



Cátia Alexandra de Oliveira Gaudêncio **Argamassas para fixação de cerâmicos porosos em reabilitação de edifícios**



**Cátia Alexandra de
Oliveira Gaudêncio**

**Argamassas para fixação de cerâmicos porosos em
reabilitação de edifícios**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Victor Miguel Carneiro De Sousa Ferreira, Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação do Eng.º Luís Miguel Cardoso da Silva, especialista na área das argamassas e Diretor de Marketing da empresa Saint-Gobain Weber Portugal.

Aos meus pais e irmã

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor João António Labrincha Batista
Professor associado com agregação do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Vítor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira
Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A elaboração deste trabalho não seria possível, sem a ajuda, a motivação, a amizade e compreensão de muitas pessoas que me rodearam ao longo de todo este percurso.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Prof. Victor Ferreira, orientador desta dissertação, pela disponibilidade e todos os ensinamentos e conhecimentos partilhados.

Ao Eng.^o Luis Silva, orientador de estágio, por tantos conhecimentos transmitidos e extrema dedicação a este trabalho, pela paciência, compreensão e amizade, é alguém por quem tenho grande admiração.

À empresa Saint-Gobain Weber Portugal pela excelente receção e oportunidade da realização do presente trabalho em contexto empresarial, disponibilizando todas as condições necessárias. A todos os seus colaboradores, pela simpatia com que me acolheram e fizeram sentir tão bem.

À Vera Fernandes, ao Pedro Sequeira, Hélder Gonçalves, Nuno Vieira, Rui Reis, António Cardoso e à D. Glória Lopes, com quem partilhei muitos bons momentos. Obrigada pela grande amizade, pelo companheirismo, ensinamentos e ajuda nos trabalhos realizados. Tenho um enorme carinho por todos e levo-vos no coração!

À Ana Magalhães, pela excelente pessoa que é, que sempre demonstrou grande carinho e preocupação, muito obrigada por todos os momentos proporcionados e pela grande amizade que permanecerá sempre.

Aos amigos e colegas de curso, que direta ou indiretamente, sempre me apoiaram e foram essenciais não só agora mas em todo o percurso académico, em especial à Cátia Alves, Daniel, Ana Ministro, Diana e Cátia Pinho. Obrigada Ana pela grande ajuda na fase final deste trabalho.

Ao Ricardo Martins que sempre teve as palavras certas para me motivar nos momentos mais difíceis, obrigada pela compreensão e acima de tudo pela amizade demonstrada. À sua família pela força transmitida e todo o carinho com que sempre me trataram.

À minha enorme família, em especial à minha madrinha Fátima, aos meus tios Alceu e Maria, Mila e Rogério, aos meus primos Carla, Luís Manuel, Paulo, Luís Filipe e Sofia e ao meu afilhado Martim, por sempre estarem comigo e mesmo de longe, transmitirem o seu apoio e motivação.

À minha irmã Sara, que apesar de longe se faz sentir bem perto, mostrando o seu incentivo, que para além de irmã é minha amiga. Obrigada pelos momentos partilhados, para que este percurso fosse mais fácil de percorrer.

Aos meus pais, Mário e Maria Manuela, por sempre estarem do meu lado nos meus momentos de maior frustração, sempre compreendendo a importância deste trabalho, pelo encorajamento e carinho sempre demonstrados. Obrigada pelo enorme esforço que fizeram para me darem a oportunidade de ter chegado até aqui.

Muito obrigada a todos, de coração!

palavras-chave

Argamassas-cola, reabilitação, cerâmico tradicional poroso, pozolonas, reatividade pozolânica, ativador alcalino

resumo

A reabilitação de fachadas dos edifícios antigos, anteriores à utilização do betão armado, tem sido alvo de vários estudos em torno de argamassas de substituição compatíveis com os materiais pré-existentes. Grande parte dessas fachadas é revestida por azulejos tradicionais e é extremamente importante a sua preservação e manutenção. No entanto, as argamassas normalmente formuladas para o reassentamento de azulejos, que garantem a compatibilidade entre os diversos materiais, não são classificadas como argamassas-cola por não cumprirem os requisitos normativos da EN 12004. Pretende-se desenvolver uma argamassa-cola, com materiais compatíveis com os sistemas antigos, que cumpra com os requisitos para colas de fixação de cerâmicos exigidos pela EN 12004. Estas exigências nem sempre são fáceis de alcançar ou de compatibilizar.

Por forma a atingir o objetivo proposto, inicialmente foram estudadas argamassas com base em ligantes com diferentes graus de compatibilidade: argamassas de cimento, de cal aérea e de cal hidráulica. Os resultados obtidos conduziram ao estudo de diversos materiais pozolânicos, por forma a apurar-se os que podem, potencialmente, ser utilizados em argamassas-cola como substituição, parcial ou quase total, do cimento. As argamassas-cola desenvolvidas, contendo materiais pozolânicos nas suas formulações, foram caracterizadas em estado fresco e em estado endurecido.

De entre todas as argamassas em estudo, foram escolhidas aquelas que de acordo com a EN 12004, obtiveram resultados satisfatórios. Estes produtos foram caracterizados, em conjunto com duas argamassas produzidas pela Saint-Gobain Weber, em estado fresco e em estado endurecido. Na caracterização dos produtos endurecidos, foram realizados estudos de compatibilidade entre as argamassas e o cerâmico tradicional utilizado (ensaios de aderência, químicos e físicos) e de compatibilidade entre as argamassas e os suportes antigos (ensaios mecânicos, químicos e físicos).

keywords

Adhesive mortars, rehabilitation, traditional porous ceramic, pozzolans, pozzolanic reactivity, alkaline activation

abstract

The rehabilitation of facades of the old buildings, prior to the use of reinforced concrete, has been the subject of several studies around of replacement mortars compatible with the pre-existing materials. Most of these facades are covered with traditional tiles and is extremely important their preservation and maintenance. However, the mortars normally formulated for the resettlement of tiles, that ensure the compatibility between the different materials are not classified as adhesive mortars for not complying with the standard requirements of EN 12004. It is intended to develop an adhesive mortar, with compatible materials with the old masonries which comply with the requirements for adhesives of ceramic fixing required by EN 12004. These requirements are not always easy to reach or reconcile.

In order to achieve the aim proposed, initially were studied mortars based in binders with different degrees of compatibility: cement mortars, air lime mortars and hydraulic lime mortars. The results obtained have led to the study of several pozzolanic materials, in order to establish those who may potentially be used in adhesive mortars as a replacement, partial or almost total, of the cement. The adhesive mortars developed, containing pozzolanic materials were characterized in fresh and hardened state.

Among all the mortars studied, were chosen those that have obtained satisfactory results, according to the EN 12004. These products were characterized, in conjunction with two mortars produced by Saint-Gobain Weber, in fresh and hardened state. In the characterization of hardened products, were performed studies of compatibility between the mortars and the traditional ceramic (tests of adhesion, chemical and physical tests) and studies of compatibility between the mortar and the old masonries (mechanical, chemical and physical tests).

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABELAS	IX
SIMBOLOGIA.....	XI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVO E METODOLOGIA	2
1.3. ESTRUTURA DO RELATÓRIO.....	3
2. CONTEXTO DA REABILITAÇÃO	7
2.1. GENERALIDADES	7
2.2. REABILITAÇÃO DE PAREDES ANTIGAS AZULEJADAS	7
2.2.1. Patologias em paredes azulejadas.....	8
2.2.2. Principais causas das patologias	9
3. ARGAMASSAS PARA REABILITAÇÃO DE PAREDES.....	13
3.1. GENERALIDADES	13
3.2. ARGAMASSAS NA REABILITAÇÃO DE PAREDES AZULEJADAS.....	14
3.2.1. Descrição e caracterização dos seus constituintes.....	15
3.2.1.1. Agregados.....	15
3.2.1.2. Ligantes	16
3.2.1.3. Adjuvantes e aditivos	19
3.2.1.4. Materiais pozolânicos.....	20
3.2.1.5. Água de amassadura.....	25
3.3. REQUISITOS MECÂNICOS, FÍSICOS E QUÍMICOS SEGUNDO A EN 998-1	25
3.4. REQUISITOS E PROPRIEDADES PARA ARGAMASSAS- COLA – EN12004	27
3.4.1. Definição	27
3.4.2. Enquadramento normativo	27
3.4.2.1. Norma Europeia EN12004 – CEN	27

3.4.3.	Propriedades.....	30
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	33
4.1.	DESENVOLVIMENTO E PREPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES	33
4.2.	AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE POZOLÂNICA DE MATERIAIS DIVERSOS.....	35
4.3.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	36
4.3.1.	Caracterização dos produtos em pasta	36
4.3.1.1.	Determinação da percentagem de água do amassado.....	36
4.3.1.2.	Determinação da massa volúmica aparente.....	37
4.3.1.3.	Determinação do poder molhante e transferência	37
4.3.1.4.	Determinação do tempo de presa.....	38
4.3.2.	Caracterização dos produtos após endurecimento	39
4.3.2.1.	Determinação da resistência à tração perpendicular.....	39
4.3.2.2.	Determinação da resistência à flexão	41
4.3.2.3.	Determinação da resistência à compressão.....	42
4.4.	AVALIAÇÃO DE FORMULAÇÕES ESPECÍFICAS COM UTILIZAÇÃO DE CERÂMICA TRADICIONAL.....	43
4.4.1.	Caracterização dos produtos em pasta	43
4.4.2.	Caracterização dos produtos endurecidos	44
4.4.2.1.	Resistência à tração perpendicular.....	44
4.4.2.2.	Variação de massa	45
4.4.2.3.	Variação dimensional	45
4.4.2.4.	Determinação da massa volúmica aparente.....	46
4.4.2.5.	Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (Módulo de Young) ...	46
4.4.2.6.	Determinação da resistência à flexão e à compressão	47
4.4.2.7.	Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade	47
4.4.2.8.	Determinação da permeabilidade ao vapor de água	48
4.4.2.9.	Resistência à penetração de sais	49

4.4.2.10. Avaliação da estabilidade entre as argamassas-cola e a cerâmica tradicional 50

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	55
5.1. AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO CORRENTES E CONSTITUÍDAS POR CAL	55
5.1.1. Avaliação de argamassas de cimento correntes.....	55
5.1.2. Avaliação de argamassas de cal.....	57
5.1.2.1. Argamassas de cal aérea.....	57
5.1.2.2. Argamassas de cal hidráulica natural	60
5.2. AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR MATERIAIS POZOLÂNICOS	64
5.2.1. Avaliação da reatividade pozolânica de materiais diversos	64
5.2.1.1. Caracterização dos produtos em pasta	64
5.2.1.2. Caracterização dos produtos endurecidos	65
5.2.2. Substituição por MKDP	67
5.2.2.1. Avaliação do efeito da MKDP	69
5.2.2.2. Avaliação da introdução de diferentes percentagens de MKDP	70
5.2.2.3. Avaliação da reprodutibilidade de C1G3	72
5.2.3. Substituição por GGBFS	74
5.2.3.1. Avaliação do efeito da GGBFS combinado com OPC	75
5.2.3.2. Avaliação do efeito da GGBFS combinado com OPC de presa rápida	77
5.3. AVALIAÇÃO DE FORMULAÇÕES ESPECÍFICAS COM UTILIZAÇÃO DE CERÂMICA TRADICIONAL.....	81
5.3.1. Caracterização dos produtos em pasta.....	81
5.3.2. Caracterização dos produtos endurecidos.....	82
5.3.2.1. Resistência à tração perpendicular	82
5.3.2.2. Variação de massa.....	86
5.3.2.3. Variação dimensional	87
5.3.2.4. Massa volúmica aparente	88
5.3.2.5. Módulo de elasticidade dinâmico.....	89

5.3.2.6.	Resistência à flexão	90
5.3.2.7.	Resistência à compressão	91
5.3.2.8.	Coeficiente de absorção de água por capilaridade.....	93
5.3.2.9.	Permeabilidade ao vapor de água	94
5.3.2.10.	Ensaio de resistência aos sais	95
5.3.2.11.	Avaliação da estabilidade entre as argamassas-cola e a cerâmica tradicional	97
6.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Azulejos do Séc. XVI do Palácio de Sintra (PNS)	1
Figura 2.1. Fachadas de dois edifícios na Rua da Vitória em Lisboa (Mimoso et al., 2012).....	7
Figura 2.2 - Patologias: a) Descolamento/destacamento de azulejos; b) Alteração de cor dos azulejos; c) Desprendimento do vidrado (Isidro, 2012)	9
Figura 4.1 - Avaliação da reatividade pozolânica: a) provetes de ensaio; b) provetes em cura húmida	36
Figura 4.2 - Determinação da massa volúmica aparente: a) copo cilíndrico com volume conhecido; b) mesa compactadora.....	37
Figura 4.3 - Determinação do poder molhante e transferência: a) colocação da peça de vidro; b) aplicação da carga	38
Figura 4.4 - Equipamento de VICAT para determinação do tempo de presa	38
Figura 4.5 - Preparação do ensaio de resistência à tração perpendicular: a) aplicação do produto na placa de betão; b) colocação das peças cerâmicas; c) aplicação dos pesos sobre as peças cerâmicas	40
Figura 4.6 – Ensaio de resistência à tração perpendicular: a) discos metálicos colados nas diferentes peças cerâmicas; b) dinamómetro para execução do ensaio.....	40
Figura 4.7 - Aparelho de ensaio mecânico à flexão	41
Figura 4.8 - Aparelho de ensaio mecânico à compressão	42
Figura 4.9 - Peça cerâmica "Viúva Lamego": a) vidrado; b) tardoz	43
Figura 4.10 - Determinação da resistência à tração perpendicular: a) peças cerâmicas utilizadas; b) provetes de ensaio de aderência.....	44
Figura 4.11 - Provetes de ensaio: a) provetes 40x40x160mm ³ ; b) provetes 25x25x285mm ³ ; c) provete circular com 12 cm de diâmetro e 2 cm de altura.....	45
Figura 4.12 - Aparelho de medição da variação dimensional	46
Figura 4.13 - Equipamento de medição da frequência de ressonância.....	47
Figura 4.14 – Provetes dentro do recipiente de ensaio de absorção de água por capilaridade.	48

Figura 4.15 - Ensaio de determinação do coeficiente de difusão ao vapor de água: a) revestimento das juntas com parafina; b) registo da massa do conjunto.	49
Figura 4.16 - Ensaio de resistência aos sais: a) Provetes de ensaio; b) Soluções de NaCl e NaSO ₄ ; c) ambiente com HR 90%	49
Figura 4.17 - Provetes de ensaio: a) peça cerâmica isolada com silicone; b) peças com argamassa barrada no tardoz	51
Figura 4.18 - Ensaio de absorção de água por capilaridade às peças de dimensões 7x7cm barradas com as argamassas em estudo	51
Figura 5.1 - Tensão de aderência após 7, 14, 28 dias e após imersão em água, ação do calor e tempo aberto para as formulações à base de cimento	56
Figura 5.2 - Tensão de aderência após 7, 14, 28, 56 dias, após imersão em água e ação do calor para as formulações Cal.00 e Cal.01	59
Figura 5.3 – Exemplo de ausência de retenção de água por parte da argamassa NHL5.M2 ...	61
Figura 5.4 - Tensão de aderência após 7, 14 dias, imersão em água e ação do calor da formulação NHL5.M5 c/ CE.....	63
Figura 5.5 - Resultados de resistência à flexão com e sem base forte para diferentes condições de cura	65
Figura 5.6 - Resultados de resistência à compressão com e sem base forte para diferentes condições de cura	66
Figura 5.7 - Evolução temporal da tensão de aderência das formulações C1G3 e C1G3.00 para cerâmico poroso e não poroso.....	70
Figura 5.8 - Tensão de aderência das argamassas-cola medida aos 7, 14 dias e em condições de imersão e ação do calor para cerâmico poroso e não poroso	72
Figura 5.9 - Evolução temporal da tensão de aderência para a avaliação da reprodutibilidade de C1G3	73
Figura 5.10 - Evolução temporal da tensão de aderência da introdução de GGBFS em formulações com diferentes percentagens de cimento.....	76

Figura 5.11 – Aspeto dos produtos após imersão em água com utilização de cerâmico não poroso (esquerda) e poroso (direita)	77
Figura 5.12 - Evolução temporal da tensão de aderência da introdução de GGBFS em formulações com quantidade reduzida de cimento OPC de presa rápida.....	79
Figura 5.13 – Aspeto dos produtos após imersão em água com utilização do cerâmico não poroso (esquerda) e do cerâmico poroso (direita)	80
Figura 5.14 - Tensão de aderência após 28 dias, após imersão em água e ação do calor das formulações em estudo	83
Figura 5.15 – Alteração de cor das argamassas e do tardo do azulejo: a) C1SG.02; b) C1SG.03	84
Figura 5.16 - Pormenor da ligação entre o cerâmico e a argamassa	85
Figura 5.17 - Tensão de aderência após tempo aberto aos 10, 20 e 30 minutos das formulações em estudo.....	85
Figura 5.18 - Variação de massa após 28 dias e 56 dias	86
Figura 5.19 - Variação dimensional após 28 dias e 56 dias	87
Figura 5.20 - Massa volúmica dos produtos endurecidos após 7 dias, 28 dias e 56 dias	88
Figura 5.21 - Módulo de elasticidade após 7 dias, 28 dias e 56 dias.....	89
Figura 5.22 - Resistência à flexão após 28 dias e 56 dias	91
Figura 5.23 - Resistência à compressão aos 28 dias e 56 dias.....	92
Figura 5.24 - Coeficiente de capilaridade aos 28 dias e 56 dias.....	93
Figura 5.25 - Resultados do coeficiente de resistência ao vapor de água	95
Figura 5.26 - Resultados dos ciclos de cloretos para as diferentes argamassas até 10 ciclos ..	96
Figura 5.27 - Resultados dos ciclos de sulfatos para as diferentes argamassas até 10 ciclos...	96
Figura 5.28 - Absorção de água por capilaridade das argamassas em estudo barradas nas peças 7x7cm	97

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Patologias em paredes azulejadas (Valente, 2008; Isidro, 2012).....	9
Tabela 3.1 - Requisitos mecânicos, químicos e físicos para as argamassas de substituição segundo a EN 998-1 e o Caderno de Edifícios 2 (CEN; Veiga e Carvalho, 2002; Freitas et al., 2014).....	26
Tabela 3.2 - Classes de colas segundo a norma EN 12004	28
Tabela 3.3 - Exemplos de designação e classificação dos cimentos-cola (EN 12004)	28
Tabela 3.4 - Especificações para cimentos-cola – características fundamentais (EN 12004)..	29
Tabela 3.5 - Especificações para cimentos cola – características opcionais (EN 12004)	29
Tabela 4.1 – Descrição das várias argamassas estudadas e respetiva simbologia.....	34
Tabela 4.2 - Condições de cura e respetivos momentos de ensaio.....	39
Tabela 5.1 - Formulações de argamassas de cimento correntes	55
Tabela 5.2 - Resultados da caracterização dos produtos em pasta de argamassas de cimento correntes.....	56
Tabela 5.3 - Formulações de argamassas de cal aérea	57
Tabela 5.4 - Resultados da caracterização dos produtos em pasta para as formulações Cal.00 e Cal.01.....	58
Tabela 5.5 - Formulações de argamassas de cal hidráulica.....	60
Tabela 5.6 - Resultados da determinação da percentagem de água e do tempo de presa das formulações com cal hidráulica natural.....	61
Tabela 5.7 - Resultados da caracterização do produto em pasta para a argamassa NHL5.M5 c/CE.....	62
Tabela 5.8 - Resultados dos produtos em pasta com e sem base forte para as diferentes pozolanas	64
Tabela 5.9 - Formulações de argamassas-cola com substituição de cimento por argila calcinada.....	68

Tabela 5.10 - Percentagem de água de amassadura e tempo de presa das misturas	68
Tabela 5.11 - Resultados dos produtos em pasta das formulações com e sem MKDP	69
Tabela 5.12 - Formulações contendo diferentes percentagens de MKDP	70
Tabela 5.13 - Resultados da caracterização dos produtos em pasta para diferentes percentagens de argila calcinada.....	71
Tabela 5.14 - Resultados do produto em pasta na avaliação da reprodutibilidade de C1G3...	73
Tabela 5.15 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução da escória de alto-forno.....	74
Tabela 5.16 – Formulações com cimento OPC de presa rápida, com introdução de GGBFS e de diferentes percentagens de base forte.....	75
Tabela 5.17 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de GGBFS	76
Tabela 5.18 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com cimento OPC de presa rápida e introdução de GGBFS	78
Tabela 5.19 - Formulações dos produtos SGW em estudo	81
Tabela 5.20 - Resultados da caracterização dos produtos em pasta para as argamassas em estudo	82
Tabela 5.21 - Percentagem de cloretos retida inicialmente	96
Tabela 5.22 - Resultados da observação do vidrado e respetivo registo fotográfico.....	98

SIMBOLOGIA

MATERIAIS

OPC – cimento Portland

CE – éter de celulose

NHL5 – cal hidráulica natural

MKDP – Metacaulino (argila calcinada)

CV – cinzas volantes

ZO - zeólito

GGBFS – escória de alto forno

ARGAMASSAS DIVERSIFICADAS

CIM.01 – cimento-cola de presa normal com tempo aberto alongado e deslizamento reduzido

CIM.02 – cimento-cola de presa normal com tempo aberto alongado e deslizamento reduzido com aditivos diferentes utilizados relativamente a CIM.01

Cal.00 – argamassa com base em cal aérea

Cal.01 – argamassa com base em cal aérea com adição de MKDP

NHL5.M1 – argamassa com base em cal hidráulica natural e agregado (padrão)

NHL5.Mx – argamassas com base em cal hidráulica natural e agregado com introdução de diferentes aditivos, com x a variar entre 2 a 6

C1 – argamassa-cola com base em cimento (padrão)

C1G – argamassa-cola com base em cimento (igual à padrão) com introdução de MKDP

C1Gx – argamassas-cola com base em cimento com introdução de MKDP (5%) e variação do tipo de cimento e x varia de 0 a 3

C1G3.x – argamassas-cola com base em cimento com variação da introdução de MKDP - 0%, 10% e 15% - x varia de 00 a 02

C1PSG.01 – argamassa-cola com combinação de OPC (10%) com GGBFS (10%)

C1PSG.02 – argamassa-cola com combinação de OPC (7,5%) com GGBFS (10%)

C1SG.00 – argamassa com base em GGBFS (padrão)

C1SG.x - argamassa com base em GGBFS com introdução de diferentes aditivos e x varia de 01 a 03

CC.01 – cimento-cola cinza melhorado com tempo aberto alongado, deformável e deslizamento reduzido

CC.02 – cimento-cola cinza de presa normal com tempo aberto alongado e deslizamento reduzido

Capítulo 1

Introdução

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

1.2. OBJETIVO E METODOLOGIA

1.3. ESTRUTURA DO RELATÓRIO

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O Azulejo surge em Portugal, como utilização continuada, nos finais do Séc. XV/início do Séc. XVI, altura em que D. Manuel I, rei de Portugal, contacta com a azulejaria de Sevilha e o Palácio de Sintra passa a ostentar este tipo de revestimento [Figura 1.1] (Fernandes, 2000). Antes disso, D. Afonso V, fez aplicações esporádicas de cerâmicos, nos meados do Séc. XV, em alguns espaços do mesmo Palácio que, pela qualidade de execução e pelo tipo de materiais utilizados, pensa-se que não têm origem andaluza (PNS).



Figura 1.1 - Azulejos do Séc. XVI do Palácio de Sintra (PNS)

Inicialmente, o azulejo apareceu apenas como elemento decorativo em palácios, monumentos, conventos, e com o passar dos anos começaram a ser utilizados em fachadas de edifícios correntes. Grande parte das fachadas do parque edificado nacional adorna revestimentos cerâmicos, seja em aplicações individualizadas ou em toda a fachada nobre, sendo visível também em paredes interiores e nos seus pavimentos. Este tipo de revestimento, em edifícios antigos, é parte integrante do Património Cultural Português, representa um marco histórico do nosso país sobre o qual se deve ter especial atenção, em termos do seu estado de conservação e manutenção.

A aplicação de azulejos, como revestimento interno ou externo de edifícios, tem associadas a si inúmeras vantagens, como conferir aos edifícios uma função estética e de durabilidade. Apesar disso, os revestimentos, particularmente os que se encontram no exterior das construções, ficam sujeitos a alterações climáticas severas que aliadas à falta de manutenção originam a degradação do material, quer de revestimento quer de suporte, com perdas, por vezes, muito difíceis de recuperar.

Quando se procede à reabilitação de edifícios antigos, principalmente os que contêm fachadas azulejadas, é preciso ter em conta diversos fatores para uma adequada intervenção no edifício. A compatibilização dos materiais, a nível funcional, é um desses fatores, para o qual se deve ter especial atenção. As argamassas de substituição devem, por isso, ter características e propriedades semelhantes às argamassas antigas usadas para a fixação dos cerâmicos, aquando da construção do edifício. Conseguir esta compatibilização é uma tarefa complicada, ao mesmo tempo que têm de ser cumpridos os requisitos exigidos pelos documentos normativos em vigor para argamassas-cola.

Atendendo a todos estes fatores, surge uma grande necessidade de desenvolver estudos aprofundados, que possibilitem a formulação de argamassas capazes de desempenhar um papel adequado cumprindo as condições que lhe são impostas.

1.2. OBJETIVO E METODOLOGIA

Com este trabalho pretende-se desenvolver uma argamassa-cola para fixação de revestimentos cerâmicos em reabilitação de edifícios antigos, capaz de responder aos desafios propostos. A argamassa a desenvolver deverá conter materiais compatíveis com os sistemas antigos e cumprir os requisitos para colas de fixação de cerâmicos, exigidos pela Norma Europeia EN 12004.

Para esse efeito, numa primeira fase, foram estudadas argamassas com diferentes graus de compatibilidade, essencialmente, ao nível da caracterização de produto em pasta e de resistência à tração perpendicular (aderência) para diferentes momentos de cura, por forma a ser seguido o caminho mais viável.

Os resultados obtidos na primeira fase conduziram a uma avaliação da reatividade de diferentes pozolanas em argamassas de cal, através da realização de ensaios mecânicos, no sentido de se apurar quais as que podem ser usadas em argamassas-cola. Depois de encontradas as pozolanas com maior poder pozolânico ou reatividade superior, estas foram introduzidas em diferentes formulações como substituição, parcial ou quase total, de ligantes teoricamente menos compatíveis. Estas argamassas foram avaliadas, do ponto de vista da caracterização dos produtos em pasta e da aderência em diferentes momentos de cura.

Das várias argamassas em estudo, foram escolhidas aquelas que, de acordo com a EN12004, geraram resultados mais satisfatórios as quais, posteriormente, foram novamente avaliadas

como produto em pasta e ao nível da aderência em conjunto com a fixação de cerâmicos tradicionais monoporosos “Viúva Lamego”, de ensaios de variação de massa e dimensional, massa volúmica aparente, módulo de elasticidade, de ensaios de resistência mecânica, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, resistência aos sais e estabilidade entre as argamassas e o cerâmico utilizado.

1.3. ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O presente relatório de estágio encontra-se dividido em 6 capítulos, sendo o capítulo 1 a presente introdução, na qual se faz um enquadramento histórico do cerâmico tradicional, bem como da importância da manutenção/reabilitação do património edificado e da adequação dos materiais aquando da intervenção nos edifícios. Neste mesmo capítulo, é ainda, exposto o objetivo principal deste estudo e é feita uma breve descrição da estrutura do presente relatório.

O capítulo 2 é alusivo ao contexto da reabilitação em Portugal e mais especificamente, da reabilitação de paredes antigas azulejadas onde se descrevem algumas das patologias associadas a este tipo de revestimento, bem como as suas principais causas.

No capítulo 3, são abordadas as argamassas utilizadas na reabilitação de fachadas, são também relatadas algumas das suas principais características e quais os requisitos que estas devem cumprir por forma a haver uma adequada intervenção de reabilitação. É feita uma referência às argamassas usadas na reabilitação de fachadas azulejadas, onde são indicados os tipos de ligantes mais utilizados e as suas principais vantagens e desvantagens, relativamente à utilização em argamassas-cola de reabilitação de paredes antigas com revestimento de azulejo. São ainda descritos e caracterizados os principais constituintes das argamassas-cola. Neste mesmo capítulo, são apresentados os requisitos mecânicos, químicos e físicos a cumprir pelas argamassas de substituição, para garantir compatibilidade com os suportes antigos. Por fim, é dada especial atenção às argamassas-cola, apresentando uma definição geral e o respetivo enquadramento normativo com destaque da Norma Europeia EN12004, descrevendo os requisitos a cumprir pelas argamassas-cola a serem utilizadas.

O capítulo 4 diz respeito ao procedimento experimental, onde são descritos todos os métodos de ensaio, referindo as respetivas normas, que foram realizados ao longo do trabalho laboratorial por forma a atingir o objetivo proposto.

No capítulo 5, são apresentados todos os resultados obtidos durante os ensaios laboratoriais aos quais é feita uma análise comentada e detalhada.

Por último, as conclusões referentes aos resultados obtidos em toda a campanha experimental e ao que foi discutido no Capítulo 5, tal como algumas propostas para trabalhos futuros, encontram-se no Capítulo 6.

Capítulo 2

Contexto da Reabilitação

2. CONTEXTO DA REABILITAÇÃO

2.1. GENERALIDADES

2.2. REABILITAÇÃO DE PAREDES ANTIGAS AZULEJADAS

2.2.1. PATOLOGIAS EM PAREDES AZULEJADAS

2.2.2. PRINCIPAIS CAUSAS DAS PATOLOGIAS

2. CONTEXTO DA REABILITAÇÃO

2.1. GENERALIDADES

O atual estado de conservação das construções antigas [Figura 2.1] leva a que a reabilitação seja encarada como uma imposição à construção nova. Edifícios anteriores ao Séc. XX encontram-se em elevado estado de degradação um pouco por todo o país, principalmente na zona Norte e Centro, em consequência da nova construção, do abandono, da falta de tempo e manutenção do edifício e ainda da desertificação dos centros urbanos.



Figura 2.1. Fachadas de dois edifícios na Rua da Vitória em Lisboa (Mimoso et al., 2012)

A reabilitação tem como principais objetivos combater a desertificação e aproveitar os recursos que o património histórico português disponibiliza (Valente, 2008). No entanto, o sucesso do processo de reabilitação está sujeito a vários fatores, que vão desde a definição de *uma estratégia de intervenção*, passando pela *recolha de informação e elaboração do projeto*, até à *execução em obra das soluções adotadas*.

Quando os edifícios existentes possuem um valor patrimonial a proteger, torna-se mais complicado reabilitar do que construir novo, pois exigem materiais e técnicas muito diferentes e mão-de-obra especializada (Cóias et al., 2008).

2.2. REABILITAÇÃO DE PAREDES ANTIGAS AZULEJADAS

As paredes dos edifícios antigos, anteriores ao uso do betão armado, eram constituídas por materiais muito porosos e mais deformáveis em relação aos atualmente utilizados e a

capacidade de resistência e de proteção era assegurada essencialmente pela elevada espessura. O modelo de funcionamento das paredes antigas, construídas sem cortes de capilaridade, admitia a entrada de água para o interior da alvenaria, mas evitava uma permanência prolongada, procurando a sua rápida saída para o exterior.

Os revestimentos, de materiais com características semelhantes, portanto compatíveis com o suporte, tinham um papel importante na capacidade de proteção e no bom funcionamento da parede (Veiga e Tavares, 2002; Santos e Veiga, 2012).

