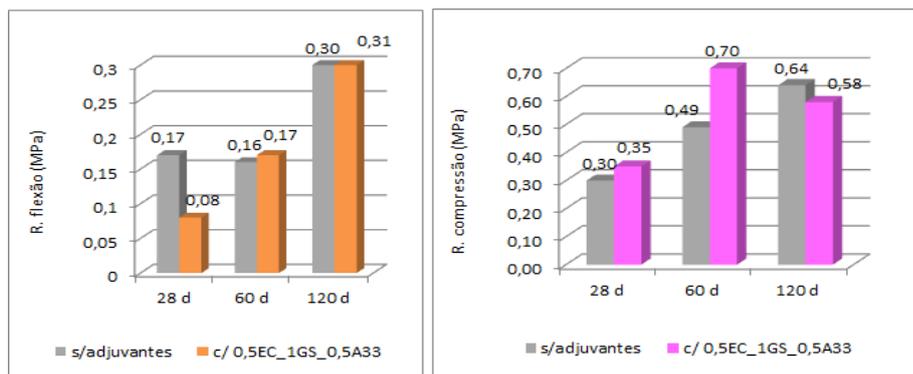


Figura 48 – Efeito da introdução de adjuvantes sobre as propriedades mecânicas do *grout* base com 10 % de filler calcário em substituição do agregado – grupo 2.

Para complementar o estudo da influência da introdução destes adjuvantes nos *grouts* deste grupo de análise, conclui-se ainda acerca do efeito dos mesmos, quando o *grout* apresenta não só o filler calcário no agregado, mas também o metacaulino ou a diatomite no ligante. Os resultados obtidos para as formulações representativas nesta abordagem, constam dos gráficos das figuras 49 e 50, respetivamente.

Depreende-se, que a adição dos referidos adjuvantes sobre as composições de metacaulino (figura 49) não é favorável, já que se obtêm maioritariamente resistências mecânicas de flexão extremamente insuficientes e mais baixas do que as obtidas para os *grouts* sem introdução de adjuvantes.

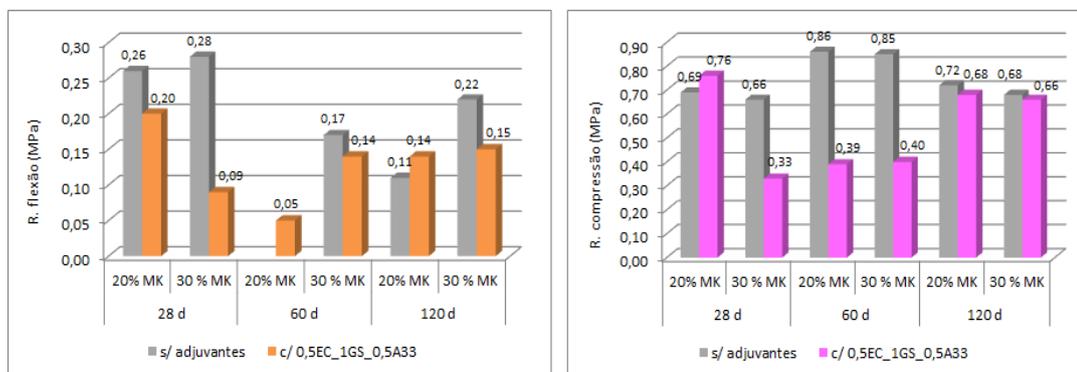


Figura 49 – Efeito da introdução de adjuvantes sobre as propriedades mecânicas das composições de metacaulino com 10% de filler calcário em substituição do agregado – grupo 2.

A exceção, corresponde ao *grout* com 20% de metacaulino e 10% de filler calcário que aos 120 dias de cura, que têm a sua resistência mecânica de flexão aumentada de 0,11 para 0,14 MPa, no entanto, estas resistências são notoriamente insuficientes. A máxima resistência de flexão aos 120 dias, obtém-se para uma argamassa com 30 % de metacaulino e 10% de filler calcário sem adjuvantes (G2\_VIII), sendo próxima dos 0,22 MPa.

É notório, também pela análise da figura 49, que a introdução de adjuvantes, nas referidas percentagens, sobre as composições de metacaulino do grupo 2, não promove benefícios nos

valores de resistência mecânica à compressão obtidos, uma vez que é de uma forma geral, minorativa dos mesmos.

Analisando, agora os *grouts* diatomíticos do 2º. Grupo de amostras, e a fim de perceber de que forma a introdução dos adjuvantes referidos, interfere nas propriedades resistentes, propõe-se a observação da figura 50.

Quando se procede à introdução de adjuvantes como o éter de celulose, o gluconato de sódio e o acril 33 nas percentagens já anteriormente referidas, sobre as composições de diatomite com 10% de filler calcário em substituição do agregado, verifica-se que ocorre um aumento das propriedades resistentes à flexão para a maioria das formulações comparadas. Certo é, também, que as composições com adjuvantes têm a sua resistência mecânica de flexão crescente ao longo do tempo de cura. O mesmo não se verifica para os *grouts* sem adjuvantes. Neste âmbito, a resistência máxima de flexão aos 120 dias, é obtida para o *grout* com adjuvantes, com 30% de diatomite no ligante e 10% de filler calcário no agregado (G2\_XI, designadamente) e é de 0,34 MPa, cumprindo o mínimo desejado.

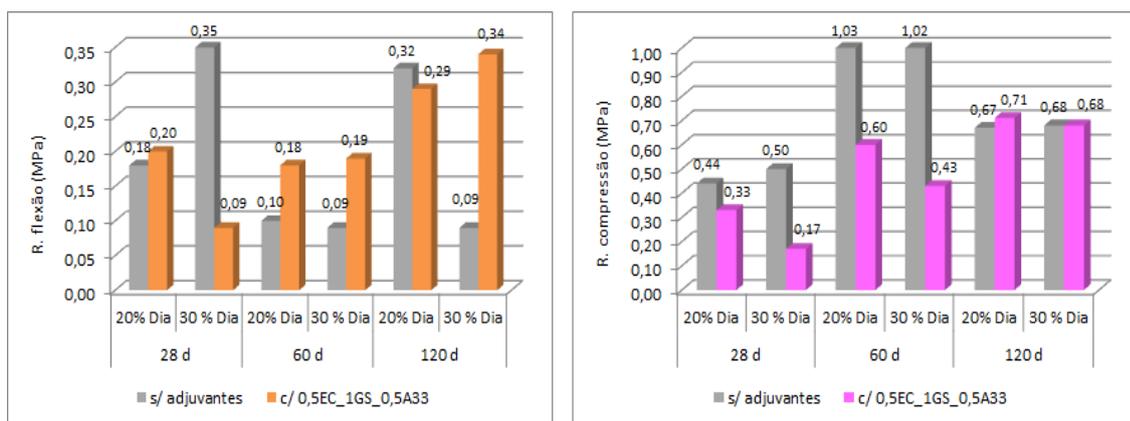


Figura 50 – Efeito da introdução de adjuvantes sobre as propriedades mecânicas das composições de diatomite com 10% de filler calcário em substituição no agregado – grupo 2.

### 3. Grupo 3 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR METACAULINO (1,5 E 3%) E AINDA POR FILLER CALCÁRIO (10%)

#### Resultados gerais – grupo 3:

Os *grouts* deste grupo, caracterizam-se pela substituição do agregado (farinha de sílica) por diferentes percentagens de aditivo pozolânico (1,5 e 3% de metacaulino e diatomite), numa base com 10% de filler calcário em substituição do agregado. Pretende-se avaliar, assim, quais os efeitos gerados nos *grouts* se, ao invés de se proceder à introdução do metacaulino e

da diatomite no ligante (como acontecia no grupo 1 e 2), se proceder, antes, à introdução dos mesmos aditivos pozolânicos na fração dos agregados.

No gráfico da figura 51, apresentam-se os resultados gerais para o presente grupo de amostras, no que às resistências mecânicas diz respeito.

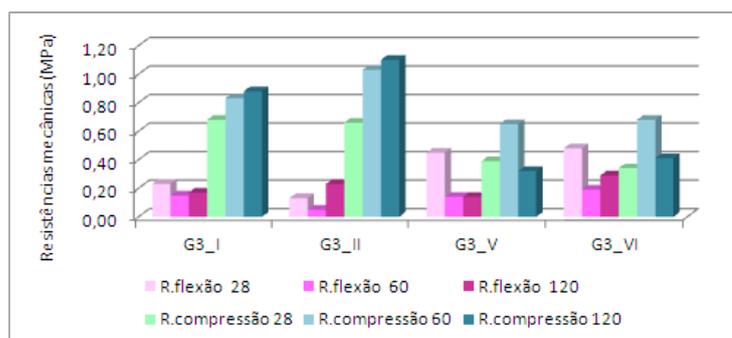


Figura 51 – Gráfico geral de resistências mecânicas englobando todas as composições testadas referentes ao Grupo 3.

De uma forma geral, a resistência mecânica de flexão obtida, quando se procede à substituição de parte do agregado (1, 5 e 3%) pelos aditivos pozolânicos (metacaulino e diatomite), é maioritariamente baixa, cumprindo apenas os requisitos mínimos, de 0,2 MPa, as amostras G3\_V e G3\_VI, aos 28 dias de cura. No entanto, são estas amostras que revelam menor desempenho quando ensaiadas à compressão. De facto, as resistências de compressão são bastante superiores para as amostras G3\_I e G3\_II que alcançam os 0,4MPa mínimos, estabelecidos para as três idades de ensaio. Procede-se nos itens seguintes, a uma análise mais detalhada, no que às resistências mecânicas diz respeito.

### ***Efeito do metacaulino como substituto do agregado, sobre a resistência mecânica de flexão e compressão – grupo 3:***

Ao ser adicionado o metacaulino nas formulações de *grout*, como elemento substituto de parte do agregado (em 1,5 e 3%), é possível perceber, através da figura 52, que o aumento desta percentagem não influi positivamente na capacidade resistente dos *grouts* à flexão. Ao aumentar a percentagem de substituição desta pozolana no agregado, de 0 para 3%, verifica-se que a resistência mecânica de flexão tende a diminuir. O valor máximo de resistência à flexão é obtido para o *grout* com 0% de metacaulino e 10% de filler calcário em substituição do agregado aos 120 dias de cura, e é de 0,30MPa, cumprindo os requisitos mínimos. Não obstante, importa analisar os *grouts* em que o metacaulino substitui parte do agregado em conjunto com o filler calcário, e inferir acerca da sua influência. Sendo assim, o *grout* que evidencia melhor desempenho mecânico à flexão, é aquele no qual a percentagem de

metacaulino no agregado toma o valor de 3% (G3\_II). Embora ocorra, para este *grout*, um ressalto na resistência mecânica de flexão dos 28 para os 120 dias (devido ao efeito pozolânico do metacaulino se revelar tardio), o valor alcançado para os 120 dias de idade encontra-se já, dentro dos limites mínimos preconizados (VEIGA, 2003), sendo de 0,23MPa.

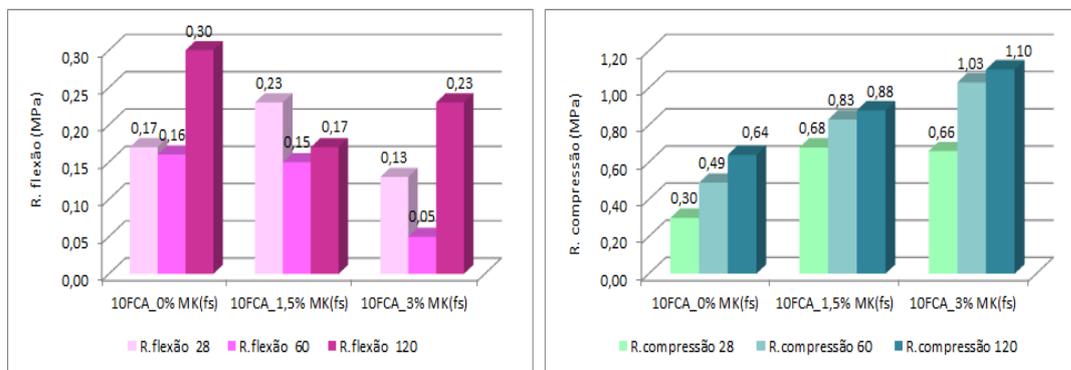


Figura 52 – Efeito nas propriedades mecânicas, da substituição do metacaulino no agregado, considerando uma argamassa base com 10% de filler calcário.

Incidindo, agora, sobre a resistência mecânica à compressão, e através da visualização do gráfico da figura 52, percebe-se que esta é incrementada com o aumento da percentagem de metacaulino em substituição do agregado numa base com 10% de filler calcário. De facto, os valores obtidos para esta resistência são crescentes para as três formulações, objeto de comparação, ao longo do processo de cura e à medida que a percentagem de metacaulino sobe de 0 para 3%. O valor máximo de resistência mecânica à compressão, aos 120 dias, é referente ao *grout* com 3% de metacaulino e 10% de filler calcário em substituição do agregado (G3\_II) e corresponde a 1,10MPa, o que é bastante satisfatório.

### ***Efeito dos adjuvantes na resistência mecânica de flexão e compressão – grupo 3:***

Analisa-se, neste item, a influência da introdução dos adjuvantes (0,5% de éter de celulose, 1 % de gluconato de sódio e 0,5% de acril 33), nas composições dos *grouts* do presente grupo de análise, ou seja, quando se procede à substituição de parte do agregado por 10% de farinha de sílica e 1,5 ou 3% de metacaulino.

Deste modo, procedeu-se à realização de ensaios mecânicos sobre *grouts* equivalentes, para os quais o elemento diferenciador é a presença ou ausência de adjuvantes. Torna-se evidente, pela análise do gráfico da figura 53, que o efeito dos adjuvantes é bastante revelador aos 28 dias de cura, tendo uma influência majorativa da resistência mecânica à flexão das composições com 1,5 e 3% de metacaulino no agregado. Os valores, de resistência à flexão para esta idade são máximos e encontram-se dentro do limite pretendido (0,2 MPa). No

entanto, com a evolução do processo de cura dos *grouts* para os 60 dias, percebe-se que este efeito se desvanece. Importa salientar, que aos 120 dias de cura, os *grouts* voltam a apresentar resistências mecânicas de flexão superiores. Destaca-se neste âmbito o *grout* com 3% de metacaulino e 10% de filler calcário em substituição do agregado, e adjuvantes (G3\_VI), que aos 120 dias revela uma resistência mecânica de flexão, crescente, igual a 0,29MPa. Seria interessante efetuar uma análise sobre estes *grouts* para tempos de cura mais avançados, percebendo se o efeito pozolânico do metacaulino no seio do *grout* promove a ocorrência de maiores resistências mecânicas.

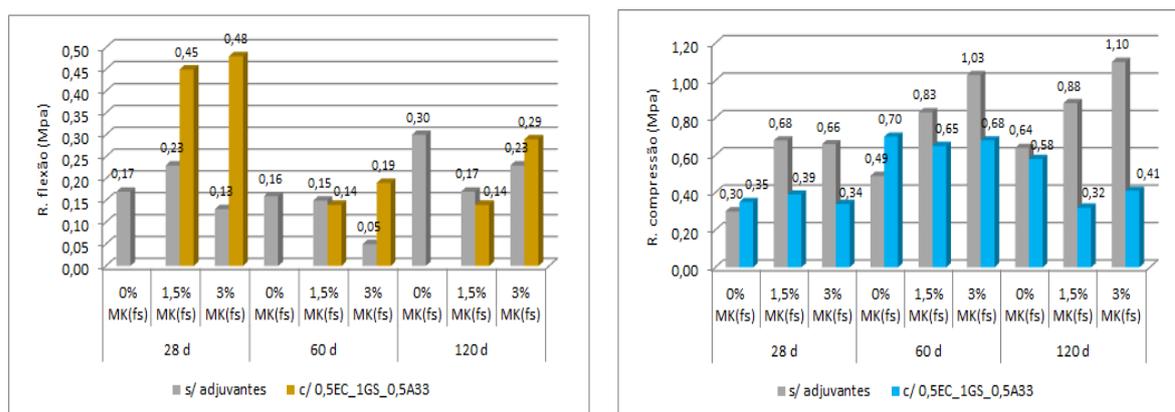


Figura 53 – Efeito da introdução de adjuvantes nas composições de metacaulino sobre as resistências mecânicas à flexão e compressão para os 28, 60 e 120 dias – grupo 3.

Visualizando o gráfico relativo à determinação da resistência mecânica à compressão dos *grouts* deste grupo de análise (figura 53), percebe-se que, a adição destes adjuvantes nas referidas percentagens, é minorativo.

#### 4. Grupo 4 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR METACAULINO/DIATOMITE (1,5 E 3%) SEM A ADIÇÃO DE FILLER CALCÁRIO

##### **Resultados gerais – grupo 4:**

O presente grupo de amostras encontra alguma similitude com o anterior, distingue-se pela ausência na formulação base, do filler calcário como substituto de 10% do agregado. Deste modo, procedeu-se apenas à introdução do metacaulino e da diatomite nos *grouts* como parte da massa do agregado.

Pretende-se, neste ponto, efetuar uma análise das propriedades mecânicas, em consequência desta mesma supressão. O gráfico da figura 54 apresenta os resultados gerais dos ensaios mecânicos de flexão e compressão das amostras do presente grupo para os 28 dias de cura. Na

maioria todas as amostras revelam insuficiente resistência mecânica de flexão, à exceção das amostras G4\_V e G4\_VI que ultrapassam ligeiramente os 0,2 MPa (mínimo requerido para as argamassas de substituição).

Para a resistência à compressão este grupo de amostras, revela resultados satisfatórios, visto apenas a amostra G4\_V não alcançar os 0,4 MPa. O valor máximo de resistência à compressão é dado pela amostra G4\_I e ultrapassa os 0,80 MPa. O desenvolvimento do presente estudo, não permitiu, em tempo útil, a realização de ensaios para idades de cura mais avançadas, considerando-se pertinente a sua futura realização.

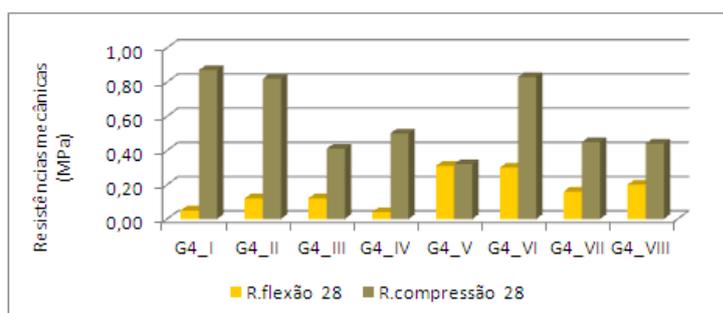


Figura 54 – Gráfico geral das resistências mecânicas, aos 28 dias, das composições do Grupo 4.

#### ***Efeito do metacaulino e da diatomite na resistência mecânica de flexão e compressão – grupo 4:***

Pretende-se, neste item, concluir acerca do efeito gerado nas propriedades mecânicas dos *grouts*, quando se procede à substituição da farinha de sílica por 1,5 e 3% de metacaulino ou diatomite, agora sem a adição de filler calcário no agregado.

Pela análise da figura 55, constata-se que o aumento da percentagem de metacaulino no agregado, de 1,5% (G4\_I) para 3% (G4\_II), resulta na obtenção de *grouts* com maiores resistências à flexão. De facto, para os 28 dias de idade, o *grout* com 3% de metacaulino no agregado, apresenta maior valor de resistência mecânica do que aquele em que esta pozolana figura numa percentagem de apenas 1,5%. No entanto, é evidente que os valores de resistência à flexão obtidos para esta idade são bastante baixos e ainda insuficientes, face ao valor tido como aceitável (0,2 MPa).

Atentando, agora, no gráfico de resistências mecânicas à compressão (figura 55), é possível concluir que o aumento da percentagem de metacaulino de 0 para 3% no agregado, resulta num aumento das resistências de compressão dos *grouts*. O valor máximo de resistência mecânica à compressão é alcançado para a composição com 1,5% de metacaulino no

agregado (G4\_I) e corresponde a 0,87 MPa. O *grout* com 3% de metacaulino no agregado (G4\_II) revela uma resistência mecânica à compressão bastante próxima, ou seja, de 0,82 MPa, sendo igualmente satisfatória.

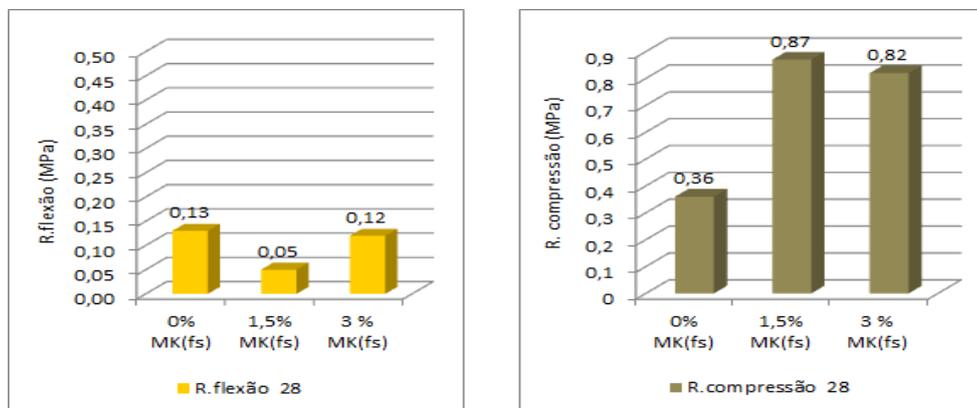


Figura 55 – Efeito da substituição de parte do agregado pela mesma percentagem de metacaulino, sobre as resistências mecânicas à flexão e à compressão dos *grouts* do grupo 4, aos 28 dias.

Se o aditivo de substituição usado, for a diatomite (figura 56), os resultados de flexão são bastante mais favoráveis do que os verificados para os *grouts* com metacaulino. É notório que o aumento da percentagem de diatomite no agregado, de 0 para 3%, resulta num aumento da resistência mecânica de flexão destes *grouts*. A resistência máxima de flexão, é alcançada quando a diatomite substitui 3% do agregado (G4\_IV), e é de 0,50 MPa, estando em conformidade com o pretendido.

Atentando ainda na mesma figura, mas agora, sobre o gráfico representativo das resistências mecânicas à compressão, percebe-se que a diatomite como substituta do agregado, revela uma evolução inversa à observada para o metacaulino, resultando em valores extremamente insuficientes aos 28 dias.

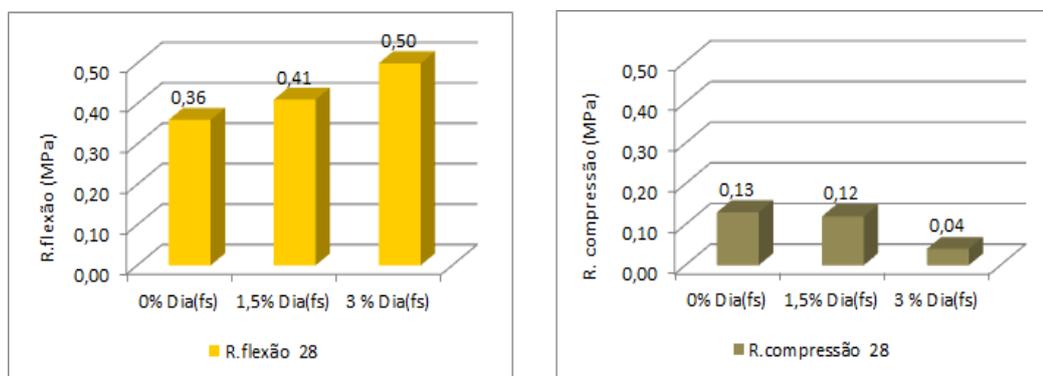


Figura 56 – Efeito da substituição de parte do agregado pela mesma percentagem de diatomite, sobre as resistências mecânicas à flexão e à compressão dos *grouts* do grupo 4, aos 28 dias.

### ***Efeito dos adjuvantes sobre a resistência mecânica de flexão e compressão – grupo 4:***

Neste item, procede-se à análise do efeito gerado nos *grouts* do 4º. grupo de amostras, quando se introduz o conjunto de adjuvantes já referenciado (0,5% de éter de celulose, 1% de gluconato de sódio e 0,5% de acril 33).