Os azulejos têm uma longa história como revestimento interior e exterior de edifícios antigos, principalmente por causa da sua versatilidade em termos de cor, dimensão, textura e pelas vantagens inerentes à sua utilização como por exemplo, elevada durabilidade, resistência ao ataque dos ácidos, álcalis, humidade e vapores, facilidade de aplicação, boa adesão mecânica às argamassas colantes e baixa expansão térmica (Valente, 2008; Silvestre e Brito, 2011). Enquanto material de revestimento decorativo aplicado à arquitetura engloba o vidro, o suporte cerâmico, as argamassas, a alvenaria e as condições ambientais que o influenciam, em especial as oscilações termo – higrométricas (Rosa et al., 2012).

Normalmente, os problemas mais graves, ou que acarretam consequências mais graves, surgem no exterior dos edifícios. No entanto, também podem ocorrer no interior dos edifícios, nas paredes onde a predominância de humidade e as variações térmicas se fazem sentir com maior intensidade (Bento, 2010).

É importante ainda o conhecimento das patologias em paredes azulejadas bem como das causas a elas associadas, para uma melhor definição de estratégias de reabilitação.

2.2.1. Patologias em paredes azulejadas

Grande parte dos problemas que se encontram nas paredes azulejadas, têm origem no interior dos paramentos, pelo que a determinação das anomalias azulejares exige um levantamento diferenciado quer dos problemas dos revestimentos cerâmicos quer do suporte (Rosa et al., 2012). Geralmente, as patologias associadas às argamassas de assentamento provocam diversos problemas ao nível dos azulejos (Valente, 2008).

De um modo geral as patologias mais frequentes neste tipo de paredes, associadas ao azulejo e à argamassa de assentamento, são o descolamento e a fissuração. No entanto, existem outros problemas, no que diz respeito ao aspeto e à segurança de utilização, que podem afetar o

desempenho dos revestimentos cerâmicos (Bento, 2010). Algumas dessas patologias encontram-se discriminadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Patologias em paredes azulejadas (Valente, 2008; Isidro, 2012)

<i>Patologias associadas ao azulejo</i>	<i>Patologias associadas à argamassa de assentamento</i>
<ul style="list-style-type: none"> – Descolamento ou destacamento [Figura 2.2-a] – Fissuração – Enodoamento prematuro – Riscagem ou desgaste – Alteração de cor [Figura 2.2-b] – Desprendimento do vidrado [Figura 2.2-c] – Esmagamento ou lascagem nos bordos da peça – Deficiência de planaridade 	<ul style="list-style-type: none"> – Humidade – Fendilhação e fissuração – Eflorescências e cripto eflorescências – Biodeteriorização – Perda de aderência – Perda de coesão ou desagregação



a)



b)



c)

Figura 2.2 - Patologias: a) Descolamento/destacamento de azulejos; b) Alteração de cor dos azulejos; c) Desprendimento do vidrado (Isidro, 2012)

2.2.2. Principais causas das patologias

As principais causas, associadas às patologias apresentadas, são as seguintes (Chew, 1999; Valente, 2008):

- Deformação da argamassa de assentamento, devido à retração, sobre a qual foram fixados os azulejos;
- Movimentos diferenciais entre os azulejos, a argamassa-cola e o suporte devido ao efeito térmico, de humidade, entre outros;

- Reações com sais existentes no suporte e/ou argamassas;
- Absorção de água excessiva por parte do suporte;
- Aderência insuficiente entre camadas do sistema de revestimento;
- Deficiências do suporte (deficiências de limpeza, planeza, porosidade);
- Projeto e seleção de materiais inadequados;
- Incorreta sequência e execução do trabalho.

Os azulejos devem ser encarados como um produto final complexo e inserido num suporte arquitetónico. As intervenções de conservação e reabilitação devem respeitar a integridade material das peças e o contexto onde estas se inserem, os modelos de funcionamento originais, sob pena de provocar patologia mais grave que a que se pretende reparar (Veiga e Tavares, 2002; Rosa et al., 2012). A reabilitação pode implicar o uso de técnicas e de materiais novos, por isso, é necessário um conhecimento científico sólido dos materiais utilizados nos edifícios antigos com o intuito de desenvolver técnicas e soluções compatíveis (Rodrigues et al., 2012).

Capítulo 3

Argamassas para Reabilitação de Paredes

3. ARGAMASSAS PARA REABILITAÇÃO DE PAREDES

3.1. GENERALIDADES

3.2. ARGAMASSAS NA REABILITAÇÃO DE PAREDES AZULEJADAS

3.2.1. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS SEUS CONSTITUINTES

3.3. REQUISITOS MECÂNICOS, QUÍMICOS E FÍSICOS SEGUNDO A EN 998-1

3.4. REQUISITOS E PROPRIEDADES PARA ARGAMASSAS-COLA – EN12004

3.4.1. DEFINIÇÃO

3.4.2. ENQUADRAMENTO NORMATIVO

3.4.3. PROPRIEDADES

3. ARGAMASSAS PARA REABILITAÇÃO DE PAREDES

3.1. GENERALIDADES

De acordo com a European Mortar Industry Organization (EMOdicó, 2001), uma argamassa pode definir-se como uma mistura de agregados, um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos e eventualmente aditivos e/ou adjuvantes.

Nos edifícios antigos, sobejamente referenciados, as argamassas desempenhavam uma multiplicidade de funções: função estrutural como constituinte fundamental das alvenarias, aglomerando pedras ou blocos; função de proteção no refechamento de juntas e em revestimentos exteriores de paredes; função de colagem de azulejos; função decorativa em estuques, etc.. Atualmente, as argamassas desempenham a maior parte das funções referidas, embora as exigências colocadas sejam diferentes devido às alterações concetuais e aos materiais de construção utilizados (Veiga, 2012).

Numa intervenção de reabilitação eficaz, sobre revestimentos de paredes antigas é necessário ter em conta o seu estado de conservação assim como a sua composição. Quando há necessidade de substituição, total ou parcial, das argamassas existentes, devem ser formuladas argamassas de substituição apoiadas em critérios de compatibilidade com os elementos pré-existentes e que cumpram os requisitos funcionais e estéticos, por forma a garantir a adequabilidade dos materiais a utilizar.

As argamassas de substituição não devem contribuir para a degradação das alvenarias antigas mas sim, ter a capacidade de proteção das paredes e, para isso, é necessário que ofereçam alguma resistência à penetração da água até ao suporte e que não dificultem a sua secagem, devem possuir alguma resistência mecânica mas que não transmitam tensões elevadas ao suporte e não devem introduzir sais solúveis no suporte. As argamassas devem ainda, ser duráveis e contribuir para a durabilidade do conjunto e não prejudicar a apresentação visual da arquitetura, nem descaracterizar o edifício. Por isso, têm de possuir alguma resistência mecânica, mas inferior à dos tipos de suportes, módulo de elasticidade relativamente pouco elevado e reduzida suscetibilidade à fendilhação (Veiga, 2003; Santos e Veiga, 2012).

Apesar da grande variedade de funções associadas às argamassas utilizadas aquando da construção dos edifícios antigos, apenas importa, para o presente trabalho, as que se encontram relacionadas com a colagem/assentamento de azulejos.

3.2. ARGAMASSAS NA REABILITAÇÃO DE PAREDES AZULEJADAS

Atendendo aos requisitos enunciados anteriormente, é necessário que as argamassas de colagem possuam determinadas características físicas, químicas e mecânicas, visando a preservação e a proteção das técnicas e materiais das paredes antigas sobre o qual vão ser aplicados os cerâmicos (Ferreira, 2009).

As argamassas frequentemente usadas podem ser agrupadas em argamassas de cimento, argamassas de cal aérea e argamassas de cal hidráulica.

De acordo com alguns autores, as argamassas à base de cimento, que poderão apresentar resistências superiores aos azulejos, não são as mais apropriadas para a reabilitação de edifícios antigos. A sua baixa porosidade e elevada impermeabilização geram incompatibilidades nos edifícios antigos, normalmente compostos por materiais porosos. Para além disso, contêm na sua composição sais solúveis (cloretos e sulfatos) que contribuem para a degradação das paredes e para o destacamento de material cerâmico. Outro aspeto que leva à degradação do suporte é a sua elevada resistência mecânica que provoca tensões muito grandes nas paredes que resultam frequentemente na fissuração e na entrada de água no suporte (Veiga, 2003; Ferreira, 2009; Velosa et al., 2012).

Por outro lado, as argamassas com base em cimento apresentam maior rapidez de execução, relativamente ao que é conseguido com as argamassas tradicionais de assentamento e respondem melhor aos movimentos diferenciais entre suporte e revestimento. A sua capacidade de retenção de água permite que sejam aplicadas em camadas mais finas sem perderem a água necessária de hidratação do cimento para o suporte. Apresentam maior elasticidade, proporcionando a obtenção de maior resistência ao descolamento e tornando-as mais aptas para suportarem os movimentos de suportes (Silvestre, 2005).

Segundo Veiga (2003), as argamassas de cal aérea – com cal aérea como único ligante, ou em mistura com teores reduzidos de cimento – são as mais adequadas para revestimento de paredes antigas, pois apresentam uma constituição semelhante às argamassas usadas aquando

da construção do edifício. Por outro lado apresentam problemas de durabilidade, principalmente quando se encontram expostas à chuva.

Do conjunto de vantagens que lhes são associadas, destaca-se o bom comportamento à água, a boa permeabilidade ao vapor de água que facilita a secagem da parede, o lento endurecimento, boa deformabilidade e baixo módulo de elasticidade; são características que lhes permitem acomodar variações higrométricas ambientais e pequenas tensões no suporte sem fissurar (Ferreira, 2009; Velosa et al., 2012).

As argamassas cujo ligante é a cal hidráulica natural podem ser utilizadas no âmbito da reabilitação de edifícios antigos, principalmente quando a ação implica a substituição total do revestimento e a presença de humidade no suporte é continuada (Velosa et al., 2012).

Estas duas últimas argamassas apresentam como desvantagem, menor tensão de adesão ao cerâmico (uma vez que a fixação ocorre por ação física), maior sobrecarga da estrutura, tempos de execução mais longos (devido ao seu lento endurecimento) e a aplicação deste tipo de argamassas ser adequada apenas a suportes e a materiais cerâmicos de elevada porosidade (Silvestre, 2005).

3.2.1. Descrição e caracterização dos seus constituintes

3.2.1.1. Agregados

Os agregados são definidos como um material granular, sendo o constituinte maioritário na formulação das argamassas mas não interferem no endurecimento destas, sendo adicionados com o objetivo de melhorar a sua compacidade e diminuir a retração. Com granulometria adequada e isentos de sais e qualquer matéria orgânica, podem contribuir para o aumento da resistência mecânica e durabilidade das argamassas (Marques, 2005; Agostinho, 2008; Linhares, 2011).

A classificação dos agregados pode ser feita de três formas: segundo a origem, a dimensão das partículas e a massa volúmica. Segundo a origem eles podem ser: *naturais* - conforme se encontram na natureza, *industrializados* - em que a granulometria e composição são obtidas através de processos industriais - e *reciclados* - resultantes de materiais inorgânicos utilizados anteriormente. Segundo as dimensões das partículas são considerados: *finos* - de granulometria inferior a 4mm - ou *grossos* - godo, de origem sedimentar, o rolado, o calhau

ou seixo. Segundo a massa volúmica podem ser leves, médios/normais ou pesados (Bauer, 1995; Coutinho, 1997; Paulo, 2006).

O agregado maioritariamente utilizado em argamassas é a areia. De acordo com o que refere Rodrigues (2004), do ponto de vista químico, as areias podem ser classificadas como areias siliciosas provenientes de rios ou de areiros (naturais) e areias calcárias resultantes de desperdícios de pedreiras de rocha calcária (artificiais). Segundo a mesma autora, as areias naturais com origem em areiros, apresentam partículas mais angulosas produzindo argamassas com melhor comportamento mecânico, ao contrário do que se espera com areia do rio por terem formas mais arredondadas. Por outro lado, com as areias artificiais é preciso ter em atenção a quantidade de finos.

No decorrer da campanha experimental, do presente trabalho, apenas serão usados agregados finos no desenvolvimento das argamassas a estudar, sendo neste caso, mais especificamente as areias siliciosas.

3.2.1.2. Ligantes

Segundo Coutinho (1997), a principal característica dos ligantes é a capacidade de aderir e aglomerar uma grande proporção de inertes, conferindo coesão e resistência ao conjunto que os torna capazes de serem utilizados como argamassas. De acordo com o mesmo autor, os ligantes propriamente ditos dividem-se em dois grandes grupos: ligantes orgânicos e ligantes inorgânicos.

Os ligantes inorgânicos ou de origem mineral são compostos por pós muito finos que em contacto com a água e/ou ar formam uma pasta que endurece após reações de hidratação e/ou carbonatação (Paulo, 2006; Agostinho, 2008). Sendo assim, estes podem ser: ligantes hidráulicos e ligantes aéreos.

- i. Ligantes hidráulicos: adquirem forma sólida após endurecimento quer em contacto com o ar, quer em presença de água. Este tipo de ligante é designado por hidráulico porque apesar de endurecer ao ar, tem a capacidade de obter elevada resistência quando imerso.
- ii. Ligantes aéreos: é a categoria mais antiga de ligantes. São designados aéreos porque o seu endurecimento ocorre apenas em contacto com o ar, e a sua inclusão

na formulação de argamassas torna-as não resistentes à água (Coutinho, 1997; Martins e Paiva, 2010).

Os ligantes orgânicos ou ligantes poliméricos, segundo Jenni et al. (2005), quando introduzidos nas formulações de argamassas melhoram os valores de coesão final e das propriedades de aderência. De acordo com estudos realizados pelos autores, os ligantes poliméricos são considerados como responsáveis pelo aumento da resistência de aderência e esta melhoria é condicionada pelo tipo de polímero.

As argamassas para edifícios antigos, geralmente, são constituídas por ligantes de cal e de cimento, sendo que nos de cal inserem-se as cais aérea e hidráulica (Rodrigues, 2004). No entanto, existem ainda os ligantes de gesso que não serão amplamente caracterizados neste estudo.

Ligantes de cal

Os ligantes de cal, ao longo de vários séculos, foram os ligantes mais utilizados em argamassas de assentamento de alvenarias e como revestimento de fachadas mas, com o aparecimento de ligantes hidráulicos, mais propriamente o cimento, o uso da cal foi diminuindo (Rodrigues, 2004).

Existe uma característica importante que divide as argamassas de cal que é a sua hidraulicidade, que reflete a capacidade de uma argamassa estabelecer presa debaixo de água, sem contacto com o dióxido de carbono atmosférico (Marques, 2005). Assim, os ligantes de cal utilizados são: de *cal aérea* ou *cal hidráulica*, sendo a cal hidráulica a que possui índice de hidraulicidade.

As argamassas de cal, geralmente, são consideradas não hidráulicas, embora possam apresentar carácter hidráulico se tiverem sido adicionadas de algumas substâncias pozolânicas, ou quando a quantidade de argilas ou silicatos na rocha de origem exceder 10% em massa (Marques, 2005).

– Cal aérea

A cal aérea é o ligante que resulta da decomposição, pela ação da temperatura a rondar os 900°C, de uma rocha com percentagem não inferior a 95% de carbonato de cálcio ou de cálcio

e magnésio. O produto obtido pela cozedura destes calcários designa-se por *cal viva* (óxido de cálcio) (Coutinho, 1997).

Segundo Bauer (1995), a cal viva não é o ligante a ser utilizado na formulação de argamassas. O óxido deve ser hidratado, a operação de hidratação recebe o nome de extinção, e o hidróxido resultante denomina-se *cal hidratada*. Sendo assim, a cal aérea pode ser dividida em duas: cal viva e cal hidratada.

A cal hidratada ou cal aérea é então utilizada nas formulações das argamassas numa mistura com água e areia, em proporções adequadas. Este tipo de cal endurece lentamente ao ar por reação do hidróxido com o dióxido de carbono atmosférico e não fazem presa dentro de água Bauer (1995). O uso de cal aérea origina argamassas com elevada plasticidade, obtendo uma trabalhabilidade ótima para a sua aplicação (Costa, 2008).

– Cal hidráulica

A cal hidráulica é obtida, natural ou artificialmente, através da decomposição de rochas calcárias sujeitas à ação da temperatura (entre 1200°C e 1500°C), com quantidades compreendidas entre 5% a 20% de materiais argilosos. A cal resultante do processo de calcinação deve ser extinta, de forma a eliminar a cal viva e provocar a pulverização da cal hidráulica (Coutinho, 1997).

A cal hidráulica produzida por cozedura (inferior a 1250°C) de rocha calcária mais ou menos argilosa ou siliciosa, extinta e reduzida a pó, com ou sem moagem, é denominada de cal hidráulica natural (NHL). A cal artificial, designada por HL, é considerada um cimento magro, obtido por adição ao clínquer do cimento, de fileres inertes, geralmente, calcários (Rodrigues, 2004).

Este tipo de cal, tem a capacidade de endurecer em presença de água, devido ao seu carácter hidráulico e o dióxido de carbono atmosférico, à semelhança das cals aéreas, também contribui para o processo de endurecimento. A introdução de cal hidráulica na formulação das argamassas proporciona a estas uma boa trabalhabilidade, um aumento da resistência mecânica, boa aderência às superfícies e bom acabamento, melhorando a qualidade da construção civil (Paulo, 2006).

Ligantes de cimento

O cimento é o ligante mais frequentemente utilizado na formulação de argamassas, principalmente usado em argamassas de colagem de cerâmica atual. É definido como um ligante hidráulico logo, conforme referido anteriormente, ganha presa e endurece após reação de hidratação tanto em contacto com o ar como em presença de água.

A produção do cimento é efetuada a partir de uma mistura em adequada proporção de calcário e argilas, ou margas, contendo cerca de 25% de argila e, eventualmente, mais algumas substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro. As matérias-primas são finamente moídas, e após controlo da composição do produto a obter, são submetidas a temperaturas a rondar os 1450°C, atualmente, em fornos rotativos contínuos e por via seca. Após vários processos químicos e físicos até atingir a temperatura desejada, os produtos da reação, ao arrefecerem de forma rápida, obtêm uma forma granular com dimensões variáveis, denominados por clínquer. Posteriormente, o clínquer é moído e adicionado de gesso (por forma a reduzir o tempo de presa) e de aditivos, para a obtenção do cimento (Rodrigues, 2004; Martins e Paiva, 2010).

O cimento apresenta como principais características: resistência a agressões químicas, elevada resistência mecânica, instabilidade volúmica e calor de hidratação (Marques, 2005). Assim, origina argamassas com elevada resistência mecânica.

3.2.1.3. Adjuvantes e aditivos

Os adjuvantes e aditivos, são introduzidos nos ligantes com o objetivo de melhorar as propriedades das argamassas, adaptando-as a determinadas condições de uso e desempenho específico. Segundo Coutinho (1997), com a utilização de adjuvantes e aditivos pretende-se modificar certas propriedades dos materiais, quer no estado fluído, quer no estado sólido, quer ainda no momento da passagem de um estado a outro, alcançando os seguintes efeitos: melhorar a trabalhabilidade; acelerar a presa; retardar a presa; acelerar o endurecimento nas primeiras idades; diminuir permeabilidade aos líquidos; etc..

Paulo (2006) faz referência ao grupo de trabalho da RILEM (Reunião Internacional dos Laboratórios de Ensaio de Materiais), que aquando de uma conferência em Paris em 1967, adotou critérios para a classificação dos adjuvantes. Sendo eles: *modificadores da reologia da massa fresca* (plastificantes/redutores de presa; introdutores de ar; plastificantes/introdutores

de ar; retentores de água; promotores de aderência/coesivos); *modificadores do tempo de presa* (ativadores de endurecimento; aceleradores de presa; retardadores de presa); *impermeabilizantes e hidrofugantes*; *expansivos*.

Coutinho (1997) refere ainda que toda a substância adicionada ao ligante numa argamassa, em quantidade superior a 5% da massa desse ligante, designa-se de aditivo. Estes aditivos têm como objetivo obter ou melhorar propriedades específicas das argamassas.

Segundo Paulo (2006), os aditivos podem ser divididos em dois grupos: *adições praticamente inertes* (cargas minerais, pigmentos inorgânicos); *adições pozolânicas ou hidráulicas* (materiais pozolânicos naturais, cinzas volantes, escórias, etc.).

3.2.1.4. Materiais pozolânicos

As pozolanas são materiais que têm presente na sua constituição a sílica e a alumina, que por si só não possuem propriedades aglomerantes e hidráulicas mas, possuem outros constituintes que quando sujeitos à temperatura ambiente e em presença de água, combinam com o hidróxido de cálcio da cal e do cimento e outros constituintes, originando produtos com grande estabilidade na água e com propriedades hidráulicas (Coutinho, 1997; Sabir et al., 2001; Velosa, 2006).

Estes materiais podem ser classificados como pozolanas naturais, pozolanas artificiais ou ainda subprodutos industriais. As pozolanas naturais são provenientes de magmas ricos em sílica, arrefecidos bruscamente (ficando no estado amorfo), e posteriormente alterados por meteorização, constituídas por rochas lávicas que só por si têm propriedades pozolânicas, não necessitando de tratamentos especiais (Coutinho, 1997; Rodrigues, 2004).

As pozolanas artificiais são obtidas através de tratamento especial de materiais com base siliciosa (argilas de qualquer tipo), a temperaturas de cozedura indicadas para cada material suficiente para a desidratação, induzindo a formação de sílica amorfa. Estas temperaturas não devem ser demasiado elevadas de forma a não haver nucleação e crescimento cristalino (Coutinho, 1997; Velosa, 2006). De acordo com Al-Chaar et al. (2013), a temperatura de cozedura ou de calcinação da argila afeta a reatividade pozolânica dos produtos resultantes. A argila encontra-se no seu estado mais reativo quando a temperatura de calcinação leva à perda de hidroxilos (OH⁻) e resulta numa instabilidade e desarranjo da estrutura.

Os subprodutos industriais, são normalmente obtidos por um mecanismo semelhantes ao das pozolanas artificiais. Os materiais ficam sujeitos à ação da temperatura durante os processos industriais e adquirem propriedades pozolânicas (Coutinho, 1997). De acordo com o que refere Rodrigues (2004), o aproveitamento de subprodutos industriais tem cada vez mais importância, como forma de diminuir o consumo energético, poupar matérias-primas, reduzir a quantidade de material para vazadouro e contribuir para a sustentabilidade ambiental.

Segundo Sabir et al. (2001) e Al-Chaar et al. (2013), a utilização das pozolanas no betão ou em argamassas, como substituto parcial do cimento, oferece algumas vantagens técnicas manifestadas pela redução do aumento da temperatura durante as reações de hidratação, pela melhoria da durabilidade e da resistência dos materiais, apesar de, em alguns casos, a resistência se desenvolver mais lentamente. Abdullah et al. (2012) referem ainda que esta substituição proporciona a redução das reações álcali-agregado, reduzindo a expansão dos materiais, melhora a resistência ao ataque de sais, e permite diminuir a produção de cimento, bem como o abrandamento das emissões de carbono para a atmosfera, que são elevadas durante a obtenção do cimento.

No presente trabalho, serão caracterizadas e estudadas as seguintes pozolanas: o metacaulino, as cinzas volantes, escória de alto-forno e zeólito.

– **Metacaulino**

O metacaulino, identificado no presente trabalho com a sigla MKDP, trata-se de uma pozolana artificial e é obtida a partir de argilas cauliníticas com elevada pureza, por calcinação a temperaturas moderadas entre os 650°C e 800°C. A perda de água provoca a quebra da estrutura cristalina da argila produzindo produtos amorfos (sílica e alumina) de elevada área superficial e reatividade química. As características do metacaulino/argila calcinada dependem, para além de outros fatores, da natureza e da composição original da matéria-prima (argila), da temperatura máxima atingida na calcinação e do tempo de duração desta (Sabir et al., 2001; Rodrigues, 2004).

Sabir et al. (2001), referenciando diversos autores, referem que a temperatura de calcinação ideal para se obter máxima resistência é de 700°C, abaixo deste valor resultam produtos com baixa reatividade e com mais resíduos de caulinite e a temperaturas acima dos 850°C ocorre cristalização e a reatividade diminui.

As principais razões, para o uso de pozolanas à base de argila em argamassas ou betões, é a disponibilidade de materiais e a melhoria da durabilidade. Além disso, dependendo da temperatura de calcinação e do tipo de argila utilizada, é também possível obter melhorias na resistência dos materiais, principalmente nas primeiras idades, bem como de outras propriedades como menor porosidade, a resistência à absorção de água e a trabalhabilidade dos produtos (Sabir et al., 2001).

– **Cinzas Volantes**

As cinzas volantes, identificadas no presente trabalho por CV, são, de entre todos os subprodutos industriais, as mais utilizadas no fabrico de argamassas industriais (Paulo, 2006). Segundo Coutinho (1997), as cinzas volantes são um resíduo finamente dividido proveniente da queima do carvão (pulverizado) em centrais termoelétricas, que é arrastado nos gases de combustão. A captação deste resíduo pode ser feita através de precipitadores eletrostáticos, que captam as partículas menores, ou por coletores mecânicos que captam as partículas maiores. As partículas das cinzas são normalmente esféricas e vítreas, provenientes da argila do carvão, esféricas negras de magnetite, mas também podem existir partículas de forma irregular ou angular (Rodrigues, 2004; Velosa, 2006).

A composição química das cinzas volantes é condicionada pelo tipo de carvão utilizado e pelos processos de combustão, no que se refere à quantidade de carvão por queimar existente nas cinzas. No entanto, os seus componentes principais são a sílica, a alumina e o óxido de ferro.

De uma forma geral, as cinzas volantes são pozolanas de fraca reatividade inicial, produzindo materiais com resistências iniciais mais baixas, mas em prazos superiores a 28 dias, chega a atingir comportamento semelhante ou superior às características de pozolanicidade obtidas para as pozolanas naturais. No entanto, as cinzas volantes aumentam a trabalhabilidade das argamassas (Coutinho, 1997).

– **Escória de alto-forno**

A escória de alto-forno, identificada no presente trabalho pela sigla GGBFS (que vem do inglês e significa Ground Granulated Blast-Furnace Slag), é um subproduto da indústria do aço e é obtido pela combinação da ganga dos minérios dos metais com fundentes apropriados

e cinzas de carvão utilizado. A ganga é constituída por substâncias ricas em silício, alumínio e cálcio enquanto o minério de ferro é uma mistura destas substâncias com o óxido de ferro.

A GGBFS é constituída pelos mesmos componentes do cimento (óxido de cálcio, silício e alumínio) mas em diferentes proporções, possuindo propriedades hidráulicas e por isso não deveriam ser consideradas como pozolanas, apesar de muitas vezes serem tratadas assim. Enquanto a pozolana, como foi referido anteriormente, necessita de se combinar com o hidróxido de cálcio para que obtenha propriedades hidráulicas, a escória já as possui e apenas precisa de um meio altamente alcalino para que essas propriedades se manifestem (Coutinho, 1997).

Segundo Alhozaimy et al. (2012), devido aos seus constituintes serem muito semelhantes aos do cimento, a GGBFS pode ser usada como material suplementar do cimento. Por isso, é normalmente utilizada em combinação com o cimento e produz materiais com diversas vantagens, como a melhoria da trabalhabilidade, da durabilidade e ainda garante benefícios económicos (Barnett et al., 2006). De acordo com o que referem Tsai et al. (2014), a GGBFS pode substituir o cimento em aproximadamente 70% ou até 80 % da sua massa.

Alhozaimy et al. (2012), referem que o uso de GGBFS em substituição do cimento, desenvolve produtos com baixas resistências iniciais e devido a isso, não devem ser utilizadas quando são requeridas resistências iniciais elevadas. No entanto, Barnett et al. (2006) estudaram argamassas com diferentes percentagens de GGBFS em substituição do cimento, sujeitas a diferentes condições de cura e verificaram que as resistências iniciais dependem essencialmente da temperatura de cura e da quantidade de GGBFS presente na argamassa. Sob condições de temperatura a rondar os 20°C, as argamassas ganham resistência mais lentamente do que as que contêm apenas cimento Portland. A temperaturas mais elevadas, o ganho de resistência é mais rápido e essa melhoria é mais significativa em níveis mais elevados de GGBFS.

– **Zeólito**

O zeólito, identificado no presente trabalho por ZO, é uma pozolana natural de origem vulcânica ou vulcano-sedimentar, que tem vindo a ser utilizada na construção, em misturas com cal, desde o tempo dos Romanos. Na sua constituição tem presente alumino-silicatos hidratados, com estrutura do tipo “gaiola” que permite obter grandes áreas superficiais e

assim, produzir materiais com grande reatividade (Ahmadi e Shekarchi, 2010; Perraki et al., 2010).

Segundo Ahmadi e Shekarchi (2010), referem que, embora zeólito natural seja um material cristalino, este pode ser utilizado como material pozolânico, sendo um excelente suplemento de cimento. A grande quantidade de sílica e alumina na sua constituição combina com o hidróxido de cálcio do cimento, proveniente da hidratação do mesmo, que resulta numa melhoria da microestrutura do betão ou das argamassas depois de endurecidas.

De acordo com Caputo et al. (2008), a substituição de cimento por zeólito natural diminui a trabalhabilidade das misturas e aumenta a percentagem de água de amassadura necessária. No entanto, tal como as restantes pozolanas, o uso do zeólito como suplemento do cimento melhora as propriedades mecânicas das argamassas ou do betão (Ahmadi e Shekarchi, 2010).

Reatividade pozolânica e ativação alcalina

Rodrigues (2004) define a reatividade pozolânica como *a capacidade da sílica e da alumina amorfa dos componentes pozolânicos se combinarem com o hidróxido de cálcio, na presença de água, para formarem silicatos e aluminatos de cálcio (hidratados) do tipo dos que se desenvolvem com a hidratação do cimento Portland*. Assim, a reatividade está relacionada com a estrutura interna das pozolanas e por isso, quanto mais afastado estiver o produto do estado cristalino, maior será a sua reatividade. Outro fator que também influencia a reatividade das pozolanas é a área superficial em contacto com o hidróxido de cálcio, que deve ser elevada, pois quanto maior for a superfície específica, maior a reatividade (Coutinho, 1997).

Conforme referido anteriormente, existem inúmeras vantagens associadas ao uso de pozolanas como suplemento do cimento em argamassas e betão. No entanto, as reações pozolânicas iniciais são consideradas lentas o que conduz à diminuição das resistências iniciais dos produtos. Várias técnicas têm sido experimentadas por forma a ativar a potencial reatividade das pozolanas, onde se incluem: a calcinação das pozolanas naturais; o tratamento ácido das pozolanas naturais; moagem prolongada das pozolanas naturais; elevação da temperatura de cura dos materiais com pozolanas e o uso de ativadores químicos em adição aos materiais com pozolanas (Shi e Day, 2000, 2001).

A ativação alcalina de materiais pozolânicos é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (parcial ou totalmente amorfas) em compósitos compactos bem cimentados (Palomo et al., 1999).

De acordo com estudos realizados por Shi e Day (2001), verifica-se que o uso de ativadores em argamassas de cal acelera as reações pozolânicas, que gera o aumento significativo das resistências iniciais. A comparação feita, pelo mesmo autor, entre a adição do ativador alcalino, da elevação da temperatura e da moagem prolongada das pozolanas, mostrou que a ativação química é o método mais eficiente na ativação da reatividade pozolânica, com efeitos mais significativos tanto ao nível do desenvolvimento da resistência mecânica, no período inicial e após cura prolongada.

3.2.1.5. Água de amassadura

A água, conforme foi referido anteriormente, é o elemento responsável pelas reações de hidratação nas argamassas constituídas por ligantes hidráulicos, pois permite desencadear as condições necessárias para estes materiais adquirirem propriedades aglomerantes.

Na produção das argamassas, pode ser utilizado qualquer tipo de água desde que seja potável e contenha teor reduzido de sais solúveis. Estes requisitos resultam do facto de a água de amassadura influir nas propriedades das argamassas se possuir substâncias dissolvidas e em suspensão capazes de retardar a presa e o endurecimento.

A quantidade de água utilizada tem um papel fulcral na qualidade das argamassas produzidas, pois condiciona a sua consistência, o processo de endurecimento, a aderência ao suporte e as características no estado endurecido (Botelho, 2003; Cavaco, 2005; Agostinho, 2008).

Portanto, a água de amassadura deve ser utilizada em quantidade mínima, normalmente a indicada pelo fabricante, por forma a garantir a consistência necessária visando obter uma argamassa com trabalhabilidade ótima, sem comprometimento das outras propriedades importantes (Cavaco, 2005; Paulo, 2006; Agostinho, 2008).

3.3. REQUISITOS MECÂNICOS, FÍSICOS E QUÍMICOS SEGUNDO A EN 998-1

As argamassas de substituição em reabilitação de edifícios, conforme referido anteriormente, têm de cumprir com uma grande variedade de exigências no que concerne a características mecânicas, químicas e físicas, para que haja compatibilidade com os suportes antigos.

A EN 998-1 e o Caderno de Edifícios 2 (Veiga e Carvalho, 2002) apresentam os requisitos a cumprir pelas argamassas para que tenham um ótimo desempenho ao nível da compatibilidade mecânica, física e química com os suportes antigos. Na compatibilidade mecânica, as propriedades que devem cumprir com os requisitos normativos, são a resistência à compressão e módulo de elasticidade. Na compatibilidade física devem ser cumpridos os requisitos para o coeficiente de absorção de água por capilaridade, ascensão capilar permeabilidade ao vapor de água. Por último, a compatibilidade química tem como propriedade a satisfazer o teor de cloretos e a resistência aos sais.

Na Tabela 3.1, em função do desempenho desejado, apresentam-se as propriedades e os respetivos requisitos normativos que as argamassas de substituição devem cumprir.

Tabela 3.1 - Requisitos mecânicos, químicos e físicos para as argamassas de substituição segundo a EN 998-1 e o Caderno de Edifícios 2 (CEN; Veiga e Carvalho, 2002; Freitas et al., 2014)

DESEMPENHO DESEJADO	PROPRIEDADES	REQUISITOS
Compatibilidade mecânica	Resistência à compressão (MPa)	CSI - 0,4 a 2,5 MPa CSII - 1,5 a 5 MPa
	Módulo de elasticidade (MPa)	2000-5000 (Veiga e Carvalho, 2002)
Compatibilidade física	Coeficiente de absorção de água por capilaridade	$\geq 0,3 \text{ kg/m}^2$ - após 24h $>1,0$ e $<1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ (Veiga e Carvalho, 2002)
	Ascensão capilar (mm)	< 5
	Permeabilidade ao vapor de água	≤ 15
Compatibilidade química	Teor de cloretos (%)	$< 0,10$
	Resistência aos sais	> 5 ciclos (Freitas et al., 2014)

CS – Compressive strength

Para além da compatibilidade dos materiais, o presente trabalho pretende relacionar as propriedades que devem ser impostas às argamassas de substituição, com os requisitos a cumprir, em termos mecânicos, para as argamassas-cola/cimentos-cola de acordo com a norma EN 12004.

3.4. REQUISITOS E PROPRIEDADES PARA ARGAMASSAS- COLA – EN12004

3.4.1. Definição

Segundo a Norma Europeia EN12004 – *Adhesives for tiles – Requirements, evaluation of conformity, classification and designation* (CEN), os cimentos-cola definem-se como uma *mistura de ligantes hidráulicos, agregados e aditivos orgânicos. As colas são misturadas com água ou com o líquido de adição imediatamente antes da sua utilização.* Para além dos cimentos-cola, a EN 12004 (CEN) apresenta a definição de mais dois tipos de cola para aplicação de cerâmicos: a cola em dispersão aquosa e a cola de resinas de reação¹. Estas argamassas são produzidas industrialmente e fornecidas na forma de mistura pré-doseada em pó.

A EN12004 classifica, nas secções seguintes, os cimentos-cola que têm como base de ligante o cimento, no entanto, todas as argamassas estudadas no presente trabalho têm de cumprir com os requisitos aqui citados.

3.4.2. Enquadramento normativo

O Comité Européen de Normalisation (CEN), a British Standards Institutions (BSI), o Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), a Union Européen pour L’agrément Technique dans la construction (UEAtc), o Deutsches Institut für Normung (DIN) e a American National Standards Specifications (ANSI) apresentam documentos normativos que pretendem definir e caracterizar as argamassas-cola (Sá, 2005).

Neste ponto apenas será abordada a Norma Europeia EN12004 apresentada pelo CEN, pois é sobre esta que se irá debruçar este trabalho.

3.4.2.1. Norma Europeia EN12004 – CEN

A norma EN 12004 (CEN) classifica os três tipos de cola, definidos anteriormente, em função da sua composição química. As classes podem ser: do tipo C (classificação atribuída aos

¹ Nota: A EN12004 define as restantes colas da seguinte forma:

- Cola em dispersão aquosa: *mistura de ligantes hidráulicos sob a forma de polímeros em dispersão aquosa, de aditivos orgânicos e de cargas minerais finais.*

- Cola de resinas de reação: *mistura de resinas sintéticas, cargas minerais e aditivos orgânicos, em que o endurecimento ocorre por reação química.*

cimentos-cola por terem uma constituição de base de cimento ou mineral), do tipo D (classifica as colas em dispersão, D = dispersão) e do tipo R (classifica as resinas de reação, R = resinas de reação). Para o estudo em causa, vai ser apenas abordado o cimento-cola (C).

a. Classificação

Os cimentos-cola podem ainda ser divididos em classes [Tabela 3.2] que dependem das características fundamentais e de características opcionais. As características fundamentais são as propriedades que têm absolutamente que cumprir, enquanto as características opcionais representam as propriedades requeridas para aplicações específicas (CEN).

Tabela 3.2 - Classes de colas segundo a norma EN 12004

Características Fundamentais	
1	cola normal
2	cola melhorada
Características Opcionais	
E	cola com tempo aberto alongado
F	cola de presa rápida
T	cola com resistência ao deslizamento vertical
S1	cola deformável
S2	cola altamente deformável

As classes pertencentes às características fundamentais podem ser combinadas com todas as classes referentes às características opcionais. Assim sendo, os cimentos-cola da classe do tipo C, podem desdobrar-se de acordo com a combinação de propriedades desejada, originando o que se apresenta na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Exemplos de designação e classificação dos cimentos-cola (EN 12004)

SÍMBOLO		DESCRIÇÃO
TIPO	CLASSE	
C	1	Cimentos-cola de presa normal
C	1E	Cimentos-cola de presa normal com tempo aberto prolongado
C	1F	Cimentos-cola de presa rápida
C	1FT	Cimentos-cola de presa rápida com deslizamento reduzido
C	2	Cimentos-cola melhorados
C	2E	Cimentos-cola melhorados com tempo aberto prolongado
C	2F	Cimentos-cola de presa rápida melhorados
C	2S1	Cimentos-cola deformáveis melhorados
C	2S2	Cimentos-cola altamente deformáveis melhorados
C	2FT	Cimentos-cola de presa rápida melhorados e com deslizamento reduzido
C	2FTS1	Cimentos-cola de presa rápida deformáveis melhorados e com deslizamento reduzido

b. Requisitos a cumprir

Os requisitos que a norma EN 12004 (CEN) especifica para as características fundamentais são: a resistência de aderência inicial, após imersão em água, após ação do calor e após ciclos de gelo-degelo e, por último, o tempo de abertura (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Especificações para cimentos-cola – características fundamentais (EN 12004)

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS		
1a	CIMENTOS-COLA DE PRESA NORMAL	
Característica	Requisito	Método de ensaio
Tensão de aderência inicial	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	8.2 da EN 1348:2007
Tensão de aderência à tração após imersão em água	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	8.3 da EN 1348:2007
Tensão de aderência à tração após ação do calor	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	8.4 da EN 1348:2007
Tensão de aderência à tração após ciclos de gelo-degelo	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	8.5 da EN 1348:2007
Tempo aberto: tensão de aderência à tração	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após 20'	EN 1346
1b	CIMENTOS-COLA DE PRESA RÁPIDA	
Característica	Requisito	Método de ensaio
Tensão de aderência rápida à tração	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não mais de 6h	8.2 da EN 1348:2007
Tempo aberto: tensão de aderência à tração	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não mais de 6h	EN 1346
Todos os outros requisitos em 1a		EN 1346

Em relação às características opcionais, a norma EN 12004 especifica os requisitos de resistência ao deslizamento; tempo aberto; deformação transversal; e resistência de aderência inicial, após imersão em água, após ação do calor e após ciclos de gelo-degelo (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Especificações para cimentos cola – características opcionais (EN 12004)

CARACTERÍSTICAS OPCIONAIS		
1c	CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS	
Característica	Requisito	Método de ensaio
Deslizamento	$\leq 0,5 \text{ mm}$	EN 1308
Tempo aberto prolongado: tensão de aderência à tração	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após 30'	EN 1346
Cimento-cola deformável: deformação transversal	$\geq 2,5 \text{ mm}$ e $< 5 \text{ mm}$	EN 12002
Cimento-cola altamente deformável: deformação transversal	$\geq 5 \text{ mm}$	EN 12002
1b	CARACTERÍSTICAS ADICIONAIS	
Característica	Requisito	Método de ensaio
Elevada tensão de aderência inicial à tração	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	8.2 da EN1348:2007
Elevada tensão de aderência à tração após imersão em água	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	8.3 da EN1348:2007
Elevada tensão de aderência à tração após ação do calor	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	8.4 da EN1348:2007
Elevada aderência à tração após gelo-degelo	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	8.5 da EN1348:2007

3.4.3. Propriedades

De acordo com a norma EN 12004 (CEN), as propriedades dos cimentos-cola e das outras colas aí definidas, encontram-se divididas entre as propriedades de aplicação e as propriedades finais. As propriedades de aplicação, dizem respeito a:

- *Tempo de vida útil* – período de tempo durante o qual uma cola, armazenada em condições definidas, conserva as suas propriedades de aplicação;
- *Tempo de repouso (maturação)* – período de tempo entre a preparação de uma cola e o momento em que esta deve ser aplicada;
- *Tempo de vida* – máximo período de tempo após preparação de uma cola, durante o qual ela é utilizável;
- *Tempo aberto* – máximo período de tempo para a fixação dos ladrilhos desde o momento de aplicação de uma cola, permitindo cumprir a tensão de aderência especificada;
- *Poder molhante* – aptidão de uma camada de cola penteada para molhar os ladrilhos;
- *Deslizamento* – Deslocação, sobre uma superfície vertical ou inclinada, de um ladrilho aplicado sobre uma camada de cola penteada;
- *Tempo de ajustabilidade* – máximo período de tempo durante o qual a posição de um ladrilho na camada de cola pode ser corrigida após colocação, sem perda significativa da aderência final.

As propriedades finais definidas no mesmo documento normativo são:

- *Tensão de aderência* – força máxima de rotura por unidade de superfície, que pode ser medida com aplicação de uma força de tração ou de corte;
- *Deformabilidade* – capacidade apresentada por uma cola endurecida para ser deformada por tensões entre o ladrilho e a superfície de suporte, sem danos para a superfície revestida;
- *Deformação transversal* – deflexão registada no centro de uma camada de cola endurecida submetida a uma carga aplicada em três pontos.

Capítulo 4

Procedimento Experimental

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

- 4.1. DESENVOLVIMENTO E PREPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES
- 4.2. AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE POZOLÂNICA DE DIVERSOS MATERIAIS
- 4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO
 - 4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS EM PASTA
 - 4.3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS ENDURECIDOS
- 4.4. AVALIAÇÃO DE FORMULAÇÕES ESPECÍFICAS COM UTILIZAÇÃO DE CERÂMICA TRADICIONAL
 - 4.4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS EM PASTA
 - 4.4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS ENDURECIDOS

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente capítulo divide-se em duas partes distintas. Numa primeira fase foram desenvolvidas formulações que, posteriormente, foram caracterizadas como produto em pasta e produto endurecido. Numa segunda fase foram avaliadas cinco formulações potencialmente capazes de cumprir os requisitos, com utilização de cerâmicos porosos “Viúva Lamego”.

4.1. DESENVOLVIMENTO E PREPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES

Conforme supramencionado, o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma argamassa-cola compatível com os suportes a reabilitar, cumprindo o elemento normativo em vigor. Assim, desenvolveram-se e estudaram-se diferentes formulações capazes de responder aos desafios propostos.

Numa primeira fase, fez-se a análise de resultados típicos de duas argamassas à base de cimento produzidas e comercializadas pela Saint-Gobain Weber, teoricamente menos compatíveis com os suportes antigos/a reabilitar, devido à introdução de sais (sulfatos e cloretos) na estrutura por parte do cimento. Posteriormente desenvolveram-se formulações à base de cal, potencialmente mais compatíveis com os suportes. Por último, a partir de uma argamassa com cal hidráulica como base de ligante mineral, foram desenvolvidas formulações combinadas com diferentes tipos de cimento, em percentagens reduzidas. Estas argamassas foram estudadas, essencialmente, do ponto de vista do tempo de presa e resistência à tração perpendicular.

Numa segunda fase, avaliou-se a reatividade de diferentes pozolanas em argamassas à base de cal. Nesta fase é também estudado o efeito da adição de um ativador alcalino, que tem como objetivo acelerar as reações pozolânicas, que se conhecem como reações lentas, e obter melhores resultados ao nível das resistências mecânicas (sobretudo nos períodos iniciais) (Shi e Day, 2000, 2001). As pozolanas com reatividade superior foram, posteriormente, introduzidas em formulações com quantidades reduzidas de cimento OPC e avaliadas como produto em pasta e endurecido.

As argamassas estudadas encontram-se descritas, de forma sucinta, na Tabela 4.1, onde se apresenta uma variável (x) que diferencia as várias formulações dentro de cada tipo de argamassa estudada.

Tabela 4.1 – Descrição das várias argamassas estudadas e respetiva simbologia

ARGAMASSAS ESTUDADAS		SÍMBOLO	DESCRIÇÃO SUCINTA
Argamassas de cimento		CIM.x	. Cimentos-cola de presa normal com tempo aberto alongado e deslizamento reduzido, variando no tipo de aditivos utilizados - x varia de 01 a 02
Argamassas de cal aérea		Cal.00	. Argamassa com base em cal aérea
		Cal.01	. Argamassa com base em cal aérea com adição de MKDP
Argamassas de cal hidráulica		NHL5.M1	. Argamassa padrão (cal hidráulica natural + agregado)
		NHL5.Mx	. Argamassas com base em cal hidráulica natural e agregado com introdução de diferentes aditivos . x varia de 2 a 6
Argamassas para estudo da reatividade pozolânica		MKDP	. Argamassa de cal com metacaulino
		CV	. Argamassa de cal com cinzas volantes
		ZO	. Argamassa de cal com zeólito
		GGBFS	. Argamassa de cal com escória de alto-forno
Substituição de cimento por pozolanas	MKDP	C1	. Argamassa-cola padrão com base em cimento
		C1G	. Argamassa-cola com base em cimento e introdução de MKDP
		C1Gx	. Argamassa-cola com base em cimento, introdução de MKDP e variação do tipo de cimento - x varia de 0 a 3
		C1G3.x	. Argamassas-cola com base em cimento com variação de MKDP - 0%, 10% e 15% - x varia de 00 a 02
	GGBFS	C1PSG.x	. Argamassa-cola com combinação de OPC com GGBFS, variando a quantidade de cimento - x varia de 01 a 02
		C1SG.00	. Argamassa-cola padrão com base em GGBFS
		C1SG.x	. Argamassa-cola com base em GGBFS com introdução de diferentes aditivos - x varia de 01 a 03
		Argamassas Saint-Gobain Weber	
		CC.02	. Cimento-cola cinza de presa normal com tempo aberto alongado e deslizamento reduzido

Todas as formulações foram devidamente doseadas em misturas de 3kg e posteriormente, todos os componentes sólidos foram misturados com o auxílio de um misturador em “V” durante 6 minutos, por forma a garantir a sua homogeneização.

O amassado das argamassas-cola tem como objetivo garantir a homogeneização da mistura em pó com a água e segue as normas NP EN 196-1 e EN 1347. O processo de amassadura é necessariamente antecedido pela determinação da percentagem de água do amassado, que se encontra descrita no ponto 4.3.1.1. Após isso, a água é adicionada num recipiente da amassadora à qual se adicionam 2 kg do produto em pó e mistura-se manualmente de modo a obter uma homogeneização e evitar perdas de material. De seguida, coloca-se o produto na amassadora durante 30 segundos, mistura manual durante 1 minuto e novamente na amassadora durante 1 minuto. Deixa-se o material em repouso durante dois minutos e volta-se a amassar mecanicamente durante 15 segundos. Depois de obtidas as argamassas em estado fresco, procede-se à caracterização das mesmas.

4.2. AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE POZOLÂNICA DE MATERIAIS DIVERSOS

A avaliação da reatividade pozolânica, como o nome indica, pretende estudar a reatividade das pozolanas em argamassas, por forma a definir quais podem ser potencialmente usadas em argamassas-cola. As pozolanas em estudo são: a argila calcinada (MKDP), cinzas volantes (CV), zeólito (ZO) e escória de alto-forno (GGBFS). Este estudo consiste na realização de ensaios mecânicos, à flexão e à compressão, a provetes com dimensões de 40x40x160mm³ procedentes de uma mistura à base de cal adicionada das pozolanas em estudo.

A preparação dos provetes começou pela determinação da percentagem de água do amassado com 100g de mistura até obter a quantidade de água adequada. Posteriormente, avançou-se com o amassado de cada mistura que passou pelos seguintes passos: mistura manual para uniformização da mistura e evitar perdas de material, 30 segundos na amassadora, 1 minuto de homogeneização manual e novamente 1 minuto na amassadora. Depois de preparado o amassado, foi determinada a massa volúmica aparente e, posteriormente moldaram-se os provetes através do enchimento dos moldes até metade, seguindo-se o processo de compactação (10 pancadas por cada extremo do molde), enchimento do molde até perfazer a sua totalidade, repete-se o processo de compactação e, por fim, retira-se o excesso de argamassa.

Os provetes, oito por mistura [Figura 4.1-a], foram mantidos durante 24 horas em câmara climatizada com temperatura e humidade relativa de aproximadamente 23 °C e 50%,

respetivamente. Após esse período de tempo, os provetes foram desmoldados e um deles foi ensaiado à compressão e flexão. Metade do provete ensaiado foi colocado em imersão e após 24h verificou-se a sua integridade. Se se mantiverem sem grandes alterações físicas, três provetes são colocados em cura húmida [Figura 4.1-b] e os restantes são mantidos em cura normal (cura seca).

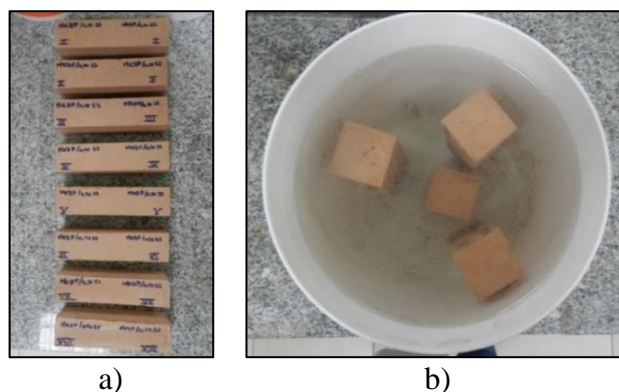


Figura 4.1 - Avaliação da reatividade pozzolânica: a) provetes de ensaio; b) provetes em cura húmida

Após 3 dias, 7 dias e 28 dias mediram-se os valores de resistência à compressão e flexão dos provetes em cura seca e em cura húmida, com e sem ativador alcalino.

Os ensaios aqui mencionados encontram-se descritos nos pontos 4.3.2.2 e 4.3.2.3.

4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.3.1. Caracterização dos produtos em pasta

A caracterização dos produtos em pasta passa por um encadeamento de processos. Em primeiro lugar, deve ser determinada a percentagem de água adequada a cada formulação e posteriormente prepara-se o amassado. Depois das argamassas-cola se encontrarem devidamente amassadas/misturadas seguem-se os seguintes passos: determinação da massa volúmica aparente, determinação da capacidade de poder molhante, da transferência e determinação do tempo de presa.

4.3.1.1. Determinação da percentagem de água do amassado

A determinação da percentagem de água correta é importante para garantir uma boa trabalhabilidade e bom desempenho do produto. A sua determinação é manual e consiste na adição progressiva de água a 200g do produto em estudo, até atingir a percentagem de água adequada por aproximação, pois esta adequação é segundo a experiência empírica, ao toque, pelo operador e não por qualquer medição reológica. Durante o processo de amassadura

manual é importante ter em atenção alguns aspetos, tais como a trabalhabilidade e a consistência da argamassa que se pretende caracterizar.

4.3.1.2. Determinação da massa volúmica aparente

Na determinação da massa volúmica aparente, é necessário ter como conhecimento prévio o volume de um copo cilíndrico a utilizar [Figura 4.2-a]. Em primeiro lugar é registada a massa do copo vazio, de seguida enche-se o copo até meio e aglomera-se o seu conteúdo com o auxílio de uma mesa compactadora [Figura 4.2-b] dando 5 batidas (ao ritmo de uma batida por segundo). Por fim, enche-se o copo até perfazer a sua totalidade e repete-se o processo de compactação. Retira-se o excesso de argamassa com o auxílio de uma espátula, pesa-se e regista-se o valor da massa.

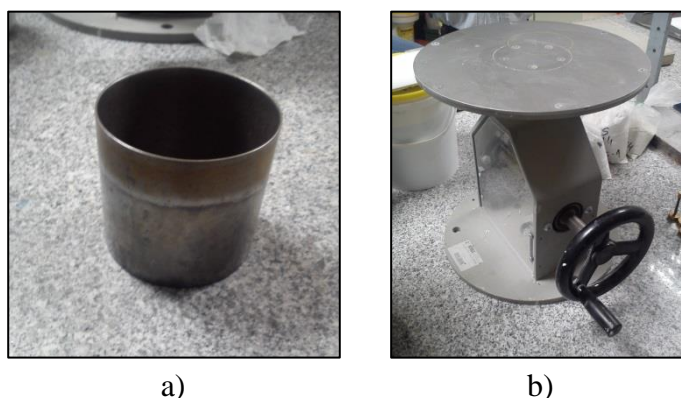


Figura 4.2 - Determinação da massa volúmica aparente: a) copo cilíndrico com volume conhecido; b) mesa compactadora

A densidade é expressa em g/cm^3 e é determinada pela Equação 1.

$$\text{Massa volúmica aparente } (\rho_{\text{pasta}}) = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que, m_1 e m_0 são, respetivamente, a massa do copo cheio após compactação e a massa do copo vazio e V o volume conhecido do copo cilíndrico.

4.3.1.3. Determinação do poder molhante e transferência

A determinação do poder molhante e da transferência decorre conforme a norma EN 1347.

O produto em estado fresco é aplicado sobre uma placa de betão com recurso a uma talocha dentada (neste caso foi uma talocha dentada de 6x6mm). Aplica-se uma camada fina de produto, com a parte lisa da talocha, por forma a humedecer e saturar toda a área de ensaio, e posteriormente uma segunda camada, com a parte dentada mantida num ângulo de 60° em relação ao suporte, que se deixa em repouso durante 2 minutos. Após esse tempo, coloca-se

uma peça de vidro com dimensões 50x50mm sobre o produto, aplicando uma carga de 2kg durante 30 segundos [Figura 4.3]. Decorridos 30 segundos, retira-se o peso e faz-se uma avaliação visual em percentagem do poder molhante e da transferência.

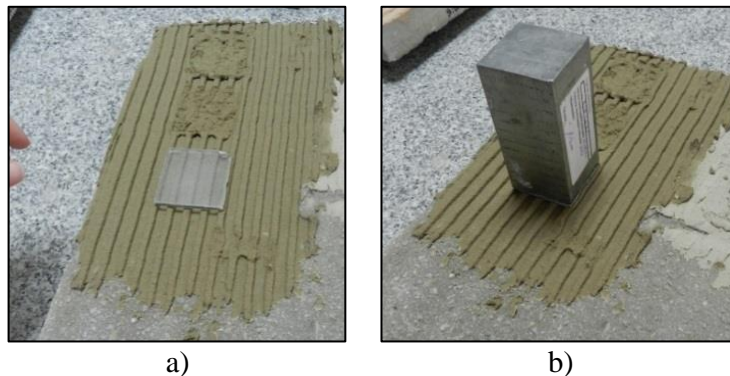


Figura 4.3 - Determinação do poder molhante e transferência: a) colocação da peça de vidro; b) aplicação da carga

O poder molhante avalia-se pela quantidade de produto em contacto com o vidro e a transferência pela quantidade de material transferido para o vidro, ambos relacionados com a sua área. O processo repete-se por intervalos de 10 minutos desde o momento de aplicação do produto.

4.3.1.4. Determinação do tempo de presa

O tempo de presa é obtido através do método de VICAT, conforme a norma NP EN 196-3:2006. Segundo o documento normativo, o método consiste na introdução da argamassa fresca num molde troncocónico, sem compactação. Posteriormente, com auxílio de uma espátula, retira-se o excesso de argamassa da superfície do molde, até esta ficar completamente lisa.

O ensaio é realizado num equipamento de VICAT [Figura 4.4], previamente preparado com folha de registo e programado para um intervalo de 15 minutos entre cada picagem da agulha.



Figura 4.4 - Equipamento de VICAT para determinação do tempo de presa

4.3.2. Caracterização dos produtos após endurecimento

A caracterização dos produtos endurecidos, nesta fase, apenas incidiu na determinação da resistência à tração perpendicular (ensaio de aderência) e, no caso da avaliação da reatividade pozolânica, na determinação da resistência à flexão e à compressão. Sendo assim, as argamassas-cola desenvolvidas foram avaliadas do ponto de vista de aderência e resistências mecânicas, após serem submetidas a diferentes condições de cura.

4.3.2.1. Determinação da resistência à tração perpendicular

A determinação da resistência à tração perpendicular decorreu segundo as normas EN 1348:2007 e EN12004, onde se define o método para se obter a força por unidade de superfície capaz de descolar uma argamassa-cola do suporte ou do cerâmico, através da aplicação de uma força de tração perpendicular.

A realização deste ensaio consistiu na obtenção de valores de aderência para as seguintes situações:

- Aderência inicial
- Aderência após imersão em água
- Aderência após ação do calor
- Aderência após tempo aberto

Na Tabela 4.2 encontram-se as condições de cura e de ensaio para cada uma das situações acima citadas.

Tabela 4.2 - Condições de cura e respetivos momentos de ensaio

	CONDIÇÕES DE CURA	TEMPOS DE ENSAIO
Aderência inicial	7 dias, 14 dias, 28 dias e 56 dias em câmara climatizada (T: 23°C e Hr: 50%)	Após 7, 14, 28 e 56 dias
Aderência após imersão	7 dias em câmara climatizada (T: 23°C e Hr: 50%) + 21 dias em imersão em água	Após 28 dias
Aderência após ação do calor	14 dias em câmara climatizada (T: 23°C e Hr: 50%) + 14 dias em estufa ventilada (T: 70°C)	Após 29 dias
Aderência ao tempo aberto	28 dias em câmara climatizada (T: 23°C e Hr: 50%)	Após 28 dias

A preparação deste ensaio consiste na aplicação da argamassa-cola fresca, após amassadura, numa placa de betão isenta de poeiras. Em primeiro lugar é aplicada uma camada de produto por forma a humedecer toda a área de ensaio. Posteriormente, com recurso a uma talocha dentada (6mm), fazendo um ângulo de cerca de 60° com o suporte, é aplicada uma segunda

camada [Figura 4.5-a]. No caso dos ensaios de aderência inicial, após imersão e após ação do calor, o produto fica em repouso durante 5 minutos, em seguida colocam-se cinco peças cerâmicas porosas e cinco peças cerâmicas não porosas [Figura 4.5-b] e sobre cada uma delas são aplicadas cargas de 2kg durante 30 segundos [Figura 4.5-c]. Em relação ao ensaio de aderência ao tempo aberto, de acordo com a norma EN 1346, o produto fica em repouso durante 20 e 30 minutos desde a sua aplicação e procede-se à colocação das peças cerâmicas porosas seguindo o mesmo processo usado nas situações anteriores.

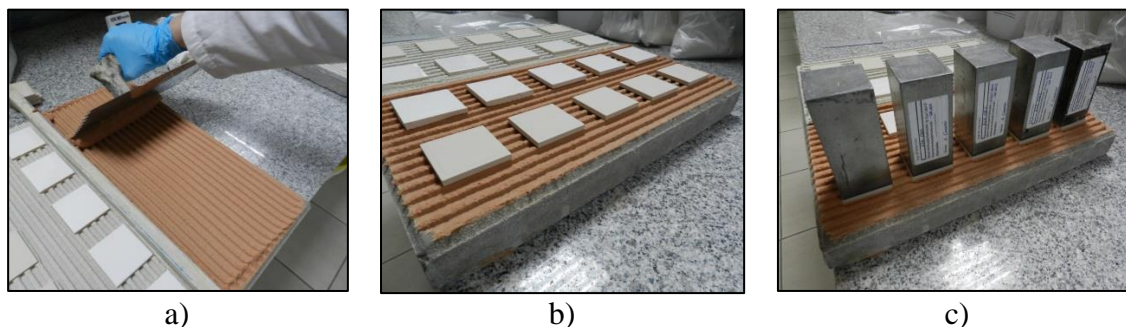


Figura 4.5 - Preparação do ensaio de resistência à tração perpendicular: a) aplicação do produto na placa de betão; b) colocação das peças cerâmicas; c) aplicação dos pesos sobre as peças cerâmicas

Após a preparação do ensaio, as placas de betão são colocados numa câmara climatizada nas condições de aproximadamente 23°C e 50% Hr de temperatura e humidade relativa, respetivamente, e seguem-se as condições de ensaio da Tabela 4.2.

No dia anterior à realização do ensaio, as placas são retiradas dos respetivos locais de cura e são colados discos metálicos de tração às peças cerâmicas [Figura 4.6-a]. O ensaio é executado com recurso a um dinamómetro que aplica uma força de tração de 250 ± 50 N/s a velocidade constante [Figura 4.6-b].

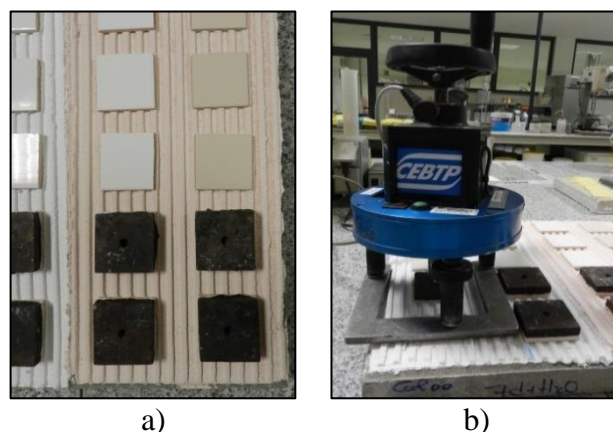


Figura 4.6 – Ensaio de resistência à tração perpendicular: a) discos metálicos colados nas diferentes peças cerâmicas; b) dinamómetro para execução do ensaio

A aderência (A_s) é obtida em kgf/cm^2 ou N/mm^2 pela Equação 2.

$$As = \frac{F}{S} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde, F corresponde à força de rutura (kgf ou N) e S à área superficial de contacto (cm^2).