Deste modo, para os *grouts* com 1,5 e 3% de metacaulino no agregado, é perceptível, pela análise da figura 57, que a adição destes adjuvantes, aumenta muito significativamente as propriedades resistentes à flexão. Consta-se, no entanto, que embora haja este aumento, ele não atinge valores de capacidade resistente muito elevados, tendo-se registado um valor de 0,31 e 0,30 MPa para os *grouts* com 1,5 e 3 % de metacaulino no agregado, respetivamente.

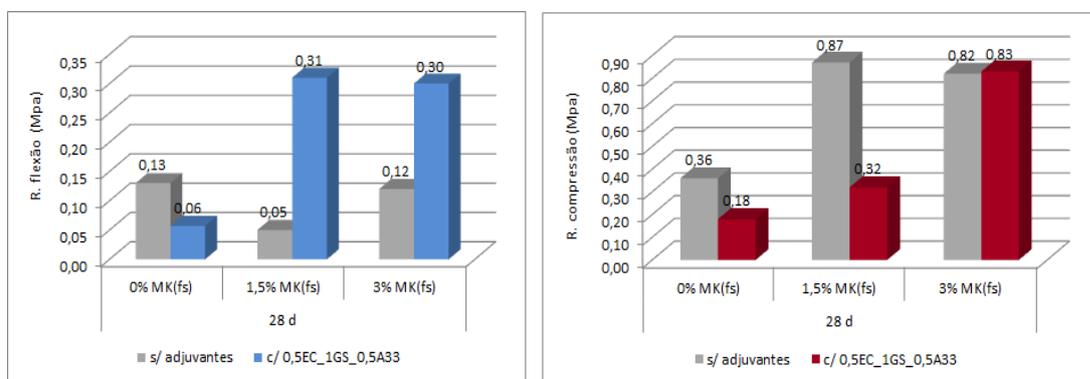


Figura 57 – Efeito da introdução de adjuvantes nas composições de metacaulino do grupo 4 para os 28 dias.

A adição de adjuvantes revela-se infrutífera na resistência à compressão aos 28 dias, para este tipo de *grouts*, pois quando o metacaulino figura na sua composição com uma percentagem mais elevada, ou seja em 3% de substituição do agregado, o valor obtido é muito semelhante àquele que se obtém na ausência de adjuvantes. O valor máximo de resistência à compressão é de 0,87 MPa e verifica-se para o grout com 1,5% de metacaulino no agregado, sem a introdução de adjuvantes (G4\_I).

Ao usar a diatomite em substituição do agregado (figura 58), percebe-se que a introdução de adjuvantes favorece a resistência mecânica de flexão dos *grouts*, no entanto, não se cumprem os requisitos mínimos, ficando todas as formulações abaixo dos 0,2 MPa.

Relativamente à resistência de compressão dos *grouts* diatomíticos, é notório pela figura 58, que o efeito dos adjuvantes apenas se faz notar para a argamassa com 1,5% de diatomite em substituição do agregado, ainda que seja pouco significativo. Importa, por último, referir que a resistência máxima de compressão para estes *grouts* é alcançada para aquele que possui 3% de diatomite em substituição do agregado e não apresenta adjuvantes na sua formulação (G4\_IV), sendo igual a 0,50 MPa.

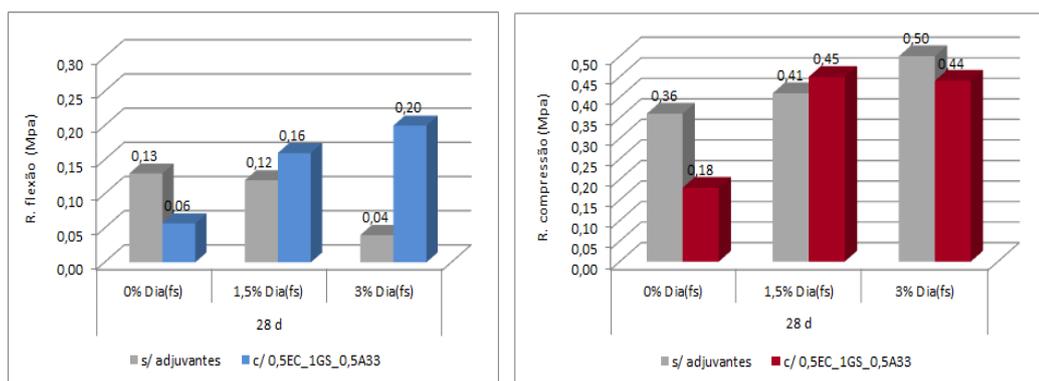


Figura 58 – Efeito da introdução de adjuvantes sobre as resistências mecânicas das composições de diatomite do grupo 4, para os 28 dias.

#### 4.3.2.2. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade, traduz a velocidade de absorção de um determinado *grout*, baseada no coeficiente de capilaridade e na quantidade de água absorvida. Com base nas curvas de absorção de água por capilaridade, determinaram-se os coeficientes de capilaridade ( $C$ ) para cada composição estudada.

Ao longo do processo de carbonatação, ocorre a deposição do carbonato de cálcio nos interstícios dos *grouts*, pelo que a microestrutura interna dos mesmos vai sendo alterada. Este facto, resulta em diferenças consideráveis relativamente à capilaridade das diferentes composições estudadas.

Segundo (VEIGA, 2003), os valores recomendados para o coeficiente de capilaridade das argamassas de substituição, situam-se entre os 8 e os 12  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ . Os resultados decorrentes deste ensaio, para os quatro grupos de amostras especificados na secção 4.2 da presente Dissertação, podem ser encontrados nas tabelas do Anexo C. De seguida far-se-á uma análise detalhada dos valores obtidos para o coeficiente de capilaridade, em  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ , para todos os *grouts* estudados.

#### 1. Grupo 1 - SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE (CAL AÉREA) POR METACAULINO E DIATOMITE (10, 20 e 30%)

Ao analisar a tabela C.1 do Anexo C, verifica-se que o coeficiente de capilaridade dos *grouts* pertencentes ao primeiro grupo de amostras, se encontra, maioritariamente, bastante acima do limite máximo estabelecido para as argamassas de substituição (VEIGA, 2003). De seguida, procede-se à avaliação da influência específica de cada componente, no coeficiente de capilaridade dos *grouts* em que se procedeu à substituição de parte do ligante por 10, 20 e 30% de metacaulino ou diatomite.

### ***Efeito do metacaulino e da diatomite na capacidade de absorção de água por capilaridade – grupo 1:***

É possível constatar, pela leitura dos gráficos da figura 59, que o *grout* base (0% de metacaulino ou 0% de diatomite) é o que apresenta maior coeficiente de capilaridade para as três idades de ensaio, nomeadamente 28, 60 e 120 dias. É também notório que para este *grout*, existe um ligeiro decréscimo da capacidade de absorção de água ao longo do tempo de cura. Tal facto era expectável, uma vez que, com a evolução do processo de cura, os *grouts* tendem a carbonatar (devido à penetração do dióxido de carbono que reage com o hidróxido de cálcio, que precipita no interior dos poros, formando carbonato de cálcio), tornando-se deste modo, mais compactos e portanto menos porosos.

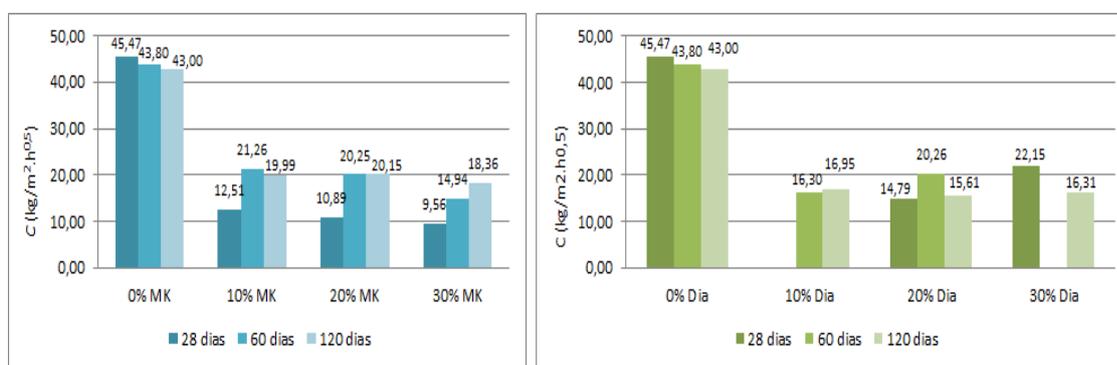


Figura 59 – Coeficiente de capilaridade para as diferentes percentagens de metacaulino e diatomite – Grupo 1.

É possível ainda, pela análise do mesmo gráfico concluir acerca do efeito da variação das percentagens de metacaulino e diatomite, quando em substituição do ligante, na capacidade de absorção de água dos *grouts*.

Relativamente aos *grouts* em que a pozolana introduzida como ligante é o metacaulino, percebe-se que o coeficiente de capilaridade diminui com o aumento do teor de metacaulino de 0 para 30%. Deste modo, conclui-se que a adição de maiores percentagens de metacaulino, como substituto de parte do ligante, faz com que os valores do coeficiente de capilaridade dos *grouts*, sejam mais favoráveis e por isso mais próximos do desejado (entre os 8 e os 12  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ ). O *grout* com 30% deste aditivo no ligante, é aquele que apresenta melhor comportamento face à ascensão de água capilar. No entanto, este parâmetro sofre um acréscimo com o processo de cura dos provetes.

No que diz respeito às composições que fazem uso da diatomite como componente aditivo em substituição do ligante, conclui-se que, a capilaridade aumenta com o aumento da percentagem do mesmo. Destacam-se, neste domínio, as composições com 10 e 20% de

diatomite no ligante, que evidenciam valores para a capacidade de absorção de água por capilaridade mais próximos dos  $12 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ , aos 120 dias de idade.

A introdução dos aditivos metacaulino e diatomite no ligante, revela-se bastante vantajosa para os *grouts* estudados, uma vez que possibilita a obtenção de coeficientes de capilaridade muito mais razoáveis, face ao *grout* base.

## 2. Grupo 2 - SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE (CAL AÉREA) POR METACAUULINO E DIATOMITE (20 e 30%) E DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR FILLER CALCÁRIO (10%)

Os resultados do ensaio de capilaridade, para o presente grupo de amostras, constam da tabela C.2 do Anexo C. Pretende-se avaliar, se a substituição de parte do agregado por percentagem 10% de filler calcário influi, e de que forma, no comportamento face à água dos *grouts* em estudo.

### *Efeito do Filler calcário sobre a capilaridade do grout base – grupo 2:*

Ao comparar dois *grouts* base (G1\_AB) e (G2\_AB), que se distinguem essencialmente, pelo facto do último apresentar o filler calcário como elemento substituto de parte do agregado (10%), é possível constatar, pela análise do gráfico da figura 60, que o coeficiente de capilaridade é consideravelmente minorado quando esta substituição é feita, ou seja, para o *grout* com filler calcário.

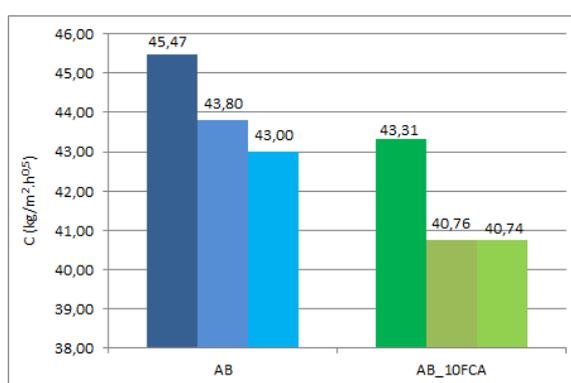


Figura 60 – Efeito do filler calcário sobre a capilaridade do *grout* base - Grupo 2.

Como seria de esperar, para os dois *grouts* base comparados, a capacidade de absorção de água capilar reduz-se com o tempo de cura dos provetes, uma vez que a estrutura porosa dos mesmos sofre alteração com o decorrer da carbonatação. Destaca-se o comportamento do *grout* com 10% de filler calcário no agregado, por apresentar menores valores de capilaridade

e por estes se manterem praticamente inalterados dos 60 para os 120 dias de cura. Ressalva-se, contudo, que embora o efeito do filler calcário permita o ajustamento dos valores de capilaridade para resultados mais satisfatórios, estes encontram-se ainda bastante elevados face ao pretendido.

### ***Efeito da variação da percentagem de metacaulino e diatomite na capilaridade – grupo 2:***

Pretende-se agora, concluir acerca do efeito que a introdução de diferentes percentagens de metacaulino e de diatomite em substituição do ligante (nos *grouts* com 10% de filler calcário no agregado), gera sobre a capilaridade dos mesmos. Ao ser adicionada maior percentagem destes aditivos pozolânicos no ligante, é possível obter capilaridades mais baixas face ao *grout* base (0% de metacaulino e 0% de diatomite). Como era esperado, a capilaridade diminui, com o aumento das percentagens de metacaulino e diatomite testadas, à medida que a cura dos provetes se vai processando, mantendo-se, no entanto, ainda bastante elevada (figura 61).

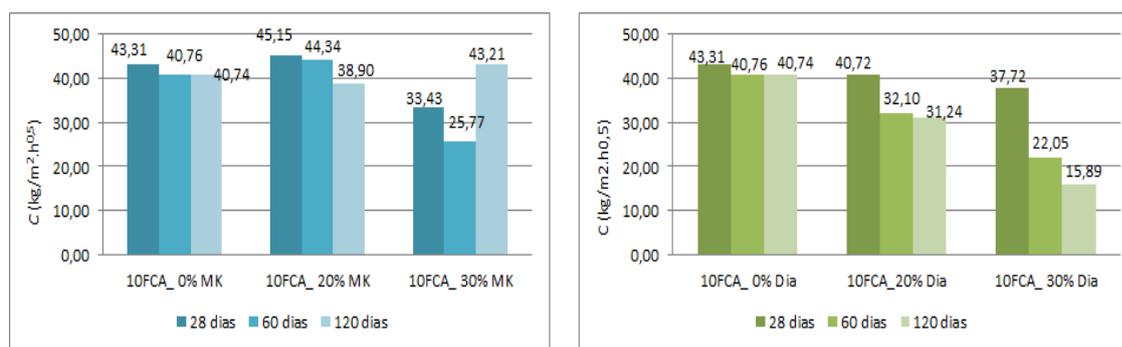


Figura 61 – Coeficiente de capilaridade para as diferentes percentagens de metacaulino e diatomite - Grupo 2.

Torna-se ainda, evidente, pela análise da figura 61, que para os *grouts* com 30% de diatomite em substituição do ligante e 10% de filler calcário em substituição do agregado, se obtêm valores mais favoráveis para o coeficiente de capilaridade, nomeadamente para os 120 dias de cura. Mais uma vez, com o desenvolvimento do processo de carbonatação, o dióxido de carbono presente no ar, vai-se difundindo pelos poros do *grout* e reagindo com o hidróxido de cálcio, dando origem ao carbonato de cálcio que se vai depositando gradualmente nos interstícios, reduzindo a porosidade da amostra, resultando num aumento da sua densidade e consequente diminuição da capilaridade.

**Efeito da introdução de adjuvantes na capilaridade – grupo 2:**

Os adjuvantes usados (0,5% de éter e celulose, 1% de gluconato de sódio e 0,5% de acril 33), tendo papéis ativos distintos no seio da mistura, influenciam drasticamente o comportamento dos *grouts* deste grupo, face à ascensão de água por capilaridade (figura 62).

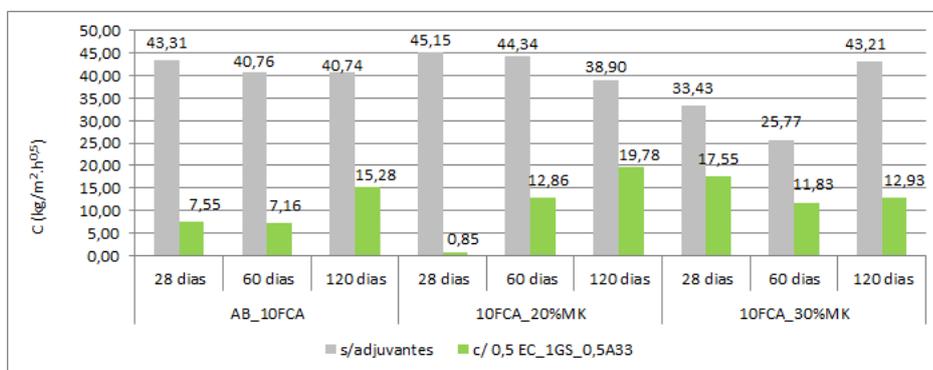


Figura 62 – Efeito dos adjuvantes sobre a capilaridade dos *grouts* de metacaulino pertencentes ao Grupo 2.

Demonstra-se claramente, esta ação interventiva nos gráficos das figuras 62 e 63. De facto, através da adição de um agente retentor de água (EC), de um fluidificante/plastificante (GS) e de um agente adesivo (A<sub>33</sub>), mesmo que em reduzidas percentagens face ao total de ligantes (0,5%, 1% e 0,5%, respetivamente), é possível minorar em larga escala, o coeficiente de capilaridade dos *grouts* estudados. Esta análise é transversal a todas as amostras do grupo 2.

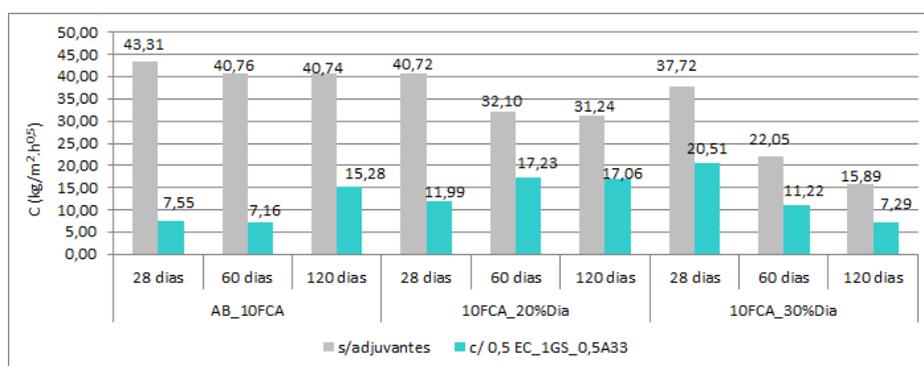


Figura 63 - Efeito dos adjuvantes sobre a capilaridade dos *grouts* de diatomite pertencentes ao Grupo 2.

Importa notar, que não são desejáveis valores de capilaridade demasiado baixos, uma vez que se pretende compatibilidade com as argamassas de reboco antigas, já pré-existentes. A situação ideal, corresponderá à conceção de *grouts* com coeficiente de capilaridade entre os 8 e os 12 kg/m<sup>2</sup>.h<sup>0,5</sup> e com elevada permeabilidade ao vapor de água. Das amostras de *grout* pertencentes ao grupo 2, destacam-se as correspondentes ao uso de 30% de metacaulino e diatomite como substitutos do ligante, pelo facto de, apresentarem valores de capilaridade

bastante bons e decrescentes no tempo, como é esperado, devido à alteração da estrutura capilar decorrente da evolução do processo de carbonatação dos mesmos.

### 3. Grupo 3 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR METACAULINO (1,5 E 3%) E AINDA POR FILLER CALCÁRIO (10%)

Pretende-se, neste grupo de amostras, concluir acerca do efeito da adição de adjuvantes sobre composições nas quais o metacaulino figura como substituto de parte do agregado, nomeadamente em 1,5 e 3%. É ainda de salientar que os *grouts* deste grupo possuem 10% de filler calcário em substituição do agregado.

#### *Efeito da introdução de adjuvantes na capilaridade – grupo 3:*

O gráfico da figura 64, é indicativo da influência vantajosa dos adjuvantes, nomeadamente de 0,5% de éter de celulose (agente retentor de água), 1% de gluconato de sódio (agente plastificante) e 0,5 % de acril 33 (agente adesivo), sobre os *grouts* nos quais o metacaulino figura como substituto do agregado (em 1,5 e 3%). Constata-se ainda, que o aumento da percentagem de metacaulino em substituição do agregado, associado à introdução de adjuvantes nestes *grouts*, permite que o coeficiente de capilaridade alcançado chegue a valores ótimos, portanto pertencentes ao intervalo entre os 8 e os 12  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ .

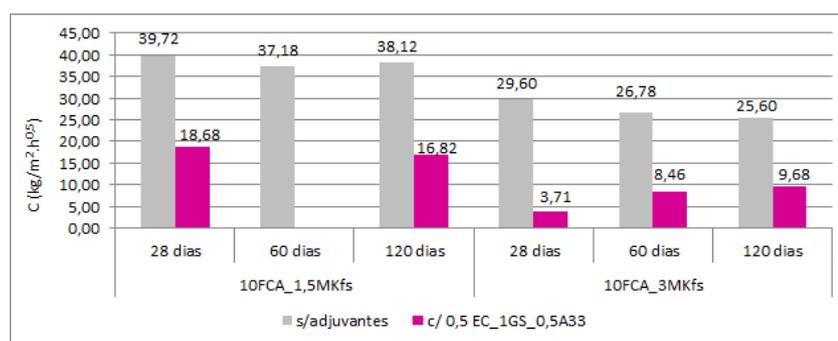


Figura 64 – Efeito dos adjuvantes sobre a capilaridade das amostras com metacaulino no agregado – Grupo 3.

### 4. Grupo 4 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR METACAULINO/DIATOMITE (1,5 E 3%) SEM A ADIÇÃO DE FILLER CALCÁRIO

O último grupo de amostras, será sobretudo indicador do efeito que os adjuvantes adquirem, se introduzidos nos *grouts*, que apresentam o metacaulino e a diatomite como substitutos de

1,5 e 3% do agregado, agora sem adição de filler calcário à sua formulação. Deste modo, propõe-se a análise da figura 65.

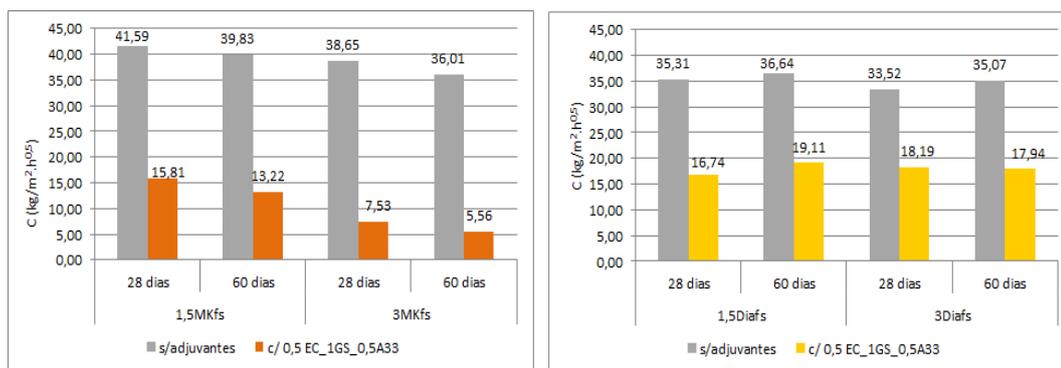


Figura 65 – Efeito dos adjuvantes sobre a capilaridade nas amostras de metacaulino e diatomite em substituição do agregado – Grupo 4.

Os gráficos da figura 65, vêm corroborar a influência positiva dos adjuvantes usados, neste tipo de composições, sendo maior o seu efeito para o grupo de *grouts* que usam o metacaulino como substituto do agregado. Mais uma vez, à medida que aumenta a percentagem de metacaulino de 1,5 para 3%, melhora o comportamento dos *grouts* face à ascensão de água capilar, que é menor também no decurso do tempo de cura. Ressalva-se que os *grouts* com 3% de metacaulino no agregado e com adjuvantes, apresentam coeficientes de capilaridade demasiado baixos, face ao pretendido.

#### 4.4. Ensaios de simulação de consolidação de revestimentos

##### 4.4.1. Permeabilidade à água sob baixa pressão (Tubos de Karsten)

Este ensaio permite avaliar a capacidade de absorção de água sob pressão das argamassas de reboco e das diferentes caldas de injeção desenvolvidas. Esta característica, designa-se frequentemente por permeabilidade. Estes ensaios apresentam correlação, se realizados *in situ* e à escala real, com a ação combinada da chuva e do vento sobre os rebocos das paredes exteriores. Mesmo sendo referenciada internacionalmente, esta técnica não se baseia em critérios de desempenho, uma vez que não existem valores aceitáveis definidos nas normas existentes (CARASEK, 2003). Em virtude deste fato, os resultados obtidos devem ser complementados pelo ensaio que estima a absorção de água por capilaridade definido na norma EN 1015-18. Embora permita ter uma ideia da capacidade de impermeabilização das argamassas de reboco, e das zonas sujeitas a consolidação, é necessário ter em conta as suas limitações na análise dos resultados obtidos. A medida da permeabilidade à água, através

deste método, pode ser usada para caracterizar qualitativamente, o estado em que se encontra a zona ensaiada. Deste modo, através das comparações efetuadas, é possível avaliar as alterações superficiais que modificam a absorção de água pelo reboco (consolidado e não consolidado) e estimar o grau de degradação a que o material foi submetido.