O resultado final para cada ensaio é a média dos valores obtidos. A aderência é posteriormente classificada consoante o tipo de rutura. Segundo a norma EN 12004, podem existir ruturas coesivas e ruturas adesivas, ou as duas em simultâneo. Ambas as ruturas podem ser classificadas da seguinte forma:

- **Rutura coesiva:**
 - . Rutura coesiva na cola - CF-A;
 - . Rutura coesiva no suporte - CF-S;
 - . Rutura coesiva no ladrilho - CF-T.
- **Rutura adesiva:**
 - . Rutura adesiva entre a cola e o suporte - AF-S;
 - . Rutura adesiva entre o ladrilho e a cola - AF-T;
 - . Rutura adesiva entre o ladrilho e a peça de tração - BT.

4.3.2.2. Determinação da resistência à flexão

Na determinação da resistência à flexão foram utilizados provetes com dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$ com cura de 24 horas, 3, 7 e 28 dias. O equipamento utilizado para a realização do ensaio permite obter valores para a resistência à flexão e compressão [Figura 4.7].

O ensaio decorre segundo a norma EN 1015-11 em que, o provete é colocado sobre os apoios do aparelho, centrado em relação a estes e é sujeito a uma carga que aumenta a velocidade constante, até 115 kPa/s, registando-se o valor obtido para a força de rutura do provete.



Figura 4.7 - Aparelho de ensaio mecânico à flexão

A resistência à flexão expressa-se em MPa e é dada pela Equação 3.

$$R_f = \frac{1,5.F_f.l}{b.d^2} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que, F_f corresponde à carga máxima suportada pelo provete (N), l à distância entre os cilindros de apoio (mm) e b e d são as dimensões interiores do provete.

4.3.2.3. Determinação da resistência à compressão

Na determinação da resistência à compressão, utilizam-se as metades dos provetes resultantes do ensaio à flexão. O equipamento [Figura 4.8] e elemento normativo usados são os mesmos para a determinação da resistência à flexão. Coloca-se e centra-se a metade do provete sobre o suporte do aparelho de ensaio à compressão e sujeita-se uma das faces laterais do provete a uma carga que aumenta uniformemente até atingir o valor de 245 kPa/s. O ensaio termina quando é atingida a carga máxima suportada pelo provete até à rutura, registando-se o valor da força de rutura.



Figura 4.8 - Aparelho de ensaio mecânico à compressão

A resistência à compressão expressa-se em MPa e é dada pela Equação 4.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que, F_c corresponde à carga máxima suportada pelo provete (N) e A , à área da superfície sobre a qual se aplica a carga (mm^2). Assim como no ensaio de resistência à flexão, a determinação da resistência à compressão poder ser obtida diretamente pela máquina de ensaios.

4.4. AVALIAÇÃO DE FORMULAÇÕES ESPECÍFICAS COM UTILIZAÇÃO DE CERÂMICA TRADICIONAL

Nesta fase, pretende-se caracterizar argamassas-cola específicas do ponto de vista químico, físico e mecânico para avaliação de compatibilidade com suportes antigos e ainda a aplicação/compatibilidade em caso real, com cerâmicas tradicionais “Viúva Lamego” [Figura 4.9].

Decorrente dos estudos efetuados às formulações desenvolvidas e analisando todos os resultados obtidos, escolheram-se cinco formulações para desenvolvimento. Para cada uma das formulações fez-se a caracterização dos produtos em pasta e dos produtos em estado endurecido.

A peça cerâmica “Viúva Lamego” utilizada para este estudo tem dimensões 140x140mm, com vidrado de cor verde [Figura 4.9-a] e classe de absorção BIII.

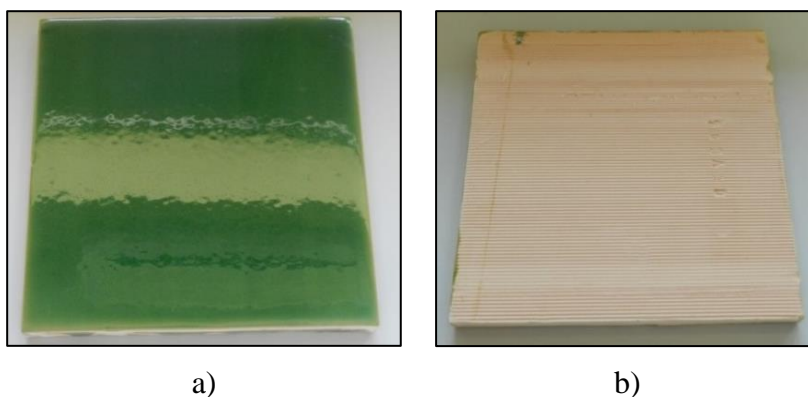


Figura 4.9 - Peça cerâmica "Viúva Lamego": a) vidrado; b) tardoz

O processo de amassadura e preparação das argamassas decorreu de acordo com o que se encontra descrito em 4.1 e procedeu-se aos ensaios de caracterização dos produtos em pasta e em estado endurecido foram realizados de acordo com o descrito nas secções 4.4.1 e 4.4.2, respetivamente.

4.4.1. Caracterização dos produtos em pasta

A caracterização dos produtos em pasta passou, em primeiro lugar, pela determinação da percentagem de água do amassado para as cinco formulações em estudo, baseada em princípios anteriormente descritos, e depois avançou-se com o processo de amassadura. Depois de preparadas as argamassas, foi determinada a massa volúmica aparente. Todos estes

parâmetros, já referidos nos pontos anteriores (secção 4.3.1), foram determinados segundo os mesmos princípios o que não justifica novamente a sua descrição.

4.4.2. Caracterização dos produtos endurecidos

A caracterização dos produtos endurecidos é um processo determinante no estudo da compatibilidade entre os diversos materiais, sendo esta uma das questões centrais do presente trabalho.

O estudo da compatibilidade entre as argamassas-cola e a peça cerâmica utilizada para fixação, foi realizado através de ensaios de resistência à tração perpendicular e de ensaios de absorção de água por capilaridade específicos (conforme 4.4.2.10). No caso do estudo de compatibilidade entre a argamassa-cola e o suporte antigo/a reabilitar foram efetuados ensaios de carácter físico (p.e. variação dimensional; variação de massa e coeficiente de absorção de água), mecânico (p.e. resistência à flexão e compressão) e químico (comportamento por sujeição a sais).

4.4.2.1. Resistência à tração perpendicular

Na preparação dos ensaios de resistência à tração perpendicular, as argamassas em estudo foram aplicadas sobre placas de betão de acordo com o procedimento descrito na secção 4.3.2.1. A alteração a efetuar neste procedimento é a utilização do tipo de peças cerâmicas. Neste caso, a peça cerâmica referida no presente capítulo foi dividida em pequenos pedaços com dimensões de aproximadamente $45 \times 45 \text{mm}^2$ [Figura 4.10-a] e sobre cada produto foram colocadas 3 peças [Figura 4.10-b] sendo devidamente pressionadas com cargas de 2kg.

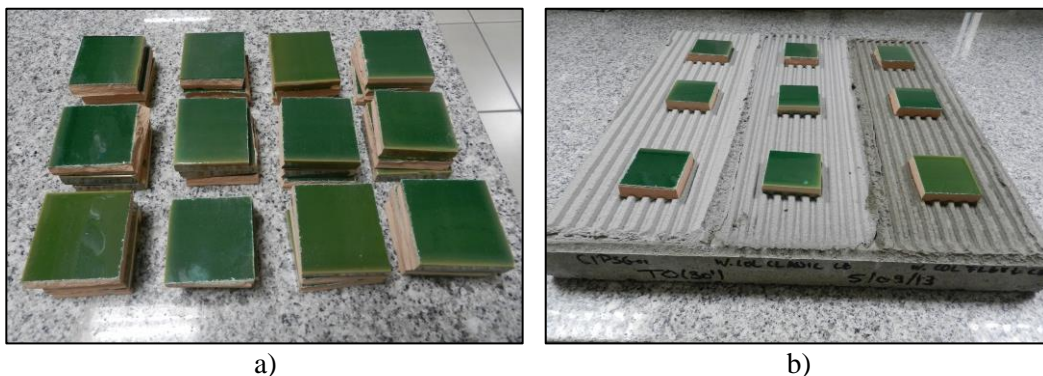


Figura 4.10 - Determinação da resistência à tração perpendicular: a) peças cerâmicas utilizadas; b) provetes de ensaio de aderência

A resistência à tração perpendicular foi determinada para as condições de aderência inicial aos 28 dias, aderência após imersão em água, após ação do calor e aderência ao tempo aberto de 30 minutos.

Para a realização dos ensaios físicos, mecânicos e químicos foram preparados seis provetes para cada uma das formulações:

- Três provetes com dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$ [Figura 4.11-a]
- Dois provetes com dimensões $25 \times 25 \times 285 \text{mm}^3$ [Figura 4.11-b]
- Um provete de forma circular com 12 cm de diâmetro e 2 cm de altura [Figura 4.11-c]

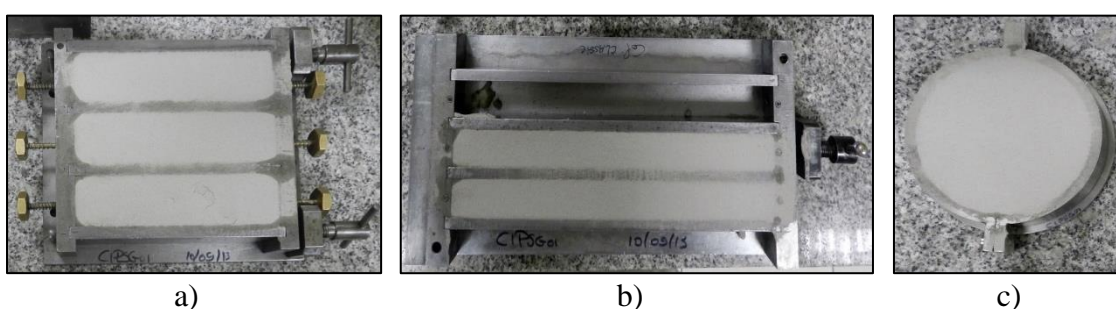


Figura 4.11 - Provetes de ensaio: a) provetes $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$; b) provetes $25 \times 25 \times 285 \text{mm}^3$; c) provete circular com 12 cm de diâmetro e 2 cm de altura

Depois de preparados os provetes de ensaio, os mesmos foram caracterizados da forma que a seguir se descreve.

4.4.2.2. Variação de massa

A determinação da variação de massa segue a especificação Cahiers du CBST (2669-4) – A3.3 e consiste em determinar a massa inicial e massa final dos provetes com dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$. A variação de massa (Δm), expressa em percentagem, é determinada pela Equação 5.

$$\Delta m = \frac{m_f - m_i}{m_i} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que m_f corresponde à massa final e m_i à massa inicial.

No presente trabalho, apenas se conseguiu registrar a massa ao fim de 7, 28 e 56 dias.

4.4.2.3. Variação dimensional

A determinação da variação dimensional baseia-se na especificação Cahiers du CBST (2669-4) A – 3.3 e, tal como na variação de massa, efetuam-se medições após desmoldagem dos

provetes, após 7 e 28 dias de cura, com o auxílio de um micrómetro [Figura 4.12]. No presente trabalho fizeram-se medições após 7 dias, 28 e 56 dias.



Figura 4.12 - Aparelho de medição da variação dimensional

A variação dimensional é expressa em mm/m e é determinada pela Equação 6.

$$\delta_r = \frac{l_f - l_i}{16} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Em que, l_i e l_f correspondem às dimensões iniciais e finais, respectivamente e 16 é a dimensão inicial do provete (cm).

4.4.2.4. Determinação da massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente do produto endurecido é determinada com provetes de dimensões 40x40x160 cm³. A determinação deste parâmetro, efetuada de acordo com a norma EN1015-10, consiste em pesar e registar a massa dos provetes após desmoldagem (inicial), 7 dias e 28 dias. No presente trabalho fizeram-se medições após 7 dias, 28 e 56 dias. A massa, expressa em gramas (g), de cada provete nesses momentos, é dividida pelo seu volume em cm³ do que resulta a massa volúmica aparente.

A massa volúmica aparente é expressa em g/cm³ e é determinada pela Equação 7.

$$\text{Massa volúmica aparente } (\rho_{\text{endurecido}}) = \frac{m}{V_p} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que m é a massa do provete e V_p o seu volume.

4.4.2.5. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (Módulo de Young)

Na determinação do módulo de Young, utilizam-se dois provetes com dimensões 25x25x285mm³. Após 7 e 28 dias de cura, regista-se o valor da massa e da frequência de ressonância de ambos os provetes. A frequência de ressonância é obtida através de um equipamento próprio [Figura 4.13], no qual se fixa o provete e se aplicam impulsos

mecânicos, nas extremidades do provete, que geram uma frequência própria do provete em vibração, medida num osciloscópio. No presente trabalho fizeram-se medições após 7 dias, 28 e 56 dias.



Figura 4.13 - Equipamento de medição da frequência de ressonância

O módulo de elasticidade (ε), expresso em GPa, é diretamente proporcional à frequência de ressonância e é obtido através da Equação 8.

$$\varepsilon = \frac{4.F.L.P}{g.V} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que, F corresponde à frequência de ressonância obtida através do equipamento utilizado (Hz), L é o comprimento do provete (mm), P a massa do provete (g), g a aceleração gravítica (cm/s^2) e V é o volume do provete (cm^3).

4.4.2.6. Determinação da resistência à flexão e à compressão

A determinação da resistência à flexão e à compressão seguiu o método de ensaio descrito em 4.3.2.2 e 4.3.2.3, respetivamente. Ainda assim, existe uma pequena alteração no procedimento. Dos três provetes elaborados com dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$, dois foram preparados para serem ensaiados aos 28 dias e um para ser ensaiado após 56 dias de cura.

4.4.2.7. Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade

Na determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade utilizam-se as restantes metades dos provetes resultantes do ensaio de resistência à flexão. O ensaio decorre conforme a norma EN1015-18 e consiste em pesar o provete seco, registar a sua massa inicial e colocá-lo num recipiente com uma esponja e água destilada [Figura 4.14]. O recipiente encontra-se dentro de uma caixa totalmente isolada e no seu interior contém uma solução de sulfato de zinco, que garante uma humidade relativa e temperatura de aproximadamente 95% e 23°C , respetivamente. Os provetes são sujeitos a estas condições durante 10 minutos, ao fim desse

tempo, retiram-se do recipiente, remove-se o excesso de água e regista-se a massa. Colocam-se novamente os provetes dentro do recipiente durante 80 minutos, que perfaz os 90 minutos desde o início do ensaio, e são pesados novamente.



Figura 4.14 – Provetes dentro do recipiente de ensaio de absorção de água por capilaridade

Obtidos os valores da massa ao fim de 10 minutos e de 90 minutos, desde o início do ensaio, pode-se determinar o coeficiente de absorção (C) que se expressa em $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, através da Equação 9.

$$C = m(90) - m(10) \quad (\text{Equação 9})$$

Em que, $m(90)$ corresponde à massa do provete após 90 minutos (g) e $m(10)$ o valor após 10 minutos (g).

4.4.2.8. Determinação da permeabilidade ao vapor de água

A determinação da permeabilidade ao vapor segue a norma EN 1015-19. Neste ensaio utilizam-se os provetes circulares, com 12 cm de diâmetro e 2 cm de altura. Ao fim de 28 dias de cura, retiram-se os provetes da câmara climatizada e prepara-se uma solução aquosa saturada de nitrato de potássio (KNO_3), utilizada para controlar a humidade relativa do ar em valores próximos de 92%. A solução é posteriormente colocada em 5 equipamentos de ensaio (tinhas) até perfazer um nível correspondente a 1 cm em relação à superfície das tinhas. Os provetes circulares (de cada argamassa em estudo) são colocados no topo das tinhas e procede-se ao revestimento da junta e das laterais dos provetes com parafina [Figura 4.15-a] com o intuito de garantir um conjunto estanque.

Três vezes ao dia e ao longo de 7 dias são registados os valores da temperatura do ar (T), da humidade relativa (H_r), da massa do conjunto (M_c) [Figura 4.15-b] e do tempo decorrido desde a primeira medição (t). Finalizadas as medições, calculam-se as médias da temperatura do

ar (T_{med}) e da humidade relativa (H_{rm}). Com estes dois valores, consulta-se um diagrama psicrométrico e traça-se uma linha vertical sobre o diagrama, que vai desde o ponto correspondente à temperatura do ar até à linha curva correspondente á humidade relativa média. Traça-se uma outra linha, horizontal sobre o diagrama, que passará no ponto onde se cruzam as duas linhas anteriores. E, faz-se a leitura da pressão de vapor, encontrada, no eixo das ordenadas (y). Estes resultados são obtidos recorrendo a uma folha de cálculo previamente definida segundo o elemento normativo acima citado.

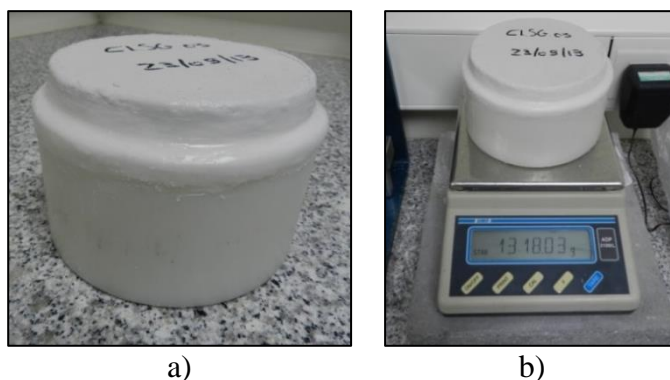


Figura 4.15 - Ensaio de determinação do coeficiente de difusão ao vapor de água: a) revestimento das juntas com parafina; b) registo da massa do conjunto.

O coeficiente de resistência ao vapor de água (μ) permite avaliar a resistência das argamassas à passagem do vapor de água, por difusão, quando sujeitas a uma diferença de pressão entre as duas faces.

4.4.2.9. Resistência à penetração de sais

O ensaio de resistência à penetração de sais consistiu na sujeição, das diferentes argamassas, a sais de cloretos e a sais de sulfatos. Para a realização destes ensaios, foram utilizadas as metades dos provetes sobranes dos ensaios de resistência mecânica [Figura 4.16-a]. Em cada um dos ensaios, foram realizados 10 ciclos.

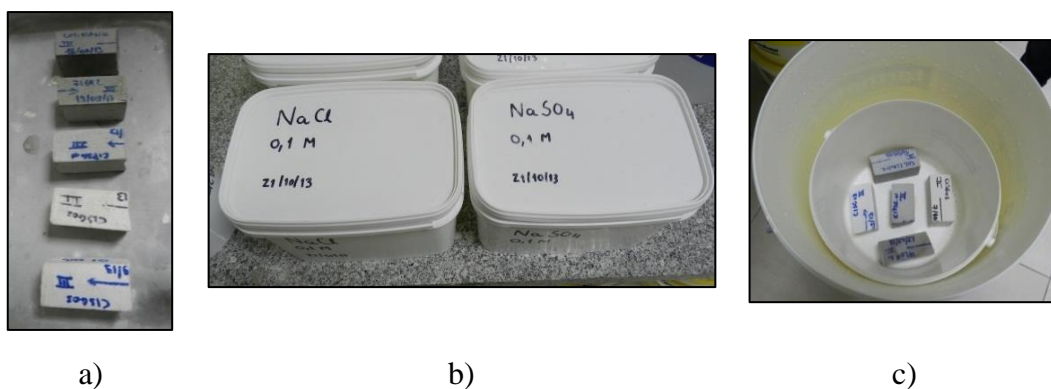


Figura 4.16 - Ensaio de resistência aos sais: a) Provetes de ensaio; b) Soluções de NaCl e NaSO₄; c) ambiente com HR 90%

Para a resistência aos sais de cloretos foi utilizada uma solução de cloreto de sódio (0,1M) [Figura 4.16-b]. Os provetes, após 28 dias de cura, foram imersos na solução durante 24h, posteriormente foram colocados a secar na estufa a 70°C durante o mesmo período de tempo. Após cada uma das situações anteriores foi medida a massa dos provetes. A percentagem de cloretos retidos inicialmente, foi calculada a partir da Equação 10. Posteriormente, os provetes foram sujeitos a ciclos de 12h em ambiente com 90% de humidade relativa [Figura 4.16-c] seguido de 12h em ambiente com 60% de humidade relativa e temperatura constante de 22°C, aproximadamente. Os provetes foram pesados ao fim de cada ciclo por forma a ser calculada a variação de massa, em relação à massa inicial, e foi feita uma avaliação visual da integridade física dos provetes.

$$\% \text{ cloretos} = \frac{m_2 - m_i}{m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 10})$$

Onde, m_i corresponde à massa inicial dos provetes (g) e m_2 à massa após secagem na estufa a 70°C (g).

Para determinar a resistência à penetração de sulfatos foi utilizada uma solução de sulfato de sódio (0,1M). Os provetes, após 28 dias de cura e depois de medida a massa inicial, foram sujeitos a ciclos de imersão na solução durante 2h, seguido de secagem na estufa a 70°C durante 22h. Ao fim de cada ciclo, os provetes foram pesados e a variação de massa foi determinada em relação à massa inicial. Tal como no ensaio dos cloretos, os provetes também foram avaliados visualmente por forma a analisar a integridade física de cada argamassa.

4.4.2.10. Avaliação da estabilidade entre as argamassas-cola e a cerâmica tradicional

A avaliação da compatibilidade entre as argamassas-cola em estudo e a cerâmica consistiu na realização de ensaios de absorção de água por capilaridade com observação do vidrado. Assim, foram preparadas peças com dimensões 70x70mm² protegidas lateralmente com silicone [Figura 4.17-a] e com barramento do tardez com uma camada com aproximadamente 3-4 mm de cada uma das argamassas-cola [Figura 4.17-b].

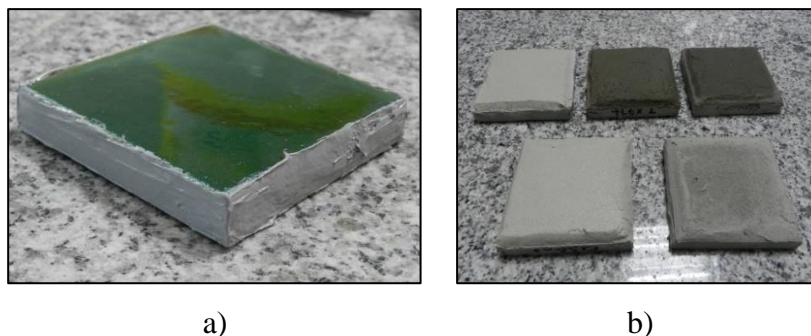


Figura 4.17 - Provetes de ensaio: a) peça cerâmica isolada com silicone; b) peças com argamassa barrada no tardo

As amostras foram mantidas durante 7 dias em câmara climatizada com temperatura e humidade relativa de aproximadamente 23 °C e 50%, respetivamente. Decorrido o tempo de cura indicado, procedeu-se à realização do ensaio de absorção de água por capilaridade [Figura 4.18], que decorreu durante 48h com intervalos de tempo distintos. Em primeiro lugar, foi registada a massa inicial do conjunto (seco) para as diferentes peças, que posteriormente foram colocadas no recipiente de ensaio referido em 4.4.2.7 e repete-se o processo de pesagem após 10, 30, 60, e 90 minutos, 3 horas, 5 horas, 8 horas, 24 horas e 48 horas.

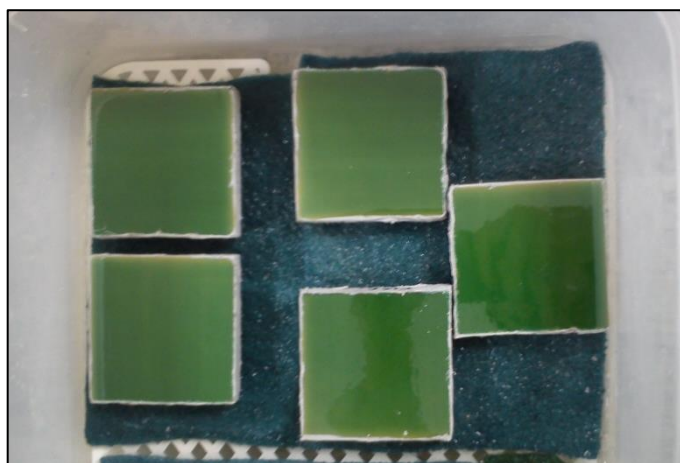


Figura 4.18 - Ensaio de absorção de água por capilaridade às peças de dimensões 7x7cm barradas com as argamassas em estudo

Durante o ensaio, observou-se o vidro por forma a detetar qualquer alteração, como por exemplo o aparecimento de manchas que pudessem indicar uma possível incompatibilidade entre os materiais.

Capítulo 5

Apresentação e discussão de resultados

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO CORRENTES E CONSTITUÍDAS POR CAL

5.1.1. AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO

5.1.2. AVALIAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CAL

5.2. AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR MATERIAIS POZOLÂNICOS

5.2.1. AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE POZOLÂNICA DE DIVERSOS MATERIAIS

5.2.2. SUBSTITUIÇÃO POR MKDP

5.2.3. SUBSTITUIÇÃO POR GGBFS

5.3. AVALIAÇÃO DE FORMULAÇÕES ESPECÍFICAS COM UTILIZAÇÃO DE CERÂMICA TRADICIONAL

5.3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS EM PASTA

5.3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS ENDURECIDOS

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se e são discutidos todos os resultados obtidos através dos ensaios mencionados no procedimento experimental.

5.1. AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO CORRENTES E CONSTITUÍDAS POR CAL

Numa primeira fase, conforme citado anteriormente, avaliaram-se diferentes argamassas preparadas com o cimento e a cal (aérea e hidráulica) como principais ligantes. Pretende-se estudar o comportamento de argamassas com diferentes graus possíveis de compatibilidade com o suporte a reabilitar e o cerâmico a fixar e seguir o caminho mais viável, que possa cumprir com os requisitos pretendidos.

5.1.1. Avaliação de argamassas de cimento correntes

As argamassas-cola aqui estudadas possuem o cimento como base de ligante, em elevadas concentrações. Este tipo de argamassas é, teoricamente, menos compatível com os suportes a reabilitar. Na Tabela 5.1 encontram-se formulações de duas argamassas-cola de mercado, para as quais serão analisados resultados típicos provenientes da caracterização dos produtos em pasta e dos produtos endurecidos.

Tabela 5.1 - Formulações de argamassas de cimento correntes

	FORMULAÇÕES (% EM MASSA)	
	CIM.01	CIM.02
Cim cz, II 42,5	24,00	35,00
Areia Siliciosa	75,67	52,87
Éter de celulose	0,23	0,30
Éter de amido	0,08	0,03
Redutor de crómio	0,025	-
Filler	-	10
Polímero redispersável	-	1,30
Acelerador de presa	-	0,50

A percentagem de água do amassado e o tempo de presa foram as propriedades avaliadas na caracterização dos produtos em pasta. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 5.2.

A argamassa CIM.02 possui uma maior percentagem de água devido, essencialmente, à presença de uma concentração superior de cimento e de éter de celulose (retentor de água) em relação a CIM.01.

Relativamente ao tempo de presa, a argamassa CIM.02 apresenta endurecimento em tempo inferior comparado com CIM.01, explicado em parte pela presença de um acelerador de presa na sua constituição. Ao nível de execução em obra, os tempos de presa obtidos para ambas as formulações, permitem trabalhos correntes, com tempos de execução ajustados à tipologia de exigência de mercado.

Tabela 5.2 - Resultados da caracterização dos produtos em pasta de argamassas de cimento correntes

		FORMULAÇÕES	
		CIM.01	CIM.02
% Água		21,50%	24,00%
Tempo de presa	Início	9h45	6h00
	Fim	10h15	6h30

Na caracterização dos produtos endurecidos, foram analisados resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração perpendicular em condições de aderência inicial (7, 14 e 28 dias), aderência após imersão em água, após ação do calor e ao tempo aberto após 20 e 30 minutos. Os resultados apresentam-se no gráfico da Figura 5.1.

Verifica-se que a argamassa CIM.02 possui valores de tensão de aderência superiores para todas as condições de cura. Relativamente a CIM.01, na condição de aderência após ação do calor, apresenta resultados nulos influenciados pela ausência de polímero redispersável na formulação.

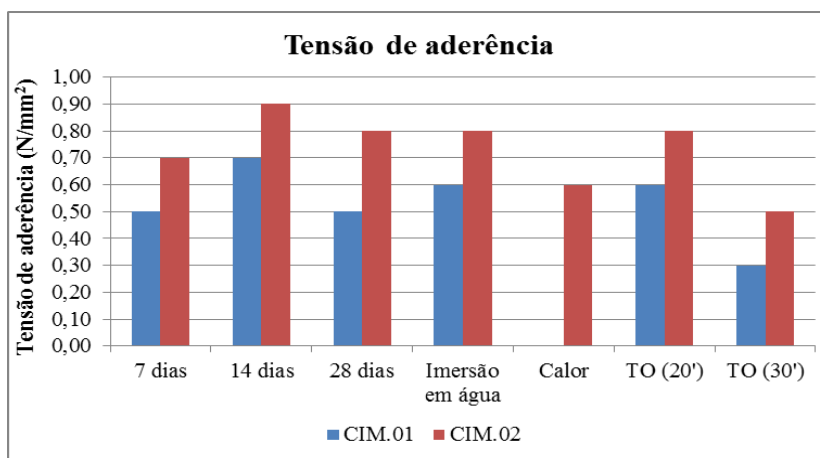


Figura 5.1 - Tensão de aderência após 7, 14, 28 dias e após imersão em água, ação do calor e tempo aberto para as formulações à base de cimento

As ruturas usualmente observadas, de acordo com a EN12004, para as condições de aderência inicial, foram coesivas pela cola (CF-A) em ambas as argamassas estudadas. Nas condições após imersão em água e após ação do calor, a argamassa CIM.01 apresenta ruturas adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T) enquanto a argamassa CIM.02 mostra ruturas parciais coesivas pela cola e ruturas adesivas entre o cerâmico e a cola. Para as condições de tempo aberto de 20 minutos, observaram-se ruturas maioritariamente adesivas entre o cerâmico e a cola, e aos 30 minutos apenas ruturas adesivas entre o cerâmico e a cola.

As duas formulações cumprem o requisito mínimo ($\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$) segundo a norma EN12004, conforme indicado em fichas técnicas. Ao nível de aplicação em obra, CIM.01 é indicado para utilização em interiores e CIM.02 para utilização em interiores e exteriores.

As formulações estudadas contêm elevado teor de cimento, o que pode conferir sais (sulfatos e cloretos) aos suportes antigos. Por isso, a compatibilidade física e química pode ser comprometida, em termos teóricos.

5.1.2. Avaliação de argamassas de cal

Para a avaliação de argamassas de cal desenvolveram-se diferentes formulações com cal aérea e cal hidráulica natural como ligantes. Posteriormente, foram preparadas conforme descrito na secção 4.1 e caracterizadas como produto em pasta e produto endurecido.

5.1.2.1. Argamassas de cal aérea

Na avaliação de argamassas de cal aérea, desenvolveram-se duas argamassas-cola cujas formulações se apresentam na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Formulações de argamassas de cal aérea

		FORMULAÇÕES (% EM MASSA)	
		Cal.00	Cal.01
COMPONENTES	Cal	25,00	25,00
	Areia siliciosa	73,20	68,30
	Polímero redispersável	1,50	1,50
	Argila calcinada	-	5,00
	Éter de Celulose	0,30	0,30

As argamassas estudadas são muito semelhantes, variando apenas a introdução de um material pozolânico (argila calcinada) na constituição de uma das formulações. Sendo assim, Cal.00

corresponde à formulação sem argila calcinada e Cal.01 contém 5% dessa matéria-prima na sua composição.

A caracterização dos produtos em pasta consistiu na determinação da percentagem de água do amassado, da densidade em pasta e do tempo de presa para ambas as formulações. Na Tabela 5.4 apresentam-se os resultados obtidos na determinação das propriedades citadas.

A argamassa Cal.01 requer uma maior quantidade de água de amassadura e da massa volúmica aparente (ρ_{pasta}) superior devido à introdução da argila calcinada na sua formulação por ser um material de granulometria fina e gerar argamassas mais compactas.

Relativamente à determinação do tempo de presa, a argamassa Cal.00 apresentou endurecimento mais lento. Após 24 horas do início do ensaio, os produtos foram desmoldados e fez-se uma avaliação visual do endurecimento onde se verificou que a argamassa Cal.00 ainda se encontrava mole à superfície e em pasta no seu interior. Por outro lado, Cal.01 encontrava-se mole à superfície e no interior, mas mais endurecido que Cal.00. Ao nível de execução, não existe adequação ao aplicador comum, por exigir tempos de presa muito elevados.

Assim, pode-se afirmar que a adição da argila calcinada à formulação base, Cal.00, teve ligeira influência na determinação das propriedades do produto em pasta.

Tabela 5.4 - Resultados da caracterização dos produtos em pasta para as formulações Cal.00 e Cal.01

	FORMULAÇÕES	
	Cal.00	Cal.01
% Água	35,00%	38,50%
ρ_{pasta}	1,36	1,39
Tempo de presa	>24h	>24h

Para a caracterização dos produtos endurecidos, procedeu-se à determinação da resistência à tração perpendicular (aderência). Os ensaios foram realizados em condições de aderência inicial (7, 14, 28 e 56 dias), após imersão em água e após ação do calor para cerâmico poroso e não poroso. Nos gráficos da Figura 5.2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de aderência.

Em condições de aderência inicial (aos 7 e 14 dias), no caso de utilização de cerâmico poroso, os valores obtidos são muito baixos, sendo que a Cal.01 apresenta valores superiores. Aos 28 e 56 dias, há um decréscimo significativo da tensão de aderência, sendo nula aos 28 dias devido a retração da argamassa, pois como as resistências são baixas a retração faz com que

se obtenham valores nulos. Relativamente à utilização de cerâmico não poroso, aos 7 e 14 dias, apesar de os valores serem superiores aos referidos para o cerâmico poroso, verifica-se que a Cal.00 obteve valores ligeiramente superiores invertendo a sua posição aos 28 e 56 dias. Novamente, para as duas formulações, observa-se uma diminuição significativa dos valores aos 28 e 56 dias.

As argamassas apresentam valores nulos para as condições de cura em imersão em água, explicado, em grande parte, pelo facto de a cal aérea não obter presa em imersão.

Apesar das formulações conterem polímero redispersável na sua constituição, os valores obtidos na utilização de cerâmico poroso, para as condições após ação do calor, foram nulos. Por outro lado, na utilização de cerâmico não poroso obteve-se, nas mesmas condições, um valor de 0,03 N/mm² para a argamassa Cal.00 e novamente nulo para a Cal.01.

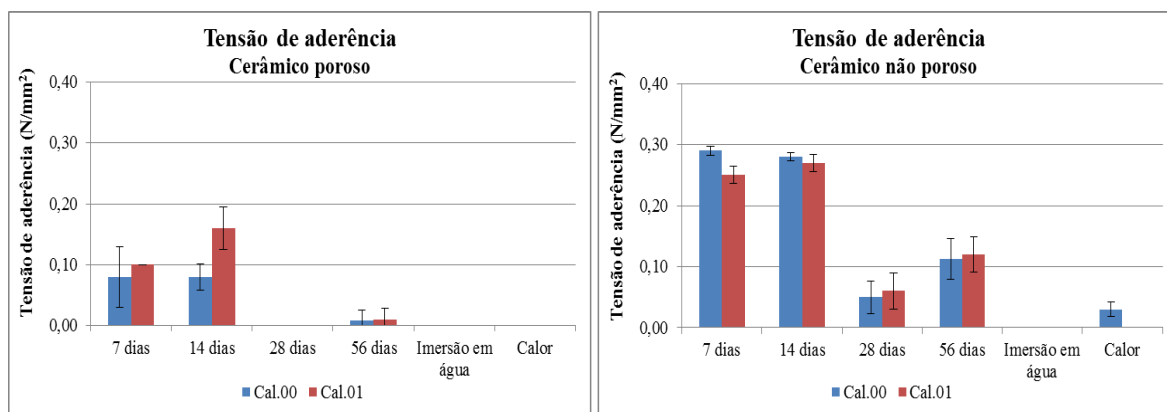


Figura 5.2 - Tensão de aderência após 7, 14, 28, 56 dias, após imersão em água e ação do calor para as formulações Cal.00 e Cal.01

Para as argamassas estudadas, as ruturas observadas nas diferentes condições de cura são maioritariamente adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T), para os dois tipos de cerâmicos utilizados, existindo uma pequena percentagem de rutura coesiva pela cola (CF-A). Em condições de aderência inicial, aos 28 dias, apenas no caso da utilização do cerâmico poroso foi observado exclusivamente rutura adesiva entre o cerâmico e a cola.

Mediante os resultados obtidos, é possível afirmar que a ausência de cimento prejudica os resultados de aderência. Os valores obtidos estão muito abaixo daquilo que se pretende para qualquer situação da norma e respetivo requisito de qualidade mínima. As argamassas estudadas são muito limitadas ao nível do cumprimento das exigências normativas como argamassa-cola (EN12004).

Uma argamassa deste tipo não pode ser classificada como argamassa-cola, segundo os padrões normativos. A sua utilização para efeitos de “fixação” de cerâmicos só é aceitável considerando a perspetiva de argamassa de assentamento.

5.1.2.2. Argamassas de cal hidráulica natural

Para a avaliação de argamassas de cal hidráulica natural, desenvolveram-se diversas formulações partindo de uma formulação base (NHL5.M1) constituída apenas por cal hidráulica natural (NHL5) e areia siliciosa. Na Tabela 5.5 encontram-se as formulações desenvolvidas e respetivos componentes.

O desenvolvimento das restantes formulações consistiu na adição de cimentos de presa rápida (cimento aluminoso) e outros aditivos (gesso), à sua constituição. Com isto pretende-se, essencialmente, avaliar o efeito da adição destes cimentos ao nível do tempo de presa. A partir de NHL5.M1 adicionou-se formiato de cálcio, éter de celulose e polímero redispersável (NHL5.M6), por forma a estudar o efeito da adição destes materiais.

Tabela 5.5 - Formulações de argamassas de cal hidráulica

		FORMULAÇÕES (% EM MASSA)					
		NHL5.M1	NHL5.M2	NHL5.M3	NHL5.M4	NHL5.M5	NHL5.M6
COMPONENTES	Cal NHL5	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
	Areia siliciosa	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
	OPC (rico em aluminatos)	-	5,00	-	-	-	-
	Cim. aluminoso	-	-	5,00	5,00	-	-
	Carbonato de lítio	-	-	0,10	0,10	0,10	-
	Gesso	-	-	-	1,00	-	-
	Sulfoaluminato de cálcio	-	-	-	-	5,00	-
	Formiato de cálcio	-	-	-	-	-	1,00
	Éter de celulose	-	-	-	-	-	0,30
Polímero redispersável	-	-	-	-	-	1,50	

Na Tabela 5.6 apresentam-se os resultados da determinação do tempo de presa para as várias formulações, bem como da percentagem de água de cada amassado.

Analisando os valores dos tempos de presa das várias formulações, é possível constatar de imediato que a cal hidráulica (NHL5.M1), por si, está a prender em tempo aceitável (na ordem de 2h) o que faz prever potencialidade para o desejado.

A argamassa NHL5.M3 possui um tempo de presa inferior comparado com as restantes. No entanto, ao nível de execução em obra, não é aceitável pois não permite trabalhos correntes.

Comparando as argamassas NHL5.M3 e NHL5.M4, por possuírem formulações muito semelhantes, pode-se avaliar o efeito da adição do gesso na constituição de NHL5.M4. Verifica-se que em relação a NHL5.M3, o tempo de presa de NHL5.M4 é muito superior por se estar a introduzir gesso na argamassa.

Relativamente à argamassa NHL5.M6, verifica-se que houve um retardamento significativo do tempo de presa em relação à formulação base, influenciado pela adição dos materiais referidos anteriormente, em especial o éter de celulose.

Tabela 5.6 - Resultados da determinação da percentagem de água e do tempo de presa das formulações com cal hidráulica natural

		FORMULAÇÕES					
		NHL5.M1	NHL5.M2	NHL5.M3	NHL5.M4	NHL5.M5	NHL5.M6
% Água		20,50%	20,00%	21,00%	19,50%	19,00%	19,00%
Tempo de presa	Início	02h00	00h50	<5 Minutos	00h20	Aprox. 50 Minutos	10h00
	Fim	03h20	02h20		00h50		15h00

Os cimentos rápidos parecem ter o mesmo efeito na cal hidráulica que no cimento o que os torna interessantes do ponto de vista de presa e aceleração de processos.

À exceção de NHL5.M6, as argamassas não possuem capacidade de retenção de água [Figura 5.3], grande parte da água do produto perdeu-se durante o ensaio de determinação do tempo de presa e sem comportamento pseudo-plástico (reologia como cimento/areia) logo, não é aceitável como cola. Por outro lado, NHL5.M6 apresenta-se com capacidade de retenção de água e com boa reologia, sendo aceitável como cola.



Figura 5.3 – Exemplo de ausência de retenção de água por parte da argamassa NHL5.M2

Entre todas as formulações estudadas, as que obtiveram tempos de presa aceitáveis, ao nível prático, foram a NHL5.M4 e NHL5.M5 com valores próximos dos 50 minutos. Face aos resultados obtidos, decidiu-se estudar o efeito da introdução de éter de celulose nas duas

argamassas escolhidas. Assim, foi introduzida uma concentração de 0,3% de éter de celulose nas formulações NHL5.M4 e NHL5.M5 sendo posteriormente, avaliadas em termos do tempo de presa e da percentagem de água de amassadura.

A introdução do retentor (CE) levou à necessidade do aumento da percentagem de água de amassadura e contribuiu para que não houvesse perda de água durante o ensaio da determinação do tempo de presa.

No que respeita ao tempo de presa, a argamassa NHL5.M4 teve o seu fim de presa após 3h10m do início do ensaio enquanto a NHL5.M5 endureceu em menos de 2h00; assim, verifica-se que houve retardamento em relação aos valores obtidos anteriormente. Após o ensaio, procedeu-se à desmoldagem dos produtos onde se avaliou o seu endurecimento, e verifica-se que NHL5.M4 se encontrava mais inconsistente à superfície e no interior que NHL5.M5.

Atendendo aos resultados obtidos, optou-se por avaliar o produto NHL5.M5 com éter de celulose (CE) por este apresentar um tempo de presa satisfatório, melhor trabalhabilidade e melhor endurecimento global. Esta avaliação consistiu na caracterização do produto em pasta, onde se determinou a massa volúmica aparente e a capacidade de poder molhante e transferência; e caracterização do produto endurecido através da determinação da resistência à tração perpendicular (aderência).

Na Tabela 5.7, para além da percentagem de água e do tempo de presa anteriormente determinados, apresentam-se os resultados da caracterização dos produtos em pasta.

Tabela 5.7 - Resultados da caracterização do produto em pasta para a argamassa NHL5.M5 c/ CE

		FORMULAÇÃO
		NHL5.M5 c/ CE
%Água		23,50%
ρ_{pasta}		1,35
Tempo de presa		< 2h
Poder molhante vs Transferência	5'	100% vs 20%
	10'	100% vs 20%
	20'	95% vs 35%

Apesar do tempo de presa ter aumentado com a adição do retentor de água, a trabalhabilidade melhorou razoavelmente, embora com alguma ausência de goma/poder de transferência logo aos 5 minutos.

Na Figura 5.4 apresentam-se os resultados obtidos na determinação da tensão de aderência para condições iniciais (7 e 14 dias), após imersão em água, após ação do calor e ao tempo aberto (após 20' e 30') para os dois tipos de cerâmicos utilizados.

É possível verificar que em condições de aderência inicial aos 7 e 14 dias, a argamassa NHL5.M5 com CE, gerou valores de tensão de aderência próximos do limite mínimo exigido pela norma em vigor (EN12004). Em condições de imersão em água os resultados obtidos são nulos para os dois tipos de cerâmicos utilizados, pois é colocada em imersão aos 7 dias não obtendo hidráulidade (não ganha presa debaixo de água) e acaba por se desfazer levando ao destacamento dos cerâmicos. Por outro lado, em condições de envelhecimento por ação do calor a adesão é muito baixa, com valores de $0,21 \text{ N/mm}^2$ para o cerâmico poroso e de $0,03 \text{ N/mm}^2$ para o não poroso. Por último, relativamente ao tempo aberto aos 20 e 30 minutos, os valores obtidos foram igualmente nulos.

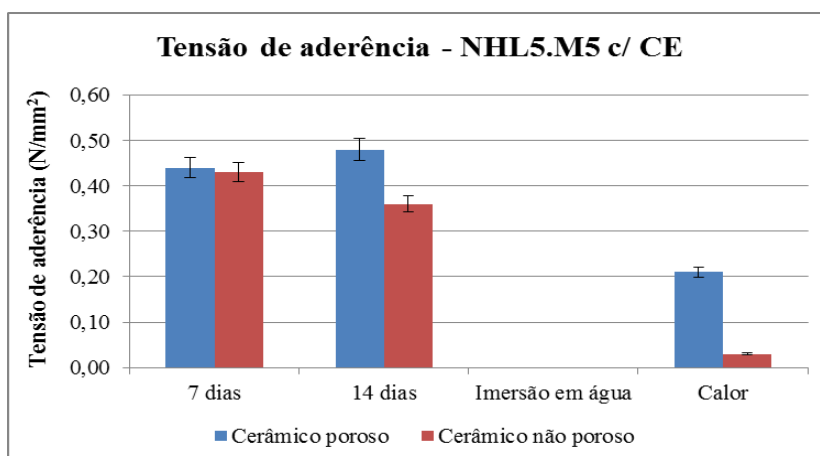


Figura 5.4 - Tensão de aderência após 7, 14 dias, imersão em água e ação do calor da formulação NHL5.M5 c/ CE

Em condições de aderência inicial aos 7 dias, após imersão em água e após tempo aberto aos 20 e 30 minutos, as ruturas observadas são ruturas adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T). Por outro lado, em condições de aderência inicial aos 14 dias e após ação do calor, verificam-se ruturas maioritariamente adesivas entre o cerâmico e a cola, existindo uma pequena percentagem de rutura coesiva pela cola (CF-A).

Os resultados obtidos, para esta situação, foram superiores aos que se obtiveram para as argamassas de cal aérea estudadas anteriormente, mas ainda abaixo dos mínimos requeridos pela norma EN12004.

5.2. AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR MATERIAIS POZOLÂNICOS

Devido aos resultados obtidos anteriormente decidiu-se proceder à avaliação da reatividade pozolânica de um conjunto de materiais. Posteriormente, as pozolanas com reatividade superior foram introduzidas em formulações de argamassas (por substituição do cimento), por forma a estudar o seu efeito.

5.2.1. Avaliação da reatividade pozolânica de materiais diversos

A avaliação da reatividade pozolânica consistiu, essencialmente, na realização de ensaios mecânicos em diferentes condições de cura. Neste estudo, as misturas utilizadas foram as seguintes:

- . 2800g de areia siliciosa + 700g de cal + 700g de metacaulino (argila calcinada - MKDP)
- . 2800g de areia siliciosa + 700g de cal + 700g de cinzas volantes (CV)
- . 2800g de areia siliciosa + 700g de cal + 700g de escória de alto-forno (GGBFS)
- . 2800g de areia siliciosa + 700g de cal + 700g de zeólito (ZO)

Nesta fase, como se pretende avaliar as reações pozolânicas, optou-se por introduzir nas formulações o ativador alcalino (silicato de sódio), referido anteriormente (secção 4.2). Para o efeito, prepararam-se novas misturas com a adição de 0,5% (percentagem em massa) dessa base forte. Assim, avalia-se o efeito do ativador e comparam-se resultados entre as várias situações, principalmente ao nível das resistências mecânicas iniciais.

5.2.1.1. Caracterização dos produtos em pasta

Na caracterização dos produtos em pasta, procedeu-se à determinação da percentagem de água do amassado e da massa volúmica aparente (densidade), conforme descrito no procedimento experimental. Estes parâmetros foram determinados para as misturas com e sem ativador alcalino (base forte) na sua constituição e apresentam-se na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Resultados dos produtos em pasta com e sem base forte para as diferentes pozolanas

Reatividade Pozolânica	Sem base forte		Com base forte	
	% Água	Densidade (g/cm ³)	% Água	Densidade (g/cm ³)
MKDP	28,00	1,85	26,50	1,77
CV	25,00	1,84	25,00	1,83
GGBFS	-	-	22,00	1,86
ZO	27,00	1,74	27,00	1,72

A adição do ativador alcalino não influencia a massa volúmica aparente dos diferentes materiais, ao contrário do que se regista com a utilização das diferentes pozolanas.

5.2.1.2. Caracterização dos produtos endurecidos

Resistência à flexão

Na Figura 5.5 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à flexão das amostras com e sem base forte, para condições de cura seca e cura húmida.

Ao nível de resistências iniciais em cura seca, a amostra com zeólito (ZO) e sem base forte, foi a que apresentou valores de resistência à flexão superiores, seguido da argila calcinada (MKDP) e por último as cinzas volantes (CV). Em períodos longos, a amostra com MKDP, apresenta resultados superiores. Para este caso, não se fez avaliação para as escórias de alto-forno (GGBFS). Na situação de adição da base forte, a mistura com GGBFS apresenta valores de resistência superiores nos dois tipos de cura. Adicionalmente, a relação entre as restantes amostras segue tendência semelhante ao caso anterior.

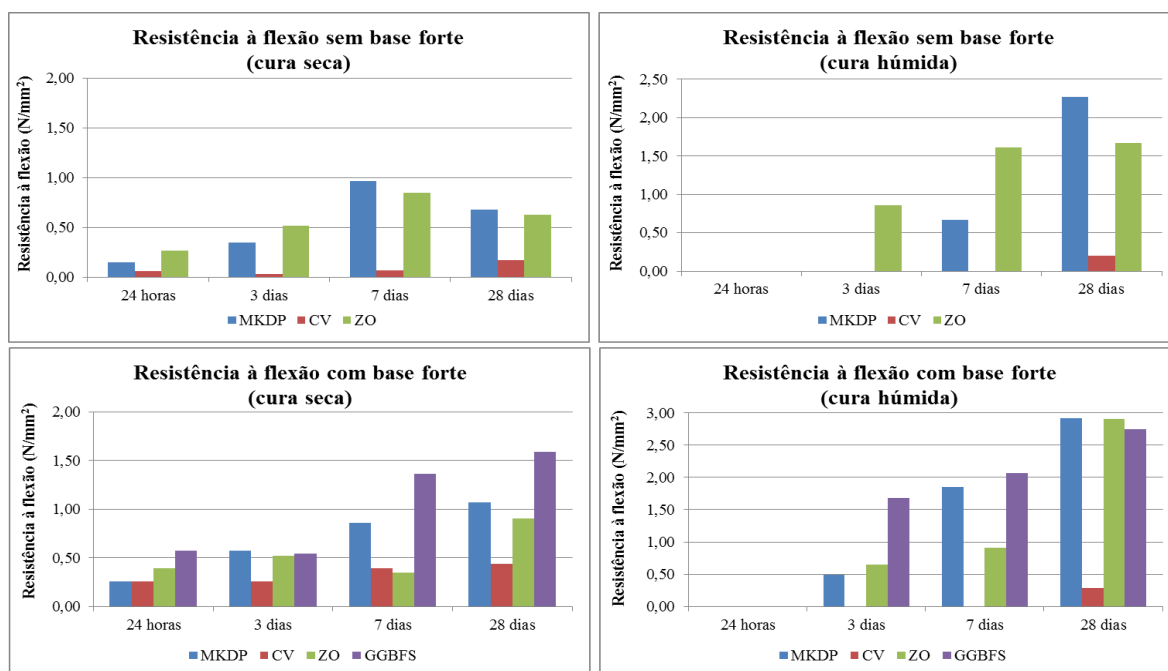


Figura 5.5 - Resultados de resistência à flexão com e sem base forte para diferentes condições de cura

Os provetes para MKDP e CV, sem base forte, apenas foram colocados em imersão após 3 dias e 7 dias, respetivamente, devido à sua instabilidade quando imersos em água. Assim, só foi possível obter valores de resistência a partir dos 7 dias para a MKDP e, para as cinzas

volantes, apenas aos 28 dias. Com a adição da base forte, conseguiu-se obter valores aos 3 dias para a MKDP e as cinzas volantes mantiveram-se instáveis.

Resistência à compressão

Na Figura 5.6 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão das amostras com e sem base forte, para condições de cura seca e cura húmida.

As amostras com zeólito (ZO) e sem base forte na sua composição apresentam valores superiores de resistência à compressão nas diferentes condições de cura, seguido da argila calcinada (MKDP) e por último as cinzas volantes (CV).

No caso das amostras com base forte, a escória de alto-forno (GGBFS) apresenta valores superiores de resistência à compressão em ambas as condições de cura. Em cura seca, verifica-se que em tempo prolongado a MKDP atinge valores superiores em relação ao ZO, o que não acontecia nas amostras sem base forte.

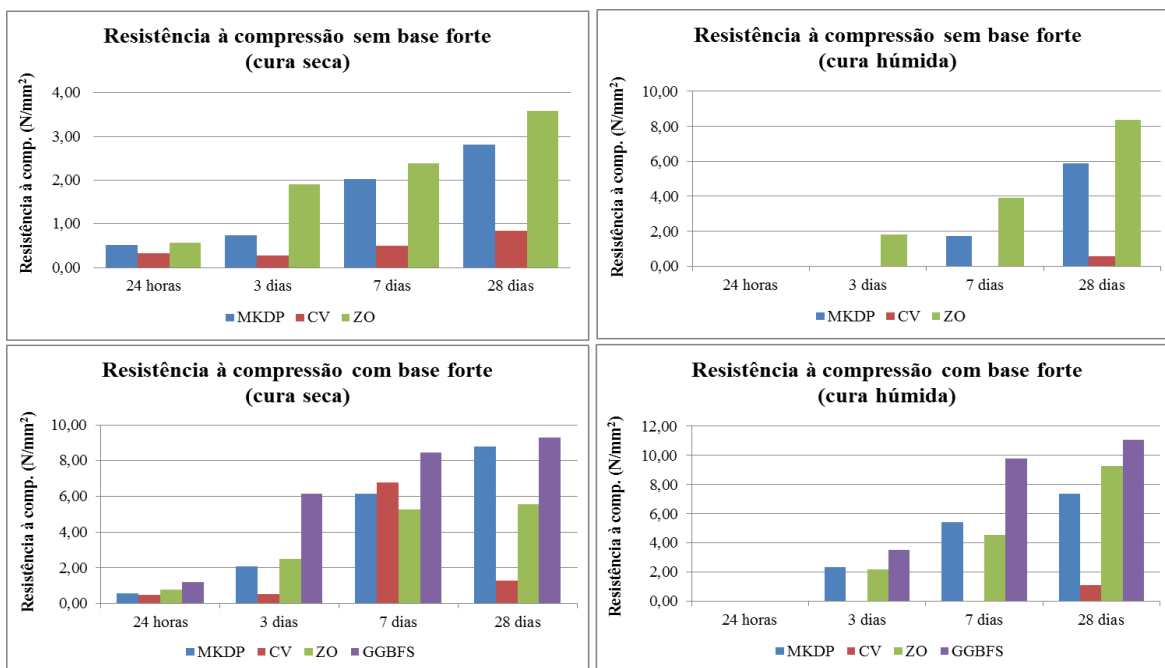


Figura 5.6 - Resultados de resistência à compressão com e sem base forte para diferentes condições de cura

De salientar que nos dois ensaios, em condições de cura húmida (nas duas situações estudadas) durante períodos prolongados, as amostras apresentam valores superiores aos obtidos para condições de cura seca, o que demonstra que as pozolanas possuem maior reatividade quando imersas em água.

As amostras com CV apresentam, em ambos os ensaios, valores inferiores comparados com os restantes, ou seja, sem grande poder como pozolana. Por isso, foram abandonadas no estudo.

Destaca-se o efeito da adição da base forte nas misturas à base de cal em relação aos valores obtidos sem este aditivo. Verificou-se um aumento das resistências iniciais à flexão e à compressão, bem como nos restantes tempos de cura. Sendo assim, o ativador alcalino teve o efeito esperado e houve aceleração das reações pozolânicas nas misturas.

De uma forma geral, por ordem decrescente de pozolanicidade tem-se:

- Escória de alto-forno > Argila calcinada \geq Zeólito > Cinzas volantes

A análise dos resultados obtidos na avaliação das argamassas de cimento correntes e na avaliação da reatividade pozolânica levou ao desenvolvimento de argamassas-cola com substituição parcial de cimento por materiais pozolânicos, ou seja, retirando uma matéria-prima menos compatível com o suporte a reabilitar e substituir por materiais potencialmente compatíveis. As pozolanas em estudo que apresentaram maior reatividade (MKDP e GGBFS) foram introduzidas em formulações de argamassas-cola e, posteriormente, caracterizadas em pasta e após endurecimento. Não se aprofundou o estudo da sua relação com cal e cal hidráulica uma vez que as secções anteriores revelam que estes casos estão muito aquém dos valores normativos. Os resultados obtidos encontram-se nos pontos seguintes.

5.2.2. Substituição por MKDP

Para a avaliação da substituição por argila calcinada (MKDP), desenvolveram-se formulações a partir de uma argamassa-cola C1 (padrão de mercado), com metade da concentração de OPC, substituindo parcialmente o cimento por argila calcina da cor de tijolo. Na Tabela 5.9, encontram-se as formulações desenvolvidas para estudo e respetivos componentes.

A argamassa C1 corresponde à formulação sem MKDP e serve como base de comparação com as restantes. Nas formulações C1G0, C1G1 e C1G3, para além de conterem este componente em estudo na sua constituição, uma parte do cimento OPC normal foi substituído por cimento OPC de presa mais rápida (material mais rico em aluminatos). As formulações C1G2 e C1G3 variam, em relação à formulação base e em relação às restantes, no tipo de cimento normal utilizado. Por último, a formulação C1G3.00 é uma variante de C1G3, onde

se usou a mesma quantidade de cimento e se retirou a argila calcinada fazendo o acerto com areia siliciosa.

Tabela 5.9 - Formulações de argamassas-cola com substituição de cimento por argila calcinada

		FORMULAÇÕES (% EM MASSA)						
		C1	C1G	C1G0	C1G1	C1G2	C1G3	C1G3.00
COMPONENTES	Areia siliciosa	88,20	83,20	83,20	83,20	83,20	83,20	88,20
	Cim. Br., II, 52,5	10,00	10,00	7,50	5,00	-	-	-
	Cim. Br., I, 52,5	-	-	-	-	10,00	5,00	5,00
	Cimento OPC, presa rápida	-	-	2,50	5,00	-	5,00	5,00
	Argila Calcinada	-	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	-
	Éter de Celulose	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Polímero redispersável	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

O estudo da substituição de cimento pela MKDP, numa primeira fase, consistiu na avaliação do tempo de presa e do comportamento das formulações desenvolvidas. Os resultados obtidos para o tempo de presa, bem como da percentagem de água de amassadura encontram-se na Tabela 5.10.

As argamassas C1, C1G e C1G2 apresentam valores de tempo de presa muito superiores em relação às restantes. Após 24 horas desde o início do ensaio, fez-se uma avaliação do endurecimento dos produtos e verificou-se que C1 e C1G2, apesar de endurecidos à superfície, mantiveram-se em pasta no interior. Em relação a estas, C1G apresentou-se ligeiramente mais endurecido.

As argamassas C1G0, C1G1, C1G3 e C1G3.00 possuem valores inferiores, com tempos de presa aceitáveis (< 24 horas), devido ao facto de conterem na sua constituição cimento OPC de presa mais rápida. O produto C1G0 teve um endurecimento mais lento, certamente por ser o que contém menor quantidade desse cimento.

Tabela 5.10 - Percentagem de água de amassadura e tempo de presa das misturas

		FORMULAÇÕES						
		C1	C1G	C1G0	C1G1	C1G2	C1G3	C1G3.00
% Água		21,00	22,50	21,50	21,50	23,50	21,00	18,00
Tempo de Presa	Início	> 2 Dias	> 2 Dias	< 24 horas à superfície	3h00	>2 Dias	8h05	8h15
	Fim	> 2 Dias	> 2 Dias		8h00		8h20	9h30

Entre todas as formulações estudadas, C1G1, C1G3 e C1G3.00 foram as que apresentaram resultados mais satisfatórios. Sendo assim, é importante referir que a obtenção de uma presa

razoável (< 12 horas), exige uma quantidade mínima de cimento na ordem de 10%, parte deste corresponde a um cimento de presa rápida (5%).

Posteriormente decidiu-se avaliar as formulações com menor tempo de presa, C1G3 e C1G3.00, do ponto de vista da resistência à tração perpendicular. Com isto pretende-se também avaliar o efeito da argila calcinada, uma vez que C1G3.00 não possui aquele componente.

5.2.2.1. Avaliação do efeito da MKDP

A avaliação do efeito da MKDP iniciou-se com a caracterização dos produtos em pasta, onde se fez a determinação da percentagem de água de amassadura e da massa volúmica aparente das misturas. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 5.11.

A percentagem de água de C1G3.00 é inferior, possivelmente devido ao facto da formulação não conter a pozolana em estudo na sua formulação. Curiosamente, o valor da massa volúmica aparente não é alterado na mesma tendência, isto é, a argamassa com maior teor de água de amassadura apresenta maior densidade em pasta.

Tabela 5.11 - Resultados dos produtos em pasta das formulações com e sem MKDP

	FORMULAÇÕES	
	C1G3	C1G3.00
%Água	20,50	18,00
ρ_{pasta}	1,28	1,22

Relativamente à determinação da resistência à tração perpendicular, foram obtidos valores para os dois tipos de cerâmicos utilizados no estudo (poroso e não poroso) aos 7, 14, 28 e 56 dias, após imersão em água e após ação do calor. Os resultados encontram-se na Figura 5.7.

Pela análise dos gráficos é possível constatar que a formulação C1G3 apresenta valores superiores em relação a C1G3.00, para os dois tipos de cerâmicos. Poderá afirmar-se que a MKDP terá alguma influência, mas não significativa, pois os resultados obtidos para ambas as formulações foram muito semelhantes.