Os resultados do ensaio podem ser encontrados nas tabelas do Anexo E, e são expressos em função dos parâmetros necessários ao traçado da respetiva curva de absorção  $p$  ( $\text{kg/m}^2$ ) e  $t^{0,5}$  (h).

De seguida, far-se-á uma análise comparativa das curvas de absorção relativas à zona das argamassas reboco de cal aérea e à zona de *grout* (onde foi injetada a calda) para composições representativas de todos os grupos de amostras.

### **1. Grupo 1 - SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE (CAL AÉREA) POR METACAULINO E DIATOMITE (10, 20 e 30%)**

Para o presente grupo de amostras, optou-se por selecionar as composições com diferentes percentagens de metacaulino (10, 20 e 30%) e de diatomite (20 e 30%), e compará-las com o *grout* base (G1\_AB), a fim de perceber o efeito do aumento da dosagem dos aditivos pozolânicos, quando em substituição do ligante, na absorção de água a baixa pressão.

#### ***Efeito da variação das percentagens de metacaulino na permeabilidade à água sob baixa pressão – grupo 1:***

As curvas de absorção representadas na figura 66, traduzem os resultados obtidos para o ensaio de permeabilidade à água realizado sob dois provetes distintos, nomeadamente (G1\_AB) e (G1\_I).

Estes provetes, concebidos para a realização dos ensaios de consolidação de revestimentos, apresentam duas zonas de ensaio distintas (zona rebocada – representativa do revestimento original sem falta de aderência) e (zona de injeção – representativa do mesmo revestimento após consolidação). Deste modo, é possível avaliar a permeabilidade antes e após a consolidação, determinando o impacto das alterações sofridas.

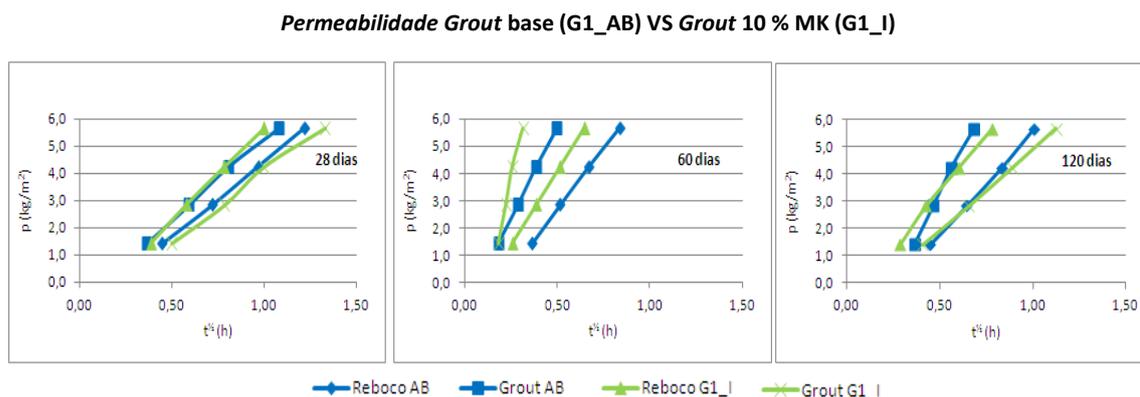


Figura 66 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre o *grout* base e o *grout* com 10% de metacaulino, aos 28, 60 e 120 dias (zona de reboco e zona de *grout*).

Comparam-se então, os resultados obtidos para a permeabilidade aos 28, 60 e 120 dias de cura, da zona de reboco e da zona de injeção de *grout*, para os dois provetes referidos (proвете que tem como consolidante o *grout* base e provete que tem como consolidante o *grout* com 10% de metacaulino).

Da leitura destas curvas (figura 66), é possível perceber que aos 28 dias, os dois provetes têm curvas de absorção com desenvolvimento bastante semelhantes. No entanto o provete (G1\_AB) apresenta para as três idades de cura, maior rapidez de absorção no *grout* do que na zona de reboco. Ou seja, o *grout* base é menos compacto do que o reboco e portanto apresenta maior índice de vazios, sendo mais poroso.

Atentando agora no provete com 10% de metacaulino (G1\_I), pode afirmar-se que para os 28 e 120 dias, o reboco absorve mais rapidamente do que o *grout*, ou seja a zona consolidada é mais compacta, logo menos porosa do que o reboco. Esta tendência é quebrada aos 60 dias, onde é perceptível que o *grout* absorve mais rapidamente do que a zona de reboco sendo, por isso, menos compacto.

Na figura 67, percebe-se que ao aumentar a percentagem de metacaulino para 20% (G1\_III) e tomando o provete base como elemento comparativo (G1\_AB), é evidente que o provete (G1\_III) revela, aos 28 dias, uma tendência de permeabilidade oposta à observada para os 60 e 120 dias.

Deste modo, aos 28 dias, a zona consolidada absorve água mais lentamente do que o reboco, demonstrando ser menos porosa e mais compacta. Para os 60 e 120 dias de cura, o *grout* revela adquirir maior velocidade de absorção da franja líquida, apresentando maior índice de vazios e menor compactidade.

**Permeabilidade Grout base (G1\_AB) VS Grout 20 % MK (G1\_III)**

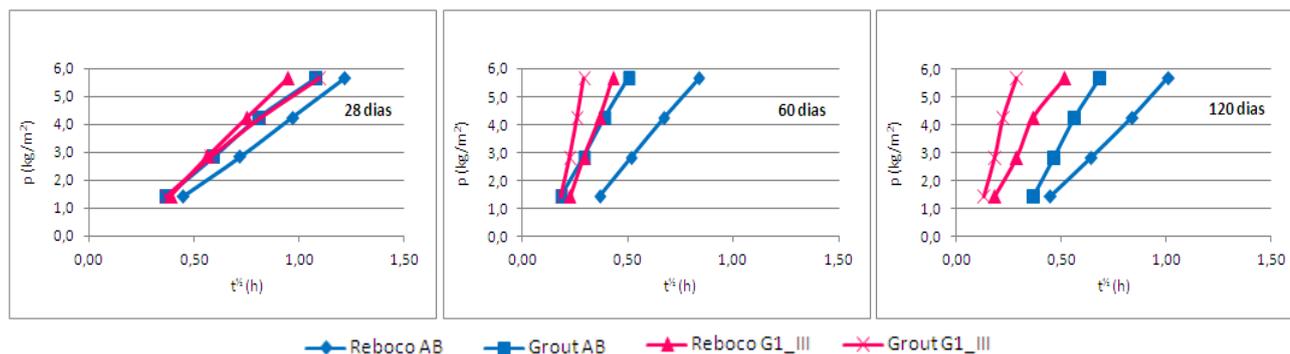


Figura 67 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre o *grout* base e o *grout* com 20% de metacaulino, aos 28, 60 e 120 dias (zona de reboco e zona de *grout*).

De acordo com a figura 68, se for adicionada ainda maior percentagem de aditivo pozolânico à calda de consolidação, ou seja 30% de metacaulino (G1\_V), entende-se que aos 28 dias a capacidade de absorção da zona consolidada é máxima face ao reboco, sendo por isso, bastante mais porosa e menos compacta.

À medida que o tempo de cura decorre e a calda de injeção vai ganhando presa, evolui a carbonatação e o *grout* torna-se muito menos rápido na absorção, sendo suplantado pelo reboco. Aos 120 dias, a zona de reboco e a zona consolidada (*grout*) revelam-se mais ou menos concomitantes neste processo.

**Permeabilidade Grout base (G1\_AB) VS Grout 30 % MK (G1\_V)**

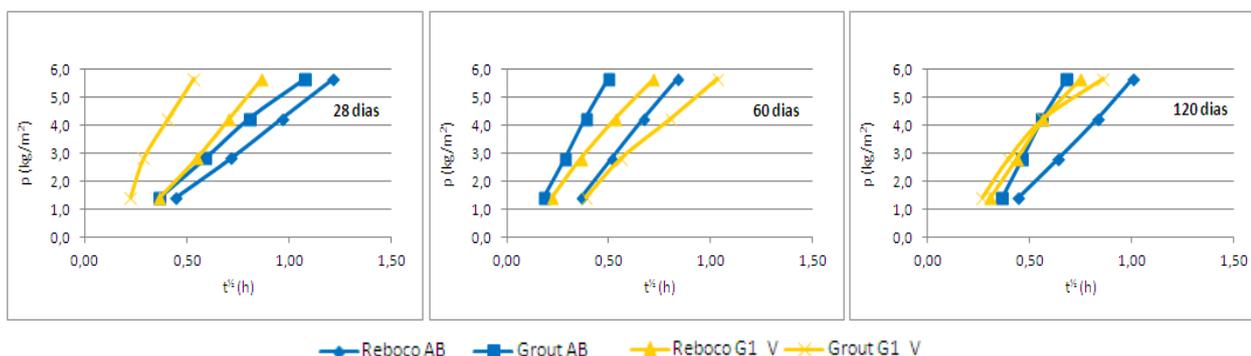


Figura 68 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre o *grout* base e o *grout* com 30% de metacaulino, aos 28, 60 e 120 dias (zona de reboco e zona de *grout*).

Em suma consta-se que, para os três consolidantes estudados (*grout* G1\_I, *grout* G1\_III e *grout* G1\_V), aos 120 dias, com o acréscimo da percentagem de metacaulino dos 10 para os 20%, o *grout* torna-se muito mais rápido na absorção da franja líquida. Os 30% de metacaulino permitem uma situação de maior equilíbrio entre a permeabilidade da zona consolidada e da zona rebocada aos 120 dias.

### ***Efeito da variação das percentagens de diatomite na permeabilidade à água sob baixa pressão – grupo 1:***

Se a pozolana adotada para a constituição da calda de injeção for a diatomite, e se se fizer variar a sua percentagem nas composições dos *grouts* de 20 para 30% é possível perceber o seu efeito sob a permeabilidade à água sob baixa pressão.

Assim, de acordo com a figura 69, para os 20% de diatomite (amostra G1\_IX), a zona de consolidada revela, aos 60 dias, ter menor velocidade de absorção do que a respetiva zona de reboco. Trata-se pois de um consolidante menos poroso, logo menos permeável do que o reboco não consolidado. No decorrer da presa, este tipo de consolidante, adquire uma velocidade de absorção bastante semelhante à do reboco (visível aos 120 dias de cura).

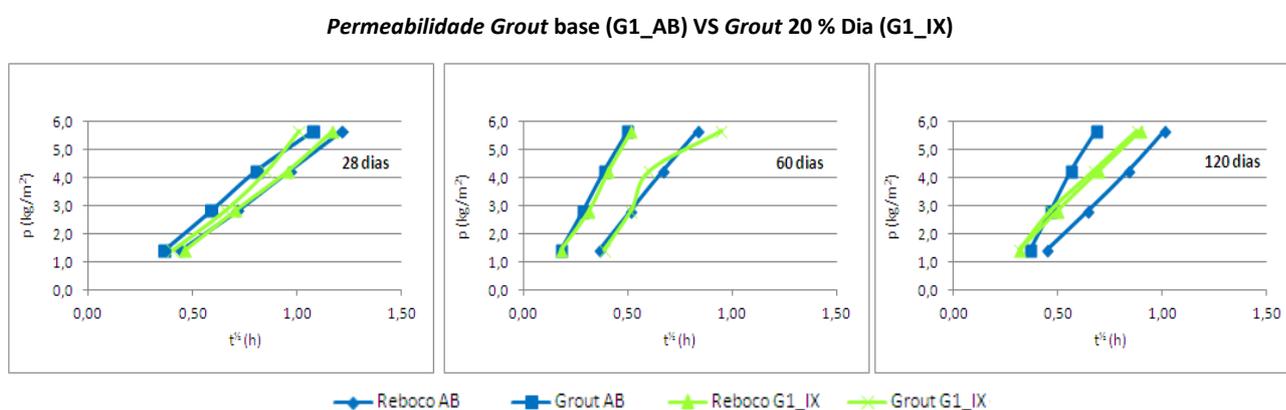


Figura 69 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre o *grout* base e o *grout* com 20% de diatomite, aos 28, 60 e 120 dias (zona de reboco e zona de *grout*).

Da interpretação da figura 69, percebe-se que ao ser aumentada a percentagem de diatomite na calda de injeção para 30% (amostra G1\_XI), consegue-se, tal com sucedia para os 30% de metacaulino, atingir aos 120 dias de cura, permeabilidades bastante idênticas para a zona consolidada e para a zona de reboco (não consolidada).

Contudo, é notório que esta calda de consolidação começa por se revelar, aos 28 dias, bastante mais lenta na absorção do que a respetiva zona de reboco, apresentando, por isso, o *grout* menor porosidade do que o reboco.

Aos 60 dias, a zona consolidada revela-se mais permeável do que o reboco. Se comparar o efeito da adição de 30% de metacaulino (figura 68), com o de 30% de diatomite (figura 70), constatam-se velocidades de absorção muito semelhantes aos 120 dias, denunciando uma estrutura porosa e compacidade destas argamassas também idênticas a esta idade.

**Permeabilidade Grout base (G1\_AB) VS Grout 30 % Dia (G1\_XI)**

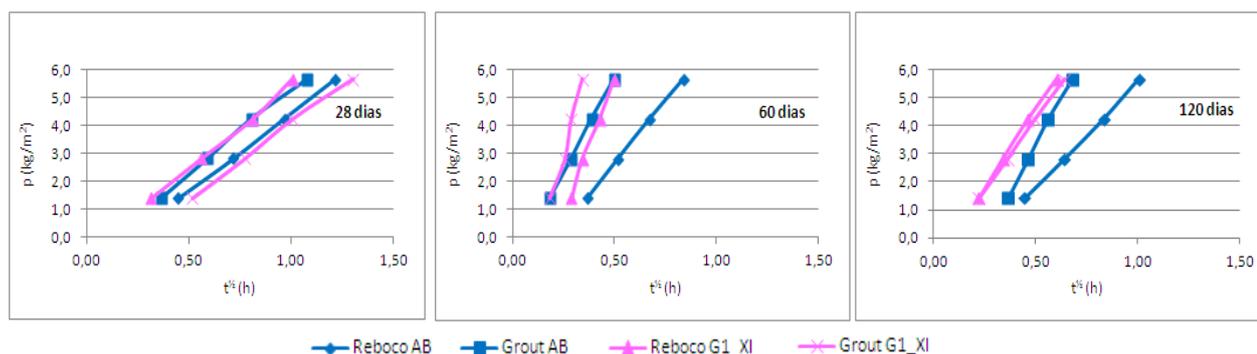


Figura 70 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre o *grout* base e o *grout* com 30% de diatomite, aos 28, 60 e 120 dias (zona de reboco e zona de *grout*).

## 2. Grupo 2 - SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE (CAL AÉREA) POR METACAULINO E DIATOMITE (20 e 30%) E DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR FILLER CALCÁRIO (10%)

O presente grupo de amostras, difere do primeiro, essencialmente pelo facto de se ter introduzido na sua formulação o filler calcário como substituto de 10% do agregado. Optou-se, de igual modo, por seleccionar as composições com diferentes percentagens de metacaulino e de diatomite (20 e 30%), e concluir acerca dos resultados obtidos no domínio da permeabilidade das zonas consolidadas e não consolidadas. Faz-se ainda, por último, uma análise da permeabilidade obtida para uma calda de injeção com e sem filler calcário como substituto do agregado.

### *Efeito da variação das percentagens de metacaulino na permeabilidade de grouts com filler calcário em substituição do agregado – grupo 2:*

Das curvas de absorção de água da figura 71, conclui-se que para a amostra (G2\_II) com 10% de filler calcário no agregado e 20% de metacaulino no ligante, a zona de reboco (não consolidada) e a zona de injeção de *grout* (sujeita a consolidação), apresentam rapidez de absorção da franja líquida muito semelhante para as três idades de ensaio. Aos 120 dias, encontra-se uma situação intermédia no que respeita à velocidade de absorção, ou seja, não tão célere como aos 28 dias, nem tão retardada como sucedia aos 60 dias. Constata-se ainda que, aos 120 dias o reboco é mais poroso do que o *grout*, denunciando o facto de se tratar de uma calda de consolidação mais compacta do que a argamassa de reboco.

Atentando na figura 71, constata-se ainda que, ao aumentar a percentagem de metacaulino na formulação da calda de injeção para 30% (G2\_VIII), consegue-se alcançar aos 60 dias de cura, uma permeabilidade muito semelhante entre a zona consolidada e a zona não consolidada do mesmo provete. Reparando na evolução da curva de absorção para os 120 dias de cura, é possível afirmar-se que, nesta idade, o *grout* é bastante lento na absorção da franja líquida, comparativamente com a zona de reboco (não consolidada). Este facto denuncia a compacidade elevada do *grout*, aos 120 dias, e a existência de uma estrutura porosa bastante mais fechada.

**Permeabilidade Grout 10%FCA e 20%MK (G2\_II) VS Grout 10%FCA e 30%MK (G2\_VIII)**

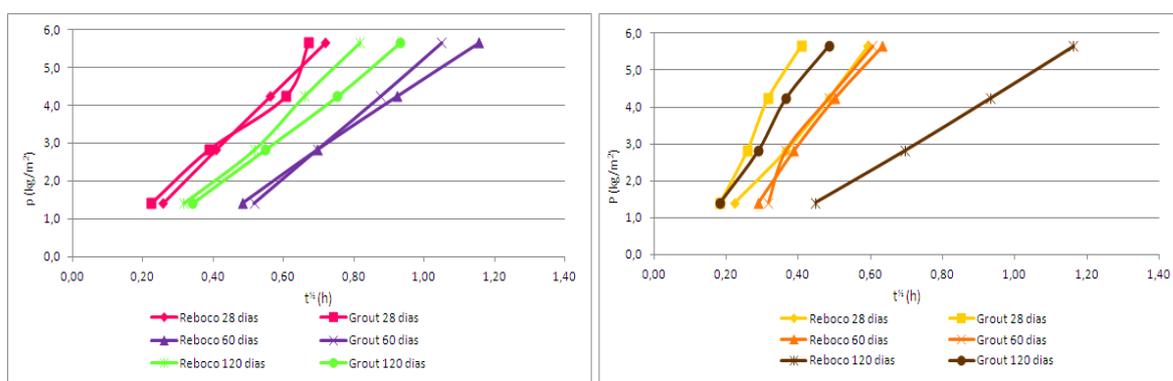


Figura 71 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre *grouts* com 20 e 30% de metacaulino e 10% de filler calcário, para os 28, 60 e 120 dias (zona de reboco e de *grout*).

Concluindo acerca do efeito do aumento da percentagem de metacaulino de 20 para 30% neste tipo de formulações, destaca-se o *grout* com 20% de metacaulino no ligante e 10% de filler calcário no agregado (G2\_II), que aos 120 dias, apresenta uma permeabilidade mais igualitária entre a zona não consolidada e a zona consolidada, logo melhor desempenho neste âmbito.

### ***Efeito da variação das percentagens de diatomite na permeabilidade de grouts com filler calcário em substituição do agregado – grupo 2:***

Para o mesmo grupo de amostras, portanto com 10% de filler calcário no agregado, se fizer agora, variar as percentagens de diatomite no ligante em 20 e 30% (G2\_IV e G2\_VI), é possível perceber, pela análise da figura 72 que, na amostra (G2\_IV) o *grout* e o reboco adquirem uma velocidade de absorção intermédia aos 120 dias de idade. Assim, a zona consolidada revela-se mais rápida na absorção, sendo portanto mais porosa e menos compacta do que a zona não consolidada.

Permeabilidade Grout 10%FCA e 20%Dia (G2\_IV) VS Grout 10%FCA e 30%Dia (G2\_VI)

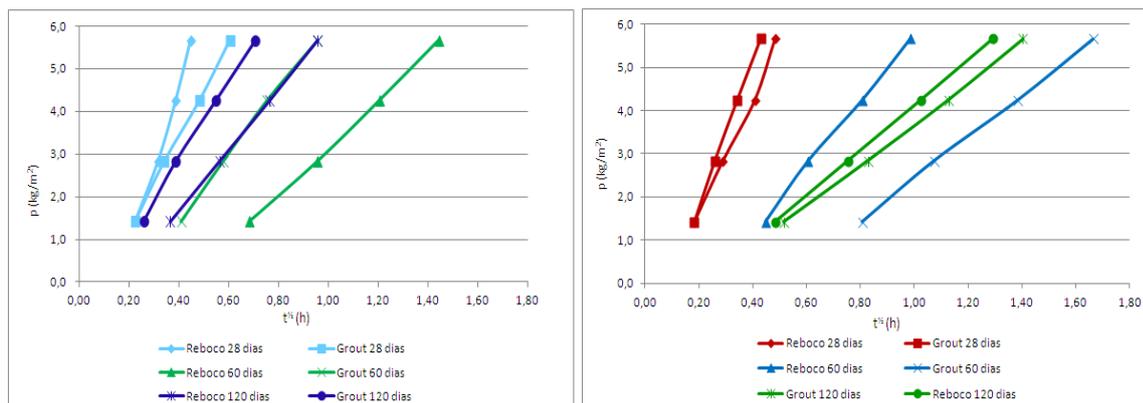


Figura 72 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre *grouts* com 20 e 30% de diatomite e 10% de filler calcário, para os 28, 60 e 120 dias (zona de reboco e de *grout*).

Relativamente à amostra (G2\_VI), onde a diatomite ganha maior expressão (30%), é possível constatar que, aos 60 dias, o *grout* se revela bastante mais lento na absorção de água, do que o reboco correspondente. Com a evolução do processo de cura desta calda de injeção, constata-se que, aos 120 dias, as capacidades de absorção de água da zona consolidada e do reboco são bastante próximas, no entanto um pouco mais elevadas para o reboco, que apresenta maior índice de vazios e menor compacidade.

### ***Efeito da adição de filler calcário em substituição do agregado, na permeabilidade dos grouts – grupo 2:***

Tal como foi referido anteriormente, estuda-se ainda o efeito na permeabilidade, da adição de 10% de filler calcário em substituição do agregado para os *grouts* desenvolvidos.

Para tal, comparam-se duas amostras equivalentes no tipo e quantidade de aditivo (30% de metacaulino), pertencentes ao grupo 1 e 2 (amostras G2\_XI e G1\_IV), com e sem filler calcário, respetivamente (figura 73).

Constata-se que a amostra com 10% de filler calcário no agregado (G2\_XI) apresenta maior rapidez de absorção para os 28 dias (quer no reboco, quer no *grout*). Já para os 120 dias, o *grout* com filler calcário parece apresentar maior lentidão na absorção da franja líquida, do que aquele em que este componente não é usado.

**Permeabilidade Grout 10%FCA e 30%MK (G2\_XI) VS Grout 0%FCA e 30%MK (G1\_IV)**

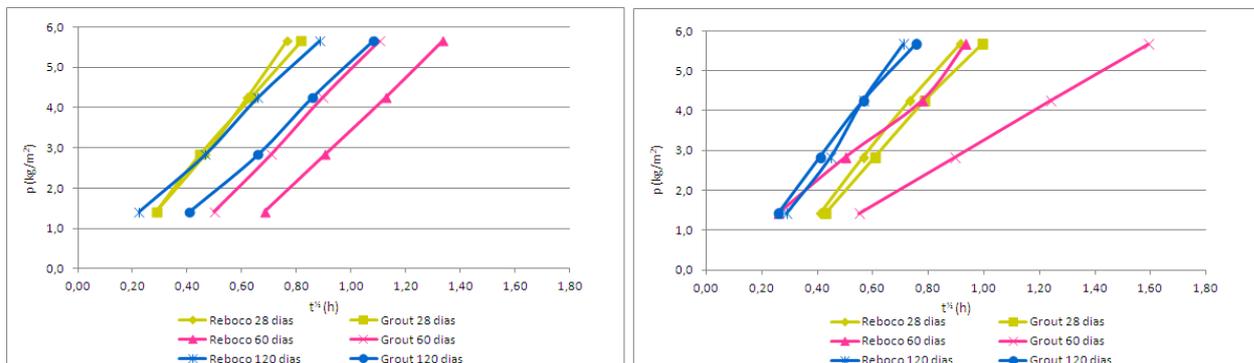


Figura 73 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre *grouts* com e sem filler calcário, para os 28, 60 e 120 dias (zona de reboco e *grout*).