Comparando os resultados entre o cerâmico poroso e o não poroso, verifica-se que não existe grande discrepância entre os valores obtidos para cada um.

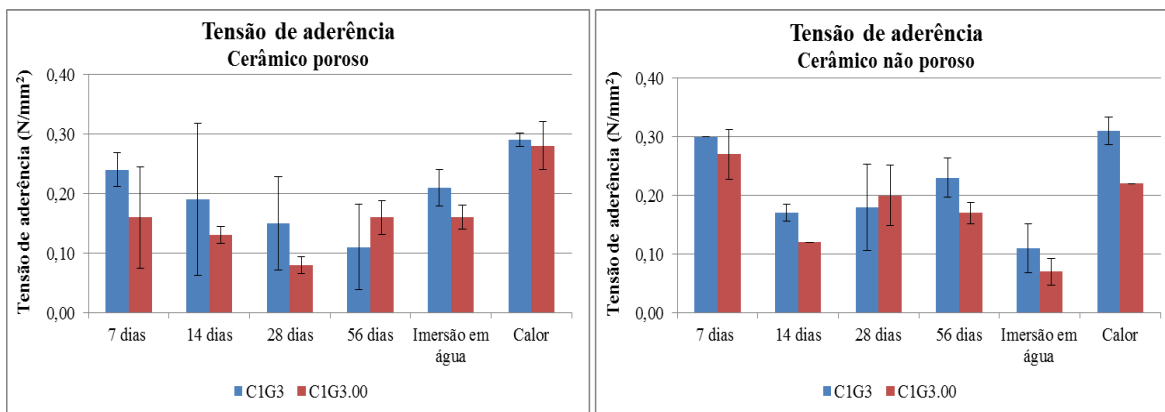


Figura 5.7 - Evolução temporal da tensão de aderência das formulações C1G3 e C1G3.00 para cerâmico poroso e não poroso

Os resultados de aderência encontram-se abaixo do limite normativo (0,5 N/mm²), o que condiciona a sua utilização, especialmente no caso da formulação com MKDP. Por isso, decidiu-se realizar mais ensaios variando o teor deste componente.

5.2.2.2. Avaliação da introdução de diferentes percentagens de MKDP

A partir de uma formulação base com 5% de argila calcinada (MKDP) na sua constituição, foram desenvolvidas novas formulações com quantidades superiores dessa pozolana a fim de se estudar qual o seu efeito ao nível de aderência. As formulações aqui estudadas e respetivos componentes encontram-se na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

A formulação C1G3 é a formulação base com 5% de MKDP, C1G3.01 corresponde à formulação com 10% de MKDP e C1G3.02 contém 15% deste componente. A quantidade de cimento foi mantida constante (10%) e fez-se o acerto com a areia siliciosa. As formulações foram preparadas e avaliadas como produto em pasta e após endurecimento.

Tabela 5.12 - Formulações contendo diferentes percentagens de MKDP

		FORMULAÇÕES (% EM MASSA)		
		C1G3	C1G3.01	C1G3.02
COMPONENTES	Cim. br. I, 52,5	5,00	5,00	5,00
	Cimento de presa rápida	5,00	5,00	5,00
	Argila calcinada	5,00	10,00	15,00
	Areia siliciosa	83,20	78,20	73,20
	Éter de celulose	0,30	0,30	0,30
	Polímero redispersável	1,50	1,50	1,50

Numa primeira fase, fez-se a caracterização dos produtos em pasta em que se procedeu à determinação da percentagem de água do amassado, da capacidade de poder molhante e transferência aos 10, 20 e 30 minutos. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 5.13.

Relativamente à percentagem de água, verifica-se um aumento da quantidade de água necessária conforme o aumento da quantidade de MKDP nas formulações, porque são introduzidos materiais finos no produto que leva à necessidade de mais água para se obter uma boa trabalhabilidade.

Os resultados obtidos para a capacidade de poder molhante e transferência foram muito semelhantes entre as diferentes formulações estudadas. Aos 10 minutos, verifica-se que a quantidade de argamassa transferida para o vidro de ensaio é minimamente aceitável, entre 50 e 65%, diminuindo nos restantes tempos de ensaio, o que poderá traduzir alguns problemas ao nível prático na fixação dos cerâmicos.

Tabela 5.13 - Resultados da caracterização dos produtos em pasta para diferentes percentagens de argila calcinada

		FORMULAÇÕES		
		C1G3	C1G3.01	C1G3.02
%Água		21,50	23,50	26,50
Poder molhante (%) vs Transferência (%)	10'	95 vs 50	95 vs 65	95 vs 65
	20'	90 vs 45	85 vs 50	90 vs 50
	30'	70 vs 10	55 vs 5	65 vs 10

Posteriormente, os produtos foram avaliados do ponto de vista da resistência à tração perpendicular. Assim, para os dois tipos de cerâmica (porosa e não porosa) foram determinadas as tensões de aderência em condições iniciais de cura, 7 e 14 dias, após imersão em água e após ação do calor. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 5.8.

As formulações aqui estudadas apresentam valores muito semelhantes entre si, havendo apenas uma variação mais significativa no caso do cerâmico poroso para as condições de imersão em água. A formulação C1G3 apresenta um valor de tensão de aderência superior em imersão, seguida da C1G3.01 e, por último, C1G3.02.

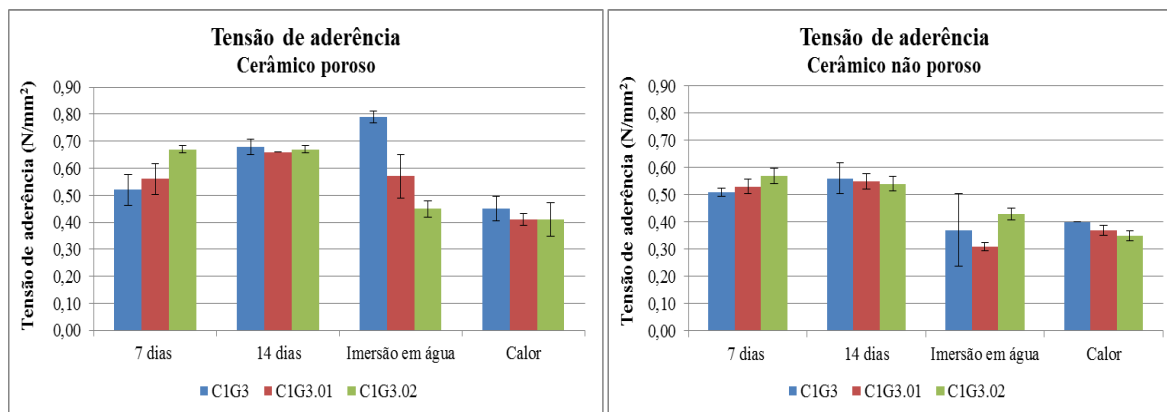


Figura 5.8 - Tensão de aderência das argamassas-cola medida aos 7, 14 dias e em condições de imersão e ação do calor para cerâmico poroso e não poroso

Em condições de aderência inicial e após ação do calor, as argamassas aqui estudadas, apresentam ruturas maioritariamente coesivas pela cola (CF-A), para o cerâmico poroso e não poroso, existindo uma pequena percentagem de rutura adesiva entre os cerâmicos e a cola (AF-T). As ruturas observadas para todas as formulações, em condições de aderência após imersão em água, são apenas coesivas pela cola.

O aumento da percentagem de MKDP não teve uma influência significativa em relação aos resultados obtidos para a formulação base, C1G3. Assim, pode-se afirmar que não há necessidade de aumentar a quantidade desta pozolana nas formulações, pois não há melhorias nos valores de tensão de aderência. Contudo, ao contrário do ensaio anterior (secção 5.2.2.1), os valores de aderência obtidos encontram-se acima ou relativamente próximos, em algumas situações, do limite mínimo de $0,5 \text{ N/mm}^2$ indicado pela EN12004. Considerando ambos os casos, admitem-se reservas ao nível de reprodutibilidade, pelo que se decidiu repetir os ensaios de aderência e a caracterização do mesmo produto em pasta.

5.2.2.3. Avaliação da reprodutibilidade de C1G3

A avaliação da reprodutibilidade de C1G3 consistiu na repetição dos ensaios de caracterização do produto em pasta (percentagem de água do amassado, massa volúmica aparente, capacidade de poder molhante e transferência e tempo de presa segundo os mesmos métodos de ensaio referidos anteriormente) e nos ensaios de resistência à tração perpendicular. Os resultados obtidos para os produtos em pasta apresentam-se na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Resultados do produto em pasta na avaliação da reprodutibilidade de C1G3

		FORMULAÇÃO
		C1G3
%Água		21,00
ρ_{pasta}		1,36
Tempo de presa	Início	8h15
	Fim	9h00
Poder molhante (%) vs Transferência (%)	10'	95 vs 50
	20'	85 vs 45
	30'	65 vs 5

Os resultados obtidos na caracterização do produto em pasta para as propriedades referidas, foram semelhantes aos que se obtiveram em ensaios anteriores.

Na Figura 5.9 encontram-se os valores da resistência à tração perpendicular, obtidos em condições de aderência inicial (7 e 14 dias), após imersão em água, após ação do calor e após tempo aberto (20 e 30 minutos).

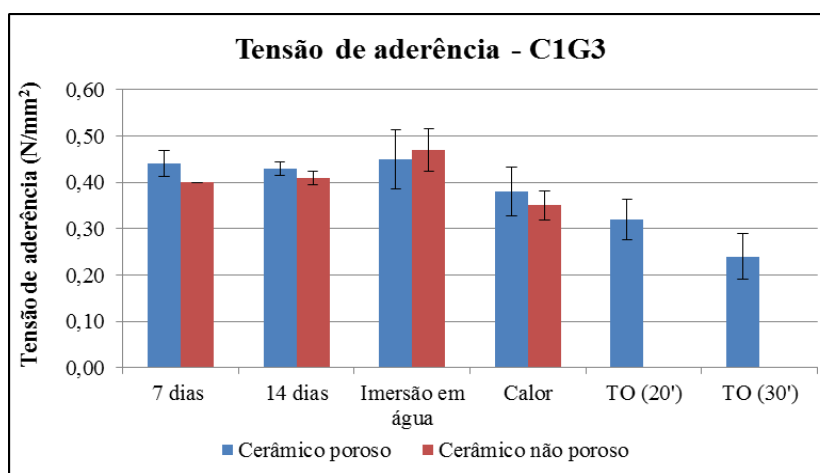


Figura 5.9 - Evolução temporal da tensão de aderência para a avaliação da reprodutibilidade de C1G3

A argamassa C1G3 apresenta valores de tensão de aderência relativamente próximos aos obtidos na situação anterior para a mesma formulação (secção 5.2.2.2), sendo no entanto ligeiramente superiores ao registado no primeiro ensaio (secção 5.2.2.1). Em relação ao tempo aberto os resultados são razoáveis apesar de se encontrarem abaixo do limite normativo.

Em todas as condições de cura, as ruturas observadas são maioritariamente ruturas coesivas pela cola (CF-A). No tempo aberto, aos 20 e 30 minutos, a formulação em estudo apresentou ruturas parcialmente coesivas pela cola e adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T).

Os valores de aderência obtidos encontram-se abaixo do que a EN12004 indica como requisito mínimo ($\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$), embora próximos o que permite referenciar a formulação como uma base de desenvolvimento, ainda que com reservas ao nível da reprodutibilidade.

5.2.3. Substituição por GGBFS

Para o estudo da substituição parcial de cimento por escória de alto-forno (GGBFS), foram desenvolvidas, numa primeira fase, duas formulações de argamassas-cola com diferentes percentagens de cimento mantendo a mesma quantidade de pozolana, onde se pretende avaliar o efeito da escória em combinação com o cimento. Na Tabela 5.15 apresentam-se as percentagens em massa de cada componente utilizado no desenvolvimento das formulações. Considerando o potencial pozolânico apresentado na secção 5.2.1 para este material, espera-se uma possibilidade de maior redução de cimento por substituição com esta pozolana.

Tabela 5.15 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução da escória de alto-forno

		FORMULAÇÕES (% EM MASSA)	
		C1PSG.00	C1PSG.01
COMPONENTES	Cim. cz., I, 42,5 (OPC)	10,00	7,50
	GGBFS (- reativa)	10,00	10,00
	Areia siliciosa	78,19	80,69
	Éter de Celulose	0,30	0,30
	Polímero redispersável	1,50	1,50
	Redutor de crómio	0,01	0,01

Conforme referido anteriormente, foram utilizadas diferentes quantidades de cimento OPC, correspondendo a C1PSG.00 e a C1PSG.01 uma concentração de 10% e 7,5%, respetivamente, desse ligante. A percentagem de GGBFS introduzida em ambas as formulações manteve-se nos 10%, fazendo-se assim o acerto da formulação com a areia siliciosa. O tipo de cimento OPC utilizado conduz à necessidade de introdução do redutor de crómio por questões de segurança.

Posteriormente, reduziu-se mais a quantidade de cimento, usando um cimento de presa rápida e introduziram-se dois tipos de escória, diferentes do ponto de vista da sua reação pozolânica, segundo o fornecedor. Nesta última fase, que consistiu na avaliação do efeito da pozolana em argamassas-cola com baixa concentração de cimento, foi adicionado o ativador alcalino (base forte) em diferentes percentagens. Na Tabela 5.16, encontram-se as formulações desenvolvidas e respetivos componentes.

Tabela 5.16 – Formulações com cimento OPC de presa rápida, com introdução de GGBFS e de diferentes percentagens de base forte

		FORMULAÇÕES (% EM MASSA)			
		C1SG.00	C1SG.01	C1SG.02	C1SG.03
COMPONENTES	GGBFS (- reativa)	25,00	25,00	25,00	25,00
	GGBFS (+ reativa)	7,00	7,00	7,00	7,00
	Areia siliciosa	60,30	60,30	60,30	58,80
	Éter de celulose	0,30	0,30	0,30	0,30
	Cimento OPC de presa rápida	4,90	4,90	4,90	4,90
	Anidrite	2,50	2,50	2,50	2,50
	Ativador alcalino	-	0,50	1,00	1,00
	Polímero redispersável	-	-	-	1,50

A formulação C1SG.00 pode ser considerada como formulação base a partir da qual se fizeram novos desenvolvimentos. A partir desta, desenvolveram-se duas formulações com a adição da base forte, em que C1SG.00 corresponde à formulação sem a presença dessa base na sua constituição, C1SG.01 a formulação com 0,5% e C1SG.02 com 1%. A formulação C1SG.03 é semelhante à C1SG.02 mas com a adição do polímero redispersável para responder à solicitação de envelhecimento por ação do calor. Todas as formulações possuem uma quantidade muito reduzida de cimento de presa rápida, menor que 5% (percentagem em massa).

5.2.3.1. Avaliação do efeito da GGBFS combinado com OPC

As formulações desenvolvidas para esta fase foram, em primeiro lugar, caracterizadas como produto em pasta. Esta caracterização consistiu na determinação da percentagem de água do amassado, da massa volúmica aparente, do tempo de presa e capacidade de poder molhante e transferência. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 5.17.

Relativamente à percentagem de água, C1PSG.01 apresenta um valor ligeiramente inferior, possivelmente influenciado pela redução da quantidade de cimento em relação à argamassa C1PSG.00. A massa volúmica aparente segue a mesma tendência, sendo o valor mais baixo o do produto C1PSG.01.

O tempo de presa obtido para ambos os produtos foi muito longo. Após 24 horas, apesar de relativamente endurecidos à superfície, encontravam-se completamente em pasta no seu interior. Após 3 dias, C1PSG.01 ainda se apresentava inconsistente no seu interior, mas não em pasta. Sendo assim, ambos os produtos apresentam tempos de presa muito superiores a 24 horas, o que limita a sua utilização em termos práticos.

Entre as duas argamassas a capacidade de poder molhante e de transferência apresentou resultados muito semelhantes. Aos 30 minutos, continua a haver uma quantidade razoável de produto transferido o que ajuda a nível prático na fixação de cerâmicos.

Tabela 5.17 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de GGBFS

		FORMULAÇÕES	
		C1PSG.00	C1PSG.01
%Água		20,00	19,50
ρ_{pasta}		1,34	1,28
Poder molhante (%) vs Transferência (%)	10'	95 vs 70	95 vs 60
	20'	90 vs 65	95 vs 80
	30'	80 vs 50	90 vs 55
Tempo de presa		>> 24 horas	≥ 3 dias

Posteriormente, as argamassas foram caracterizadas como produtos endurecidos através da determinação da resistência à tração perpendicular, para os dois tipos de cerâmicos utilizados no estudo (cerâmico poroso e não poroso). O ensaio foi realizado para as condições de aderência inicial aos 7 e 14 dias, após imersão em água e após ação do calor. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 5.10.

Pela análise dos gráficos não é possível afirmar que existe uma argamassa com melhor desempenho, pois ambas apresentam resultados muito semelhantes, com valores muito próximos para cada uma das condições de cura. Comparando os dois tipos de cerâmicos, os resultados obtidos são igualmente similares, havendo apenas uma variação mais significativa nas condições de cura em imersão em água, onde o cerâmico poroso apresenta valores superiores.

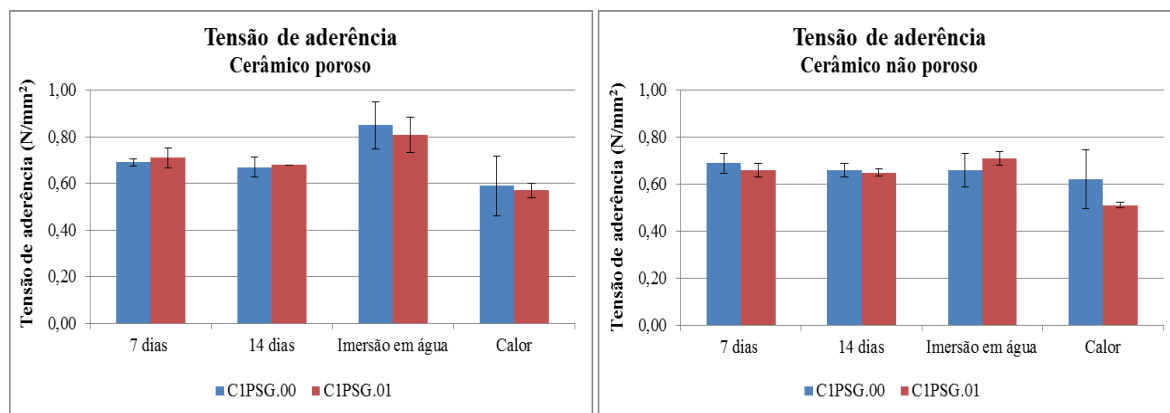


Figura 5.10 - Evolução temporal da tensão de aderência da introdução de GGBFS em formulações com diferentes percentagens de cimento

As ruturas observadas em ambas as formulações, para todas as condições de cura, são do tipo coesivo pela cola (CF-A). Nas condições após imersão em água, os modos de rutura observados são, maioritariamente, coesivos existindo alguma percentagem de rutura adesiva entre o cerâmico e a cola (AF-T) apenas no caso em que se utilizou a peça cerâmica não porosa [Figura 5.11 - à direita]. Nestas condições, é ainda possível verificar uma alteração de cor por parte das argamassas. A argamassa C1PSG.00 apresenta uma cor azulada mais acentuada com a utilização do cerâmico não poroso, sendo mais ténue com o poroso [Figura 5.11 - C1PSG.00]. Por outro lado, na C1PSG.01, observou-se a presença de uma cor azulada na utilização do cerâmico não poroso não existindo qualquer alteração no caso do poroso [Figura 5.11 – C1PSG.01]. A presença de cor terá origem na GGBFS pela presença de cobre.

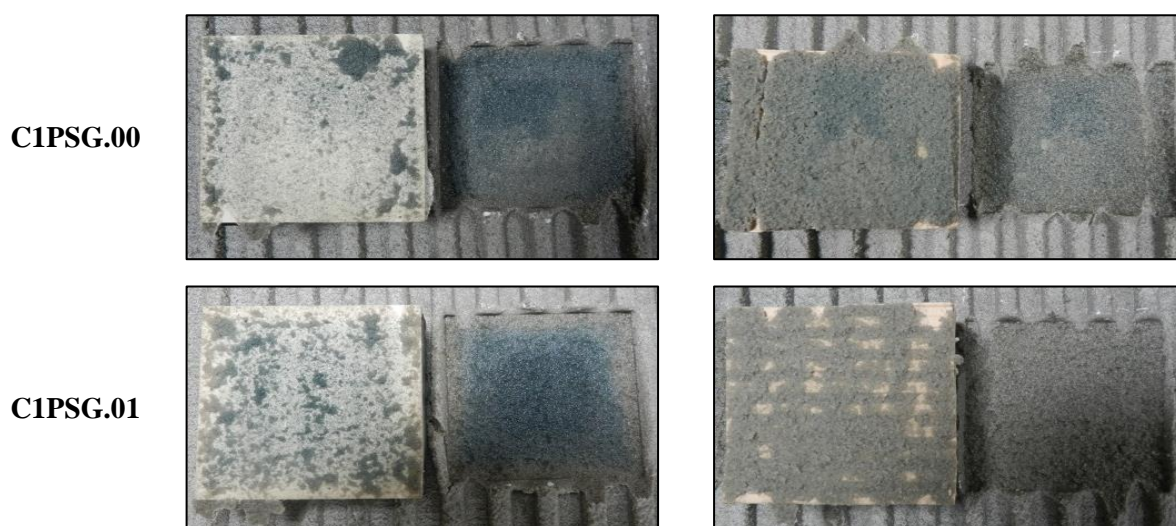


Figura 5.11 – Aspeto dos produtos após imersão em água com utilização de cerâmico não poroso (esquerda) e poroso (direita)

Os valores de tensão de aderência obtidos encontram-se acima do que a EN12004 indica como requisito mínimo ($\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$), o que traduz potencial aptidão das formulações, apesar de apresentarem tempos de presa muito longos. Pode-se afirmar que 7,5% de OPC apresenta-se como a concentração razoável para afetação de aderências mínimas de acordo com a EN12004. Não obstante, o tempo de presa muito longo pode apresentar-se como uma limitação na sua utilização prática.

5.2.3.2. Avaliação do efeito da GGBFS combinado com OPC de presa rápida

Para esta situação, as formulações desenvolvidas foram avaliadas como produto em pasta e após endurecimento. A caracterização dos produtos em pasta consistiu na determinação da

percentagem de água do amassado, da massa volúmica aparente e do tempo de presa. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 5.18.

As argamassas C1SG.00, C1SG.01 e C1SG.02 requerem teores semelhantes de água de amassadura e possuem o mesmo valor de massa volúmica aparente apesar de, na sua constituição, terem diferentes percentagens de base forte. Relativamente à argamassa C1SG.03, esta apresenta valores inferiores devido à introdução do polímero redispersável.

Entre as formulações sem polímero redispersável, a argamassa C1SG.00 foi a que apresentou um tempo de presa superior, seguida da C1SG.01 e por último C1SG.02. Em tempo inferior a 24 horas e após desmolde, C1SG.02 encontrava-se endurecido à superfície mas um pouco inconsistente no fundo. No entanto, a amostra C1SG.00 apresentava-se menos endurecida em ambas as superfícies. A formulação C1SG.01 teve o seu início de presa após 9h05 e depois de decorridas 24 horas desde o início do ensaio, verificou-se que se apresentava completamente endurecido à superfície mas ligeiramente inconsistente no fundo. Pode-se afirmar que estes produtos têm o início de tempo de presa entre 8 a 15 horas.

A argamassa C1SG.03, comparando com a sua formulação base (C1SG.02), apresentou um tempo de presa mais longo, pois após 16 horas desde o início do ensaio apresentava-se ligeiramente endurecido à superfície mas completamente em pasta no fundo.

Tabela 5.18 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com cimento OPC de presa rápida e introdução de GGBFS

	FORMULAÇÕES			
	C1SG.00	C1SG.01	C1SG.02	C1SG.03
%Água	23,50	23,50	23,50	20,50
ρ_{pasta}	1,48	1,48	1,48	1,25
Tempo de presa	< 24h	< 24h	< 24h	> 24h

A caracterização dos produtos endurecidos, tal como aconteceu nas avaliações anteriores, passou pela determinação da resistência à tração perpendicular. As argamassas C1SG.00, C1SG.01 e C1SG.02 foram ensaiadas em condições de aderência inicial (7 e 14 dias), de imersão em água e após ação do calor. A argamassa C1SG.03 sofreu as mesmas condições de cura à exceção das condições de aderência inicial, pois para além de ensaiada aos 7 e 14 dias, foram obtidos valores para 28 e 56 dias. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 5.12.

A argamassa C1SG.00, mesmo sem a presença de base forte na sua constituição, apresenta resultados de tensão de aderência razoáveis, principalmente na utilização de cerâmico poroso.

Apesar disso, apresenta valores inferiores quando comparada com C1SG.01 e C1SG.02 sendo esta última a que apresenta valores superiores. Assim, pode afirmar-se que o aumento da percentagem de base forte nas formulações resulta na melhoria das tensões de aderência, para as diferentes condições de cura, segundo a sua implicação real nos processos reativos.

As argamassas C1SG.00, C1SG.02 e C1SG.03, no caso da utilização de cerâmico poroso, apresentam valores de aderência razoáveis após ação do calor. Por outro lado, na colagem da peça cerâmica não porosa, os resultados obtidos foram nulos, devido à ausência do polímero redispersável. Consequentemente, foi desenvolvida a argamassa C1SG.03, que contém polímero na sua constituição, por forma a melhorar os resultados de aderência após ação do calor. Assim, verifica-se que o polímero teve o efeito esperado nas aderências após calor, mas teve influência contrária nas restantes condições de ensaio, porque os valores são consideravelmente menores.

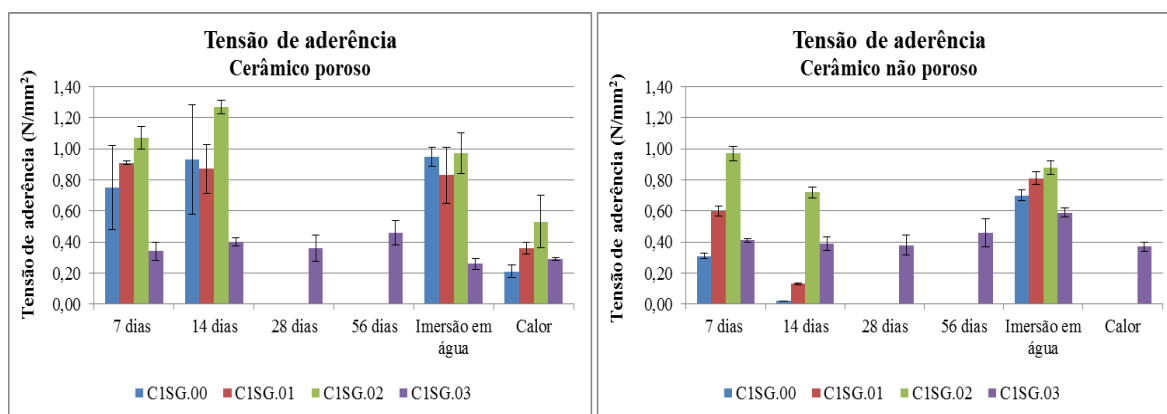


Figura 5.12 - Evolução temporal da tensão de aderência da introdução de GGBFS em formulações com quantidade reduzida de cimento OPC de presa rápida

Na utilização do cerâmico poroso, em condições de aderência inicial, as argamassas C1SG.00, C1SG.01 e C1SG.03 apresentaram, maioritariamente, ruturas adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T) aos 7 dias, sendo coesivas pela cola (CF-A) aos 14 dias. Na utilização do não poroso, as argamassas C1SG.00 e C1SG.03 mostraram aos 7 dias, ruturas coesivas pela cola e a argamassa C1SG.01 ruturas maioritariamente adesivas entre o cerâmico e a cola. Aos 14 dias, observaram-se ruturas adesivas entre o cerâmico e a cola com as argamassas C1SG.00 e C1SG.01 e ruturas parcialmente coesivas com a C1SG.03. A argamassa C1SG.02 apresentou, essencialmente, ruturas coesivas pela cola com os dois tipos de cerâmica.

Após imersão em água, verificaram-se ruturas maioritariamente coesivas pela cola, na utilização do cerâmico poroso, com as argamassas C1SG.00, C1SG.02 e C1SG.03 e ruturas

adesivas entre o cerâmico e a cola com C1SG.01. Na utilização do cerâmico não poroso observaram-se ruturas maioritariamente adesivas entre o cerâmico e a cola com C1SG.00 e C1SG.02 e ruturas coesivas pela cola com C1SG.01 e C1SG.03. Em condições de envelhecimento por ação do calor, as ruturas observadas com as argamassas C1SG.00, C1SG.01 e C1SG.03, no caso da utilização do cerâmico poroso, são parcialmente coesivas pela cola e adesivas entre o cerâmico e a cola. Na utilização do cerâmico não poroso, as ruturas são maioritariamente adesivas entre o cerâmico e a cola. A argamassa C1SG.03 apresenta, nas mesmas condições, ruturas coesivas pela cola nos dois tipos de cerâmico.

Após imersão em água verificou-se alteração de cor por parte das argamassas no caso da utilização do cerâmico não poroso [Figura 5.13 – à esquerda] mantendo-se sem qualquer alteração significativa na utilização do cerâmico poroso [Figura 5.13 – à direita].

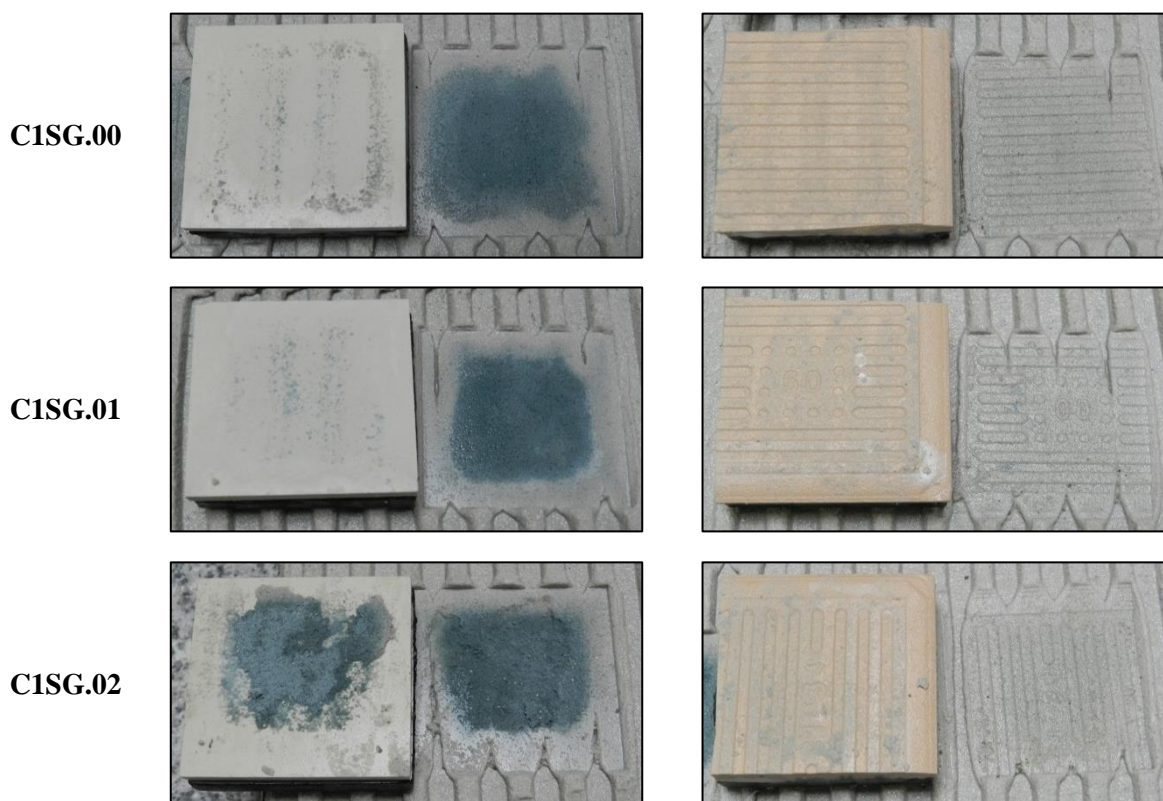


Figura 5.13 – Aspeto dos produtos após imersão em água com utilização do cerâmico não poroso (esquerda) e do cerâmico poroso (direita)

Os valores de tensão de aderência encontram-se, maioritariamente, acima do limite exigido pela norma EN12004, o que torna estas argamassas com potencial desenvolvimento, embora se evidencie a necessidade de trabalhos mais profundos, uma vez que se obtém um conjunto

de resultados com alguma discrepância e ainda sem justificção direta (especialmente ao nível dos tempos de presa e das aderências no tempo).

5.3. AVALIAÇÃO DE FORMULAÇÕES ESPECÍFICAS COM UTILIZAÇÃO DE CERÂMICA TRADICIONAL

Atendendo aos estudos realizados anteriormente, foram escolhidas três formulações que, do ponto de vista normativo, obtiveram resultados mais satisfatórios. Nesta fase, foram também estudados dois produtos, produzidos e comercializados pela Saint-Gobain Weber (SGW) designados aqui por CC.01 e CC.02, cujas formulações se encontram na Tabela 5.19, para efeito comparativo com as formulações escolhidas, por forma a atingir os desafios/objetivos propostos.

Tabela 5.19 - Formulações dos produtos SGW em estudo

		FORMULAÇÕES (% EM MASSA)	
		CC.01	CC.02
COMPONENTES	Areia (0,1 – 0,5 mm)	34,78	74,67
	Areia (0,5 – 1,2 mm)	13,00	-
	Cim. cz, I, 42,5	40,00	18,00
	Cim. cz, II, 42,5	2,50	-
	MKDP	2,50	1,00
	Cinzas volantes	-	6,00
	Éter de celulose	0,47	0,23
	Éter de amido	0,03	0,08
	Polímero redispersável	5,00	-
	Redutor de crómio	0,05	0,025
	Bentonite	0,30	-
	Formiato calcio	0,80	-
	Fibra de celulose	0,57	-

Os produtos estudados foram C1PSG.01, C1SG.02, C1SG.03, CC.01 e CC.02 para os quais se procedeu à caracterização como produto em pasta e produto endurecido.

5.3.1. Caracterização dos produtos em pasta

A caracterização dos produtos em pasta seguiu o procedimento descrito na secção 4.4.1 que remete para a secção 4.3.1. Na Tabela 5.20 apresentam-se os resultados obtidos para as formulações em estudo.

De uma forma geral, os resultados obtidos nesta fase, para a percentagem de água de amassadura, são semelhantes aos obtidos anteriormente para as mesmas argamassas à exceção de C1SG.03, que requerem maior teor de água de amassadura e apresentou densidade superior.

Tabela 5.20 - Resultados da caracterização dos produtos em pasta para as argamassas em estudo

	FORMULAÇÕES				
	C1PSG.01	C1SG.02	C1SG.03	CC.01	CC.02
%Água	19,00	22,50	23,50	29,00	20,50
ρ_{pasta}	1,29	1,47	1,42	1,38	1,38

A argamassa CC.01 é a que necessita de uma maior quantidade de água para se obter uma boa trabalhabilidade e proceder à amassadura, pois possui elementos retentores de água e uma grande quantidade de cimento na sua formulação. Relativamente a CC.02, que também contém na sua formulação uma quantidade significativa de cimento, não necessitou de teor de água superior para se obter boa trabalhabilidade, no entanto, apresenta densidade igual a CC.01.

O uso de escória de alto-forno (GGBFS) em grandes quantidades nas formulações de C1SG.02 e C1SG.03, introduz materiais finos na estrutura produzindo argamassas mais densas e compactas. Como resultado quando endurecidas permitem obter melhores resultados ao nível do comportamento mecânico e físico. A presença de polímero redispersável em C1SG.03 exigiu maior quantidade de água para garantir uma boa trabalhabilidade, baixando a densidade em pasta. A GGBFS combinada com o cimento na formulação de C1PSG.01, necessita de uma percentagem de água baixa para adquirir ótima trabalhabilidade, gerando-se uma pasta menos densa.

5.3.2. Caracterização dos produtos endurecidos

5.3.2.1. Resistência à tração perpendicular

O ensaio de resistência à tração perpendicular foi realizado após 28 dias de cura, após imersão em água, após ação do calor e após tempo aberto. Na Figura 5.14 encontram-se os resultados obtidos na determinação da resistência à tração perpendicular, para as condições iniciais (28 dias, imersão em água, ação do calor).

É possível constatar de imediato que a argamassa CC.01 é a que apresenta valores de tensão de aderência superiores em todos os modelos de ensaio. Isto é explicado, em grande parte, pela alta concentração de cimento na sua formulação que lhe confere elevada resistência. A argamassa CC.02 também contém uma percentagem alta de cimento, que lhe confere alguma resistência embora inferior a CC.01 porque para além de não possuir tanto cimento, não existem outros elementos (como o polímero redispersável) na sua formulação que contribuam para o aumento dessa resistência.

A escória de alto-forno (GGBFS) presente nas formulações de C1SG.02 e C1SG.03 (ver Tabela 5.16) origina argamassas com comportamento satisfatório ao nível de resistência à tração perpendicular. A adição de polímero redispersável na argamassa C1SG.03 melhorou significativamente alguns resultados, com especial importância sob ação do calor que era o objetivo a atingir com a sua introdução na formulação. Em situação de imersão em água, os valores baixaram, influenciados pela presença do polímero; no entanto, o desvio-padrão indica que o patamar de $0,5 \text{ N/mm}^2$ pode ser atingido e ultrapassado.

O uso de GGBFS em conjunto com o cimento na formulação de C1PSG.01, em situação de aderência inicial (28 dias) apresenta valores de aderência inferiores em relação às restantes argamassas. Após ação do calor os valores são semelhantes a C1SG.02 e CC.02 e após imersão em água apresenta resultados muito próximos da argamassa C1SG.02.

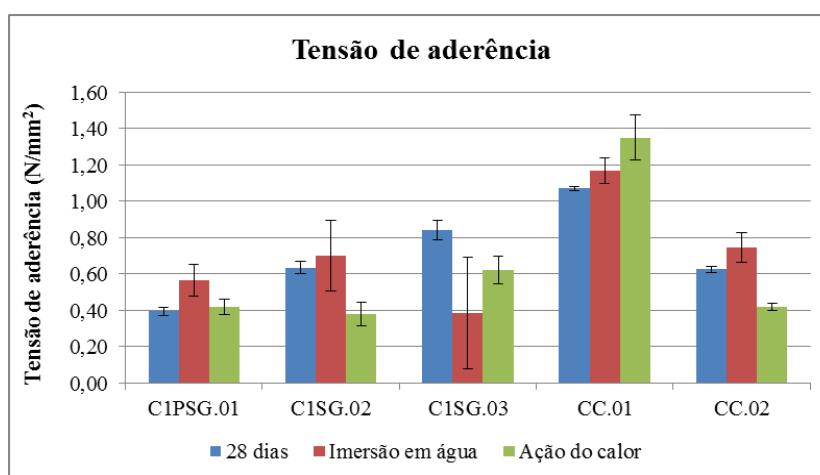


Figura 5.14 - Tensão de aderência após 28 dias, após imersão em água e ação do calor das formulações em estudo

Em condições de aderência inicial e após ação do calor, as formulações C1PSG.01, CC.01 e CC.02 apresentam ruturas coesivas pela cola (CF-A), enquanto as formulações C1SG.02 e

C1SG.03, ruturas maioritariamente coesivas pela cola e uma pequena percentagem (entre 5% a 10%) de rutura adesiva entre o cerâmico e a cola (AF-T). Em condições de aderência após imersão em água, as formulações C1SG.02 e C1SG.03 apresentam ruturas adesivas entre o cerâmico e a cola, C1PSG.01 e CC.02 mostram ruturas maioritariamente coesivas pela cola observando-se uma percentagem (entre 5% a 10%) de rutura adesiva entre o cerâmico e a cola. Por último, CC.01 apresenta rutura coesiva pela cola.

Nas formulações C1SG.02 e C1SG.03, após imersão em água, observa-se o desenvolvimento de uma cor azulada apenas nas zonas onde o azulejo esteve em contacto com o produto, encontrando-se mais acentuada na argamassa C1SG.02 [Figura 5.15-a]. Para além da alteração de cor por parte dos produtos, também se verifica que o tardoz do azulejo sofre uma mudança de cor, o que não aconteceu em ensaios anteriores (secção 5.2.3.2).

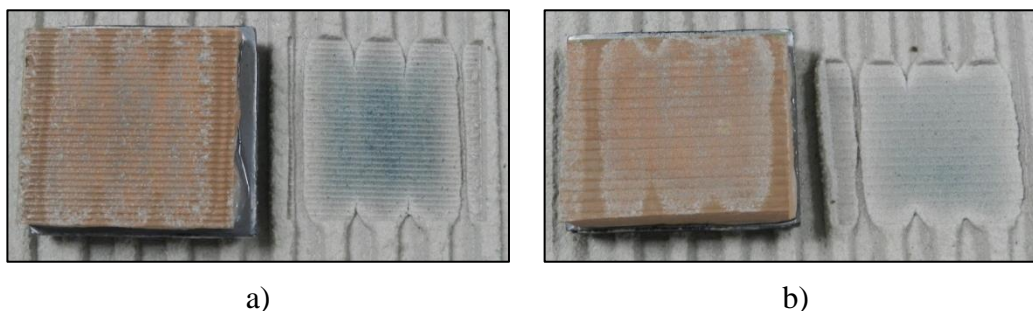


Figura 5.15 – Alteração de cor das argamassas e do tardoz do azulejo: a) C1SG.02; b) C1SG.03

Os valores de tensão de aderência obtidos consideram-se satisfatórios e encontram-se muito próximos (acima e abaixo) do limite mínimo exigido pela norma em vigor (EN12004), ou seja, $0,5 \text{ N/mm}^2$. Excetuando o caso da formulação CC.01, onde se verifica que os valores obtidos são significativamente superiores ao mesmo requisito normativo.

Na determinação da resistência à tração perpendicular após tempo aberto, as formulações C1PSG.01, CC.01 e CC.02 foram avaliadas após 30 minutos de tempo aberto. Em relação às formulações C1SG.02 e C1SG.03, estas foram avaliadas após 10, 20 e 30 minutos de tempo aberto. Durante a preparação do ensaio ao tempo aberto, verificou-se que aos 20 e 30 minutos havia falta de ligação entre o cerâmico e a argamassa C1SG.02 [Figura 5.16].

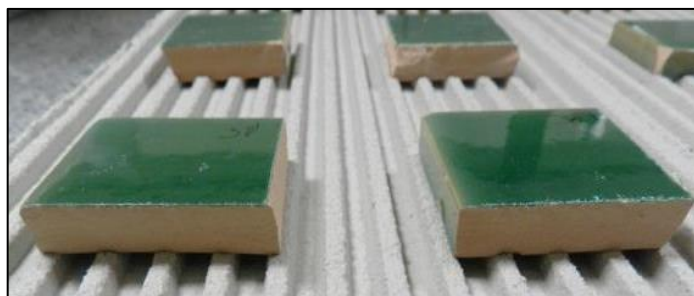


Figura 5.16 - Pormenor da ligação entre o cerâmico e a argamassa

Na Figura 5.17 encontram-se os resultados obtidos na determinação da resistência à tração perpendicular ao tempo aberto após 10, 20 e 30 minutos.

Verifica-se que a formulação CC.01 aos 30 minutos apresenta valores de resistência à tração perpendicular muito superiores aos dos restantes produtos. As formulações C1PSG.01 e CC.02 apresentam resultados muito semelhantes.

Na situação de estudo aos 10, 20 e 30 minutos de tempo aberto, a formulação C1SG.02 apresenta valores nulos aos 20 e 30 minutos, enquanto C1SG.03 apresenta um valor muito próximo de zero aos 30 minutos ($0,05 \text{ N/mm}^2$). Aos 10 minutos, C1SG.03 obteve valores superiores em relação a C1SG.02.

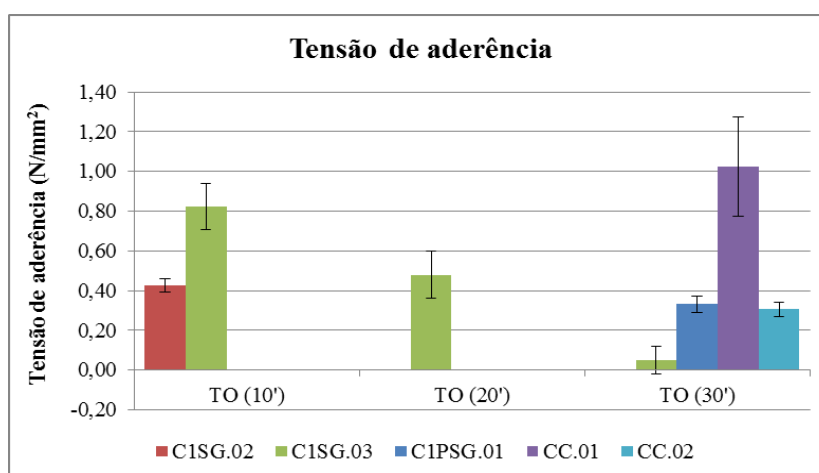


Figura 5.17 - Tensão de aderência após tempo aberto aos 10, 20 e 30 minutos das formulações em estudo

As formulações C1PSG.01, CC.01 e CC.02, avaliadas apenas aos 30 minutos de tempo aberto, apresentam ruturas maioritariamente coesivas pela cola (CF-A), com uma pequena percentagem (entre 5% a 20%) de rutura adesiva entre o cerâmico e a cola (AF-T). As formulações C1SG.02 e C1SG.03 apresentaram, aos 10 minutos de tempo aberto, ruturas

parcialmente coesivas pela cola (40%) e adesivas entre o cerâmico e a cola. Aos 20 minutos, C1SG.02 apresenta rutura adesiva entre o cerâmico e a cola enquanto C1SG.03 rutura maioritariamente adesiva entre o cerâmico e a cola com uma percentagem (25%) de rutura coesiva pela cola. Por último, aos 30 minutos, em ambas as formulações observam-se ruturas adesivas entre o cerâmico e a cola.

Os valores de tensão de aderência após 30 minutos de tempo aberto encontram-se abaixo do requisito mínimo imposto pela norma EN12004, no caso das formulações C1SG.02, C1SG.03, C1PSG.02 e CC.02. Apenas a formulação CC.01 supera o limite normativo de $0,5 \text{ N/mm}^2$.

5.3.2.2. *Variação de massa*

Para a determinação da variação de massa dos produtos endurecidos mediram-se valores após 28 e 56 dias de cura cujos resultados se encontram na Figura 5.18.

Normalmente, a maior perda de água por parte das argamassas ocorre nos primeiros dias de cura, ou seja, a variação de massa será maior aos 7 dias, cujo valor não foi possível determinar, pois os provetes foram desmoldados após 7 dias de cura.

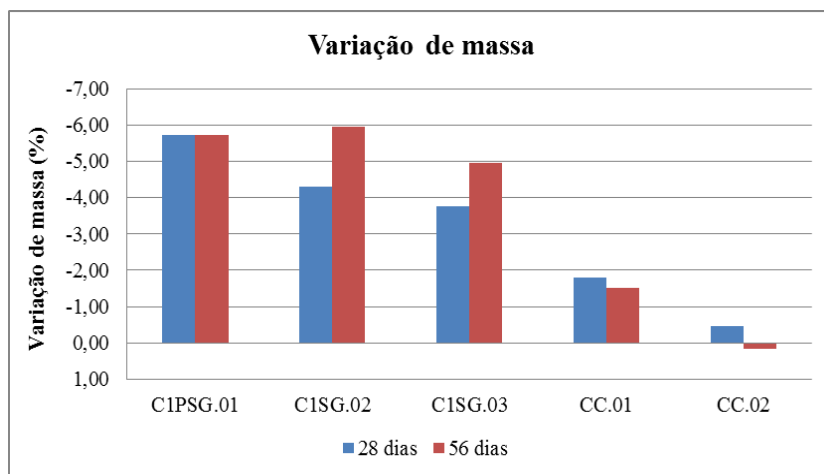


Figura 5.18 - Variação de massa após 28 dias e 56 dias

A variação de massa é mais acentuada nos casos em que se utiliza escória de alto-forno (GGBFS) e verifica-se que a tendência é a perda de massa ao longo do tempo de cura, à exceção de C1PSG.01 que não registou variação de massa entre os 28 dias e os 56 dias. A argamassa C1SG.03, com teor de água de amassadura superior ao da argamassa C1SG.02,

apresenta valores de variação de massa inferiores a esta última sugerindo processos de presa inicial mais rápidos.

A argamassa CC.01, apesar de ser a que possui uma percentagem de água de amassadura superior, obteve menor variação de massa em relação às argamassas anteriores. Novamente, tal pode significar um processo de presa mais rápido, capaz de permitir maior perda inicial de água, não medida na fase subsequente de ensaio. Poderá ainda, significar maior higroscopicidade pela presença de cimento, reduzindo a tendência à perda de água.

Por fim, verifica-se que CC.01 e CC.02 registaram um ganho de massa dos 28 dias para os 56 dias sendo mais acentuado na argamassa CC.02. Tal facto é explicado, teoricamente, pela absorção de vapor de água do meio ambiente ou pela ocorrência de carbonatação.

5.3.2.3. *Variação dimensional*

Na determinação da variação dimensional obtiveram-se valores aos 28 e 56 dias de cura cujos resultados se encontram no gráfico da Figura 5.19.

A variação dimensional está, normalmente, relacionada com a evaporação da água de amassadura associada a cada produto, com as reações de hidratação do cimento e com a carbonatação do hidróxido de cálcio. De uma forma geral, é possível constatar que existe um aumento da variação das dimensões dos provetes com o tempo de cura.

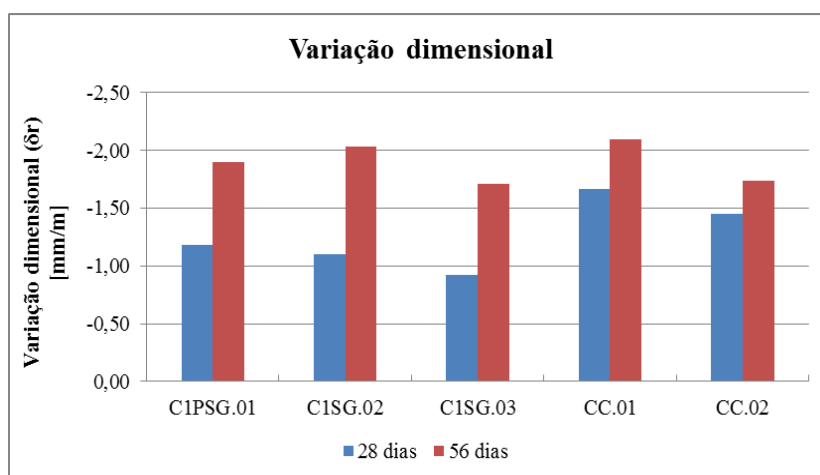


Figura 5.19 - Variação dimensional após 28 dias e 56 dias

As formulações que contêm cimento como base de ligante em maiores quantidades (CC.01 e CC.02), apresentam maior variação das suas dimensões ao fim de 28 dias. Num momento inicial, existe retração explicada pela evaporação de água durante o processo de cura dos

produtos. Nesta fase (28 dias), para além de ainda poder existir alguma perda de água, a esta estarão associadas as reações de hidratação do cimento e/ou a carbonatação do hidróxido de cálcio por reação com o CO₂. Após 56 dias, a argamassa CC.01 continua a manifestar valores de retração superiores.

Em relação às formulações onde se utilizou a GGBFS (C1PSG.01, C1SG.02 e C1SG.03), verifica-se que estas tiveram um comportamento semelhante entre si, sendo C1PSG.01 a que apresenta valores ligeiramente superiores após 28 dias de cura. O uso de GGBFS produz argamassas que sofrem menor retração aos 28 dias. No entanto, aos 56 dias, estas argamassas sofrem grande variação, chegando mesmo a valores muito próximos das argamassas de cimento. A presença do ativador alcalino nas formulações terá desencadeado as reações de hidratação da GGBFS fazendo com que as argamassas registassem grande variação das suas dimensões.

5.3.2.4. Massa volúmica aparente

Na Figura 5.20 apresentam-se os resultados obtidos após desmoldagem (7 dias), 28 dias e 56 dias na determinação da massa volúmica aparente.

A massa volúmica está relacionada com a perda de água durante o tempo de cura, que normalmente é mais acentuada entre a desmoldagem (após 24h) e os 7 dias havendo, por isso, uma diminuição aos 7 dias da massa volúmica aparente. Como a desmoldagem ocorreu após 7 dias de cura, não foi possível registar esse valor inicial. Para além da percentagem de água associada a cada produto, o arranjo da estrutura interna das argamassas, as características das matérias-primas utilizadas também têm a sua influência na determinação deste parâmetro.

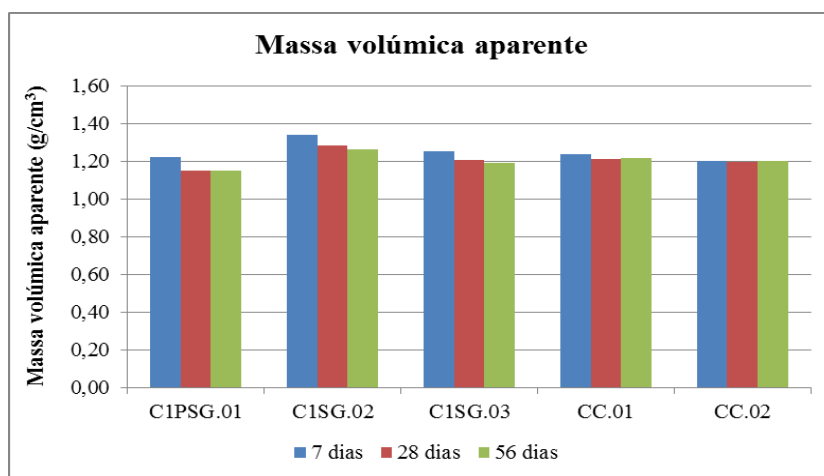


Figura 5.20 - Massa volúmica dos produtos endurecidos após 7 dias, 28 dias e 56 dias

Os valores obtidos são muito semelhantes ao das argamassas em pasta. De uma forma geral, é possível constatar que a densidade dos produtos endurecidos diminui com o tempo de cura, com tendência a estabilizar. Para além disso, os valores obtidos para as diferentes argamassas encontram-se muito próximos.

5.3.2.5. Módulo de elasticidade dinâmico

Na determinação do módulo de elasticidade dinâmico foram registados valores aos 7, 28 e 56 dias de cura para as várias argamassas em estudo. Na Figura 5.21 encontram-se os resultados obtidos.

O módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca dos materiais que permite a medição da sua rigidez que depende, entre outras coisas, da densidade. Assim, verifica-se que as formulações com densidade superior obtiveram resultados de módulo de elasticidade superiores.

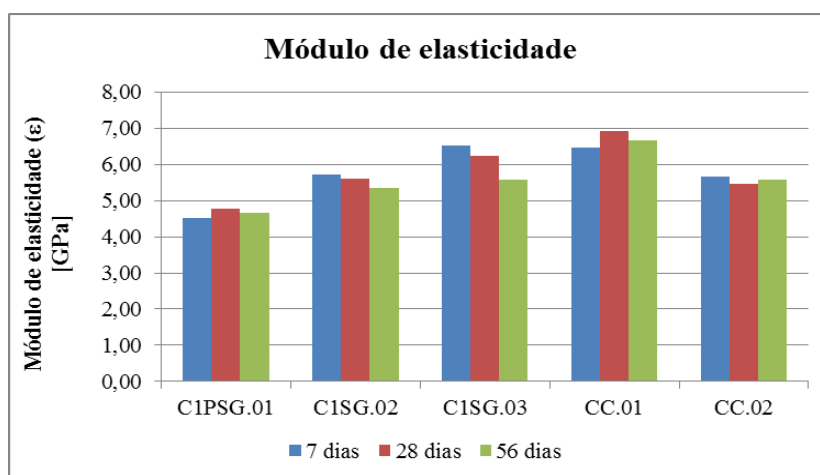


Figura 5.21 - Módulo de elasticidade após 7 dias, 28 dias e 56 dias

A argamassa CC.01, para além de ser um dos produtos que possui uma densidade superior, a sua formulação contém cimento OPC normal em grandes quantidades (> 40%) que, teoricamente lhe confere maior rigidez. Por isso, é a argamassa que apresenta valores de módulo de elasticidade superiores (à exceção do valor aos 7 dias em que C1SG.03 gerou um resultado ligeiramente superior). A formulação CC.02, contém uma quantidade considerável de cimento na sua formulação (18%), que assegura uma rigidez muito próxima à argamassa anterior.

As formulações C1SG.02 e C1SG.03 contêm uma pequena percentagem de cimento de presa rápida, que potencialmente, não é o que influencia a rigidez nesta situação. Assim, pode-se afirmar que a utilização da pozolana GGBFS em maiores quantidades e do ativador alcalino conferem boa rigidez aos materiais, ao ponto de os valores se encontrarem muito próximos das formulações que teoricamente apresentam maior rigidez (CC.01 e CC.02). Comparando C1SG.02 e C1SG.03, verifica-se que a adição do polímero redispersável também incrementa os valores de módulo de elasticidade.

A argamassa C1PSG.01 é o produto que apresenta menor densidade e, por isso, é a argamassa que apresenta menor rigidez.

De acordo com Veiga e Carvalho (2002), em contexto de reabilitação e por forma a garantir compatibilidade mecânica, as argamassas devem possuir módulos de elasticidade entre 2 GPa e 5 GPa. Verifica-se que C1PSG.01 é a única argamassa que se encontra dentro deste intervalo de valores, apresentando módulos de elasticidade entre os 4 GPa e 5 GPa. As restantes argamassas encontram-se acima do limite máximo deste intervalo, ainda que ligeiramente nos casos de C1SG.02 e CC.02.

5.3.2.6. Resistência à flexão

Na determinação da resistência à flexão obtiveram-se valores aos 28 e 56 dias de cura cujos resultados se encontram na Figura 5.22.

Com os resultados obtidos para o módulo de elasticidade era possível prever o que aconteceria nos ensaios mecânicos de resistência à flexão e à compressão, pelo simples facto das resistências mecânicas estarem relacionadas com a densidade e rigidez dos materiais. Assim, cruzando os resultados de resistência à flexão com os da massa volúmica aparente (densidade) e do módulo de elasticidade, verifica-se que as argamassas menos densas são as que apresentam menor rigidez e consequentemente resistência à flexão inferior.

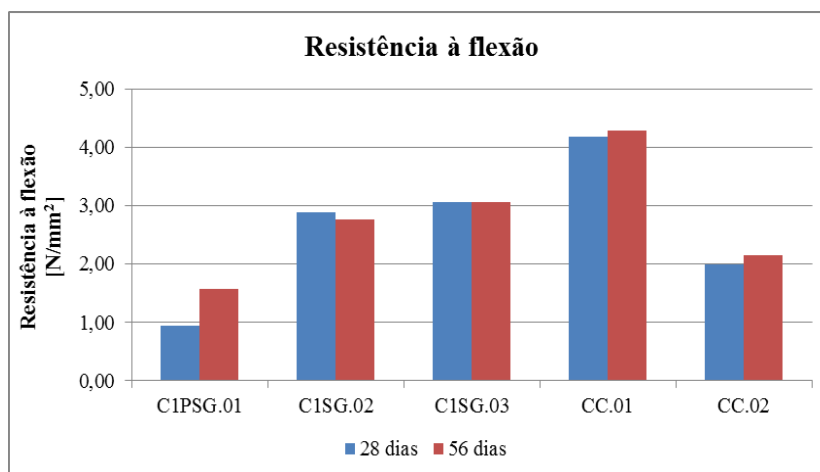


Figura 5.22 - Resistência à flexão após 28 dias e 56 dias

A argamassa CC.01 apresenta resistência à flexão superior para os dois tempos de cura, em relação aos restantes produtos. Para além de ser uma das argamassas mais densas, a presença de cimento em quantidades elevadas na sua formulação confere-lhe grande rigidez, conforme se constatou no ponto anterior (5.3.2.5). Verifica-se ainda que existe um ligeiro aumento dos valores dos 28 para os 56 dias.

A resistência à flexão das argamassas C1SG.02 e C1SG.03 segue a mesma tendência verificada na determinação do módulo de elasticidade. Estas argamassas apresentam elevada densidade e, conseqüentemente, grande rigidez o que assegura resultados satisfatórios ao nível de resistência à flexão. Assim, conforme se tem vindo a constatar, o uso de GGBFS em grandes quantidades e uma quantidade muito reduzida de cimento de presa rápida, conferem um bom comportamento mecânico. Entre C1SG.02 e C1SG.03, verifica-se que o uso do polímero redispersável melhora os resultados, ainda que ligeiramente.

Por outro lado, CC.02 apesar de conter uma percentagem alta de cimento na sua constituição o que lhe poderia conferir alguma rigidez, apresenta valores de resistência à flexão baixos com tendência para um ligeiro aumento aos 56 dias. Por último, a argamassa C1PSG.01, com densidade mais baixa e módulo de elasticidade igualmente mais baixo, obteve valores muito inferiores de resistência em relação às restantes, apresentando um aumento significativo aos 56 dias.

5.3.2.7. Resistência à compressão

Na determinação da resistência à compressão obtiveram-se valores aos 28 dias e 56 dias cujos resultados se encontram na Figura 5.23.

A resistência à compressão, assim como à flexão, está relacionada com a densidade e rigidez dos materiais. Por isso, também nesta situação, argamassas menos densas/compactas obtêm resistências à compressão inferiores. Pela análise do gráfico, verifica-se de imediato que os resultados obtidos para a resistência à compressão seguiram praticamente a mesma tendência dos anteriormente obtidos para a flexão.

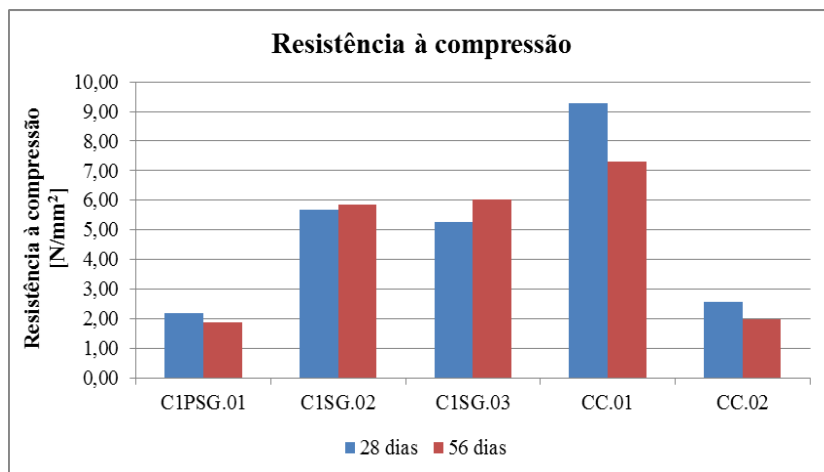


Figura 5.23 - Resistência à compressão aos 28 dias e 56 dias

A argamassa CC.01, que conforme se verificou anteriormente, possui elevada rigidez e por isso, apresenta resultados de resistência à compressão superiores em relação às restantes argamassas em estudo. Ao contrário do que aconteceu na resistência à flexão, os valores têm tendência a diminuir dos 28 dias para os 56 dias.