Pode concluir-se então, que para esta idade de cura, o *grout* com filler calcário é mais compacto e portanto menos poroso do que o outro. Este facto era expectável uma vez que o filler calcário se caracteriza por apresentar partículas mais finas do que a farinha de sílica, que se podem dispor no seio da calda de injeção de forma mais compacta, fechando a sua estrutura porosa.

Destaca-se ainda neste âmbito, o comportamento do *grout* sem filler calcário no agregado (G1\_IV) que, aos 120 dias, apresenta maior similitude entre a permeabilidade da zona consolidada e da zona não consolidada, o que é bastante favorável.

#### 4. Grupo 4 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR METACULINO/DIATOMITE (1,5 E 3%) SEM A ADIÇÃO DE FILLER CALCÁRIO

Para o presente grupo de amostras, optou-se por seleccionar composições com diferentes percentagens de metacaulino e de diatomite (1,5 e 3%) em substituição do agregado, e avalia-se de que forma esta variação influi na permeabilidade das mesmas, para os 28 e para os 60 dias de cura.

##### *Efeito da variação das percentagens de diatomite (em substituição do agregado) na permeabilidade dos grouts – grupo 4:*

Visualizando os gráficos da figura 74, evidencia-se que quando a diatomite é utilizada como substituta de parte do agregado em 1,5% (G4\_III), para os 60 dias de cura, a zona não

consolidada (reboco) é bastante mais rápida no processo de absorção da franja líquida do que a zona consolidada (*grout*). Esta calda de consolidação, é assim, bastante mais compacta e menos porosa do que a respectiva argamassa de reboco.

**Permeabilidade Grout 1,5% Dia (fs) (G4\_III) VS Grout 3% Dia (fs) (G4\_IV)**

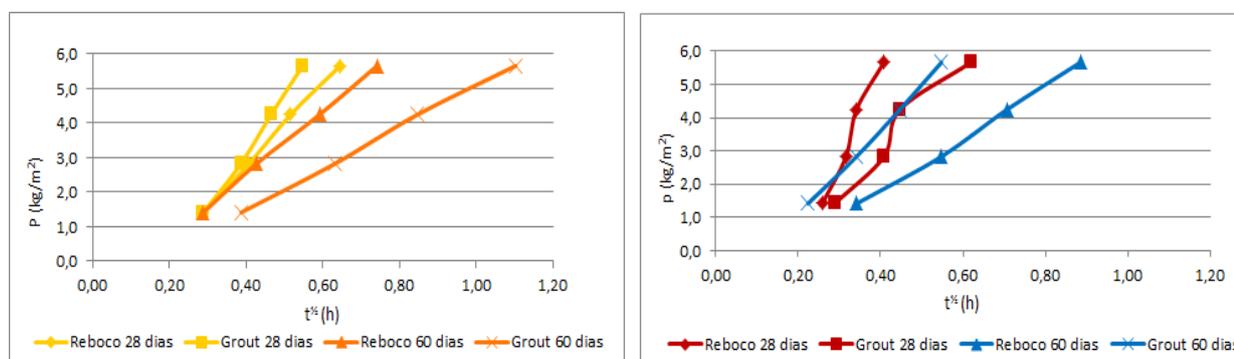


Figura 74 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre *grouts* com diatomite em substituição do agregado aos 28 e 60 dias (zona de reboco e *grout*).

No entanto, se para uma percentagem de diatomite igual a 1,5%, aos 60 dias, o reboco se revela mais rápido na absorção, e por isso mais poroso do que o *grout*; para uma percentagem de diatomite superior (3%), este facto inverte-se, e é a zona consolidada que absorve a água de forma mais célere, logo manifesta maior porosidade e menor compactidade, do que a zona não consolidada (reboco).

***Efeito da variação das percentagens de metacaulino (em substituição do agregado) na permeabilidade dos grouts – grupo 4:***

Se a pozolana adicionada em substituição do agregado, for agora o metacaulino, pretende-se avaliar qual o efeito gerado na permeabilidade dos *grouts*. Deste modo, comparam-se as amostras (G4\_V e G4\_VI), onde o metacaulino substitui 1,5 e 3% do agregado, respetivamente.

Pela análise da figura 75, é possível constatar que a amostra (G4\_V) apresenta, aos 60 dias de cura, maior velocidade de absorção de água para a zona não consolidada (reboco). Deste modo, conclui-se que o *grout* com 1,5% de metacaulino em substituição do agregado, é mais compacto e portanto mais denso do que a argamassa de reboco.

Se aumentar a percentagem desta pozolana no agregado (3% de metacaulino), para o mesmo tempo de cura, ou seja 60 dias, esta tendência mantém-se, ou seja, a zona consolidada continua a ser menos rápida na absorção do que a zona não consolidada.

**Permeabilidade Grout 1,5% MK (fs) (G4\_V) VS Grout 3% MK (fs) (G4\_VI)**

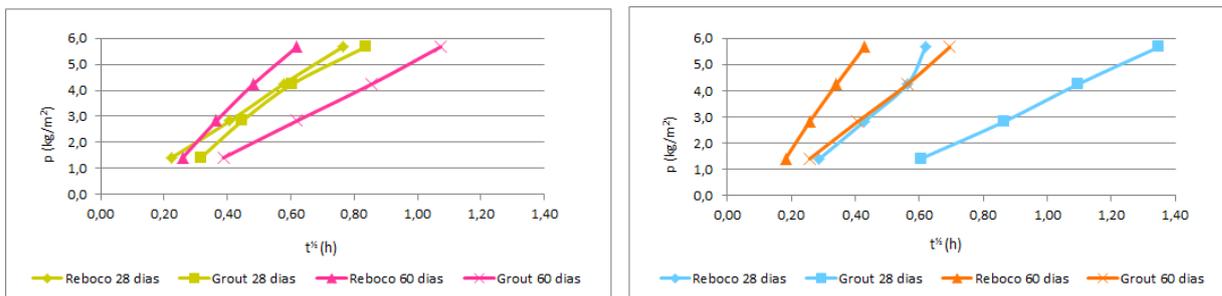


Figura 75 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre grouts com metacaulino em substituição do agregado aos 28 e 60 dias (zona de reboco e grout).

**Efeito na permeabilidade dos grouts, do uso de metacaulino em substituição do ligante ou do agregado – grupo 1/4:**

É ainda interessante efetuar uma análise comparativa do comportamento face à água de um grout pertencente ao 1º. Grupo de amostras (em que o metacaulino substitua parte do ligante) e outro grout pertencente ao 4º. Grupo de amostras (onde o metacaulino substitui parte do agregado). Deste modo, entende-se a influência desta alteração na permeabilidade das caldas de injeção em estudo. Comparam-se por isso, as amostras em que a percentagem de metacaulino testada é mínima, ou seja, 10% no ligante (G1\_I) e 1,5% no agregado (G4\_V); e também as amostras em que a percentagem de metacaulino testada é máxima, ou seja, 30% no ligante (G1\_V) e 3% no agregado (G4\_VI).

Da interpretação dos resultados patentes na figura 76, é possível inferir que o uso de metacaulino como substituto do ligante em 10% (G1\_I), permite obter aos 60 dias de cura, caldas de consolidação muito mais absorventes e porosas, do que quando figura como substituto do agregado em 1,5% (G4\_V).

**Permeabilidade Grout 10% MK (G1\_I) VS Grout 1,5 % MK (fs) (G4\_V)**

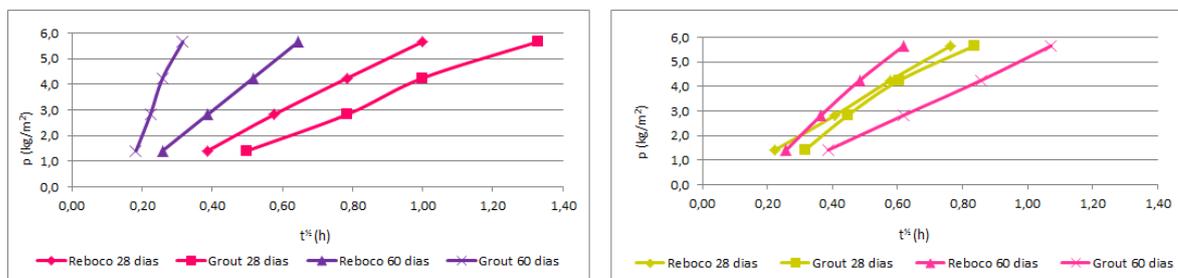


Figura 76 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre grouts com metacaulino em substituição do ligante ou no agregado (percentagens mínimas testadas).

Tendo por base agora a análise dos gráficos da figura 77, constata-se que esta discrepância não é tão visível, e as curvas de absorção de água dos *grouts* aos 60 dias, têm um desenvolvimento mais similar. Contudo, entende-se que o *grout* com substituição de metacaulino no ligante (G1\_V) é ligeiramente mais lento na absorção da franja líquida e portanto apresenta a sua estrutura porosa mais fechada do que o da amostra (G4\_VI).

**Permeabilidade Grout 30% MK (G1\_V) VS Grout 3 % MK (fs) (G4\_VI)**

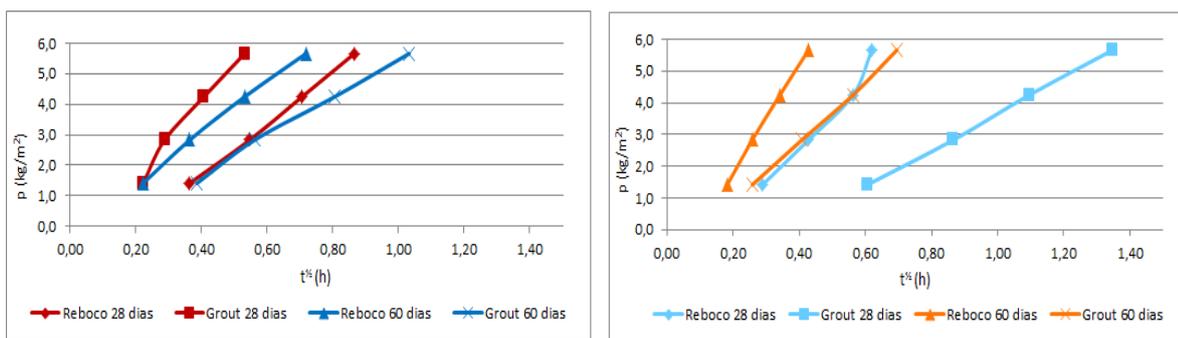


Figura 77 – Absorção de água sob baixa pressão: comparação entre grouts com metacaulino em substituição do ligante ou no agregado (percentagens máximas testadas).

#### 4.4.2. Aderência do *grout* e do reboco

A aderência é uma propriedade extremamente relevante na interação das argamassas de revestimento com o suporte, sendo determinante para o seu comportamento mecânico e durabilidade. A aderência será tanto mais elevada, quanto maior a compatibilidade do revestimento com suporte.

Esta propriedade está intimamente relacionada com a capacidade da argamassa absorver tensões normais ou tangenciais na superfície de interface com o suporte, ou seja, com a capacidade para resistir a deslocamentos por tração e por corte puro, sem causar danos, como sejam os destacamentos (BOTELHO, 2003).

A aderência das argamassas ao suporte é, deste modo, uma propriedade determinante para o seu desempenho, quando aplicada em rebocos, dado que é necessário garantir uma distribuição eficiente de tensões de modo a evitar a tendência para a fendilhação. Esta aderência não deve ser excessiva, nem superior à resistência de tração do suporte, para não levar à degradação do mesmo (CAVACO, 2005) (VEIGA, 1994).

Pretende-se nesta secção, avaliar quantitativamente a resistência de aderência de diferentes caladas de consolidação, a fim de melhor avaliar o seu desempenho como possíveis argamassas de substituição.

Para a obtenção das resistências de aderência à tração foram utilizados os métodos especificados na secção 3.5.3. Pretende-se desta forma, melhorar e otimizar os resultados obtidos, conferindo-lhes maior rigor, ainda que se considere necessária a realização de maior número de provetes para cada amostra simulada. Assim, para cada calda de consolidação desenvolvida, foram realizados três provetes para simulação de consolidação de revestimentos, possibilitando o ensaio de aderência em três idades de cura diferentes, nomeadamente aos 28, 60 e 120 dias.

O anexo F, contém as tabelas que expressam os resultados quantitativos dos ensaios realizados em termos de tensão de aderência (MPa). Para além desta análise, é feita também paralelamente uma abordagem qualitativa aos mesmos de acordo com o tipo de rotura observado e já referenciado na secção 3.5.3.3. do presente trabalho.

Importa ainda referir, que o ensaio de aderência à tração foi realizado sobre os provetes em duas zonas distintas: zona de reboco (não consolidada) e zona de injeção (sujeita a consolidação).

#### **1. Grupo 1 - SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE (CAL AÉREA) POR METACAULINO E DIATOMITE (10, 20 e 30%)**

Neste grupo de amostras, para o ensaio de aderência, visa-se caracterizar a influência da adição de diferentes percentagens de aditivo (metacaulino e diatomite) nas caldas de consolidação (*grouts*), bem como, realizar um estudo comparativo entre si. É ainda avaliado, o efeito sobre a tensão de aderência, quando se introduzem diferentes percentagens de éter de celulose, (agente retentor de água) sobre as composições de metacaulino.

##### ***Efeito sobre a aderência, da adição de diferentes percentagens de metacaulino – grupo 1:***

Procede-se no presente item, a uma análise comparativa dos resultados de tensão de aderência obtidos para as amostras (G1\_I, G1\_III e G1\_V), nas quais se fez variar a percentagem de metacaulino em substituição do ligante, em 10, 20 e 30%, respetivamente.

Pela observação do gráfico da figura 78, é possível verificar que, aos 28 dias de cura, existe uma evolução crescente e significativa da resistência de arrancamento na zona de consolidação, quando se procede ao aumento da percentagem de metacaulino dos 10 para os 30%. A tensão máxima de aderência, nesta idade, ocorre para o *grout* com 30% de metacaulino no ligante e é próxima dos 0,015 MPa.

Aos 60 dias de cura, verifica-se uma inversão na evolução da tensão de aderência, face ao aumento da percentagem de metacaulino como ligante. De facto, a tensão máxima de aderência, para os 60 dias de cura dos provetes, é registada para o *grout* com 10% de metacaulino no ligante. Assim, à medida que a percentagem de metacaulino aumenta de 10 para 30%, ocorre uma diminuição gradual da respetiva tensão de arrancamento de 0,015 para 0,006 MPa.

Este fenómeno era previsível, uma vez que o metacaulino apresenta um efeito tardio da sua atividade pozolânica, deste modo, constata-se que quanto maior é a percentagem deste aditivo no seio das formulação, mais esse efeito se faz retardar, sobre as propriedades resistentes dos *grouts* sujeitos a ensaio.

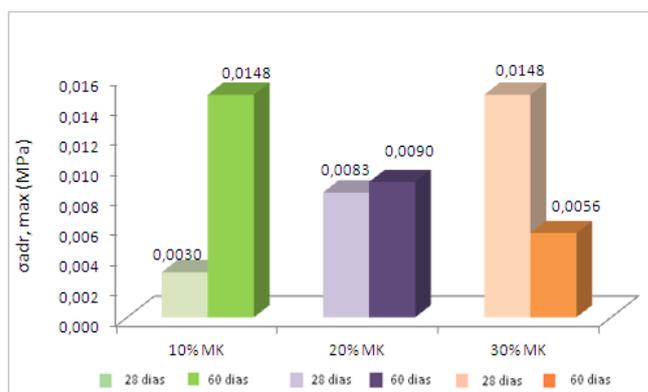


Figura 78 – Aderência na zona de injeção do grout, com diferentes percentagens de metacaulino.

Importa ressaltar que embora os valores recomendados para a tensão de arrancamento, em argamassas de substituição variem entre 0,1 e 0,3MPa (VEIGA, 2003), os valores obtidos no âmbito do presente estudo não são comparáveis, devido à diferença dos suportes utilizados. Na verdade, outros autores referem valores de tensão de aderência para argamassas à base de cal aérea aplicadas em suportes de tijolo entre 0,04 e 0,08MPa (SÁ, 2005), podendo estes servir de base de comparação neste estudo.

Conclui-se então que as caldas de consolidação testadas, com metacaulino no ligante, apresentam ainda valores de tensão de aderência baixos face ao pretendido.

### ***Efeito sobre a aderência, da adição de diferentes percentagens de diatomite – grupo 1:***

Caso o aditivo, aplicado na calda consolidante como ligante, seja a diatomite, pode afirmar-se, através da análise da figura 79, que existe um aumento da resistência de arrancamento na zona consolidada, à medida que se aumenta a percentagem de diatomite de 10 para 20%. Este facto, é verificável para ambas as idades de ensaio, nomeadamente para os 28 e 60 dias de cura.

É perceptível, ainda, que o aumento da percentagem de diatomite no ligante, para valores de 30%, resulta numa diminuição da sua tensão de arrancamento, para as duas idades de ensaio.

Entende-se então, que os valores mais favoráveis para a aderência resultam dos ensaios realizados sobre os *grouts* com 20% de metacaulino em substituição do ligante, sendo próximos dos 0,026 MPa aos 60 dias de cura. É perceptível ainda, que os valores máximos alcançados são ainda algo baixos, não atingindo o mínimo pretendido, ou seja, os 0,04MPa.

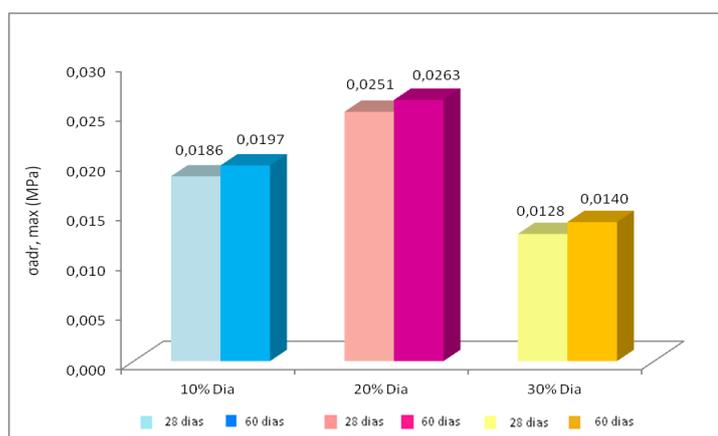


Figura 79 – Aderência na zona de injeção do *grout*, com diferentes percentagens de diatomite.

### ***Efeito comparativo da adição de diferentes percentagens de metacaulino e de diatomite na aderência – grupo 1:***

Através da observação do gráfico da figura 80, é possível comparar a influência que a adição de diferentes aditivos pozolânicos (metacaulino e diatomite) tem, sobre a resistência de arrancamento por tração.

Deste modo, torna-se evidente que, os *grouts* diatomíticos revelam maiores valores de aderência quer aos 28 dias, quer aos 60 dias de cura, face aos *grouts* de metacaulino.

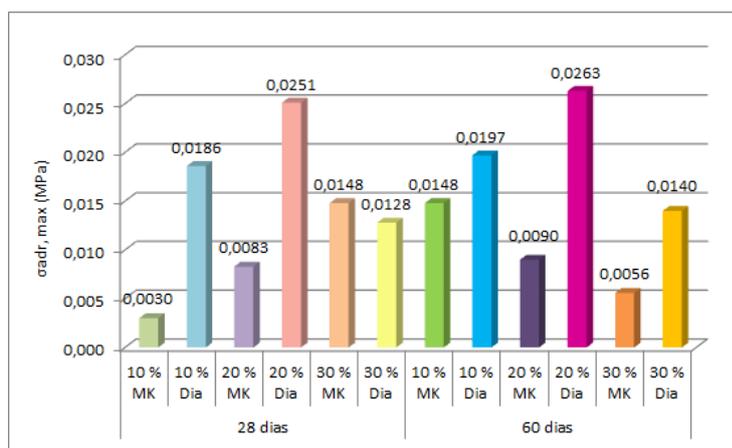


Figura 80 – Efeito comparativo da adição de diferentes percentagens de metacaulino e de diatomite na aderência – grupo 1

Comparando os valores máximos de aderência obtidos para os dois tipos de aditivos já citados, é possível atingir, ao ser usada a diatomite uma tensão máxima de aderência de 0,026 MPa; já o uso de metacaulino como parte do ligante, permite alcançar um valor de aderência máximo próximo dos 0,015 MPa, logo bastante inferior.

#### ***Efeito comparativo da adição de diferentes percentagens de éter de celulose, na aderência – grupo 1:***

A adição de éter de celulose às caldas de consolidação, permite reter a água de amassadura de tal forma que, esta permanece no *grout* por um período de tempo bastante mais longo facilitando assim a presa da mesma. Como agente espessante, este componente possui polímeros solúveis e atua por forma a aumentar a viscosidade e a coesão dos *grouts*, melhorando também a trabalhabilidade e a adesão dos mesmos.

Deste modo, pela observação dos gráficos da figura 81, visualiza-se claramente o seu efeito sobre os *grouts* de metacaulino relativamente à tensão de aderência obtida. A adição de maiores percentagens de éter de celulose (de 0,4 para 0,5%), resulta num aumento significativo da tensão de arrancamento. O valor máximo registado é de 0,020MPa e corresponde a um *grout* com 30% de metacaulino que inclui 0,5% de éter de celulose na sua composição. Um incremento de 0,1% na percentagem deste adjuvante, nesta composição, permitiu obter um acréscimo na tensão de aderência de 0,004 MPa para 0,02 MPa, o que é bastante favorável.

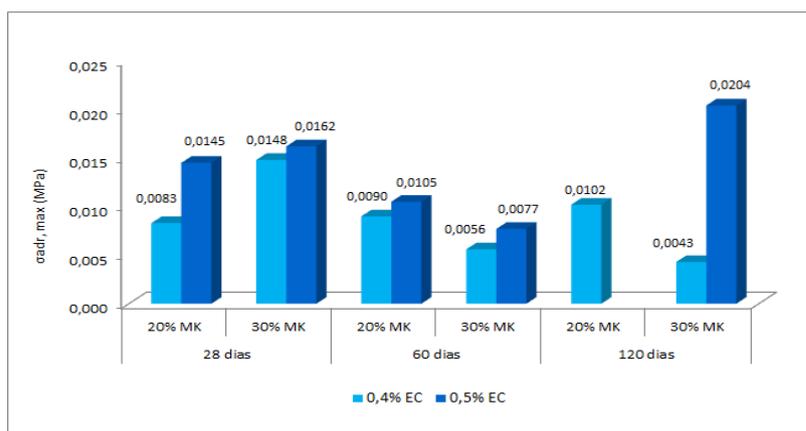


Figura 81 – Efeito comparado da adição de diferentes percentagens de éter de celulose nas composições de metacaulino.

Conclui-se então, que para todas as caldas consolidantes deste grupo de amostras, é favorável o aumento da percentagem de éter de celulose de 0,4 para 0,5%, sobre a sua resistência de aderência à tração. A variabilidade de resultados face à idade dos provetes, prende-se não só com o facto do efeito pozolânico do metacaulino ser tardio, sobre as propriedades resistentes das caldas, mas também com o facto de terem sido realizados diferentes corpos de prova para as três idades de ensaio. Seria interessante em estudos posteriores efetuar o arrancamento a diferentes idades tendo por base sempre o mesmo provete, minimizando assim a sua influência sobre os resultados obtidos.

## 2. Grupo 2 - SUBSTITUIÇÃO DO LIGANTE (CAL AÉREA) POR METACAUULINO E DIATOMITE (20 e 30%) E DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR FILLER CALCÁRIO (10%)

Neste grupo de amostras, é realizado o estudo da aderência, tendo em consideração o efeito da substituição do agregado por 10% de filler calcário. Posteriormente avalia-se, também, a influência na tensão de aderência, da adição de diferentes percentagens de aditivos (metacaulino e diatomite) sobre as caldas de consolidação que possuem 10% de filler calcário no agregado.

Por último, mas não menos importante, é feita uma avaliação da capacidade aderente das caldas de consolidação quando se procede à introdução de adjuvantes na sua composição.

### *Efeito na aderência, da substituição de 10% do agregado por filler calcário – grupo1/2:*

Para melhor interpretar o comportamento resistente em termos de aderência dos *grouts* deste grupo de amostras, importa observar o efeito gerado pela introdução do elemento filler calcário na calda de consolidação como substituto de parte do agregado (10%).

A fim de efetuar esta análise, procedeu-se à comparação de dois *grouts* equivalentes, que diferem apenas no facto de um deles possuir filler calcário no agregado, e o outro não.

Ora, é evidente, pela análise gráfica da figura 82, que esta substituição se revela vantajosa para a aderência dos *grouts*, às três idades de ensaio.

Assim a calda de consolidação com 30% de metacaulino no ligante, sem filler calcário no agregado, revela como valor máximo de tensão de arrancamento, 0,020 MPa. Já a calda de consolidação equivalente, mas com 10% de filler calcário no agregado, possui uma tensão de aderência aos 120 dias superior, ou seja, próxima dos 0,028 MPa.

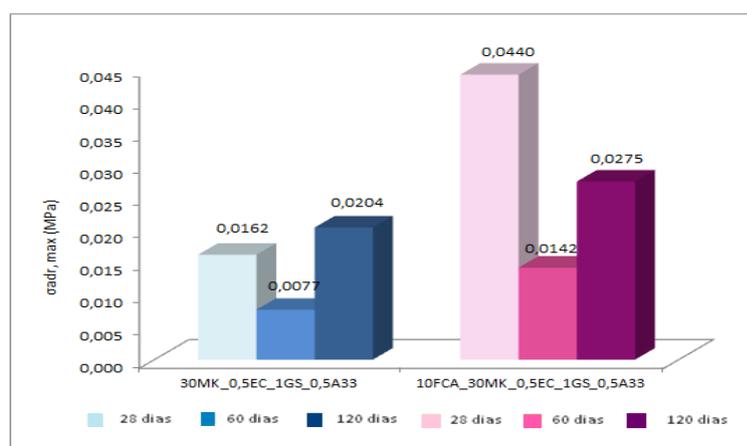


Figura 82 – Efeito de filler calcário em substituição no agregado numa calda de consolidação com metacaulino.

É interessante também analisar, que por se tratar de caldas de consolidação que fazem uso do metacaulino como ligante, ocorre um ressalto na resistência de aderência dos 60 para os 120 dias, em virtude da atividade desta pozolana se revelar tardia, no âmbito das propriedades resistentes dos *grouts*.

Destaca-se o valor de aderência à tração obtido para a calda consolidante com 10% de filler calcário e 30% de metacaulino, aos 28 dias, que atinge o requisito mínimo pretendido, ou seja os 0,04 MPa (SÁ, 2005). Dado o aumento de resistência verificado para os 120 dias de idade, seria interessante prolongar o estudo da aderência destas caldas para idades de cura mais avançadas e verificar se o valor máximo alcançado aos 28 dias é, ou não, suplantado.

### ***Efeito na aderência, da adição de diferentes percentagens de metacaulino – grupo 2:***

São, neste domínio, objeto de comparação as caldas de injeção, que apresentam percentagens crescentes de metacaulino na sua composição, nomeadamente 20 e 30%. Relativamente à figura 83, é perceptível o aumento da percentagem de metacaulino nestas formulações,

permite obter um aumento significativo dos valores de tensão de aderência aos 28 dias de cura, passando de 0,022 MPa, para tensões na ordem dos 0,056 MPa.

Com o evoluir da presa, verifica-se que a calda de consolidação com 20% de metacaulino no ligante e 10% de filler calcário no agregado, revela valores de tensão de arrancamento mais elevados, alcançando para os 60 e 120 dias de cura, o intervalo definido como aceitável, ou seja, entre 0,04 e 0,08 MPa, o que é extremamente positivo.

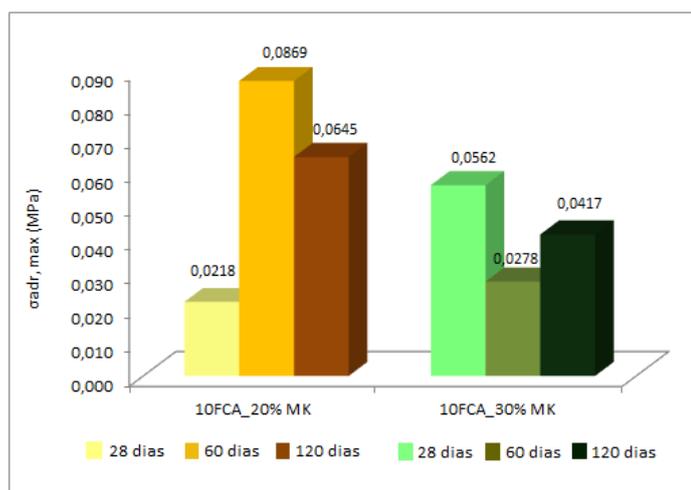


Figura 83 – Efeito na aderência, da adição de diferentes percentagens de metacaulino numa calda de consolidação com com 10% de filler calcário em substituição do agregado.

Não obstante, a calda de consolidação com 30% de metacaulino no ligante e 10% de filler calcário no agregado, apresenta valores de tensão de aderência à tração, também bastante representativos, dado o tipo de caldas em estudo. Após o ressalto verificado dos 60 para os 120 dias de cura, perspectiva-se a sua tendência evolutiva, sendo de todo o interesse a realização de futuros ensaios de aderência para idades de cura mais avançadas.

#### ***Efeito na aderência, da adição de diferentes percentagens de diatomite – grupo 2:***

Realizando exatamente o mesmo tipo de análise, mas agora, atentando nas composições de diatomite (figura 84), é possível constatar que, a maior tensão de arrancamento é obtida para o *grout* em que este aditivo figura em 20% na fração ligante. O valor máximo é registado para esta calda consolidante, aos 28 dias de cura e é de 0,042MPa. Contudo, com o evoluir do processo de cura, esta calda acaba por revelar uma severa perda das suas propriedades resistentes no ensaio de aderência à tração, acabando por atingir aos 120 dias, uma tensão de aderência quase insignificante, de 0,003 MPa.

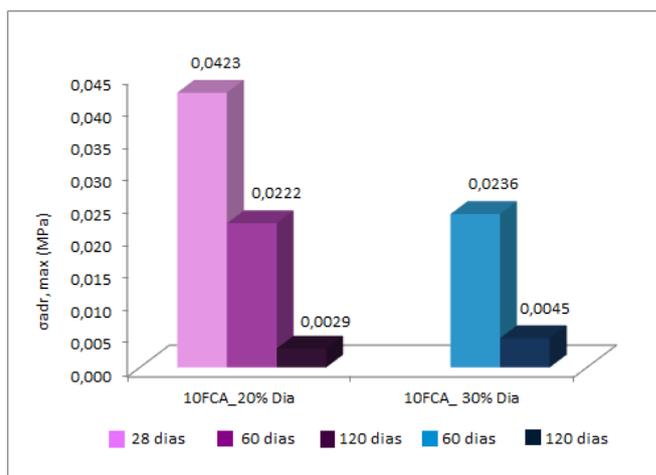


Figura 84 – Efeito na aderência, da adição de diferentes percentagens de diatomite numa calda de consolidação com 10% de filler calcário em substituição do agregado.

Atentando ainda na análise da mesma figura, verifica-se que a calda consolidante com 10% de filler calcário no agregado e 30% de diatomite no ligante, revela valores ligeiramente mais elevados para a tensão de aderência à tração aos 120 dias de idades, embora ainda muitíssimo diminutos e insuficientes. Verifica-se, igualmente, uma perda da capacidade aderente dos 60 para os 120 dias de cura da calda consolidante.

### ***Efeito comparativo da adição de diferentes percentagens de metacaulino e de diatomite, sobre a aderência – grupo 2:***

Pretende-se neste item, efetuar uma análise comparativa, acerca da influência da adição de diferentes tipos de aditivos, nomeadamente o metacaulino e a diatomite, como substitutos do ligante nas propriedades de aderência das caldas de consolidação deste grupo.

Observando a figura 85, percebe-se que o aditivo que facultava melhores resultados de aderência para os *grouts* deste grupo de amostras, é o metacaulino. A tensão máxima de aderência registada corresponde à percentagem de 20% deste aditivo e aproxima-se dos 0,087 MPa aos 60 dias de cura. As composições de diatomite, aos 120 dias de cura, acabam por revelar um comportamento face à aderência extremamente insatisfatório.

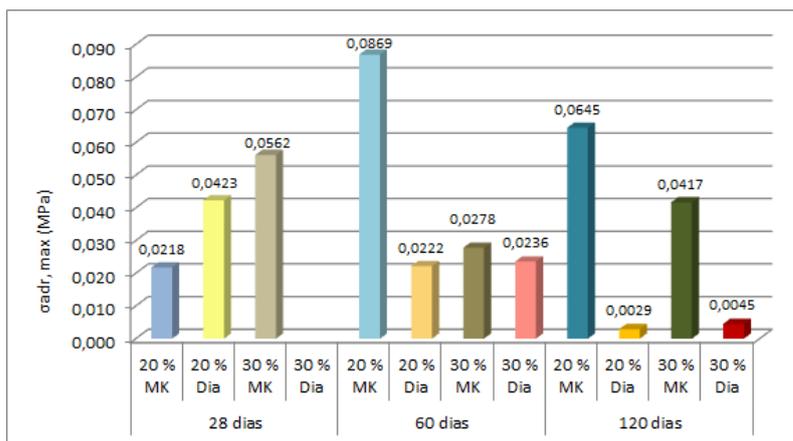


Figura 85 – Efeito comparativo sobre a aderência, da adição de diferentes percentagens de metacaulino e de diatomite nas caldas de consolidação com 10% de filler calcário em substituição no agregado.

***Efeito na aderência, da introdução de adjuvantes nos grouts de metacaulino com 10% de filler calcário no agregado – grupo2:***

De acordo com a figura 86, é visível que a introdução de adjuvantes nas caldas de consolidação com metacaulino no ligante e 10% de filler calcário no agregado, não tem um efeito abonatório sobre a resistência de arrancamento das mesmas. Este facto revela-se antagónico ao registado para o primeiro grupo de amostras, pelo que se subentende que aqui o filler calcário tem um efeito reativo sobre o grupo de adjuvantes adicionado.

O *grout* sem adjuvantes apresenta, deste modo, maiores valores de tensão de aderência à tração, para as três idades de ensaio. O valor máximo obtido é de 0,056 MPa e ocorre para os 28 dias de cura.

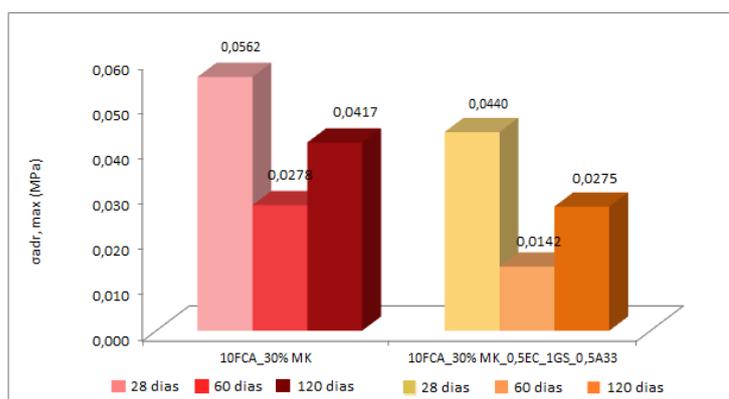


Figura 86 – Efeito na aderência, da introdução de adjuvantes nas caldas de consolidação com metacaulino e 10% de filler calcário.

De facto, tratando-se de *grouts* com 30% de metacaulino no ligante, é constatável a existência de um ressalto nas propriedades mecânicas de aderência dos 60 para ao 120 dias, devido à atividade pozolânica deste aditivo ser retardada. A tensão máxima de arrancamento sofre

assim um aumento, dos 60 para os 120 dias de cura, para as duas caldas de consolidação comparadas. Observa-se ainda que, aos 120 dias, o *grout* sem adjuvantes cumpre os requisitos mínimos de aderência especificados como aceitáveis (acima dos 0,04 MPa), já o *grout* com adjuvantes encontra-se abaixo deste limite.

#### 4. Grupo 4 - SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO (FARINHA DE SÍLICA) POR METACAULINO/DIATOMITE (1,5 E 3%) SEM A ADIÇÃO DE FILLER CALCÁRIO

Pertencendo a este grupo o conjunto de amostras que possuem o metacaulino e a diatomite como substitutos de 1,5 e 3% do agregado, importa perceber de que forma este facto influi nas propriedades de aderência dos *grouts*.

##### *Efeito na aderência, da substituição do metacaulino no agregado em diferentes percentagens – grupo 4:*

Pela análise da figura 87, verifica-se que as caldas de consolidação deste grupo, apresentam menor desempenho face ao arrancamento, se comparadas com o *grout* base (0% de metacaulino em substituição do agregado). Este facto é notório para as três idades de ensaio, nomeadamente para os 28, 60 e 120 dias de cura.

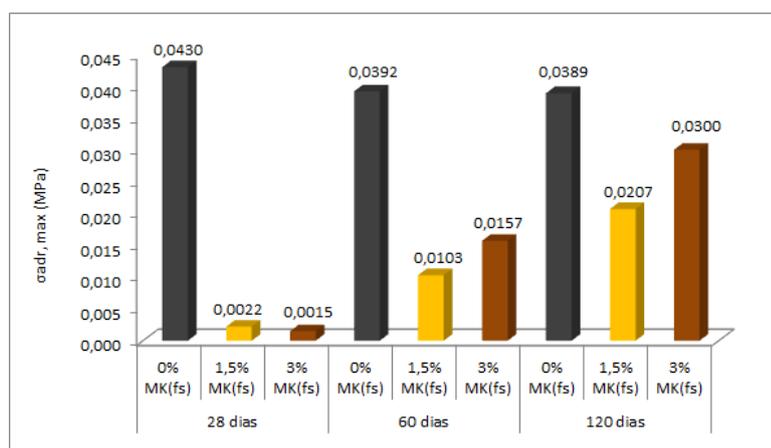


Figura 87 – Efeito na aderência da substituição do metacaulino no agregado em diferentes percentagens.

Não obstante, percebe-se que com o aumento da percentagem de metacaulino em substituição do agregado de 1,5 para 3%, ocorre uma evolução crescente das tensões de aderência obtidas, à medida também que vai decorrendo o processo de cura. A tensão máxima de aderência é registada para a calda de consolidação com 3% de metacaulino no agregado, aos 120 dias, e é de 0,03MPa. Ressalva-se que embora este valor esteja ainda um pouco abaixo do limite

mínimo pretendido (0,04MPa), a sua tendência de crescimento é indicativa da viabilidade deste tipo de composição. Propõe-se a realização de estudos neste domínio, alargando o tempo de cura das amostras.

***Efeito na aderência, da substituição da diatomite no agregado em diferentes percentagens – grupo 4:***

Analisando a figura 88, infere-se que tal como acontecia para os *grouts* de metacaulino, também os de diatomite revelam menores resistências de aderência se comparados com o desempenho do *grout* base. No entanto, salienta-se que se aumentar a percentagem de diatomite de 1,5 para 3% em substituição do agregado, consegue-se alcançar valores da tensão resistente de aderência mais elevados. Estes crescem também em função do tempo de cura das caldas de injeção, atingindo valor máximo aos 120 dias. O *grout* de diatomite com melhor desempenho face à tensão aderência é aquele em que esta pozolana iguala os 3%, ficando no entanto abaixo do valor de referência, ou seja, dos 0,04MPa.

Observa-se contudo, que a tendência destes *grouts*, é para a obtenção de valores de tensão de arrancamento maiores, se realizados ensaios a idades mais avançadas.

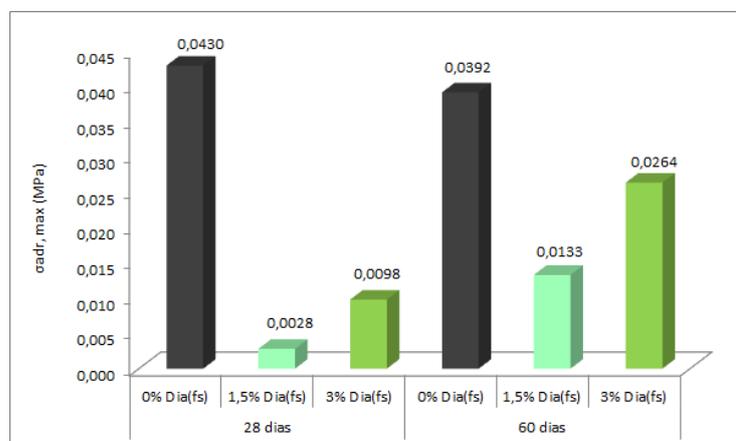


Figura 88 – Efeito na aderência, da substituição da diatomite no agregado em diferentes percentagens.

***Efeito comparativo da adição de metacaulino ou de diatomite como substitutos de parte do agregado, na aderência – grupo 4:***

Na figura 89, faz-se uma análise comparativa dos resultados de aderência, face ao tipo de pozolana usada como substituta de parte do agregado destas caldas de consolidação.

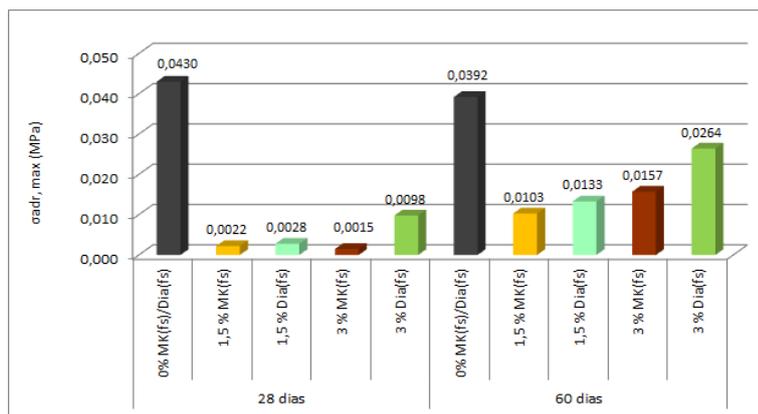


Figura 89 – Efeito comparativo da adição de metacaulino ou diatomite como substitutos de parte do agregado, na aderência – grupo 4.

É notório que as composições em que a diatomite é a pozolana usada como elemento substituto de 1,5 ou 3% do agregado, permitem a obtenção de melhores resultados de tensão de aderência aos 60 dias de cura.

Em suma, percebe-se pela análise detalhada dos resultados obtidos, que na generalidade a capacidade aderente destas caldas de consolidação, de cal aérea e aditivos pozolânicos, é algo baixa. No entanto foi possível obter valores satisfatórios para as composições do 2º. Grupo de amostras e também para aquelas em que o metacaulino ou a diatomite figuram como parte integrante do agregado. É importante notar que os resultados de aderência obtidos neste tipo de estudos, se encontra fortemente condicionado pelo tipo de suporte usado (tijolo corrente atual), que não é, de forma alguma, representativo dos suportes antigos, por ser bastante menos absorvente e muito mais liso. Este facto traduz-se necessariamente numa redução das propriedades de aderência das caldas estudadas.

#### 4.4.2.1. Avaliação das superfícies de rotura decorrentes dos ensaios de aderência

Nesta secção, é feita uma análise qualitativa sobre os resultados do ensaio de aderência, para todas as caldas de consolidação ensaiadas e também para a zona de reboco correspondente.

Os diferentes tipos de rotura observados encontram-se representados e descritos na secção 3.5.3.3. da presente Dissertação. Todos os resultados obtidos neste âmbito, bem como, a descrição pormenorizada dos tipos de rotura observados, está patente nas tabelas do Anexo F.

De seguida, far-se-á uma exposição representativa dos principais tipos de rotura decorrentes dos ensaios de aderência, designadamente para a zona consolidada (*grout*) e para a zona não consolidada (reboco).

Relativamente à zona de consolidação, ou seja, aquela que foi sujeita à injeção das diferentes caldas consolidantes, distinguem-se essencialmente três tipos de rotura distintos:

- **Rotura adesiva** - quando se verifica na interface suporte/1ª camada de emboço; na interface grout/2ª camada de emboço; ou pela pastilha.
- **Rotura coesiva** - no seio da camada de *grout*.
- **Rotura mista** - combinação dos dois tipos de rotura supracitados, na mesma superfície de destacamento.

De seguida, ilustram-se as principais tipologias de rotura registadas para esta zona de ensaio.



Figura 90 – Zona de consolidação: rotura adesiva na interface grout/2ª camada de emboço.



Figura 91 – Zona de consolidação: rotura coesiva no seio da camada de *grout*.



Figura 92 – Zona de consolidação: rotura mista.

Constata-se pela análise das tabelas do anexo F, que o destacamento ocorre maioritariamente no seio da camada de *grout*, tratando-se de uma rotura do tipo coesivo, o que é bastante satisfatório, já que indicia aderência do material consolidante às camadas de reboco adjacentes. Deste modo, o presente estudo resultou na obtenção de *grouts*, capazes de proporcionar um efeito consolidante, às camadas de revestimentos com perda de aderência, cumprindo parte do propósito inicial.

Relativamente à zona não consolidada (reboco), os tipos de rotura característicos serão:

- **Rotura coesiva** - se ocorre no seio da camada das camadas de emboço.
- **Rotura adesiva** - se ocorre na interface entre o suporte/1ª camada de emboço; na interface entre camadas de emboço; ou pela pastilha.

De seguida, ilustram-se as principais tipologias de rotura registadas para esta zona de ensaio.



Figura 93 – Zona não consolidada: rotura a coesiva no seio da 1ª camada de emboço.



Figura 94 – Zona não consolidada: rotura adesiva na interface entre camadas de emboço.



Figura 95 – Zona não consolidada: rotura adesiva na interface suporte/1ª camada de emboço.

Percebe-se pela análise das tabelas do Anexo F, que no que diz respeito ao destacamento na zona não consolidada, este ocorre maioritariamente entre o suporte e a 1ª camada de emboço, tratando-se de um tipo de rotura adesivo. Este facto evidencia a boa interligação entre ambas as camadas de emboço, que passam a funcionar, na maioria dos casos, como um conjunto quando solicitadas à tração.

#### 4.4.2.2. Avaliação qualitativa da carbonatação das caldas de injeção

A carbonatação revela ser um fator extremamente condicionante do comportamento das argamassas de cal aérea e consiste na reação que ocorre entre o hidróxido de cálcio da cal e o  $\text{CO}_2$  da atmosfera, na presença de água. Este processo inicia-se quando a evaporação da água permite que o  $\text{CO}_2$  penetre na argamassa e tenha acesso ao hidróxido de cálcio, formando novamente carbonato de cálcio (CAVACO, 2005).

A carbonatação influi, assim, de forma direta no processo de carbonatação, visto resultar num aumento da compacidade do *grout* ao longo do tempo (já referenciada nos ensaios de permeabilidade à água), contribuindo também, para o aumento das resistências mecânicas. A porosidade da calda de injeção é um fator preponderante para a carbonatação, uma vez que, uma porosidade mais elevada promove maiores velocidades de reação, já que facilita a difusão do  $\text{CO}_2$  pela estrutura interna do *grout*. Deste modo, fomenta-se o aumento da compacidade e a melhoria da capacidade resistente destas caldas.

A carbonatação é, também, condicionada pelo teor de água usado na amassadura e pela quantidade de ligante (cal aérea), destas formulações. A espessura da camada de *grout* e a temperatura a que ocorre o processo são também fatores condicionantes. Como já foi referido anteriormente, uma vez que a carbonatação se processa com redução do volume dos poros, devido ao incremento de cristais de carbonato de cálcio na sua estrutura interna, acaba por determinar, também, os resultados de absorção e permeabilidade à água obtidos.

Considera-se assim pertinente proceder a uma avaliação qualitativa do estado de carbonatação dos *grouts* desenvolvidos, logo após a ocorrência do destacamento decorrente da realização do ensaio de aderência. O objetivo não foi quantificá-la, mas sim, aferir visualmente o grau de carbonatação destas caldas de consolidação para a idade de ensaio mais avançada, ou seja os 120 dias.

Após pulverizar a superfície de destacamento com uma solução de fenolftaleína a 0,2% de concentração e uma vez que, o processo de carbonatação leva à redução do pH da argamassa que se manifesta por uma alteração do indicador de fenolftaleína, observa-se uma alteração de cor, entre as zonas carbonatadas e não carbonatadas.



Figura 96 – Avaliação qualitativa da carbonatação das caldas desenvolvidas, para os 120 dias.

Com a realização deste ensaio, foi possível observar que aos 120 dias de cura, a generalidade das caldas se encontravam ainda muito pouco carbonatadas, facto este, que se justifica pela ausência de ar no interior do reboco, dificultando a difusão das moléculas de  $\text{CO}_2$  pelos poros da argamassa. Os *grouts* encontram-se, assim, confinados entre camadas de reboco, o que retarda em muito o desenvolvimento do processo de carbonatação. Tal como era esperado, a carbonatação destas caldas consolidantes à base de cal aérea é bastante lenta, pois é dependente da evaporação da água e da migração do dióxido de carbono para o seu interior. É perceptível ainda que o bordo exterior da calda consolidante, exposto ao ar, se encontra maioritariamente carbonatado corroborando o facto de se tratar de um processo que se desenvolve do exterior para o interior dos *grouts*.

É expectável, por isso, que a área carbonatada seja cada vez mais extensa, à medida que a cura se vai verificando.

#### 4.4.3. Avaliação da homogeneidade (Ultrassons)

Os resultados do ensaio ultrassónico constam das tabelas do Anexo D.

A velocidade de propagação das ondas ultrassónicas foi claramente influenciada por vários fatores que devem ser tidos em conta na análise dos resultados obtidos. A influência destes fatores traduz-se na grande variabilidade de resultados obtidos, dificultando a sua interpretação, não sendo possível concluir de forma inequívoca acerca dos mesmos.

Um dos fatores determinantes neste aspeto foi a constituição do material analisado, quer para a zona não consolidada (reboco), quer para a zona de injeção de *grout*, já que as ondas se propagam por vibração das partículas sólidas. Deste modo, a velocidade de propagação depende do tipo de agregados, da quantidade de água presente nestes materiais, da quantidade de ligante usado e da compactidade obtida. A areia usada na conceção das camadas de emboço, embora apresentada sempre com a mesma referência pelo fabricante, revelou alguma variação granulométrica, que pode também ter influenciado os resultados deste ensaio. A porosidade é também um fator extremamente condicionante, uma vez que, para argamassas mais porosas a velocidade de propagação revela ser menor.

Pelo fato deste ensaio, ser realizado em laboratório, sobre os provetes concebidos para a simulação de consolidação de revestimentos com perda de aderência, que em muito diferem nas suas características, da real situação que ocorre *in situ*, também a forma dos mesmos afeta os resultados obtidos, já que influi na densidade do material.

Embora se tenha procedido a uma tentativa de padronização da espessura das camadas de reboco, bem como da espessura da camada de *grout*, esta pode apresentar ligeiras variações, que influenciaram igualmente os resultados obtidos. A espessura do elemento a atravessar, e a existência de descontinuidades, como fissuras ou superfícies de transição entre as diferentes camadas condicionaram também a velocidade de propagação das ondas, resultando numa diminuição da mesma.

A distância entre transdutores adotada (13 cm) pode, também, não ter sido suficiente para que a natureza heterogénea do material não afetasse a velocidade de propagação das ondas. Importa salientar que a dimensão do provete não permitiu que a distância entre transdutores fosse maior. Embora se tenha procedido ao alisamento da superfície dos provetes aquando a

sua conceção, persistiu ainda alguma rugosidade superficial, que pode ter também, de alguma forma, comprometido o contato entre os transdutores e a superfície ensaiada.

A diferença entre os resultados obtidos para as duas zonas ensaiadas (zona não consolidada e zona de consolidação), prende-se também, com o facto de o respetivo teor em água ser maior para os *grouts*, do que para as argamassa de reboco. Neste domínio (GOMES, 1995) refere que no caso das argamassas a velocidade de propagação dos ultrassons aumenta com o teor em água. Seria então de esperar que considerando isoladamente este fator, a zona onde se procedeu à injeção da calda de cal revelasse menores tempos de propagação das ondas, ou seja maior velocidade. Constata-se, pelos resultados obtidos para os diferentes grupos de amostras, que é o que maioritariamente acontece, no entanto, alguns valores contradizem o referido, já que este não é, como atrás se viu, o único fator a determinar os resultados deste ensaio. Menores tempos de propagação nas zonas de consolidação, evidenciam maior compacidade dos *grouts*, relativamente à respetiva zona de reboco. Referem-se como exemplo deste facto e para a idade de 120 dias, as amostras: G1\_AB, G1\_I, G1\_III, G1\_IX do Grupo 1; G2\_II, G2\_III; G2\_VIII e G2\_X do Grupo 2 e finalmente, a amostra G4\_VI do Grupo 4.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo incidiu sobre o desenvolvimento e conceção de caldas de cal aérea, passíveis de injeção, através da técnica de *grouting*, para a consolidação de revestimentos antigos com perda de aderência. Pretendeu-se que as caldas de consolidação concebidas satisfizessem os requisitos especificados para os rebocos de substituição, bem como a sua compatibilidade mecânica, física e química com os rebocos tradicionais e os materiais pré-existentes, permitindo assim, um desempenho adequado quando integradas no âmbito da recuperação do património edificado.

O desenvolvimento das caldas de cal fundamentou-se, necessariamente, em estudos prévios de reologia, percebendo assim o efeito de alguns adjuvantes, como o éter de celulose, o gluconato de sódio e o acril 33, sobre o comportamento reológico das caldas de cal e também o efeito de dois aditivos pozolânicos, o metacaulino e a diatomite. Deste modo foi possível desenvolver diferentes composições de argamassas de injeção, aferindo a viabilidade de aplicação de cada uma delas.

Para a caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos *grouts* desenvolvidos, foram realizados ensaios, quer no estado fresco, quer no estado endurecido. Para o estudo das propriedades de aderência foram concebidos provetes para simulação de consolidação entre camadas de reboco com perda de aderência, permitindo não só aferir as características de injetabilidade dos *grouts*, mas também efetuar uma análise quantitativa da resistência de arrancamento, e descritiva dos tipos de rotura observados.

As composições desenvolvidas encontram-se agrupadas por forma a perceber a influência específica de determinados elementos integrantes, como sejam: o papel do aumento da percentagem dos aditivos (metacaulino e diatomite) em substituição do ligante ou do agregado; o efeito da introdução de adjuvantes (éter de celulose, gluconato de sódio e acril 33) e a influência da adição de filler calcário em substituição de parte do agregado (farinha de sílica).

Partindo desta linha orientadora, é realizada uma análise das propriedades de resistência mecânica à flexão e à compressão dos *grouts* (50% de água de amassadura face ao peso total de sólidos) dos diferentes grupos de amostras, percebendo-se que, os valores obtidos neste domínio são compatíveis com o suporte. Segundo (VEIGA, 2003) as resistências à flexão e à compressão devem estar compreendidas entre 0,2 e 0,7 MPa e entre 0,4 e 2,5 MPa,

respetivamente. Na generalidade os *grouts* desenvolvidos cumprem os requisitos mínimos neste domínio. Deste modo, é possível afirmar que não são suscetíveis de promover tensões adicionais no sistema, durante o processo de envelhecimento, se aplicados a uma situação real, como material consolidante. Importa ressaltar que, a introdução do filler calcário como substituto de 10% do agregado, embora origine melhor trabalhabilidade dos *grouts* no estado fresco (em virtude da maior percentagem de partículas finas), resulta, com a presa e endurecimento, numa calda consolidante mais suscetível à fissuração e algo pulverulenta. É, portanto, necessário o ajustamento do teor ideal deste componente nos *grouts*.

Para a análise do comportamento face à água de ascensão capilar, foram realizados ensaios de capilaridade sobre os meios provetes prismáticos resultantes do ensaio de compressão. Os valores do coeficiente de capilaridade obtidos são algo elevados, no entanto, são bastante mais favoráveis com o aumento da percentagem de metacaulino e de diatomite nas composições; com a introdução de filler calcário como substituto de 10% do agregado; e também com a introdução de adjuvantes nas formulações. Conseguem-se assim, obter *grouts* com características de capilaridade concordantes com os requisitos preconizados para as argamassas de substituição (entre 8 e 12 kg/m<sup>2</sup>.h<sup>0,5</sup>). A diatomite permite obter menores valores para a capilaridade, se comparada com o metacaulino, talvez devido à sua granulometria. Também a introdução do filler calcário, é favorável à diminuição do coeficiente de capilaridade, pelo fato deste componente ser constituído por partículas com elevada superfície específica, gerando maior coesão entre as partículas da mistura, reduzindo a sua porosidade.

Visando a avaliação do comportamento das caldas de cal aérea desenvolvidas, na restituição da aderência de revestimentos antigos, foram realizados provetes para simulação de consolidação de camadas de reboco com perda de aderência. As caldas de cal para injeção, foram concebidas com 60% de água relativamente ao peso da fração sólida, a fim de permitir melhor injetabilidade das mesmas. Obtiveram-se caldas fluidas e com consistência adequada a este processo.

Sobre os provetes concebidos para simulação de consolidação de revestimentos, nos quais foram injetados os *grouts*, realizam-se diversos ensaios a fim de caracterizar o comportamento consolidante dos mesmos. Efetuou-se, neste âmbito, a análise do tempo de propagação das ondas ultrassónicas em duas zonas distintas, zona não consolidada (reboco) e zona consolidada (zona de injeção), com auxílio de uma PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester*). Não é possível estabelecer um padrão de resultados

relativos a este ensaio dado os múltiplos fatores que influenciam a sua execução. Pode no entanto constatar-se que, os *grouts* com filler calcário permitem a obtenção de tempos de propagação mais curtos, denunciando uma estrutura interna mais densa e mais compacta, logo menos porosa. É também notório que, de uma forma geral, as zonas não consolidadas revelam valores do tempo de propagação mais elevados sendo, por isso, menos densas e homogêneas do que as zonas consolidadas.

Foi também avaliado o comportamento das zonas consolidadas e não consolidadas, à permeabilidade à água sob baixa pressão, usando a técnica de tubos de Karsten. É notória a variabilidade de resultados, uma vez que, para determinados *grouts*, a absorção da franja líquida é mais rápida do que para o respetivo reboco, e para outros, o processo é antagónico. É possível concluir que, a velocidade de absorção de água está intimamente relacionada com a estrutura porosa do material e consequentemente com a sua compacidade. Deste modo, *grouts* que absorvam mais rapidamente do que a respetiva zona de reboco, são mais porosos, logo menos compactos, denunciando maior índice de vazios. Quando o reboco é mais rápido na absorção do que o *grout*, denuncia o fato da calda de consolidação ser menos porosa e portanto mais compacta do que a argamassa de reboco. Por último, constata-se que, as curvas de absorção obtidas para os *grouts* e para os respetivos rebocos, apresentam desenvolvimentos semelhantes, embora possam evoluir com algum desfasamento no tempo. A permeabilidade à água dos *grouts* está relacionada com o processo de carbonatação, uma vez que com o decorrer do mesmo os poros vão sendo colmatados com o carbonato de cálcio, diminuindo assim o índice de vazios livre, logo a capacidade de absorção. É importante um correto balanceamento entre as propriedades de absorção capilar e de permeabilidade das caldas consolidantes para que o seu desempenho *in situ* seja o mais adequado.

Para quantificar a resistência de aderência à tração, foram realizados ensaios recorrendo a dois métodos distintos: método expedito e *pull-off test*. O método expedito, revelou resultados menos precisos e fiáveis, tendo-se por isso optado por realizar os demais com auxílio da Máquina Universal de tração entretanto adquirida. Conclui-se, pela análise dos resultados obtidos, que as resistências de aderência são bastante baixas, facto este, característico das argamassas de cal aérea. A resistência mecânica de arrancamento, encontra-se também condicionada pelo tipo de suporte utilizado na simulação, uma vez que o tijolo corrente atual não é representativo dos suportes antigos, por ser menos absorvente e bastante mais liso, minorando assim a aderência. Constata-se que o aumento da percentagem de aditivos pozolânicos, nomeadamente metacaulino e diatomite melhora a capacidade de aderência dos *grouts*. Esta propriedade é também bastante favorecida se aumentar a percentagem de éter de

celulose de 0,4 para 0,5%, conseguindo para o mesmo *grout*, um incremento na resistência de aderência de 1,61%.

O valor máximo de tensão de aderência (0,087 MPa), regista-se para o *grout* com 20% de metacaulino em substituição do ligante e 10% de filler calcário em substituição do agregado. Entende-se que o grupo de amostras que contêm 10% de filler calcário como substituto do agregado, revelam resultados de aderência um pouco atípicos dadas as resistências mecânicas obtidas e dada a sua grande propensão para a fissuração. Conclui-se, assim, que os resultados de aderência deste grupo de amostras decorrem sobretudo da presença de grandes percentagens de aditivo pozolânico (até aos 30%) e também da introdução de adjuvantes que se revelam grandes propulsores da capacidade de aderência.

Quando se recorre ao metacaulino e à diatomite como substitutos de parte do agregado, percebe-se que o aumento da percentagem de substituição de 1,5 para 3%, resulta num acréscimo da resistência de aderência dos *grouts*, que se revela ainda mais significativo para o caso do metacaulino. Este acréscimo é notório, também, com o decorrer da presa da calda consolidante, atingindo valores máximos aos 120 dias. Pensa-se pela análise e confrontação dos resultados obtidos, ser este tipo de formulações as mais promissoras, sendo de todo o interesse aprofundar-se o seu estudo para idades de cura mais avançadas.

Efetou-se, ainda, uma avaliação qualitativa do grau de carbonatação dos *grouts*, sobre a superfície de arrancamento, logo após a realização do ensaio de aderência. Corrobora-se assim o facto do processo de carbonatação das argamassas de cal aérea estar completamente dependente da reação do CO<sub>2</sub> com o hidróxido de cálcio, uma vez que pelo facto dos *grouts* estarem confinados entre camadas de emboço, a penetração das moléculas de CO<sub>2</sub> é dificultada, retardando ainda mais a formação do carbonato de cálcio que se irá depositar nos interstícios do material. A superfície carbonatada revelou-se ainda bastante diminuta, aos 120 dias, como era de esperar. Em estudos posteriores seria pertinente realizar uma análise de ATG da calda de injeção.

Foi realizada, também, uma análise qualitativa das diferentes superfícies de rotura observadas como resultado do ensaio de aderência. Constatou-se que na zona não consolidada, a rotura é maioritariamente adesiva, ocorrendo na interface suporte/1ª camada de emboço e que na zona de injeção da calda de consolidação, a rotura se observa maioritariamente no seio da camada de grout (rotura coesiva), manifestando alguma adesão às camadas de emboço adjacentes, o que é bastante satisfatório.

Com a realização do presente estudo, foi possível contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de intervenção conservativa do património edificado, com recurso a técnicas e materiais sustentáveis e compatíveis com os originais. Valoriza-se também o facto dos materiais utilizados para a conceção das referidas caldas serem de produção nacional. O uso de aditivos pozolânicos como o metacaulino e a diatomite, permite obter materiais compatíveis, de baixo custo e impacto ambiental, obtidos por calcinação a temperatura moderada, sendo ideais para reabilitação de revestimentos antigos. Neste contexto, o estudo de argamassas tradicionais de cal aérea para a reabilitação de edifícios antigos deve adquirir uma dinâmica crescente em virtude de se constituírem como a solução mais adequada em intervenções de reabilitação em edifícios antigos. Fomenta-se também através deste estudo, o interesse pelo uso das pozolanas com o objetivo de ultrapassar o elevado tempo de endurecimento, mas também pelo incremento das resistências mecânicas.

A escassez de estudos anteriores no âmbito da consolidação de revestimentos antigos, faz com que, ainda haja necessidade de melhorar as técnicas de ensaio em laboratório, promovendo resultados cada vez mais precisos e rigorosos e também, com que seja necessária a realização de ensaios *in situ*, que melhor afirmam o desempenho destes consolidantes quando aplicados no âmbito de uma intervenção concreta e real. Entende-se ser uma mais valia, a realização de ensaios sobre composições com diferentes percentagens de aditivo pozolânico em substituição de parte do agregado.

Abrem-se, assim, boas perspetivas para a utilização de caldas de consolidação similares às desenvolvidas, podendo ser aprofundado e complementado o seu estudo com demais ensaios, como: envelhecimento acelerado, porosidade, aplicação e monitorização *in situ* sobre um revestimento antigo com perda aderência.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, J. - *Estudos Cromáticos nas Intervenções de Conservação em Centros Históricos*. Évora, Universidade de Évora, 1999.

Aguiar, J. - *Algumas questões sobre cor e cidade histórica: Évora, exemplar e pioneira (como sempre)*, em Revista Centros Históricos, nº. Março de 2001, 2001.

Aguiar, J.; Tavares, M.; Veiga, M. - *Consolidação de revestimentos exteriores (rebocos e barramentos) de edifícios antigos*. Reflexões para um plano de estudos. Relatório 216/01-NA, Lisboa, LNEC, 2001.

Aguiar, J.; Veiga, M. - *Definição de estratégias de intervenção em revestimentos de edifícios antigos*, em atas do 1º Encontro nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios (PATORREB), Porto, FEUP, Março de 2003.

Almeida, N.; Faria, P.; Pinto, A. - *Argamassas com base em cal aérea e cinzas de casca de arroz para conservação do património construído*. Trabalho apresentado em 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, In atas do 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, 2007.

Anunciada, R. - *Modelos de degradação para rebocos exteriores tradicionais*. Trabalho final de curso, 211 p. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2004.

Appleton, J. - *Reabilitação de edifícios antigos*. Patologias e tecnologias de intervenção. Edições Orion, 1ª Ed., Setembro de 2003.

Azeiteiro, L. - *Estudos de caldas de injeção para consolidação de revestimentos*. Tese de Mestrado pela Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia da Cerâmica e do Vidro, 2011.

Botelho, P. - *Argamassas tradicionais em suportes de alvenaria antiga: comportamento em termos de aderência e durabilidade*. Tese de Mestrado pelo Instituto Superior Técnico. Lisboa, Fevereiro de 2003.

Borsoi, G.; Veiga, M.; Silva, A. - *Consolidação de argamassas históricas de revestimento com produtos compatíveis – avaliação da eficácia*. In 4º Congresso de Argamassas e ETICS, APFAC, Coimbra, 29-30 Março de 2012.

Carasek, H. - *Factores que exercem influência na resistência de aderência de argamassas*, p.133-146. Em II Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Salvador, B.A, 1997.

Carasek, H., Pais, I.; Andrade, S.; Angelim, R.; Hasparyk, N.; Oliveira, R.; Passos, J.; Thon, D. - *O efeito dos finos calcários nas propriedades da argamassa de revestimento*. Em III Simpósio Brasileiro de Tecnologias de Argamassas, Vitória, E.S, Abril 1999.

Cardoso, F. - *Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico*. Tese de doutoramento pela Universidade de São Paulo: Escola Politécnica, São Paulo, 2009.

Carneiro, A.; Cincotto, M. - *Requisitos e critérios de desempenho para revestimento de camada única em argamassa de cimento e cal*, pp. 326-337. Em I Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Goiânia, 16-17 de Agosto, 1995.

Cavaco, L. - *Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos: influência no desempenho*, 127 p. Dissertação de Mestrado em Construção. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2005.

Coutinho, A. - *Fabrico e Propriedades do Betão*, Volume I, Ed. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1997.

Coutinho, A. - *Fabrico e Propriedades do Betão* - Volume I, Ed. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2ª Edição, Lisboa, 1998.

Couto, A. - *Especificidades e exigências das argamassas na reabilitação de edifícios antigos*, 2007. Disponível em [www: <http://hdl.handle.net/1822/8347>](http://hdl.handle.net/1822/8347).

Faria, P. - *Revestimentos de impermeabilização de paredes à base de ligantes minerais*. Modelização experimental de revestimentos aplicados sobre um suporte. Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Construção. LNEC, CSTB, IST, 1993.

Faria, P. - *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, FCT/UNL, 2004.

Flores, I.; Brito, J. - *Estratégias de Manutenção em Fachadas de Edifícios*. Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho, nº. 13, p. 47-58, Janeiro de 2002.

Flores-Colen, I.; Brito, J. de; Freitas, V.; Silva, L. - *A Resistência superficial como característica de desempenho de rebocos exteriores*. Em 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, PATORREB, FEUP, Porto, 19-20 Março de 2006.

Flores-Colen, I. - *Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção preditiva*, 487 p. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2009.

Gaspar, P. - *Metodologia para o cálculo da durabilidade de rebocos exteriores correntes*, 209 p. Dissertação de Mestrado em Construção, Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2002.

Gaspar, P. L.; Brito, J. - *Diagnóstico e reparação de patologias de rebocos em construções correntes*. Em PATORREB 2003 - 1º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto, FEUP, 18-19 Março de 2003.

Gaspar, P.; Flores-Colen, I.; Brito, J. de - *Técnicas de diagnóstico e classificação de anomalias por perda de aderência em rebocos*. Em 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, 22-23 de Novembro de 2007.

Godoy, E.; Barros, M. - *Proposta de procedimento de ensaio para avaliação do módulo de deformação de argamassas*, pp. 159-167. Em III Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Vitória, 22-23 de Agosto de 1999.

Gomes, A. - *Caracterização de argamassas tradicionais utilizadas nos revestimentos exteriores dos edifícios*, 269 p. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1995a.

Gomes, A. - *A utilização da ultrassonografia na avaliação das propriedades mecânicas dos revestimentos de paredes através de ensaios “in situ”*, pp.445-456. Em II Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Salvador, 17-18 de Abril, 1995b.

Gonçalves, A.; Brito, J. de; Branco, F. - *Anomalias em paredes de alvenaria de edifícios recentes*. Em Construção 2007, 3º Congresso Nacional, Coimbra, 17-19 de Dezembro, 2007.

Gonçalves, T. - *Guarnecimentos tradicionais para paredes exteriores de edifícios antigos*. Lisboa, LNEC, Janeiro de 1996. Proc.º 083/14/10790. Relatório 11/96-NCCt, 1996.

Guerra, J.; Assunção, J. - *Materiais de Construção: Argamassas e Rebocos*. Apontamentos da disciplina de Materiais de Construção, Série Materiais, 3ª Edição, 2010.

Horie, C. - *Materials for conservation, organic consolidants, adhesives and coatings*. London and Boston, Butterworths Editions, 1990.

LNEC - *Revestimento de paredes: Ensaio de arrancamento por tracção*. Ficha de ensaio FE,Pa36, 3 p. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Abril, 1986.

Luso, E.; Lourenço, P.; Ferreira, R. - *Injeções para consolidação de construções em terra: Revisão do conhecimento e métodos de ensaio*. Comunicação ao V Seminário de Arquitectura em terra (V ATP), Universidade de Aveiro, Aveiro, 10-13 Outubro, 2007.

Magalhães, A. - *Patologia de rebocos antigos*. LNEC, Cadernos de Edifícios, nº 2, Maio, 2002.

Margalha, G.; Veiga, R.; Brito, J. - *Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea*. Actas do 2º Congresso Nacional de Argamassas da Construção, Lisboa, APFAC, Novembro 2007

Martins, A. - *Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco*, 131 p., Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008.

Martins, C. - *Estudo e desenvolvimento de pastas de cal para a aderência de rebocos antigos*. Tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 2008.

Miltiadou. - *Comportamento Meccanico di Murature Consolidate Con Materiali e Tecniche a Base di Calce*. Tesi de Dottorato, Universita Degli Studi di Trieste. 2000

Miranda, V. - *Análise da aderência de soluções de reboco tradicional sobre suportes de betão*, 147 p. Dissertação de Mestrado em Construção, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Maio de 2004.

Nepomuceno - *Ensaio não destrutivo em betão*, 428 p. Trabalho de Síntese, Covilhã, Universidade da Beira Interior, 1999.

Nero, J. - *A evolução na utilização e no conhecimento dos materiais de construção: parte I - Da Antiguidade à Revolução Industrial*. *Arquitectura e Vida*, n.º11, pp. 68-73, 2001a.

Nero, J. - *Os rebocos: I parte*. *Arquitectura e Vida*, n.º20, pp. 112-117, 2001b.

Nero, J. - *Os rebocos: II parte*. *Arquitectura e Vida*, n.º 21, pp. 90-95, 2001c.

Paiva, H. - *Caracterização reológica de argamassas*. Tese de mestrado pela Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Aveiro, 2005.

Paulo, S. - *Caracterização de argamassas industriais*. Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos, 142p. Universidade de Aveiro, 2006.

Pinto, A.; Gomes, A.; Pinto, J. - *Argamassas*. Documento de apoio à disciplina de Materiais de Construção II. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.

Rato, V. - *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.

Rilem - *Water absorption under low pressure: Pipe method*. Test N° II.4, Tentative. Recommendations. Paris, RILEM, 1980.

Rojas, I. - *Artes de la Cal*. Universidad de Alcalá de Henares, Instituto Español de Arquitectura, Madrid, 2002.

Sá, A. - *Rebocos em Paredes de Pedra e Cal*. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa, 2005.

Scartezini, L.; Carasek, H. - *Factores que exercem influência na resistência de aderência à tracção dos revestimentos de argamassas*, p. 251-264. Em V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, São Paulo, 2003.

Silva, H.; Heitor, T. - *O Elemento "Fachada" em Projectos de Reconversão/Requalificação*, pp.775-782, Congresso Nacional de Construção 2001, Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2001.

Silva, N.; Buest, G.; Campiteli, V. - *A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento*. Em II SUFFIB - Seminário: O uso da fração fina da britagem, Brasil, São Paulo, Cuchierato et al. (eds), 2005.

Sousa, V.; Pereira, F.; Brito, J. - *Rebocos tradicionais: principais causas de degradação*. *Engenharia Civil*, n.º.23, pp. 05-18, Maio de 2005.

Tavares, M. - *A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos: Uma metodologia de estudo e reparação*. Tese de Doutoramento apresentada à Universidade Técnica de Lisboa / Faculdade de Arquitectura, 2009.

Tavares, M.; Aguiar, J.; Veiga, M. - *Conservação e restauro de antigos revestimentos exteriores: caracterização de alguns casos (dos séc. XVIII e XIX na zona de Lisboa)*. In V Seminário Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (V SBTA), São Paulo, Brasil, 11-13 de Junho de 2003.

Tavares, M.; Fragata, A.; Veiga, M. - *A consolidação da falta de aderência de rebocos antigos: um estudo com diferentes argamassas para grouting*, 2º. Congresso Nacional de Argamassas de Construção (APFAC), Lisboa, FIL, 22 e 23 de Novembro de 2007.

Toumbakari, E. - *Lime-Pozzolan-Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Masonry Walls*, PhD Thesis, Dept Burgerlijke Bouwkunde, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2002.

Veiga, M.; Carvalho, F. - *Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano*, Actas do 2º. Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios de Habitação (ENCORE), Vol. 1, p. 195-206, LNEC, Lisboa, 1994.

Veiga, M. - *Comportamento de revestimentos de fachadas com base em ligante mineral. Exigências funcionais e avaliação do desempenho*. In 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, 24 e 25 de Novembro de 2005.

Veiga, M. - *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes*. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação, 458 p., Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LNEC, Lisboa, Maio 1997.

Veiga, M. - *Protecção contra a água de paredes de edifícios antigos*. Avaliação experimental da capacidade de protecção de argamassas de reboco com base em cal. Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas Lisboa - REPAR 2000, Lisboa, LNEC, Junho de 2000.

Veiga, M. - *Revestimentos de paredes: funções e exigências*. Revista: Arquitectura e Vida. Vol. n.º 12, p pp.74 a 80, 2001.

Veiga, M. - *As argamassas na conservação*. In Actas das 1ªs Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções existentes, Aveiro, 26 de Novembro de 2003. Conferência convidada. Coleção Comunicações, COM 103, LNEC, Lisboa 2003.

Veiga, M. - *Intervenções em Revestimentos Antigos: Conservar, Substituir ou ... Destruir*. Materiais de Construção, 126, pp. 45-50, 2006.

Veiga, M.; Aguiar, J.; Silva, A.; Carvalho, F.- *Methodologies for Characterisation and Repair of Mortars of Ancient Buildings*, pp. 353-362, Proceedings of the 3rd International Seminar Historical Constructions 2001, Guimarães, Universidade do Minho, 2001

Veiga, M.; Aguiar, J.; Silva, A.; Carvalho, F. - *Conservação e Renovação de Revestimentos de Paredes de Edifícios Antigos*. Lisboa, LNEC, Coleção Edifícios (CED) n.º 9. ISBN 978-972-49-2009-2, Julho de 2004

Veiga, M.; Tavares, M. - *Características das paredes antigas. Requisitos dos Revestimentos por Pintura. Actas do Encontro A indústria das tintas no início do século XXI*. Lisboa, APTETI, Outubro de 2002.

Velosa, A. - *Influência das adições pozolânicas em argamassas de cal para a conservação de edifícios antigos*, pp. 103-116, Cadernos de Edifícios nº.2. Lisboa, LNEC, Outubro 2002.

Vintzileou, E. - *Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts, Mechanical Properties of Masonry before and after Grouting*. Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi. 2006

**Normas e Documentação técnica:**

CEN, Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). EN 1015-3:1999.

CEN, Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. EN 1015-11:1999.

CEN, Methods of test for mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates. EN 1015-12:2000.

CEN, Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. EN 1015-18: 2002.

DIN 18555: Testing of mortars with mineral binders, part 7: Determination of water retention value, (November 1987)

RILEM - Water absorption under low pressure. Pipe method. Test N° II.4, Tentative Recommendations. Paris: RILEM, 1980.



# ANEXOS



Tabela A.1. Resultados do ensaio de espalhamento dos grouts para a execução dos provetes prismáticos (50% de água face ao peso total de sólidos).

Ensaio de espalhamento							
Grupo 1					Grupo 2		
Grout	W* (%)	Esp. inicial (mm)	Esp. final (mm)	Grout	W* (%)	Esp. inicial (mm)	Esp. final (mm)
G1_AB	50	220	260	G2_AB	50	210	250
G1_I	50	215	255	G2_II	50	200	240
G1_II	50	210	250	G2_III	50	200	240
G1_III	50	210	250	G2_IV	50	200	245
G1_IV	50	205	245	G2_V	50	215	255
G1_V	50	205	240	G2_VI	50	195	235
G1_VI	50	205	235	G2_VII	50	195	235
G1_VII	50	215	250	G2_VIII	50	200	235
G1_VIII	50	210	245	G2_IX	50	200	235
G1_IX	50	210	245	G2_X	50	195	230
G1_X	50	205	240	G2_XI	50	195	230
G1_XI	50	205	235				
G1_XII	50	200	230				

W\* (%) – percentagem de água de amassadura face ao peso total de sólidos

**Tabela A.2.** Resultados do ensaio de espalhamento das argamassas de reboco de cal área para a execução dos provetes destinados aos ensaios de consolidação de revestimentos – suporte (18% de água face ao peso total de sólidos).

Ensaio de Espalhamento													
Argamassa de reboco (execução do suporte)													
Provete	W*(%)	Suporte para injeção - ensaios aos 28 dias				Suporte para injeção - ensaios aos 60 dias				Suporte para injeção - ensaios aos 120 dias			
		1ª camada de emboço		2ª camada de emboço		1ª camada de emboço		2ª camada de emboço		1ª camada de emboço		2ª camada de emboço	
		Esp. inicial (mm)	Esp. final (mm)	Esp. inicial (mm)	Esp. final (mm)	Esp. inicial (mm)	Esp. final (mm)	Esp. inicial (mm)	Esp. final (mm)	Esp. inicial (mm)	Esp. final (mm)	Esp. inicial (mm)	Esp. final (mm)
G1_AB	18	110	220	115	220	105	210	105	210	110	220	105	210
G1_I	18	110	220	105	210	110	220	105	210	110	220	110	210
G1_II	18	105	220	105	210	105	210	115	220	105	220	110	210
G1_III	18	105	210	105	210	110	220	110	210	105	220	105	210
G1_IV	18	110	220	110	220	110	220	105	210	105	215	110	220
G1_V	18	110	220	105	210	105	210	105	210	110	220	110	220
G1_VI	18	105	220	110	210	110	220	110	220	105	215	115	220
G1_VII	18	105	220	110	210	110	220	110	220	105	210	105	210
G1_VIII	18	105	215	110	210	110	220	110	220	110	220	110	220
G1_IX	18	110	220	110	210	115	220	110	220	110	220	110	220
G1_X	18	105	215	110	210	110	210	110	220	105	215	105	215
G1_XI	18	105	210	115	220	105	210	105	210	105	210	105	210
G1_XII	18	110	220	110	210	105	210	105	210	110	210	115	220
G2_AB	18	105	210	115	220	105	210	110	220	110	210	110	210
G2_II	18	110	220	115	220	110	220	110	220	110	210	105	210
G2_III	18	110	220	115	220	110	220	110	220	110	210	110	220
G2_IV	18	105	210	105	210	110	220	110	220	110	210	105	210
G2_V	18	105	210	105	210	110	220	105	215	115	220	110	220
G2_VI	18	110	220	105	210	105	215	115	220	110	210	105	210
G2_VII	18	105	210	105	210	105	210	115	220	105	210	110	220
G2_VIII	18	105	210	105	210	110	220	110	210	110	220	110	220
G2_IX	18	115	220	110	220	110	220	105	210	105	210	110	220
G2_X	18	110	210	110	220	105	210	110	220	110	210	110	220
G2_XI	18	105	210	110	220	110	210	110	220	110	210	110	220
G3_I	18	110	220	105	215	105	210	105	210	115	220	110	220
G3_II	18	105	210	105	210	110	220	105	210	115	220	110	220
G3_V	18	110	210	110	220	110	220	110	210	110	210	110	220
G3_VI	18	110	210	105	210	110	220	110	210	110	210	110	220
G4_I	18	115	220	110	220	110	220	105	210	110	210	110	220
G4_II	18	115	220	110	220	115	220	110	220	110	210	110	220
G4_III	18	110	220	110	220	115	220	110	220	115	220	115	220
G4_IV	18	110	220	110	220	110	220	115	220	110	210	105	210
G4_V	18	110	220	110	220	110	220	105	210	115	220	110	220
G4_VI	18	110	220	110	220	110	220	110	220	115	220	110	220
G4_VII	18	110	220	115	220	210	110	220	110	115	220	110	220
G4_VIII	18	210	110	220	110	210	105	210	110	105	210	110	220

W\* (%) – percentagem de água de amassadura face ao peso total de sólidos

**Tabela B.1.** Resistência mecânica à flexão e à compressão para as formulações do Grupo 1.

Formulação	R.flexão (MPa)			R.compressão (MPa)		
	28 dias	60 dias	120 dias	28 dias	60 dias	120 dias
G1_AB	0,13	0,34	0,40	0,36	0,38	0,72
G1_I	0,21	0,68	0,20	0,37	0,49	0,37
G1_II	0,08	0,87	0,17	0,24	0,47	0,44
G1_III	0,15	0,46	0,18	0,41	0,51	0,39
G1_IV	-	0,67	-	0,46	0,54	0,34
G1_V	0,45	0,66	0,27	0,54	0,61	0,39
G1_VI	0,49	0,32	-	0,56	0,52	0,34
G1_VII	0,42	0,52	-	0,49	0,63	0,46
G1_VIII	0,62	0,23	-	0,62	0,47	0,51
G1_IX	-	0,32	0,19	0,55	0,52	0,49
G1_X	0,61	0,61	0,27	0,57	0,53	0,43
G1_XI	0,14	0,32	0,23	0,64	0,59	0,51
G1_XII	-	0,55	0,26	0,66	0,61	0,47

**Tabela B.2.** Resistência mecânica à flexão e à compressão para as formulações do Grupo 2.

Formulação	R.flexão (MPa)			R.compressão (MPa)		
	28 dias	60 dias	120 dias	28 dias	60 dias	120 dias
G2_AB	0,17	0,16	0,30	0,30	0,49	0,64
G2_II	0,26	-	0,11	0,69	0,86	0,72
G2_III	0,18	0,10	0,32	0,44	1,03	0,67
G2_IV	0,08	0,17	0,31	0,35	0,70	0,58
G2_V	0,16	0,47	0,40	0,18	0,78	0,68
G2_VI	0,20	0,05	0,14	0,76	0,39	0,68
G2_VII	0,20	0,18	0,29	0,33	0,60	0,71
G2_VIII	0,28	0,17	0,22	0,66	0,85	0,68
G2_IX	0,35	0,09	0,09	0,50	1,02	0,68
G2_X	0,09	0,14	0,15	0,33	0,40	0,66
G2_XI	0,09	0,16	0,34	0,17	0,43	0,68

**Tabela B.3.** Resistência mecânica à flexão e à compressão para as formulações do Grupo 3.

Formulação	R.flexão (MPa)			R.compressão (MPa)		
	28 dias	60 dias	120 dias	28 dias	60 dias	120 dias
G3_I	0,23	0,15	0,17	0,68	0,83	0,88
G3_II	0,13	0,05	0,23	0,66	1,03	1,10
G3_V	0,45	0,14	0,14	0,39	0,65	0,32
G3_VI	0,48	0,19	0,29	0,34	0,68	0,41

**Tabela B.4.** Resistência mecânica à flexão e à compressão para as formulações do Grupo 4.

Formulação	R.flexão (MPa)			R.compressão (MPa)		
	28 dias	60 dias	120 dias	28 dias *	60 dias	120 dias
G4_I	0,05	*	*	0,87	*	*
G4_II	0,12			0,82		
G4_III	0,12			0,41		
G4_IV	0,04			0,50		
G4_V	0,31			0,32		
G4_VI	0,30			0,83		
G4_VII	0,16			0,45		
G4_VIII	0,20			0,44		

**Notas:**

(-) Não foi possível efetuar o ensaio já que as amostras fraturaram previamente, não apresentando comprimento mínimo de 10 cm. Este fato decorre da presença de uma elevada percentagem de água nas composições estudadas.

(\*) Ensaio a realizar.

**Tabela C.1.** Coeficientes de capilaridade dos grouts com 50% de água (W) – Grupo 1.

Amostra	Formulação	Coeficiente de capilaridade (C) (kg/m <sup>2</sup> . h <sup>0,5</sup> )		
		28 dias	60 dias	120 dias
G1_AB	GCA_13_50W	45,47	43,80	43,00
G1_I	GCA_13_50W_10MK_0,4EC_1GS_0,5A33	-	18,63	32,79
G1_II	GCA_13_50W_10MK_0,5EC_1GS_0,5A33	12,51	21,26	19,99
G1_III	GCA_13_50W_20MK_0,4EC_1GS_0,5A33	-	17,60	20,00
G1_IV	GCA_13_50W_20MK_0,5EC_1GS_0,5A33	10,89	20,25	20,15
G1_V	GCA_13_50W_30MK_0,4EC_1GS_0,5A33	-	14,83	19,96
G1_VI	GCA_13_50W_30MK_0,5EC_1GS_0,5A33	9,56	14,94	18,36
G1_VII	GCA_13_50W_10Dia_0,4EC_1GS_0,5A33	14,96	17,97	25,14
G1_VIII	GCA_13_50W_10Dia_0,5EC_1GS_0,5A33	-	16,30	16,95
G1_IX	GCA_13_50W_20Dia_0,4EC_1GS_0,5A33	-	20,69	17,05
G1_X	GCA_13_50W_20Dia_0,5EC_1GS_0,5A33	14,79	20,26	15,61
G1_XI	GCA_13_50W_30Dia_0,4EC_1GS_0,5A33	21,37	31,41	16,55
G1_XII	GCA_13_50W_30Dia_0,5EC_1GS_0,5A33	22,15	-	16,31

**Tabela C.2.** Coeficientes de capilaridade dos grouts com 50% de água (W) – Grupo 2.

Amostra	Formulação	Coeficiente de capilaridade (C) (kg/m <sup>2</sup> . h <sup>0,5</sup> )		
		28 dias	60 dias	120 dias
G2_AB	GCA_13_50W_10FCA	43,31	40,76	40,74
G2_II	GCA_13_50W_10FCA_20MK	45,15	44,34	38,90
G2_III	GCA_13_50W_10FCA_20Dia	40,72	32,10	31,24
G2_IV	GCA_13_50W_10FCA_0,5EC_1GS_0,5A33	7,55	7,16	15,28
G2_V	GCA_13_50W_0,5EC_1GS_0,5A33	16,30	14,20	12,29
G2_VI	GCA_13_50W_10FCA_20MK_0,5EC_1GS_0,5A33	0,85	12,86	19,78
G2_VII	GCA_13_50W_10FCA_20Dia_0,5EC_1GS_0,5A33	11,99	17,23	17,06
G2_VIII	GCA_13_50W_10FCA_30MK	33,43	25,77	43,21
G2_IX	GCA_13_50W_10FCA_30Dia	37,72	22,05	15,89
G2_X	GCA_13_50W_10FCA_30MK_0,5EC_1GS_0,5A33	17,55	11,83	12,93
G2_XI	GCA_13_50W_10FCA_30Dia_0,5EC_1GS_0,5A33	20,51	11,22	7,29

**Tabela C.3.** Coeficientes de capilaridade dos grouts com 50% de água (W) – Grupo 3.

Amostra	Formulação	Coeficiente de capilaridade (C) (kg/m <sup>2</sup> . h <sup>0,5</sup> )		
		28 dias	60 dias	120 dias
G3_I	GCA_13_50W_10FCA_1,5MKfs	39,72	37,18	38,12
G3_II	GCA_13_50W_10FCA_3MKfs	29,60	26,78	25,60
G3_V	GCA_13_50W_10FCA_1,5MKfs_0,5EC_1GS_0,5A33	18,68	-	16,82
G3_VI	GCA_13_50W_10FCA_3MKfs_0,5EC_1GS_0,5A33	3,71	8,46	9,68

**Tabela C.4.** Coeficientes de capilaridade dos grouts com 50% de água (W) – Grupo 4.

Amostra	Formulação	Coeficiente de capilaridade (C) (kg/m <sup>2</sup> . h <sup>0,5</sup> )	
		28 dias	60 dias
G4_I	GCA_13_50W_1,5MKfs	41,59	39,83
G4_II	GCA_13_50W_3MKfs	38,65	36,01
G4_III	GCA_13_50W_1,5Diafs	35,31	36,64
G4_IV	GCA_13_50W_3Diafs	33,52	35,07
G4_V	GCA_13_50W_1,5MKfs_0,5EC_1GS_0,5A33	15,81	13,22
G4_VI	GCA_13_50W_3MKfs_0,5EC_1GS_0,5A33	7,53	5,56
G4_VII	GCA_13_50W_1,5Diafs_0,5EC_1GS_0,5A33	16,74	19,11
G4_VIII	GCA_13_50W_3Diafs_0,5EC_1GS_0,5A33	18,19	17,94

**Tabela D.1.** Tempo de propagação na zona de grout e de reboco ( $\mu$ s), usando uma PUNDIT – Grupo 1.

Amostra	Formulação	28 dias		60 dias		120 dias	
		Reboco	Grout	Reboco	Grout	Reboco	Grout
G1_AB	GCA_13_60W	81,8	54,8	71,0	89,5	82,9	56,3
G1_I	GCA_13_60W_10MK_0,4EC_1GS_0,5A33	83,4	73,5	88,4	86,2	74,5	68,8
G1_III	GCA_13_60W_20MK_0,4EC_1GS_0,5A33	52,3	60,4	92,7	82,8	74,2	72,8
G1_IV	GCA_13_60W_20MK_0,5EC_1GS_0,5A33	99,6	72,3	83,3	41,3	*	
G1_V	GCA_13_60W_30MK_0,4EC_1GS_0,5A33	83,5	77,3	53,4	59,5	*	
G1_VI	GCA_13_60W_30MK_0,5EC_1GS_0,5A33	87,0	45,0	58,0	67,4	86,0	93,0
G1_IX	GCA_13_60W_20Dia_0,4EC_1GS_0,5A33	76,8	70,1	98,0	147,2	97,2	88,8
G1_XI	GCA_13_60W_30Dia_0,4EC_1GS_0,5A33	82,4	90,0	86,2	69,9	67,7	85,9

**Tabela D.2.** Tempo de propagação na zona de grout e de reboco ( $\mu$ s), usando uma PUNDIT – Grupo 2.

Amostra	Formulação	28 dias		60 dias		120 dias	
		Reboco	Grout	Reboco	Grout	Reboco	Grout
G2_II	GCA_13_60W_10FCA_20MK	73,0	97,3	73,4	88,2	83,7	57,9
G2_III	GCA_13_60W_10FCA_20DIA	64,2	70,2	72,8	84,1	81,2	71,2
G2_VIII	GCA_13_60W_10FCA_30MK	78,0	88,1	58,1	44,3	91,6	74,7
G2_IX	GCA_13_60W_10FCA_30DIA	65,2	44,9	70,6	65,9	58,0	61,7
G2_X	GCA_13_60W_10FCA_30MK_0,5EC_1GS_0,5A33	49,4	39,6	56,4	56,1	63,1	49,5

**Tabela D.3.** Tempo de propagação na zona de grout e de reboco ( $\mu$ s), usando uma PUNDIT – Grupo 4.

Amostra	Formulação	28 dias		60 dias		120 dias	
		Reboco	Grout	Reboco	Grout	Reboco	Grout
G4_I	GCA_13_60W_1,5MKfs	*		*		81,2	109,5
G4_II	GCA_13_60W_3MKfs					123,4	84,3
G4_III	GCA_13_60W_1,5Diafs	108,1	79,2	73,6	83,9	*	
G4_IV	GCA_13_60W_3Diafs	100,6	82,6	73,6	88,0		
G4_V	GCA_13_60W_1,5MKfs_0,5EC_1GS_0,5A33	83,5	78,4	70,0	81,5		
G4_VI	GCA_13_60W_3MKfs_0,5EC_1GS_0,5A33	80,8	63,7	65,8	83,6		

**Nota: (\*)** Ensaio não realizados.



**Tabelas E.1.** Resultados do ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão referentes ao Grupo 1.

Amostra: G1_AB											
Formulação: GCA_13_60W											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,45	1,415	0,37	1,415	0,37	1,415	0,18	1,415	0,45	1,415	0,37	1,415
0,72	2,831	0,59	2,831	0,52	2,831	0,29	2,831	0,65	2,831	0,47	2,831
0,97	4,246	0,81	4,246	0,67	4,246	0,39	4,246	0,84	4,246	0,56	4,246
1,22	5,662	1,08	5,662	0,84	5,662	0,50	5,662	1,01	5,662	0,68	5,662

Amostra: G1_I											
Formulação: GCA_13_60W_10MK_0,4EC_1GS_0,5A33											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,39	1,415	0,50	1,415	0,26	1,415	0,18	1,415	0,29	1,415	0,41	1,415
0,58	2,831	0,79	2,831	0,39	2,831	0,22	2,831	0,43	2,831	0,66	2,831
0,79	4,246	1,00	4,246	0,52	4,246	0,26	4,246	0,61	4,246	0,89	4,246
1,00	5,662	1,33	5,662	0,65	5,662	0,32	5,662	0,79	5,662	1,13	5,662

Amostra: G1_III											
Formulação: GCA_13_60W_20MK_0,4EC_1GS_0,5A33											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,39	1,415	0,37	1,415	0,22	1,415	0,18	1,415	0,18	1,415	0,13	1,415
0,56	2,831	0,58	2,831	0,29	2,831	0,22	2,831	0,29	2,831	0,18	2,831
0,75	4,246	0,82	4,246	0,37	4,246	0,26	4,246	0,37	4,246	0,22	4,246
0,95	5,662	1,10	5,662	0,43	5,662	0,29	5,662	0,52	5,662	0,29	5,662

Amostra: G1_IV											
Formulação: GCA_13_60W_20MK_0,5EC_1GS_0,5A33											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,18	1,415	0,26	1,415	0,29	1,415	0,29	1,415				
0,26	2,831	0,43	2,831	0,48	2,831	0,45	2,831				
0,41	4,246	0,59	4,246	0,62	4,246	0,62	4,246				
0,55	5,662	0,75	5,662	0,77	5,662	0,71	5,662				



Anexo E – Resultados dos Ensaios de permeabilidade à água (Tubos de Karsten)

Amostra: G1_V											
Formulação: GCA_13_60W_30MK_0,4EC_1GS_0,5A33											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,37	1,415	0,22	1,415	0,22	1,415	0,39	1,415	0,31	1,415	0,27	1,415
0,55	2,831	0,29	2,831	0,37	2,831	0,56	2,831	0,44	2,831	0,40	2,831
0,71	4,246	0,41	4,246	0,53	4,246	0,81	4,246	0,57	4,246	0,57	4,246
0,87	5,662	0,53	5,662	0,72	5,662	1,03	5,662	0,75	5,662	0,86	5,662

Amostra: G1_VI											
Formulação: GCA_13_60W_30MK_0,5EC_1GS_0,5A33											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,41	1,415	0,43	1,415	0,26	1,415	0,55	1,415	0,29	1,415	0,26	1,415
0,56	2,831	0,61	2,831	0,50	2,831	0,89	2,831	0,45	2,831	0,41	2,831
0,73	4,246	0,79	4,246	0,77	4,246	1,24	4,246	0,56	4,246	0,56	4,246
0,91	5,662	0,99	5,662	0,93	5,662	1,59	5,662	0,71	5,662	0,75	5,662

Amostra: G1_IX											
Formulação: GCA_13_60W_20Dia_0,4EC_1GS_0,5A33											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,47	1,415	0,41	1,415	0,18	1,415	0,39	1,415	0,32	1,415	0,32	1,415
0,71	2,831	0,66	2,831	0,32	2,831	0,52	2,831	0,50	2,831	0,47	2,831
0,96	4,246	0,86	4,246	0,41	4,246	0,61	4,246	0,70	4,246	0,67	4,246
1,17	5,662	1,01	5,662	0,52	5,662	0,95	5,662	0,89	5,662	0,88	5,662

Amostra: G1_XI											
Formulação: GCA_13_60W_30Dia_0,4EC_1GS_0,5A33											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,32	1,415	0,52	1,415	0,29	1,415	0,18	1,415	0,22	1,415	0,22	1,415
0,56	2,831	0,77	2,831	0,34	2,831	0,26	2,831	0,34	2,831	0,37	2,831
0,82	4,246	1,01	4,246	0,43	4,246	0,29	4,246	0,47	4,246	0,50	4,246
1,01	5,662	1,30	5,662	0,50	5,662	0,34	5,662	0,61	5,662	0,65	5,662



**Tabelas E.2.** Resultados do ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão referentes ao Grupo 2.

<b>Amostra: G2_II</b>											
<b>Formulação: GCA_13_60W_10FCA_20MK</b>											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,26	1,415	0,22	1,415	0,48	1,415	0,52	1,415	0,32	1,415	0,34	1,415
0,41	2,831	0,39	2,831	0,70	2,831	0,70	2,831	0,52	2,831	0,55	2,831
0,56	4,246	0,61	4,246	0,92	4,246	0,88	4,246	0,66	4,246	0,75	4,246
0,72	5,662	0,67	5,662	1,15	5,662	1,05	5,662	0,82	5,662	0,93	5,662

<b>Amostra: G2_III</b>											
<b>Formulação: GCA_13_60W_10FCA_20DIA</b>											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,22	1,415	0,22	1,415	0,68	1,415	0,41	1,415	0,37	1,415	0,26	1,415
0,32	2,831	0,34	2,831	0,96	2,831	0,58	2,831	0,56	2,831	0,39	2,831
0,39	4,246	0,48	4,246	1,20	4,246	0,75	4,246	0,76	4,246	0,55	4,246
0,45	5,662	0,61	5,662	1,44	5,662	0,96	5,662	0,96	5,662	0,71	5,662

<b>Amostra: G2_VIII</b>											
<b>Formulação: GCA_13_60W_10FCA_30MK</b>											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,22	1,415	0,18	1,415	0,29	1,415	0,32	1,415	0,45	1,415	0,18	1,415
0,37	2,831	0,26	2,831	0,39	2,831	0,37	2,831	0,70	2,831	0,29	2,831
0,48	4,246	0,32	4,246	0,50	4,246	0,48	4,246	0,93	4,246	0,37	4,246
0,59	5,662	0,41	5,662	0,63	5,662	0,61	5,662	1,16	5,662	0,48	5,662

<b>Amostra: G2_IX</b>											
<b>Formulação: GCA_13_60W_10FCA_30DIA</b>											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,18	1,415	0,18	1,415	0,45	1,415	0,81	1,415	0,48	1,415	0,52	1,415
0,29	2,831	0,26	2,831	0,61	2,831	1,07	2,831	0,75	2,831	0,83	2,831
0,41	4,246	0,34	4,246	0,81	4,246	1,38	4,246	1,02	4,246	1,13	4,246
0,48	5,662	0,43	5,662	0,98	5,662	1,66	5,662	1,29	5,662	1,40	5,662



Anexo E – Resultados dos Ensaios de permeabilidade à água (Tubos de Karsten)

Amostra: G2_X											
Formulação: GCA_13_60W_10FCA_30MK_0,5EC_1GS_0,5A33											
28 dias				60 dias				120 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
0,29	1,415	0,29	1,415	0,68	1,415	0,50	1,415	0,22	1,415	0,41	1,415
0,47	2,831	0,45	2,831	0,90	2,831	0,71	2,831	0,47	2,831	0,66	2,831
0,62	4,246	0,63	4,246	1,13	4,246	0,89	4,246	0,66	4,246	0,86	4,246
0,76	5,662	0,82	5,662	1,34	5,662	1,10	5,662	0,89	5,662	1,08	5,662

Tabelas E.3. Resultados do ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão referentes ao Grupo 4.

Amostra: G4_III							
Formulação: GCA_13_60W_1,5Diafs							
28 dias				60 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0,29	1,415	0,29	1,415	0,29	1,415	0,39	1,415
0,41	2,831	0,39	2,831	0,43	2,831	0,63	2,831
0,52	4,246	0,47	4,246	0,59	4,246	0,85	4,246
0,65	5,662	0,55	5,662	0,74	5,662	1,10	5,662

Amostra: G4_IV							
Formulação: GCA_13_60W_3Diafs							
28 dias				60 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0,26	1,415	0,29	1,415	0,34	1,415	0,22	1,415
0,32	2,831	0,41	2,831	0,55	2,831	0,34	2,831
0,34	4,246	0,45	4,246	0,71	4,246	0,45	4,246
0,41	5,662	0,62	5,662	0,89	5,662	0,55	5,662

Amostra: G4_V							
Formulação: GCA_13_60W_1,5MKfs_0,5EC_1GS_0,5A33							
28 dias				60 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0,22	1,415	0,32	1,415	0,26	1,415	0,39	1,415
0,41	2,831	0,45	2,831	0,37	2,831	0,62	2,831
0,58	4,246	0,61	4,246	0,48	4,246	0,86	4,246
0,76	5,662	0,84	5,662	0,62	5,662	1,07	5,662

Anexo E – Resultados dos Ensaios de permeabilidade à água (Tubos de Karsten)

Amostra: G4_VI							
Formulação: GCA_13_60W_3MKfs_0,5EC_1GS_0,5A33							
28 dias				60 dias			
Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)		Zona não consolidada (reboco)		Zona consolidada (grout)	
$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )	$t^{0,5}$ (h)	m/A (Kg/m <sup>2</sup> )
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0,29	1,415	0,61	1,415	0,18	1,415	0,26	1,415
0,43	2,831	0,87	2,831	0,26	2,831	0,41	2,831
0,56	4,246	1,10	4,246	0,34	4,246	0,56	4,246
0,62	5,662	1,35	5,662	0,43	5,662	0,70	5,662

**Tabela F.1.** Tensão de aderência (MPa) para todas as amostras sujeitas a ensaio e respetiva superfície de rotura.

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G1_AB (28d)	0,067	0,043		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura é mista tendo ocorrido parte dela na interface suporte/1ª camada de emboço e outra parte no seio da 1ª camada de emboço. Na zona de injeção de grout a rotura é adesiva e verifica-se na interface grout/2ª camada de emboço. O valor obtido para a tensão de aderência na zona de grout é inferior ao mínimo estabelecido para as argamassas de substituição (0,04 MPa).			
G1_AB (60d)	0,077	0,039		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura é coesiva e dá-se no seio da 1ª camada de emboço. Na zona de consolidação, a rotura é também coesiva e verifica-se no interior da camada de grout. O valor obtido para a tensão de arrancamento é, no entanto, baixo.			
G1_AB (120d)	0,056	0,039		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura é mista e ocorre simultaneamente na interface suporte/1ª camada de emboço e no interior da mesma. Na zona de injeção a rotura é também mista, uma vez que parte dela ocorre no interior da camada de grout, e a restante parte dá-se na interface grout/2ª camada de emboço. O valor obtido para a tensão de aderência é baixo.			
G1_I (28d)	0,080	0,003		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura dá-se na interface 1ª camada de emboço / 2ª camada de emboço, sendo por isso do tipo adesivo. Na zona de injeção do grout, a rotura é adesiva e desenvolve-se na interface grout/2ª camada de emboço. O valor da aderência é muito diminuto.			

Anexo F – Resultados do Ensaio de Aderência / Tipos de Rotura

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G1_I (60 d)	0,099	0,015		
Obs.	A rotura da zona não consolidada é adesiva e ocorre entre a 1ª e a 2ª camada de emboço. Na zona de consolidação, a rotura é coesiva e verifica-se no seio da camada de grout. O valor da tensão de arrancamento é inferior ao mínimo estabelecido.			
G1_I (120 d)	0,112	0,010		
Obs.	Na zona não consolidada a rotura dá-se na interface entre as duas camadas de emboço, sendo por isso, adesiva. Na zona de injeção do grout a rotura é mista, verificando-se que esta se processa em parte na interface grout/2ª camada de emboço e a restante no seio da camada de grout.			
G1_III (28 d)	0,080	0,008		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura é coesiva e ocorre no interior da 1ª camada de emboço. Na zona de injeção de grout a rotura é também ela coesiva e dá-se no interior da camada de grout.			
G1_III (60 d)	dpe	0,009	dpe	
Obs.	O provete respeitante ao ensaio realizado na zona não consolidada, não resistiu à furação, destacando antes da colagem da pastilha. Na zona de injeção da calda de consolidação, a rotura é coesiva e verifica-se no interior do grout, com fraca aderência.			
G1_IV (28 d)	0,056	0,015		
Obs.	Na zona não consolidada a rotura dá-se no interior da 1ª camada de emboço e é coesiva. Na zona de injeção a rotura ocorre ao nível do grout sendo por isso coesiva.			

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G1_IV (60 d)	0,161	0,011		
Obs.	Na zona de reboco (não consolidada), a rotura é coesiva e processa-se no interior da 1ª camada de emboço. Na zona de injeção a rotura é predominantemente adesiva já que se dá na interface grout/2ª camada de emboço. Ressalva-se que uma pequeníssima parte da camada de grout aderiu à 2ª camada de emboço na zona limite do material destacado.			
G1_IV (120 d)	0,078	dpe		dpe
Obs.	A rotura da zona não consolidada é adesiva e processa-se na interface das duas camadas de emboço. Na zona de consolidação, não foi possível efetuar o ensaio de arrancamento devido a destacamento prévio.			
G1_V (28 d)	0,052	0,015		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura dá-se na interface suporte/1ª camada de emboço, sendo de carácter adesivo. Na zona de injeção de grout a rotura é mista no grout. Observa-se que parte dela se desenvolve no interior da camada de grout, e outra parte na interface grout/2ª camada de emboço. A tensão de arrancamento é baixa.			
G1_V (60 d)	0,065	0,006		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura dá-se na interface suporte/1ª camada de emboço, sendo de carácter adesivo. Na zona de injeção de grout a rotura é mista no grout. Observa-se que parte dela se desenvolve no interior da camada de grout, e outra parte na interface grout/2ª camada de emboço. A tensão de aderência é bastante baixa.			
G1_V (120 d)	0,045	dpe		dpe
Obs.	Na zona sem consolidação o arrancamento é coesivo ao nível da 2ª camada de emboço. Na zona de injeção o ensaio não foi realizado uma vez que ocorreu destacamento prévio.			

Anexo F – Resultados do Ensaio de Aderência / Tipos de Rotura

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G1_VI (28 d)	0,079	0,016		
Obs.	A rotura da zona não consolidada é coesiva e ocorre no interior da 2ª camada de emboço. Na zona de consolidação a rotura é coesiva e dá-se no interior da camada de grout. É perceptível que existe alguma aderência entre o reboco e o grout.			
G1_VI (60 d)	0,035	0,008		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura manifesta-se no interior da 1ª camada de emboço sendo por isso coesiva. Na zona de injeção pode constatar-se uma ligeira adesão do grout à 2ª camada de emboço, pelo que se considera que a rotura é do tipo coesivo. A tensão de aderência registada é bastante baixa.			
G1_VI (120 d)	0,056	0,020		
Obs.	Na zona sem consolidação, verifica-se que o destacamento se processa na interface suporte/1ª camada de emboço sendo do tipo adesivo. Na zona de injeção do grout a rotura é coesiva e ocorre ao nível do grout, verificando-se aderência do mesmo à 2ª camada de emboço.			
G1_VII (28 d)	0,062	0,019		
Obs.	A rotura da zona não consolidada desenvolve-se na interface suporte/1ª camada de emboço e é do tipo adesivo. Na zona de injeção a rotura é coesiva e verifica-se no interior da camada de grout. A aderência do grout ao reboco é no entanto reduzida.			
G1_VII (60 d)	dpe	0,020	dpe	
Obs.	Na zona de reboco ocorreu destacamento prévio ao ensaio ao ser efetuada a furação. Na zona de injeção da calda de consolidação o destacamento é misto com alguma aderência do grout.			

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G1_IX (28 d)	0,063	0,025		
Obs.	Na não consolidada, a rotura é mista, uma vez que ocorre quer na interface entre as duas camadas de emboço, quer no interior da 2ª camada de emboço. Na zona de consolidação, o destacamento é coesivo e dá-se no interior da camada de grout. Existe alguma aderência entre o grout e a 2ª camada de emboço.			
G1_IX (60 d)	0,071	0,026		
Obs.	Na zona não consolidada a rotura é do tipo adesivo uma vez que se processa na interface suporte/1ª camada de emboço. Na zona de injeção da calda, o destacamento é coesivo e verifica-se no seio da camada de grout, sendo possível constatar a aderência do mesmo à 2ª camada de emboço.			
G1_XI (28 d)	0,044	0,013		
Obs.	A rotura da zona não consolidada, verifica-se ao nível da interface entre as duas camadas de emboço, sendo uma rotura adesiva. Na zona de injeção, a superfície de rotura localiza-se no interior da camada de grout, sendo coesiva. Constata-se alguma aderência da mesma à 2ª camada de emboço.			
G1_XI (60 d)	dpe	0,0140	dpe	
Obs.	Na zona de reboco o provete não resistiu à furação, rompendo antes da colagem da pastilha. Na zona de injeção de grout a rotura verifica-se ao nível do grout, sendo do tipo coesivo.			
G2_II (28 d)	0,065	0,022		
Obs.	A rotura é coesiva para a zona não consolidada, e manifesta-se no interior da 1ª camada de emboço. Na zona de consolidação a rotura é mista, com alguma aderência à 2ª camada de emboço.			

Anexo F – Resultados do Ensaio de Aderência / Tipos de Rotura

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G2_II (60 d)	0,092	0,087		
Obs.	Na zona não consolidada o destacamento dá-se no interior da 1ª camada de emboço sendo do tipo coesivo. Na zona com calda consolidante, a rotura é mista, sendo perceptível uma pequena área limítrofe na qual o destacamento se dá na interface grout/2ª camada de emboço. A aderência é considerável.			
G2_II (120 d)	0,071	0,065		
Obs.	Verifica-se que a rotura ocorre ao nível da interface suporte/1ª camada de emboço, na zona não consolidada. Na zona de injeção a rotura é adesiva e ocorre na interface grout/2ª camada de emboço.			
G2_III (28 d)	0,048	0,042		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura é mista e desenvolve-se simultaneamente na interface suporte/1ª camada de emboço (zona limite da carote) e também no interior da 1ª camada de emboço (zona mais central da carote). Na zona de injeção da calda de consolidação, a rotura deu-se ao nível da interface entre a 2ª camada de emboço/grout. Constata-se alguma aderência entre o reboco e o grout, embora mínima.			
G2_III (60 d)	0,062	0,022		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura é adesiva e manifesta-se na interface suporte/1ª camada de emboço. Na zona de injeção da calda consolidante, a rotura ocorre no seio da camada de grout, manifestando boa aderência do mesmo e é coesiva.			
G2_III (120 d)	0,078	0,003		
Obs.	Na zona de reboco (sem consolidação) a rotura é mista. Na zona de injeção do grout (consolidada), a rotura ocorre na interface grout/2ª camada de emboço e é adesiva. Constata-se que a aderência muitíssimo é fraca.			

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G2_VII (28 d)	0,051	dpe		dpe
Obs.	Na zona não consolidada, a superfície de rotura desenvolve-se na interface suporte/1ª camada de emboço e é adesiva. Na zona de injeção não foi possível a realização do ensaio de arrancamento uma vez que ocorreu destacamento prévio ao ser realizada a incisão na amostra.			
G2_VII (60 d)	0,046	dpe		dpe
Obs.	A rotura verifica-se na interface suporte/1ª camada de emboço e é adesiva, para a zona não consolidada. Na zona de injeção ocorreu destacamento prévio ao ensaio.			
G2_VII (120 d)	0,058	0,042		
Obs.	Na zona de reboco, a rotura ocorre na interface suporte/1ª camada de emboço (zona limite) e também no interior da 1ª camada de emboço (zona mais central), sendo por isso uma rotura mista. Na zona de injeção o destacamento dá-se no seio da camada de grout apresentando alguma aderência.			
G2_VIII (28 d)	0,081	0,056		
Obs.	Na zona não consolidada, a superfície de rotura desenvolveu-se na interface das duas camadas de emboço. Na zona de consolidação, considera-se que a rotura é mista uma vez que existe uma pequena porção de grout aderente à 2ª camada de emboço. Não obstante o destacamento ocorreu maioritariamente na interface do grout com a 2ª camada de reboco.			
G2_VIII (60 d)	dpe	0,028	dpe	
Obs.	Na zona sem consolidante, ocorreu destacamento prévio ao ensaio ao ser realizada a furação. Na zona de injeção constata-se que a rotura é coesiva e que se manifesta no seio da camada de grout.			

Anexo F – Resultados do Ensaio de Aderência / Tipos de Rotura

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G2_VIII (120 d)	0,144	0,042		
Obs.	Na zona de reboco (não consolidada), a rotura ocorreu na 1ª camada de emboço sendo coesiva. Na zona de injeção (consolidada), o destacamento é adesivo e dá-se na interface grout/2ª camada de emboço.			
G2_IX (28 d)	0,053	dpe		dpe
Obs.	Na zona não consolidada, o destacamento decorre no interior da 1ª camada de emboço e é por isso coesivo. Na zona de injeção não foi possível a realização deste ensaio uma vez que ocorreu destacamento prévio quando se efetuou a incisão.			
G2_IX (60 d)	0,064	0,024		
Obs.	Na não consolidada a rotura é adesiva e manifesta-se na interface entre as duas camadas de emboço. Na zona de consolidação pode constatar-se que houve grande adesão do grout à 2ª camada de emboço. A rotura é coesiva e dá-se fundamentalmente no interior da camada de grout.			
G2_IX (120 d)	0,059	0,005		
Obs.	A zona de não consolidada apresenta rotura adesiva, pelo facto do destacamento ocorrer na interface entre as duas camadas de emboço. A zona de injeção caracteriza-se por apresentar rotura mista, já que esta ocorre quer ao nível da interface grout/2ª camada de emboço, quer no interior da camada de grout.			
G2_X (28 d)	0,029	0,044		
Obs.	No reboco a rotura desenvolve-se ao nível da interface suporte/1ª camada de emboço e é adesiva. Na zona de injeção constata-se que a rotura é coesiva no interior da camada de grout. Existe alguma aderência do grout à 2ª camada de emboço.			

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G2_X (60 d)	0,053	0,014		
Obs.	Na zona de reboco, a rotura surge no interior da 1ª camada de emboço e é adesiva. Na zona de consolidação, a rotura é coesiva, desenvolvendo-se no interior da camada de grout e manifestando alguma aderência do mesmo à 2ª camada de emboço.			
G2_X (120 d)	0,047	0,028		
Obs.	Na zona não consolidada, o destacamento é misto uma vez que decorre quer no interior da 1ª camada de emboço (zona mais central), quer ao nível da interface suporte/1ª camada de emboço (zona limítrofe). Na zona de injeção da calda consolidante, é perceptível a ocorrência de rotura mista, com alguma aderência do grout à 2ª camada de emboço.			
G4_I (28 d)	0,061	0,002		
Obs.	Na zona de reboco a rotura é adesiva e manifesta-se entre as duas camadas de emboço. Ao nível da zona de injeção o destacamento verifica-se no interior da camada de grout, sendo a rotura coesiva. A aderência do mesmo é muito diminuta.			
G4_I (60 d)	0,079	0,010		
Obs.	Na zona não consolidada, o destacamento faz-se entre o suporte e a 1ª camada de emboço, pelo que se trata de uma rotura adesiva. Na zona de consolidação constata-se que a rotura se dá no seio da camada de grout, com boa aderência do mesmo à 2ª camada de emboço.			
G4_I (120 d)	dpe	0,021	dpe	
Obs.	Na zona de reboco o destacamento antecede a realização do ensaio. Na zona de injeção, a rotura é coesiva, ocorre no interior do grout e constata-se boa aderência do mesmo.			

Anexo F – Resultados do Ensaio de Aderência / Tipos de Rotura

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G4_II (28 d)	0,084	0,002		
Obs.	Na não consolidada o destacamento é misto. Na zona de injeção de grout pode verificar-se que a rotura é coesiva e decorre no interior da camada de grout. A aderência é bastante fraca.			
G4_II (60 d)	0,063	0,016		
Obs.	Na zona não consolidada a rotura é coesiva pois processa-se no interior da 1ª camada de emboço. Na zona de injeção da calda consolidante, verifica-se que a rotura é do tipo coesivo e decorre no interior da camada de grout. A aderência entre este e a 2ª camada de emboço é significativa.			
G4_II (120 d)	dpe	0,030	dpe	
Obs.	A zona não consolidada, não foi sujeita a ensaio devido a destacamento prévio. Na zona de consolidação a rotura é coesiva, ocorre ao no interior da camada de grout, e constata-se boa aderência do mesmo.			
G4_III (28 d)	0,054	0,003		
Obs.	No reboco, a rotura dá-se na interface entre ambas as camadas de emboço, tratando-se de uma rotura adesiva. Na zona consolidada, a rotura é mista e resulta do destacamento ocorrer quer ao nível da interface grout/2ª camada de reboco (zona mais central), quer no interior da injeção (zona mais limítrofe). A aderência é bastante ténue.			
G4_III (60 d)	0,056	0,013		
Obs.	Na zona isenta de consolidação, a rotura decorre entre o suporte e a 1ª camada de emboço e é adesiva. Relativamente à zona de consolidação, verifica-se que o destacamento se dá no interior do grout (coesivo).			

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G4_IV (28 d)	0,042	0,010		
Obs.	Na zona não consolidada, o destacamento resulta entre ambas as camadas de emboço, sendo adesivo. Na zona de injeção a rotura é mista, com alguma aderência do grout à 2ª camada de emboço.			
G4_IV (60 d)	0,068	0,027		
Obs.	Na zona não consolidada, a rotura ocorre na interface entre camadas de emboço e é adesiva. Na zona de consolidação, a rotura é mista, notando-se boa aderência do grout.			
G4_V (28 d)	0,097	0,005		
Obs.	O reboco destaca entre o suporte e a 1ª camada de emboço, traduzindo-se numa rotura adesiva, para a zona não consolidada. A zona de injeção caracteriza-se por uma rotura também ela adesiva já que se manifesta na interface grout/2ª camada de reboco. A aderência é bastante fraca.			
G4_V (60 d)	0,179	0,006		
Obs.	Na zona de reboco o destacamento dá-se entre camadas de emboço (rotura adesiva). Na zona consolidação, a rotura é adesiva e verifica-se na interface grout/2ª camada de reboco. Não há praticamente aderência do grout.			
G4_VI (28 d)	0,073	0,003		
Obs.	O destacamento ocorre no interior da 1ª camada de emboço (rotura coesiva), para a zona não consolidada. Na zona consolidada, a rotura é mista, constatando-se alguma aderência do grout.			

Anexo F – Resultados do Ensaio de Aderência / Tipos de Rotura

Amostra	Zona não consolidada (reboco) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona consolidada (grout) $\sigma_{adr,max}$ (MPa)	Zona não consolidada (reboco)	Zona consolidada (grout)
G4_VI (60 d)	0,099	0,026		
Obs.	<p>A zona não consolidada caracteriza-se por apresentar uma rotura adesiva, que se manifesta entre camadas de emboço. A rotura na zona onde foi injetada a calda de cal é manifestamente coesiva e desenvolve-se no seio da camada de grout. Existe aderência significativa entre o grout e a 2ª camada de emboço.</p>			

**NOTAS:**

dpe – destacamento prévio ao ensaio