As argamassas C1SG.02 e C1SG.03, que possuem valores de densidade e de rigidez muito próximos, apresentam níveis de compactação e de resistência à compressão igualmente próximos, sendo superiores a CC.02 e C1PSG.01. Nesta situação, o uso do polímero redispersável apenas melhora, ligeiramente, os valores aos 56 dias. No entanto, existe uma predisposição para que a resistência à compressão aumente com o tempo de cura.

No caso da argamassa CC.02, apesar de ter uma densidade muito semelhante a CC.01, apresentou uma rigidez inferior a este último o que originou valores de resistência à compressão inferiores. Por outro lado, a argamassa C1PSG.01 apesar de conter cimento OPC em maior quantidade que a gama C1SG, é a menos densa e a que apresenta uma rigidez inferior, conforme se tinha verificado anteriormente, por isso, apresenta valores de resistência à compressão inferiores. Estes valores tendem a diminuir ligeiramente dos 28 dias para os 56 dias.

De acordo com os requisitos de compatibilidade mecânica, indicados pela norma EN998-1, as argamassas C1PSG.01 e CC.02, encontram-se no limite do requisito máximo (2,5 MPa) indicado para argamassas da categoria CSI apresentado pelo Caderno de Edifícios 2 para rebocos exteriores, apesar de serem argamassas que contém cimento. No entanto, também cumprem com o requisito da categoria CSII. Verifica-se que a argamassa CC.01 apresenta valores significativamente superiores aos requisitos o que mostra incompatibilidade mecânica com os suportes antigos. As argamassas C1SG.02 e C1SG.03 encontram-se no limite do requisito máximo (5 MPa) indicado para argamassas da categoria CSII.

É sabido que as resistências dependem também da porosidade dos materiais e apesar de não ter sido determinada, é possível através dos resultados dos ensaios mecânicos e da densidade estimar quais as argamassas mais porosas. Argamassas mais porosas produzem materiais menos resistentes (Pandey e Sharma, 2000). Assim, pode-se afirmar que C1PSG.01 será a mais porosa, seguida de CC.02, C1SG.02, C1SG.03 e por último CC.01.

5.3.2.8. Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Na determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade foram obtidos resultados, aos 28 e 56 dias de cura para as várias argamassas, que se apresentam na Figura 5.24.

Normalmente, o coeficiente de capilaridade está relacionado com a porosidade dos materiais (Botas, 2009). Atendendo, ao que foi discutido anteriormente, C1PSG.01 terá maior capacidade de absorção de água e CC.01 menor.

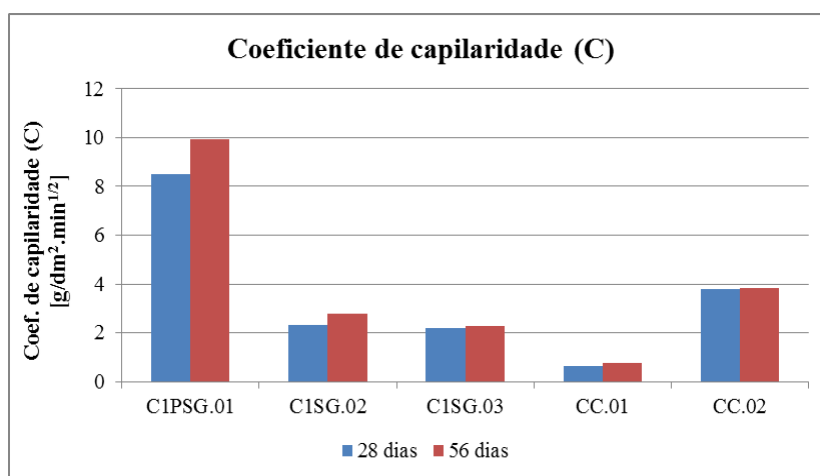


Figura 5.24 - Coeficiente de capilaridade aos 28 dias e 56 dias

De uma forma geral, verifica-se que o coeficiente de capilaridade (C) tende a aumentar com o tempo de cura ainda que de forma pouco significativa na maioria dos casos. A argamassa C1PSG.01, sendo considerada a formulação com estrutura mais porosa, é a que apresenta, ao fim de 28 e 56 dias de cura, resultados para o coeficiente de capilaridade significativamente superiores em relação às restantes. Por outro lado, a argamassa CC.01 apresenta valores inferiores devido à sua elevada densidade/baixa porosidade e também à presença de polímero redispersável na sua constituição em elevada percentagem, que dificulta a absorção de água.

As argamassas C1SG.02 e C1SG.03, que apresentam valores de densidade muito próximos, possuem coeficientes de capilaridade muito semelhantes entre si. No entanto, C1SG.03 apresenta valores ligeiramente inferiores, por conter na sua formulação uma pequena percentagem de polímero redispersável que conforme se afirmou para CC.01, dificulta a absorção de água.

Por último, a argamassa CC.02, ainda que possua densidade semelhante a CC.01 e C1SG.03, carece de elementos na sua estrutura que impede a absorção de água por capilaridade (como por exemplo, o polímero redispersável). Assim sendo, o coeficiente de capilaridade é superior a estas últimas.

De acordo com Veiga e Carvalho (2002) os valores do coeficiente de capilaridade, para cumprir com os requisitos com o limite de compatibilidade física, devem ser superiores a $10 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ e inferiores a $15 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Pela análise dos resultados, apenas C1PSG.01 atinge um valor próximo de $10 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, enquanto as restantes argamassas se encontram muito abaixo destes requisitos, mostrando incompatibilidade física com os suportes antigos.

Por outro lado, a norma EN998-1 indica que os valores de coeficiente de capilaridade devem ser superiores a $0,3 \text{ kg/m}^2$ após 24 horas. Traduzindo os resultados obtidos em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ verifica-se que logo após o ensaio este requisito é satisfeito, pois todos os valores são superiores a $0,3 \text{ kg/m}^2$ logo aos 90 minutos.

5.3.2.9. Permeabilidade ao vapor de água

Na Figura 5.25, apresentam-se os resultados obtidos na determinação da permeabilidade ao vapor de água, após 28 dias de cura para as diferentes argamassas em estudo.

A porosidade e a densidade dos materiais influenciam a resistência das argamassas à passagem do vapor de água, uma vez que quanto menor a porosidade (ou maior a densidade) mais difícil se torna a passagem do vapor de água através da microestrutura dos materiais.

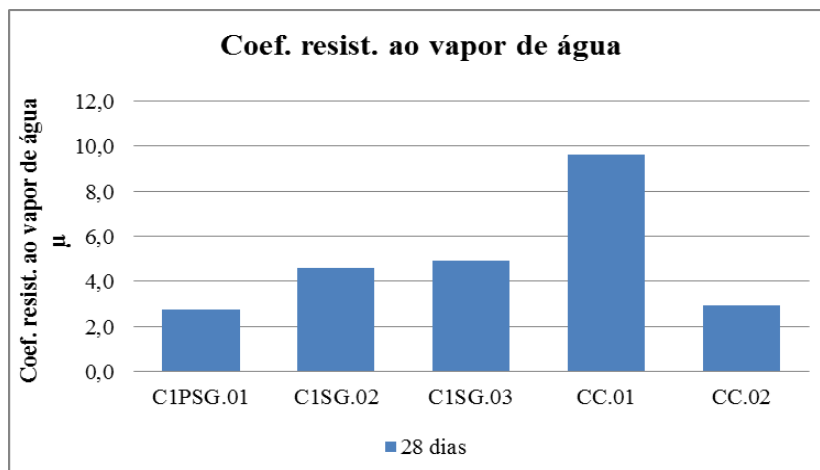


Figura 5.25 - Resultados do coeficiente de resistência ao vapor de água

Pela análise do gráfico, constata-se que as argamassas que oferecem menor resistência à passagem do vapor de água são a C1PSG.01 e CC.02 visto que, como anteriormente se analisou são os materiais mais porosos.

As argamassas C1SG.02, C1SG.03 e CC.01 são as mais densas e segundo os resultados de resistência mecânica, podem ser consideradas como as menos porosas oferecendo maior resistência à passagem do vapor de água. Comparando C1SG.02 e C1SG.03, verifica-se que C1SG.03 apresenta uma resistência ligeiramente superior por conter na sua formulação uma pequena percentagem de polímero redispersável, que a pode tornar mais resistente à passagem do vapor de água. No caso de CC.01, para além da sua elevada densidade, a presença de polímero redispersável em maior quantidade poderá promover uma resistência muito superior em relação aos restantes produtos.

Não obstante, todos os casos apresentam coeficiente de permeabilidade ao vapor de água muito compatíveis com exigências típicas de reabilitação, ou seja, com valores inferiores a 15, de acordo com a norma EN998-1 (CEN).

5.3.2.10. Ensaio de resistência aos sais

Os resultados obtidos para a percentagem de cloretos retida inicialmente, e da variação de massa ao longo de 10 ciclos apresentam-se na Tabela 5.21 e na Figura 5.26, respetivamente.

Tabela 5.21 - Percentagem de cloretos retida inicialmente

% DE CLORETOS RETIDA INICIALMENTE				
C1PSG.01	C1SG.02	C1SG.03	CC.01	CC.02
-0,62	-1,08	-1,16	-1,65	-0,55

Os resultados obtidos para a percentagem de cloretos retida inicialmente sugerem que as argamassas têm uma capacidade mínima de retenção. A massa inicial dos provetes é superior à massa obtida após secagem a 70° C e, por isso, os valores apresentados na tabela anterior são negativos.

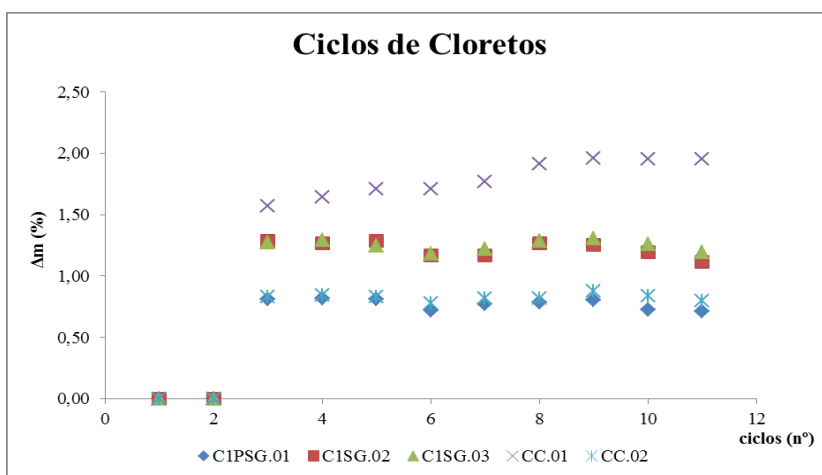


Figura 5.26 - Resultados dos ciclos de cloretos para as diferentes argamassas até 10 ciclos

Os resultados obtidos para a variação de massa, durante 10 ciclos de sujeição aos sais de sulfatos apresentam-se na Figura 5.27.

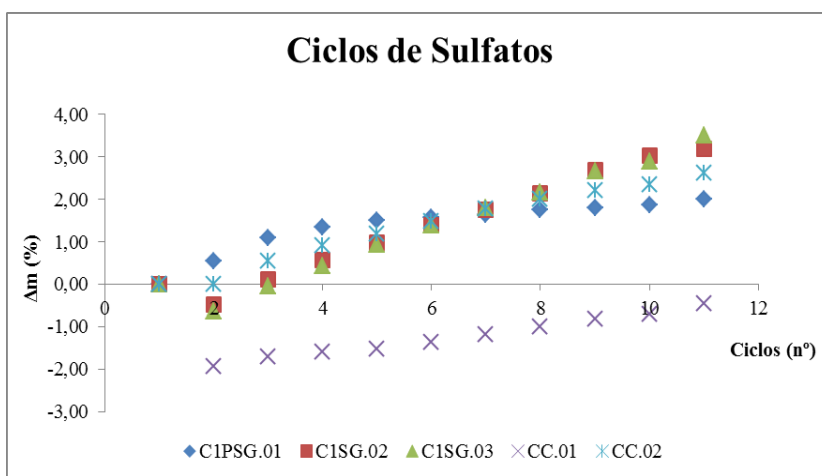


Figura 5.27 - Resultados dos ciclos de sulfatos para as diferentes argamassas até 10 ciclos

Através dos resultados obtidos, não é possível apurar quais as argamassas mais resistentes aos sais. Ao fim de 10 ciclos, não se verifica degradação dos provetes por ação dos sais de cloretos e dos sais de sulfatos, para qualquer das argamassas avaliadas.

Freitas et al. (2014) referem que a situação ideal, relativamente à compatibilidade química, é que as argamassas resistam à sujeição de sais de cloretos e de sulfatos num número de ciclos superior a 5 ciclos, sendo assim, aceitável considerar que as mesmas são duráveis deste ponto de vista.

5.3.2.11. Avaliação da estabilidade entre as argamassas-cola e a cerâmica tradicional

Para a avaliação da estabilidade entre as argamassas-cola em estudo e a cerâmica “Viúva Lamego” foi realizado o ensaio de absorção de água por capilaridade após 7 dias de cura e durante o (48 horas), foram registados os valores da massa dos provetes após 10, 30, 60, e 90 minutos, 3 horas, 5 horas, 8 horas, 24 horas e 48 horas. Os resultados obtidos após 48h de ensaio encontram-se no gráfico da Figura 5.28.

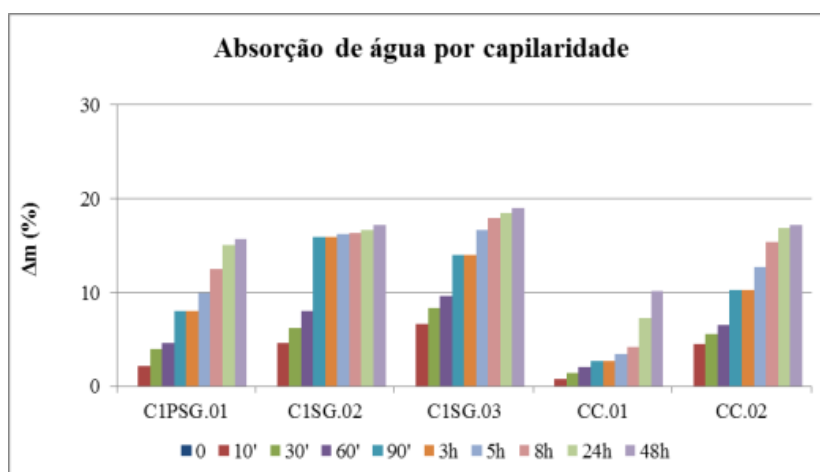


Figura 5.28 - Absorção de água por capilaridade das argamassas em estudo barradas nas peças 7x7cm






Pela análise do gráfico, verifica-se que todas as argamassas em estudo absorveram água pois, a percentagem de massa dos provetes vai aumentando à medida que o ensaio decorre.

Através da observação do vidro das diferentes peças verificou-se o aparecimento de algumas manchas. Na Tabela 5.22, apresentam-se os resultados obtidos através da observação visual do vidro e respetivo registo fotográfico, por forma a apurar incompatibilidades.

A argamassa C1PSG.01 gerou, potencialmente, maior incompatibilidade com o azulejo tradicional, com aparecimento de várias manchas de cor amarela e branca. As argamassas

C1SG.02 e CC.01 não mostraram afetação significativa comparativamente a C1PSG.01, com aparecimento de duas manchas pequenas de cor branca e uma mancha pequena de cor branca, respetivamente. A argamassa C1SG.03, não gerou qualquer tipo de incompatibilidade. A argamassa CC.02 apresenta uma mancha um pouco diferente, em princípio, do próprio cerâmico.

Tabela 5.22 - Resultados da observação do vidro e respetivo registo fotográfico

<i>Fórmulas</i>	<i>Resultado (observação visual)</i>	<i>Registo fotográfico</i>
C1PSG.01	(-)	
C1SG.02	(0)	
C1SG.03	(+)	
CC.01	(0)	
CC.02	(0)	

(-): afetação significativa (com várias manchas); (0): sem afetação significativa (manchas pontuais, até 2 casos); (+): sem afetação (sem manchas)

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Com o trabalho presente, pretende-se desenvolver uma argamassa-cola compatível com os suportes antigos a reabilitar, na fixação de cerâmicos porosos, que cumpra com os requisitos da EN12004, atualmente em vigor.

O estudo realizado às argamassas com base em cal aérea e cal hidráulica natural (NHL5), mostrou que, apesar da sua compatibilidade com os sistemas antigos, os requisitos mínimos apresentados pela EN12004 não são satisfeitos. Por outro lado, as argamassas com base em cimento cumprem com as exigências normativas, ainda que o ligante usado seja teoricamente menos compatível com os suportes.

A avaliação da reatividade pozolânica em argamassas de cal permitiu definir de uma forma geral que a GGBFS e a MKDP foram as pozolanas que apresentaram melhor comportamento mecânico e maior reatividade. A introdução do ativador alcalino melhorou os resultados das resistências iniciais de todas as argamassas, bem como nos restantes modelos de ensaio, para as diferentes condições de cura. É ainda importante referir, que as pozolanas possuem maior reatividade quando imersas em água.

A substituição parcial do cimento por MKDP mostrou que a obtenção de uma presa razoável, exigiu uma quantidade mínima de cimento (10%), preferencialmente com metade a corresponder a um cimento de presa rápida. Por outro lado, através de ensaios de resistência à tração perpendicular, verifica-se que o uso da MKDP, relativamente a uma argamassa padrão sem essa pozolana (C1G3.00), afeta positivamente os valores de resistência. No entanto, quantidades superiores de MKDP não conduzem a resultados superiores.

Relativamente à substituição com GGBFS, mostrou-se mais eficaz que MKDP, conforme era expectável, devido à sua reatividade ser mais alta. Quando se utilizam percentagens de OPC de 10% e 7,5%, combinado com a GGBFS, obtém-se argamassas com tempos de presa muito longos mas quando sujeitas a ensaios de resistência à tração perpendicular atingem valores acima dos exigidos pela EN12004. Com os resultados obtidos pode-se afirmar que, 7,5% de OPC se apresenta como a concentração mínima razoável para afetação dos valores de aderência.

No caso em que se utiliza cerca de 5% de OPC de presa rápida com GGBFS, produzem-se argamassas com tempos de presa mais aceitáveis (< 24h). Em relação aos ensaios de

aderência, verificou-se que com uma concentração de 1% de ativador alcalino (C1SG.02), se obtém valores de resistência acima das exigências normativas em todos os modelos de ensaio, com exceção, após ação do calor na utilização do cerâmico não poroso. Por forma a melhorar esse valor, foi introduzido o polímero redispersável (C1SG.03), que se mostrou um pouco eficaz, mas afetou negativamente os restantes valores bem como, o tempo de presa. De uma forma geral, verifica-se que quanto maior a quantidade de ativador alcalino, melhores são os resultados obtidos em cada momento de ensaio.

As argamassas C1PSG.01, C1SG.02 e C1SG.03 que, do ponto de vista normativo, obtiveram resultados satisfatórios e em conjunto com CC.01 e CC.02 produzidas pela SGW, foram avaliadas essencialmente, ao nível das propriedades físicas, mecânicas e químicas.

O módulo de elasticidade e as resistências mecânicas, dependem fundamentalmente da densidade dos materiais. Sendo que, argamassas mais densas reproduzem produtos mais rígidos e mais resistentes. As argamassas CC.01, C1SG.02 e C1SG.03 apresentaram valores de resistência à flexão e à compressão superiores. E atendendo aos resultados obtidos, demonstra que a introdução de GGBFS em grandes quantidades, produz argamassas com densidade e rigidez semelhante a argamassas com base em cimento.

A absorção de água por capilaridade, encontra-se relacionada com a porosidade das argamassas, e apesar de esta não ter sido determinada no presente trabalho, é possível verificar quais as argamassas mais porosas através dos ensaios de resistência mecânica. CC.02 e C1PSG.01 são as argamassas que se podem identificar como as mais porosas e consequentemente, absorvem mais quantidade de água. A presença de polímero redispersável em C1SG.03 influencia, ainda que ligeiramente, os valores desse coeficiente, dificultando a absorção de água.

A permeabilidade ao vapor de água é tanto menor, quanto menor for a porosidade. Assim, as argamassas CC.01, C1SG.03 e C1SG.02 apresentam um coeficiente de resistência ao vapor de água superior enquanto, C1PSG.01 e CC.02 sendo as mais porosas, permitindo a passagem do vapor de água por difusão, obtiveram resistência inferior.

As argamassas estudadas, à exceção de C1SG.03, mostraram alguma incompatibilidade com o cerâmico tradicional utilizado.

Como conclusão final, comprova-se a dificuldade anunciada para a compatibilização das argamassas de colagem ao nível de: compatibilidade com sistemas antigos e garantia/cumprimento da EN12004.

A argamassa de cimento CC.01 tem um excelente comportamento ao nível físico e mecânico e cumpre com as exigências normativas da EN12004. No entanto, essas características não cumprem com os requisitos de compatibilidade em relação aos suportes antigos, assim como a nível químico devido à elevada concentração de cimento presente. As argamassas sem OPC normal (C1SG.02 e C1SG.03) com base em ligantes potencialmente mais compatíveis com as paredes antigas, apresentam valores satisfatórios, do ponto de vista da EN12004 à exceção do tempo aberto. Para além disso, à semelhança de CC.01, demonstraram bom comportamento ao nível físico e mecânico mas também não satisfazem os requisitos de compatibilidade.

A argamassa de cimento CC.02 e a argamassa com OPC normal e GGBFS (C1PSG.01), do ponto de vista mecânico não diferem muito das anteriores, à exceção de CC.01, e apesar de apresentarem valores inferiores ao nível da avaliação física, cumprem com os requisitos exigidos pela EN 12004 e com os requisitos de compatibilidade com os suportes antigos. No entanto, a presença de cimento poderá introduzir sais no sistema.

Das soluções avaliadas, a obtenção de todos os requisitos mínimos segundo a EN 12004 em conjunto com os requisitos de compatibilidade mecânica, química e física com os suportes antigos, é apenas conseguida quando se tem um mínimo de OPC de 7,5%. Para já, face aos resultados, segue uma proposta de formulação que se considera razoável:

- OPC, I, 42,5 entre 15 e 25%
- Polímero redispersável entre 1 e 2%
- Pozolanas entre 5 e 10%

Numa perspetiva de trabalho futuro, poder-se-ia proceder à reformulação da argamassa C1SG.02 e/ou C1SG.03, por forma a melhorar algumas propriedades e alguns valores de aderência que, neste estudo, não cumpriram com os requisitos da EN12004 particularmente, a correção do tempo aberto e do tempo de presa, fatores muito condicionantes do processo de aplicação *in situ*. Também interessa avaliar se as adições pozolânicas, em particular a GGBFS, não poderão constituir elas próprias fontes de sais solúveis, dado que a sua origem é, potencialmente, originadora dos mesmos, além da questão do ativador alcalino que, ele

próprio é um sal. Por fim, o estudo da possibilidade de adaptação da norma EN 12004 criando novas classes ao nível normativo para corresponder a este tipo de situações estudadas.

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdullah, A.;Jaafar, M. S.;Taufiq-Yap, Y. H.;Alhozaimy, A.;Al-Negheimish, A. (2012). "The effect of various chemical activators on pozzolanic reactivity: a review." Scientific Research and Essays. Vol. 7: Pg. 719-729.

Agostinho, C. S. A. (2008), *Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico/Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Ahmadi, B.;Shekarchi, M. (2010). "Use of a natural zeolite as a supplementary cementitious material." Cement & Concrete Composites. Vol. 32: Pg. 134-141.

Al-Chaar, G. K.;Alkadi, M.;Asteris, P. G. (2013). "Natural pozzolan as a partial substitute for cement in concrete." The open construction and building technology journal. Vol. 7: Pg. 33-42.

Alhozaimy, A.;AL-Negheimish, A.;Alawad, O. A.;Jaafar, M. S.;Noorzaei, J. (2012). "Binary and ternary effects of ground dune sand and blast furnace slag on compressive strength of mortar." Cement & Concrete Composites. Vol. 34: Pg. 734-738.

Barnett, S. J.;Soutsos, M. N.;Millard, S. G.;Bungey, J. H. (2006). "Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: effect of curing temperature and determination of apparent activation energies." Cement and Concrete Research. Vol. 36: Pg. 434-440.

Bauer, L. A. F. (1995). *Materiais de Construção I. LTC - Livros Técnicos e Científicos*, Editora S.A., 5ªEd., Rio de Janeiro.

Bento, J. J. J. (2010), *Patologias em revestimentos cerâmicos colados em paredes interiores de edifícios*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Botas, S. M. d. S. (2009), *Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios*, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Botelho, P. C. (2003), *Argamassas tradicionais em suportes de alvenaria antiga: comportamento em termos de aderência e durabilidade*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico/Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Caputo, D.;Liguori, B.;Colella, C. (2008). "Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: the effect of zeolite structure." Cement & Concrete Composites. Vol. 30: Pg. 455-462.

Cavaco, L. S. (2005), *Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos: influência no desempenho*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico/Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

CEN - *Adhesives for tiles: requirements, evaluation of conformity, classification and designation*. EN12004:2007.

CEN - *Especificações de argamassas para alvenarias Part 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. NP EN 998-1:2013.

Chew, M. Y. L. (1999). "Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding." Construction and Building Materials. Vol. 13: Pg. 293-296.

Cóias, V.;Mateus, L.;Santos, M. (2008). *Reabilitação: Oportunidades e Ameaças*. 2^{as} Jornadas de Engenharia Civil, Aveiro.

Costa, L. L. (2008), *O uso de argamassas tradicionais e pré-doseadas para impermeabilização em revestimentos exteriores*, Tese de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

Coutinho, A. S. (1997). *Fabrico e propriedades do betão*. Volume 1 - Propriedades das matérias-primas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

EMODico (2001), *Dicionário técnico*, 3^a Ed. European Mortar Industry Organisation.

Fernandes, F. J. C. (2000). *O Azulejo - um olhar no alto minho e baixo litoral*. Centro de Estudos Regionais, Viana do Castelo.

Ferreira, M. I. M. (2009). *Azulejos tradicionais de fachada em Ovar: contributos para uma metodologia de conservação e restauro*. Ed. Câmara Municipal de Ovar, Ovar, Aveiro.

Freitas, V.;Freire, C.;Silva, L.;Vieira, N. (2014). *Rehabilitation walls of ancient buildings, meeting the termal requirements and maintaining the architectural façades*. 9th International Masonry Conference, Guimarães.

Isidro, S. (2012). *Outdoor portuguese glazed ceramic tiles (AZULEJOS): some degradation patterns*. Congresso Internacional Azulejar, Ovar, Aveiro.

Jenni, A.;Holzer, L.;Zurbriggen, R.;Herwegh, M. (2005). "Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cimentitious tile adhesive mortars." Cement and Concrete Research. Vol. 35: Pg. 35-50.

Linhares, P. F. (2011), *Avaliação de ligantes minerais em argamassas-cola*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Marques, S. M. F. (2005), *Estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Martins, J. G.;Paiva, P. A. (2010). *Materiais de Construção I*. Universidade Fernando Pessoa, Porto.

Mimoso, J. M.;Pereira, S. M.;Esteves, M. L.;Silva, S. A. (2012). *A tour of façade azulejos decay in Lisbon*. Congresso Internacional Azulejar, Ovar, Aveiro.

Palomo, A.;Grutzeck, M. W.;Blanco, M. T. (1999). "Alkali-activated fly ashes. A cement for the future." Cement & Concrete Research. Vol. 29: Pg. 1323-1329.

Pandey, S. P.;Sharma, R. L. (2000). "The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar." Cement & Concrete Research. Vol. 30: Pg. 19-23.

Paulo, R. S. V. (2006), *Caracterização de argamassas industriais*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Perraki, T.;Kontori, E.;Tsivilis, S.;Kakali, G. (2010). "The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements." Cement & Concrete Composites. Vol. 32: Pg. 128-133.

PNS, Palácio Nacional de Sintra. Retirado a 22 de Novembro, 2012, de <http://pnsintra.imc-ip.pt>.

Rodrigues, M. P. S. F. d. F. (2004), *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: contribuição para o estudo da influência dos ligantes*, Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Rodrigues, T.;Velosa, A.;Cachim, P. (2012). *Mechanical properties of mortar/glazed tile interfaces*. Congresso Internacional Azulejar, Ovar, Aveiro.

Rosa, L.;Vieira, E.;Coroado, J. (2012). *Conceitos e critérios em conservação e restauro de revestimentos azulejares de interior*. Congresso Internacional Azulejar, Ovar, Aveiro.

Sá, A. M. V. (2005), *Durabilidade de cimentos-cola em revestimentos cerâmicos aderentes a fachadas*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Sabir, B. B.;Wild, S.;Bai, J. (2001). "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review." Cement & Concrete Composites. Vol. 23: Pg. 441-454.

Santos, A. R.;Veiga, M. R. (2012). *Argamassas compatíveis para edifícios antigos*. Engenharia para a sociedade: investigação e inovação - cidades e desenvolvimento, LNEC, Lisboa.

Shi, C.;Day, R. L. (2000). "Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators - Part I. Reaction kinetics." Cement & Concrete Research. Vol. 30: Pg. 51-58.

Shi, C.;Day, R. L. (2001). "Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans." Cement & Concrete Research. Vol. 31: Pg. 813-818.

Silvestre, J. D. (2005), *Sistemas de apoio à inspeção e diagnóstico de anomalias em revestimentos cerâmicos aderentes*, Tese de Mestrado em Construção, Universidade Técnica de Lisboa/Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Silvestre, J. D.;Brito, J. (2011). "Ceramic and tiling in building façades: Inspection and pathological characterization using an expert system." Construction and Building Materials. Vol. 25: Pg. 1560-1571.

Tsai, C.-J.;Huang, R.;Lin, W.-T.;Wang, H.-N. (2014). "Mechanical and cementitious characteristics of ground granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag blended mortar." Materials and Design. Vol. 60: Pg. 267-273.

Valente, C. S. S. (2008), *Conservação de fachadas azulejadas em Ovar: comportamento face à água*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Veiga, M. R. (2003). *Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes*. 3º ENCORE - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, LNEC, Lisboa.

Veiga, M. R. (2012). *Argamassas de conservação como elementos multifuncionais e dinâmicos. O caso das argamassas para conservação de revestimentos azulejados*. Congresso Internacional Azulejar, Ovar, Aveiro.

Veiga, M. R.;Carvalho, F. (2002), *Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos: requisitos e características a respeitar*, Caderno de Edifícios 2, LNEC.

Veiga, M. R.;Tavares, M. (2002). *Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura*. Actas do Encontro: A indústria das tintas no início do século XXI, Lisboa, APTETI.

Velosa, A. L.;Mariz, L.;Ferreira, M. I. M. (2012). *Manual de materiais e técnicas tradicionais de assentamento de azulejos de fachada*. Câmara Municipal de Ovar, Ovar, Aveiro.

Velosa, A. L. P. L. (2006), *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro.