

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



Aos meus pais e irmãos,



## RESUMO

As crescentes preocupações relacionadas com a sustentabilidade do edificado ao longo do seu ciclo de vida condicionam cada vez mais a escolha e seleção dos materiais e sistemas para a construção e reabilitação de edifícios.

O reaproveitamento de resíduos provenientes de várias indústrias deve ser assumido como uma aposta estratégica do setor dos materiais de construção, existindo já registos de vários casos de sucesso relacionados com a incorporação de resíduos em argamassas, betões e materiais para pavimentação.

Este trabalho pretende avaliar a viabilidade da incorporação de resíduos provenientes de indústrias da região em argamassas de colagem e de reboco, substituindo-os parcialmente pelo ligante da argamassa, minimizando os seus custos de produção e o impacto ambiental provocado pela produção de cimento. Confeccionaram-se, ainda, argamassas tradicionais sem incorporação de resíduos e argamassas industrializadas, permitindo uma análise comparativa dos resultados.

Globalmente, na comparação de resultados, verificou-se que a incorporação de cinzas de biomassa e lamas de cal nas argamassas, apesar de reduzirem as suas resistências mecânicas, fizeram aumentar a tensão de arrancamento por tração nas misturas.



## **ABSTRACT**

The increasing concerns regarding buildings' sustainability throughout their lifecycle are a decisive criteria for systems and materials selection, both for new construction and rehabilitation.

The reuse of regional industries waste in bonding mortars and plastering mortars, partially replacing the mortar's binder, thus minimizing the production costs and the environmental impact cement production was tested and evaluated. Traditional and industrialized mortars were also made, without waste incorporation, allowing for a comparative analyses of the results.

Analysing the results, it was verified that the incorporation of ashes from biomass and papermaking sludge in the mortars increased the pullout tension in the mixtures, despite decreasing other mechanical resistances.



## **PALAVRAS CHAVE**

Sustentabilidade

Reaproveitamento

Resíduos

Argamassas



## KEY WORDS

Sustainability

Reuse

Waste

Mortar



## AGRADECIMENTOS

Este trabalho concretizou-se graças à ajuda e apoio de algumas pessoas, pelo que desejo os meus sinceros agradecimentos a todos os que me auxiliaram na sua realização.

Quero agradecer aos meus orientadores Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida e Paulo Alexandre da Silveira Costeira Marques da Silva pela disponibilidade, orientação, incentivo e dedicação prestada durante a realização de todas as fases deste trabalho.

Ao Eng.º Marco Filipe e Marco Vinhanova, um especial agradecimento pela ajuda nos ensaios laboratoriais, apoio e incentivo ao longo de todas as fases do trabalho.

À professora Isabel Brás pela cedência dos resíduos em estudo, pela paciência, apoio e ajuda nos ensaios laboratoriais.

Ao longo desta caminhada não posso deixar de agradecer a todos os meus colegas de curso, desde a licenciatura até ao mestrado, pela amizade e companheirismo, um especial agradecimento ao Daniel Coelho, João Oliveira, Pedro Cordeiro, Tiago Costa, Ricardo Costa, e Liliana Costa.

Quero de forma destacada agradecer aos meus pais e irmãos, sem eles nada disto seria possível.

À minha namorada Patrícia Paíga pelo amor, por todo o apoio e incentivo durante este percurso.

Ao meu melhor amigo João Pedro Oliveira pela amizade incondicional durante todos estes anos.

À empresa Almeida, Cunha & Chaves Lda. (A.C.C.) pela cedência dos blocos térmicos e à empresa Rocha & Chaves, S.A. (Viseu) pela cedência dos ladrilhos cerâmicos e cimento-cola.



# ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xvii
ÍNDICE DE QUADROS .....	xix
1. Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos do trabalho .....	2
1.3 Estrutura e organização da dissertação .....	2
2. Estado da Arte .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Argamassas de reboco .....	6
2.2.1 Constituição / Soluções .....	6
2.2.2 Formulação .....	7
2.2.3 Traço .....	8
2.2.4 Propriedades .....	8
2.2.5 Ensaios .....	11
2.3 Argamassas de colagem .....	12
2.3.1 Constituição / Soluções .....	12
2.3.2 Formulação .....	12
2.3.3 Traço .....	13
2.3.4 Propriedades .....	14
2.3.5 Ensaios .....	15
2.4 Argamassas com incorporação de resíduos .....	16
2.4.1 Viabilidade de argamassas com resíduos .....	16
2.4.2 Estudos anteriores sobre argamassas com incorporação de resíduos .....	16
2.5 Síntese do capítulo .....	20
3. Caracterização dos Materiais .....	21
3.1 Agregados .....	21

3.1.1	Introdução .....	21
3.1.2	Análise granulométrica .....	21
3.1.3	Determinação da baridade e do volume de vazios .....	24
3.1.4	Determinação do teor de humidade .....	27
3.2	Ligantes .....	28
3.2.1	Cimento Portland de calcário CEM II/ B-L 32,5 N .....	28
3.2.2	Cal hidráulica HL 5 .....	29
3.3	Resíduos .....	30
3.3.1	Cinzas de biomassa .....	30
3.3.2	Lamas de cal.....	32
3.3.3	Lamas de crómio.....	34
3.3.4	Caracterização química dos resíduos em estudo.....	34
3.4	Síntese do capítulo.....	36
4.	Análise Preliminar de Sensibilidade .....	37
4.1	Introdução.....	37
4.2	Preparação das argamassas.....	37
4.3	Ensaio mecânicos.....	43
4.3.1	Determinação da resistência à flexão.....	43
4.3.2	Determinação da resistência à compressão .....	44
4.4	Resultados e análise crítica.....	45
4.4.1	Resistência à flexão.....	46
4.4.2	Resistência à compressão .....	48
4.5	Síntese do capítulo.....	50
5.	Campanha Experimental e Análise de Resultados.....	51
5.1	Introdução.....	51
5.2	Construção da parede de alvenaria .....	52
5.3	Estudo e aplicação dos cimentos-cola .....	54
5.3.1	Metodologia .....	54
5.3.2	Colagem dos ladrilhos cerâmicos .....	56
5.3.3	Resistência à flexão.....	59
5.3.4	Resistência à compressão .....	61
5.3.5	Arrancamento por tração ( <i>Pull-off</i> ).....	63

5.3.6	Ensaio de lixiviação.....	68
5.4	Estudo e aplicação das argamassas de reboco .....	72
5.4.1	Metodologia.....	72
5.4.2	Aplicação das argamassas sobre o suporte .....	74
5.4.3	Resistência à flexão .....	76
5.4.4	Resistência à compressão .....	77
5.4.5	Influência da relação água/ligante nos ensaios mecânicos.....	78
5.4.6	Arrancamento por tração ( <i>Pull-off</i> ) .....	79
5.4.7	Ensaio de lixiviação.....	80
5.5	Síntese do capítulo .....	81
6.	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....	83
6.1	Conclusões gerais .....	83
6.2	Desenvolvimentos futuros .....	84
	Referências .....	87
	Apêndice 1 – Resultados dos ensaios nos cimentos-cola.....	93
	Apêndice 2 – Resultados dos ensaios nas argamassas de reboco.....	97



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Patologias mais frequentes em rebocos monomassa: a) Visualização das juntas de argamassa e elementos estruturais; b) Fissuração (Amaral, 2013).....	6
Figura 2-2: a) Material rejeitado pela peneiração (11,2 mm); b) Material resultante da peneiração (Cunha, 2013).....	17
Figura 2-3: a) e b) Pellets comerciais (Cunha, 2013).....	18
Figura 2-4: Resíduos de vidro com diferentes dimensões: a) Após britagem; b) Após moagem (Matos, 2010) .....	19
Figura 3-1: Areia disponível com dimensões compreendidas entre 0,063 e 4 mm.....	22
Figura 3-2: Retidos e passados no peneiro #2 mm.....	23
Figura 3-3: a) Equipamento de peneiração (agitador mecânico); b) Parcelas de areia peneiradas e separadas após pesagem .....	23
Figura 3-4: Curva granulométrica da areia em estudo .....	24
Figura 3-5: Nivelamento da superfície dos agregados .....	25
Figura 3-6: Amostra de cimento.....	29
Figura 3-7: Amostra de cal hidráulica .....	30
Figura 3-8: a) e b) Cinzas de biomassa provenientes da central termoelétrica .....	31
Figura 3-9: a) e b) Aspetto das lamas de cal em estudo .....	33
Figura 3-10: Aspetto das lamas de crómio em estudo.....	34
Figura 4-1: a) e b) Moagem das lamas de crómio .....	38
Figura 4-2: a) Peneiro com abertura em malha quadrada de 0,250 mm; b) Material passado no peneiro .....	38
Figura 4-3: a) Mistura do ligante com água; b) Mistura com areia.....	40
Figura 4-4: a) Enchimento da primeira camada dos provetes; b) Distribuição uniforme da argamassa.....	41
Figura 4-5: a) Compactação da primeira camada; b) Nivelamento da superfície .....	42
Figura 4-6: a) Identificação dos provetes; b) Desmoldagem dos provetes.....	42
Figura 4-7: Prensa utilizada no ensaio à flexão .....	43
Figura 4-8: Máquina de corte .....	44
Figura 4-9: Ensaio de resistência à compressão .....	45
Figura 4-10: a) e b) Aspetto dos provetes da argamassa com incorporação de lamas de crómio .....	45
Figura 4-11: Resultados do ensaio de resistência à flexão .....	46
Figura 4-12: Resultados do ensaio de resistência à compressão .....	48
Figura 5-1: a) Assentamento da última fiada de blocos; b) Parede de alvenaria.....	52
Figura 5-2: a) Projeção manual do chapisco; b) Aspetto final da parede com chapisco .....	53
Figura 5-3: a) Eliminação do excesso de argamassa; b) Alisamento da superfície com talocha .....	54

Figura 5-4: Esquema de aplicação dos diferentes cimentos-cola .....	55
Figura 5-5: a) Espalhamento da cola com a colher; b) Passagem da talocha dentada; c) Aplicação dos azulejos sobre a zona de colagem; d) Posição das cruzetas nos azulejos; e) Saturação dos azulejos em água; f) Colocação de cola sobre o azulejo .....	58
Figura 5-6: a) Prensa utilizada no ensaio; b) Rotura dos cimentos-cola após o ensaio .....	59
Figura 5-7: Resultados do ensaio de flexão dos cimentos-cola .....	60
Figura 5-8: Prensa utilizada no ensaio de compressão dos cimentos-cola .....	61
Figura 5-9: Resultados do ensaio de compressão dos cimentos-cola .....	62
Figura 5-10: a) Rotura adesiva ladrilho-cola; b) Rotura coesiva da cola; c) Rotura adesiva cola-suporte; d) Rotura coesiva do suporte .....	63
Figura 5-11: a) Execução do pré-corte; b) Aspeto após o pré-corte .....	64
Figura 5-12: a) Apoios na colagem das pastilhas com pré-corte no azulejo; b) Apoios na colagem das pastilhas com pré-corte no azulejo + cimento-cola .....	64
Figura 5-13: a) Pastilhas após 1 hora de secagem da cola; b) Colocação do parafuso de cabeça esférica; c) Ajustamento do aparelho sobre a pastilha a ensaiar; d) Aplicação da força de tração .....	65
Figura 5-14: a) Exemplo de rotura coesiva do suporte; Exemplo de rotura coesiva da cola...	66
Figura 5-15: Resultados do ensaio de arrancamento por tração nos cimentos-cola .....	67
Figura 5-16: a) Pesagem da amostra; b) Colocação da amostra na garrafa de vidro .....	69
Figura 5-17: a) Identificação de cada amostra; b) Colocação das amostras no agitador mecânico .....	70
Figura 5-18: Medidor multiparâmetros .....	70
Figura 5-19: a) Enchimento do molde; b) Compactação com 20 pancadas .....	73
Figura 5-20: a) Três moldes para cada amassadura; b) Cura dos provetes submersos em água .....	74
Figura 5-21: a) Alisamento da superfície com talocha; b) Colocação das régua de madeira	75
Figura 5-22: a) e b) Método de aplicação dos rebocos sobre a parede .....	75
Figura 5-23: Resultados do ensaio de flexão das argamassas de reboco .....	76
Figura 5-24: Resultados do ensaio de compressão das argamassas de reboco .....	77
Figura 5-25: Aspeto final da parede após o ensaio .....	79
Figura 5-26: Resultados do ensaio de arrancamento por tração nos rebocos .....	79

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1: Classes dos adesivos para ladrilhos e pedras naturais (NP EN 12004).....	13
Quadro 2-2: Descrição das classes das argamassas de colagem à base de cimento (NP EN 12004).....	14
Quadro 3-1: Composição granulométrica da areia de referência CEN (NP EN 196-1).....	22
Quadro 3-2: Análise granulométrica - Método de peneiração (NP EN 933-1).....	24
Quadro 3-3: Resultados da baridade.....	26
Quadro 3-4: Massas e respetivo teor de humidade dos agregados em estudo.....	27
Quadro 3-5: Valores típicos para lamas de cal (Tran, 2008).....	33
Quadro 3-6: Valores obtidos para as características químicas dos resíduos em estudo.....	35
Quadro 4-1: Composição dos provetes das argamassas .....	40
Quadro 4-2: Resultados do ensaio de resistência à flexão.....	47
Quadro 4-3: Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	49
Quadro 5-1: Constituintes dos cimentos-cola em estudo .....	56
Quadro 5-2: Tipo de rotura nas ligações ladrilho-cola-suporte.....	68
Quadro 5-3: Parâmetros químicos dos cimentos-cola em estudo.....	71
Quadro 5-4: Constituintes das argamassas de reboco em estudo .....	73
Quadro 5-5: Comparação de resultados das argamassas em função da relação água/ligante ..	78
Quadro 5-6: Parâmetros químicos das argamassas com incorporação de resíduos.....	81



# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento

A crescente melhoria da qualidade de vida das populações tem conduzido a um acréscimo na quantidade de resíduos gerados pela sociedade, tornando-se a sua gestão, tratamento e deposição um problema de difícil resolução mas que deve ser motivo de preocupação.

A reciclagem de resíduos industriais em aplicações de engenharia civil sofreu uma evolução considerável ao longo do tempo, contribuindo para uma construção sustentável. Grandes quantidades de resíduos industriais já são atualmente empregues como matéria-prima e como componentes na indústria de cimento, dos quais se salienta: a escória de alto-forno, cinzas volantes, sílica de fumo, cinzas de casca de arroz e escória de metais não ferrosos. No entanto, existem muitos outros por utilizar e experimentar na indústria dos resíduos, por exemplo, pneus usados, óleos, lodo, pó residual após combustão, borracha, plástico, etc.

A reutilização de resíduos industriais na composição de argamassas pode ser uma alternativa interessante para a valorização destes materiais. As mais-valias ambientais são evidentes, no entanto os aspetos técnicos devem ser avaliados e salvaguardados. Nesse sentido, o presente trabalho pretende avaliar a possibilidade de incorporar resíduos em argamassas de reboco e de colagem como substitutos parciais do ligante.

## 1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a viabilidade da incorporação de resíduos provenientes de indústrias de regiões próximas de Viseu em argamassas de construção.

A análise efetuada incidiu na caracterização laboratorial do desempenho mecânico das argamassas, sendo também desenvolvida uma caracterização prévia dos componentes isoladamente. A metodologia adotada incluiu ainda a confeção de argamassas tradicionais, sem incorporação de resíduos, e de argamassas industriais (comerciais), que funcionaram como materiais de controlo, permitindo, assim, uma análise comparativa.

O cumprimento deste objetivo conduziu à definição de um conjunto de tarefas e objetivos parciais, nomeadamente:

- Caracterizar laboratorialmente os agregados através de ensaios normalizados;
- Realizar uma análise preliminar de sensibilidade com a finalidade de se avaliar a potencialidade que um determinado resíduo contém para incorporar a matriz da argamassa;
- Estudar as características mecânicas (flexão e compressão) das argamassas em estudo (colagem e reboco), após a seleção dos resíduos que apresentaram viabilidade na análise preliminar;
- Construir uma parede de teste em alvenaria, com revestimento cerâmico numa das faces, com o objetivo de se poder aplicar as várias argamassas de colagem e, na outra face, as de reboco para posteriormente se realizar ensaios de arrancamento por tração (*pull-off*);
- Realizar ensaios de lixiviação com vista à caracterização química das argamassas.

Pretende-se portanto valorizar os resíduos da região, utilizando-os como substituto parcial do ligante, minimizando assim os custos de produção da mesma e o impacto ambiental provocado pela produção de cimento.

## 1.3 Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

O capítulo 1 (Introdução) refere-se às considerações mais relevantes que abrangem o tema do projeto em estudo, os objetivos principais do trabalho, bem como a estrutura e organização da dissertação.

O capítulo 2 (Estado da arte) resulta da pesquisa bibliográfica onde se destaca as bases de conhecimento mais pertinentes para o estudo, nomeadamente às argamassas de reboco, argamassas de colagem e argamassas com incorporação de resíduos.

O capítulo 3 (Caracterização dos materiais) apresenta a caracterização individual dos materiais utilizados nas argamassas: agregados, ligantes e resíduos.

O capítulo 4 (Análise preliminar de sensibilidade) mostra os resultados de uma análise preliminar em que a viabilidade de três resíduos foi analisada através de ensaios mecânicos de flexão e compressão.

O capítulo 5 (Campanha experimental e análise de resultados) apresenta a metodologia adotada para o estudo das argamassas, com e sem incorporação de resíduos, descreve a campanha experimental desenvolvida, incluindo o plano de ensaios, e apresenta a análise dos resultados.

Por fim, no capítulo 6 (Conclusões e desenvolvimentos futuros) tecem-se as principais conclusões deste trabalho e apresentam-se sugestões para futuros desenvolvimentos dentro do tema abordado.



## **2. Estado da Arte**

### **2.1 Introdução**

Uma argamassa consiste na mistura de agregados finos (areias), um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos e água. Adicionalmente, poderá ainda incorporar adições e adjuvantes.

Segundo Veiga (2004) citado por Martins (2008), desde a antiguidade que as argamassas desempenham um papel muito relevante na construção e reparação de edifícios, sendo utilizadas, essencialmente, com fins de regularização e impermeabilização de fachadas, assentamento de alvenarias e diversos acabamentos.

Atualmente, as argamassas de revestimento mais utilizadas na construção em Portugal e na Europa são as não tradicionais de ligantes hidráulicos (pré-doseadas), correntemente designadas por monomassas, devido à sua rápida e eficiente confeção e aplicação, pois apenas necessitam da correta adição de água, além de serem aplicadas em camada única. Contudo, as argamassas tradicionais de ligantes hidráulicos embora sejam aplicadas em várias camadas e, conseqüentemente, requererem mais tempo de execução, apresentam menos patologias associadas a revestimentos quando comparadas com as monomassas, tais como, fissuração e visualização das juntas dos elementos de alvenaria. A Figura 2-1 ilustra as patologias mais frequentes associadas a rebocos em monomassa (Amaral, 2013).

Desta forma, é pertinente, e pode ser viável manter as argamassas tradicionais em complemento às pré-doseadas. As argamassas tradicionais podem ainda ser alteradas, através da incorporação de materiais (resíduos) que existam em grande quantidade, permitindo reduzir os custos e as emissões de gases provenientes do fabrico de cimento, sem alterar as características fundamentais da argamassa e, podendo, portanto, torná-las mais económicas.

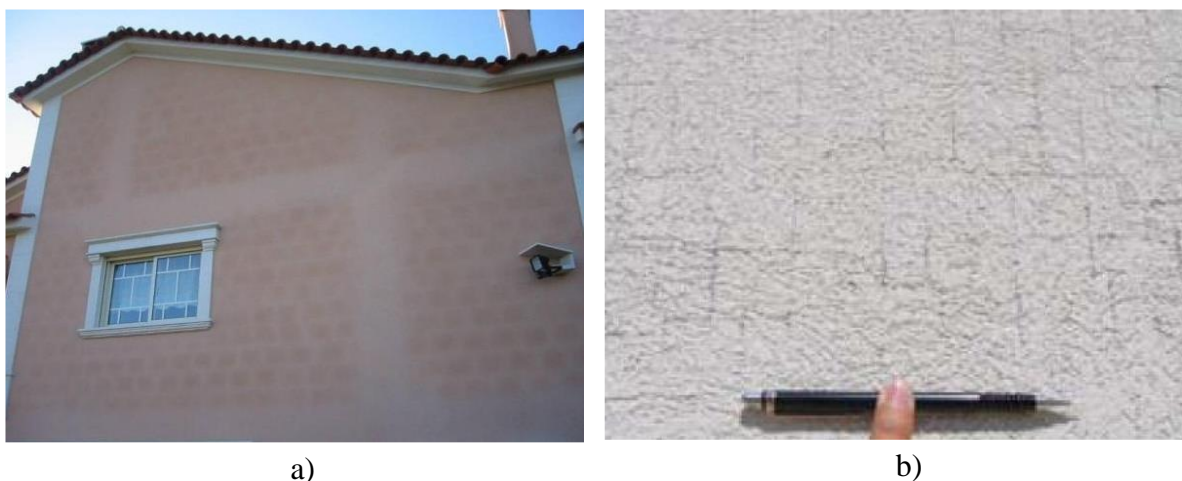


Figura 2-1: Patologias mais frequentes em rebocos monomassa: a) Visualização das juntas de argamassa e elementos estruturais; b) Fissuração (Amaral, 2013)

## 2.2 Argamassas de reboco

### 2.2.1 Constituição / Soluções

As argamassas de reboco são revestimentos essencialmente constituídos por dois ligantes hidráulicos (geralmente, cimento e cal hidráulica), agregados finos e água.

Uma argamassa à base de cal hidráulica e cimento tem mais vantagens do que uma argamassa à base de cimento, tendo em vista as exigências funcionais para uma argamassa deste tipo, pois embora o cimento proporcione uma maior resistência à tração e compressão, aderência, durabilidade e impermeabilidade, por sua vez, a cal garante trabalhabilidade, retenção de água e menor retração. A junção destes dois ligantes é, muitas vezes a ideal para argamassas de reboco (Martins, 2008 citando Veiga, 2004).

- **Ligantes hidráulicos**

A designação de ligante deve-se à propriedade que tem de poder aglomerar agregados, conferindo ao conjunto uma grande coesão e resistência.

Estes componentes das argamassas podem dividir-se em hidráulicos, aéreos e orgânicos. Nesta dissertação vão ser abordados e trabalhados somente os ligantes hidráulicos, nomeadamente o cimento Portland e a cal hidráulica.

- **Agregados**

Os agregados podem ser classificados como grossos e/ou finos (areias). As areias são então materiais granulados finos que constituem o esqueleto das argamassas e provêm da desagregação natural ou da britagem de rochas, podendo-se do ponto de vista químico distinguir dois grupos principais: areias siliciosas e calcárias. Enquanto as areias siliciosas são geralmente de rio ou de areeiro, as areias calcárias resultam do processamento de desperdícios de pedreiras de rocha calcária (Cruz, 2008 citando Rodrigues, 2004).

A NP EN 12620 (2003) citada por Rato (2006) define areia como o agregado de menores dimensões em que  $D \leq 4$  mm, representando D a sua maior dimensão. No que diz respeito ao limite inferior para a dimensão das partículas das areias, o valor de 0,063 mm surge também em definições normativas, utilizando-se os termos “filler” e “finos” como correspondendo à fração de partículas de um agregado que passa no peneiro de 0,063 mm. Assume-se então que uma areia é definida por um conjunto de partículas cuja dimensão está compreendida, maioritariamente, entre 0,063 e 4 mm.

- **Água de amassadura**

A água é um elemento fundamental na formulação das argamassas dado que reage com os ligantes hidráulicos, promovendo a sua hidratação, pondo em evidência as suas propriedades aglutinantes e conferindo ainda a consistência necessária à sua aplicação (Cruz, 2008).

Para desempenhar a sua função sem prejudicar o comportamento da argamassa, a água deverá ser limpa e isenta de impurezas, particularmente de sais, que se introduziriam na argamassa e no suporte levando à sua degradação (Cavaco, 2005 citado por Cruz, 2008).

A NP EN 1008:2003 define as especificações da água para amassadura do betão.

## **2.2.2 Formulação**

Conforme consta em Pinto et al (2006) citado por Cruz (2008), a formulação de argamassas de reboco é um processo complexo que deve ter em conta a satisfação das exigências funcionais que se lhes colocam, assim como os elementos de construção em que vão ser incorporadas. Por outro lado, a sua qualidade relaciona-se intimamente com as matérias-primas que as constituem e com a proporção de cada uma delas na mistura.

Assim, a sua formulação requer certos cuidados especiais: adequada escolha e dosagem das matérias-primas; obtenção de valores mínimos para a porosidade, permeabilidade, capilaridade e retração; obtenção de valores máximos de compacidade e obtenção de adequadas características mecânicas e de durabilidade (Cruz, 2008).

### 2.2.3 Traço

O traço corresponde às proporções dos componentes para a quantidade unitária de ligante, expressas pela seguinte ordem: ligante, agregado, água. Usam-se traços em peso e em volume para medição dos componentes em peso ou em volume, respetivamente.

Deste modo, torna-se pertinente estudar até que ponto as variações da dosagem relativa de areias e ligantes desempenham um papel considerável na argamassa.

Cavaco (2005) afirma que, à partida, estas proporções terão o objetivo de criar uma argamassa o mais compacta possível. Nesse sentido, a quantidade de ligante deverá ser tal que consiga preencher os vazios deixados pelo agregado, estando assim dependente do volume desses vazios. Num agregado compacto, com uma boa distribuição granulométrica e partículas angulosas, o volume de vazios deverá ser de cerca de 33%, o que conduzirá a um traço volumétrico de 1:3 (Cruz, 2008).

### 2.2.4 Propriedades

As propriedades mais importantes que se exigem às argamassas de reboco são as seguintes:

- **Aspeto estético**

Este é um fator geralmente muito importante, uma vez que a argamassa influencia diretamente, pela sua textura, regularidade, desempenho e grau de conservação, o aspeto estético do acabamento, mesmo quando não está à vista. Assim, alguns dos problemas mais identificados nos edifícios, penalizadores do ponto de vista estético, consistem no surgimento de fendilhação generalizada (ainda que muito fina) ou de fendas localizadas mas de expressão acentuada (Silva, 2006).

- **Trabalhabilidade e consistência**

É fundamental distinguir estes dois conceitos, uma vez que são frequentemente confundidos. Enquanto a trabalhabilidade de uma argamassa está diretamente relacionada com o seu uso ou finalidade, a consistência é apenas um valor numérico de caracterização da sua fluidez.

Citando Veiga (1998), a argamassa de reboco deve poder ser facilmente aplicada, de modo a obter-se uma boa aderência e compacidade, bom rendimento, e deve ainda apresentar uma superfície trabalhável para que o aspeto final do reboco seja satisfatório. Esta característica da argamassa fresca é mais importante do que pode parecer à primeira vista, já que muitos aspetos do comportamento do reboco dependem de uma boa aplicação, isto é, de uma boa trabalhabilidade.

A consistência de uma argamassa define como a argamassa resiste às tensões impostas ainda no estado fresco, estando diretamente relacionada com a quantidade de água e com a trabalhabilidade (Silva, 2006).

- **Retenção de água**

Esta propriedade consiste na capacidade da argamassa reter água de amassadura, contrariando deste modo a tendência de evaporação da mesma e de absorção por parte do suporte (Cruz, 2008).

Citando Veiga (1998) e Resende (2001), uma retenção de água apropriada é essencial para o endurecimento adequado da argamassa, promovendo as reações de hidratação do ligante e um consequente ganho de resistência mecânica e de aderência.

- **Permeabilidade à água**

A capacidade de impermeabilização do reboco é determinada, por um lado, pela capacidade de resistir à penetração, até ao suporte, da água proveniente do exterior e, por outro, pela capacidade de permitir a eliminação rápida por secagem da água em excesso, logo que surjam condições atmosféricas favoráveis (Veiga, 1998).

A permeabilidade depende da natureza do suporte, da composição e dosagem da argamassa, da técnica de execução, da espessura da camada de revestimento, da porosidade da argamassa e do acabamento, além de fatores externos ao revestimento como a pressão do vento e a pluviosidade (Resende, 2001).

- **Permeabilidade ao vapor de água**

A água infiltrada através de fendas ou de zonas particulares, como remates, vãos, etc., a água absorvida pelo reboco e, ainda, a água que entra na execução das alvenarias e rebocos e não é necessária à hidratação, deve evaporar-se logo que as condições atmosféricas o permitam. Uma elevada permeabilidade ao vapor de água - do reboco e, também, da eventual pintura sobre ele aplicada - é importante para que se verifique esta condição e é tanto mais importante quanto mais permeável à água for o revestimento (Veiga, 1998).

As argamassas de rebocos tradicionais são bastante permeáveis ao vapor de água. Uma elevada permeabilidade ao vapor de água é importante para facilitar a secagem do próprio revestimento e do suporte e ainda para permitir a saída para o exterior do vapor de água produzido no interior dos edifícios.

- **Absorção de água por capilaridade**

Esta propriedade é importante na avaliação da durabilidade dos rebocos, uma vez que a água absorvida por capilaridade contribui para um mau desempenho, nomeadamente em relação à durabilidade, que é francamente reduzida com o aumento da capilaridade (Silva, 2006).

- **Aderência ao suporte**

Para o bom desempenho dos revestimentos é importante que estes estejam bem aderentes ao suporte, o qual é constituído, em grande parte, por dois materiais de características diferentes, geralmente, betão e alvenaria (Miranda, 2004 citado por Cruz, 2008).

A aderência é a propriedade que o material tem de resistir a tensões normais ou tangenciais na superfície de interface do suporte. Uma boa aderência ao suporte é fundamental para o cumprimento das funções de impermeabilização do revestimento e é condicionante para a sua durabilidade (Veiga, 1998 e Silva, 2006).

- **Compatibilidade com o suporte**

A argamassa de reboco deve poder ser aplicada em espessuras suficientes para dissimular os defeitos do material de suporte e corrigir as suas irregularidades (compatibilidade geométrica). Deve aderir bem ao suporte, ter condutibilidade térmica compatível com o material deste e permitir trocas de humidade entre o suporte e o exterior (compatibilidade física). Deve ter características mecânicas adaptadas ao suporte, não transmitindo tensões elevadas que o possam deteriorar (compatibilidade mecânica) (Cruz, 2008).

É também importante que o revestimento tenha capacidade para resistir ao ataque dos sais eventualmente existentes no suporte e que, por outro lado, o reboco não contenha sais que, ao serem dissolvidos pela água (das chuvas, de condensações interiores, ou de outras proveniências), tenham reacções nocivas com os materiais constituintes dos suportes – compatibilidade química (Veiga, 1998).

- **Retração**

A retração consiste na diminuição de volume originada por perda de água. Quando acontecem com excessiva rapidez, estas variações volumétricas quase sempre ocasionam problemas de fendilhação (Cruz, 2008).

A retração de uma argamassa pode dividir-se, essencialmente, em dois grandes grupos: a plástica e a hidráulica (ou por secagem). A retração plástica inicia-se logo após a aplicação da argamassa sobre o suporte, pela movimentação de pasta de cimento e água de amassadura da argamassa para os poros da base e, também, pela perda da sua humidade para o ambiente, em função das condições climáticas locais (Miranda, 2000). Por outro lado, a retração hidráulica inicia-se só após as primeiras horas de presa da argamassa e ocorre ao longo da sua vida útil.

- **Resistência à fendilhação**

Em grande parte, a resistência de um reboco à fendilhação é função, por um lado, da capacidade da argamassa para resistir às tensões de tração nela induzidas pelo efeito da restrição da retração, conferida, principalmente, pela aderência a um suporte relativamente rígido e, por outro lado, da intensidade dessas tensões. Assim, a tendência para a fendilhação por retração

será tanto maior quanto mais elevada for a retração e quanto maior for a relação módulo de elasticidade/resistência à tração (Veiga, 1998).

Uma boa aderência ao suporte e um poder de retenção de água elevado contribuem também para melhorar o comportamento à fendilhação. O modo e as condições de aplicação, as características do suporte e os seus movimentos e deformações, a cor e o grau de exposição aos agentes atmosféricos a que está sujeito o revestimento têm uma grande importância no que diz respeito à ocorrência ou não de fendilhação no reboco (Veiga, 1998).

- **Resistência à compressão e flexão**

A resistência de uma argamassa à compressão e à flexão depende da dureza da areia, da qualidade do ligante, da granulometria da areia, da quantidade de água na amassadura, da dosagem de ligante e do modo de fabrico da argamassa.

- **Durabilidade**

Esta característica está essencialmente relacionada com algumas anomalias que podem afetar as argamassas de revestimento, tais como a fendilhação; a penetração de água por capilaridade; as perdas de aderência; o esfarelamento provocado por dessecação prematura; o corte do suporte; a espessura excessiva; o ataque de sais; a cultura e proliferação de microrganismos e a qualidade da argamassa. Os fatores externos a considerar para a durabilidade são a localização, o clima e a topografia (Resende, 2001 e Veiga, 1998).

## 2.2.5 Ensaio

Os ensaios mais frequentemente realizados em argamassas de reboco no estado fresco são:

- Consistência por espalhamento (NP EN 12350-8: 2010);
- Determinação do tempo de presa e da expansibilidade (NP EN 196-3: 2006);
- Determinação da massa volúmica (NP EN 12350-6: 2009);
- Estimativa do volume de vazios (EN 1015-6: 1998);
- Retenção de água (EN 1015-8: 1999).

No estado endurecido, os ensaios mais frequentes realizados em argamassas de reboco são:

- Ensaio mecânicos: Flexão e Compressão (NP EN 196-1: 1996);
- Arrancamento por tração (Pull - Off) (EN 1015 - 12: 2000);
- Variação dimensional (Ensaio de retração) (LNEC E 398: 1993);

- Absorção de água por capilaridade (EN 1015-18: 2002);
- Absorção de água por imersão (LNEC E 394: 1993);
- Determinação da massa volúmica (NP EN 12390-7: 2009);
- Determinação da resistência à carbonatação (LNEC E 391: 1993);
- Penetração por cloretos (LNEC E 463: 2004);
- Reação álcalis-sílica (ASTM C 1567-08);
- Ataque por sulfatos (LNEC E 462: 2004).

## **2.3 Argamassas de colagem**

### **2.3.1 Constituição / Soluções**

Estas argamassas são vulgarmente utilizadas em fixações interiores e exteriores de ladrilhos cerâmicos e pedra natural em pavimentos, tetos e paredes, designadas por adesivos. São misturadas com água imediatamente antes da aplicação e são classificadas em função da sua composição química, dividindo-se em três tipos principais (EN 12004 (2008)):

- Adesivos em dispersão aquosa (D): mistura de ligantes orgânicos, composta por polímeros aquosos em dispersão, aditivos orgânicos e cargas minerais;
- Adesivos de resinas de reação (R): mistura de resinas sintéticas, cargas minerais finas e aditivos orgânicos. O endurecimento ocorre por reação química;
- Adesivos à base de cimento (C): mistura de ligantes hidráulicos, agregados e aditivos específicos. É misturada com água ou com o líquido de adição imediatamente antes da sua utilização, de modo a obter-se uma pasta trabalhável.

No desenvolvimento do estudo, apenas serão analisadas as argamassas de colagem à base de cimento. Comercialmente são mencionados como “cimentos-cola” e, por essa razão, serão assim designados ao longo desta dissertação.

### **2.3.2 Formulação**

Segundo a EN 12004, os cimentos-cola são uma mistura de ligantes hidráulicos, inertes e aditivos orgânicos. Este material é misturado com água ou outro líquido imediatamente antes da sua aplicação.

O cimento Portland e os polímeros são os ligantes mais utilizados, pelo que a ligação obtida entre este tipo de adesivo e os elementos a fixar pode ser predominantemente hidráulica, sendo o ligante exclusivamente cimento ou com uma componente hidráulica e outra química, obtida através da adição de polímeros, sendo os mais comuns, os acetatos de vinilo, versatato de vinilo, etileno, estireno ou de copolímeros como os estireno-acrílicos, versatato de vinilo-etileno (Oliveira, 2008).

### 2.3.3 Traço

Atualmente, os cimentos-cola existentes no mercado vêm embalados em sacos, prontos a ser aplicados em obra apenas com a adição de água, tal como acontece com as monomassas, e portanto, para se obter um cimento-cola com certas especificações, a EN 12004 apresenta para cada tipo de adesivo (D, R e C), diferentes classes de acordo com as suas características específicas, isto é, características fundamentais e opcionais. Estas características fundamentais estão divididas em classes 1 e 2. As características opcionais são propriedades importantes apenas para utilizações e aplicações especiais e dividem-se em cinco (classes E, F, T, S1 e S2), conforme indica o Quadro 2-1.

Quadro 2-1: Classes dos adesivos para ladrilhos e pedras naturais (NP EN 12004)

<b>Características Fundamentais</b>
1 - Normal
2 - Melhorada
<b>Características Opcionais</b>
E - Tempo de abertura alargado
F - Presa rápida
T - Resistência ao deslizamento vertical
S1 - Cola deformável
S2 - Cola altamente deformável

Assim sendo, os diferentes tipos de cimentos-cola (adesivo do tipo C) disponíveis no mercado estão os descritos no Quadro 2-2.

Quadro 2-2: Descrição das classes das argamassas de colagem à base de cimento (NP EN 12004)

Classe	Descrição
1	Cimentos-cola de presa normal
1E	Cimentos-cola de presa normal com tempo aberto alongado
1F	Cimentos-cola de presa rápida
1FT	Cimentos-cola de presa rápida com deslizamento reduzido
2	Cimentos-cola melhorados
2E	Cimentos-cola melhorados com tempo aberto alongado
2F	Cimentos-cola de presa rápida melhorados
2S1	Cimentos-cola deformáveis melhorados
2S2	Cimentos-cola altamente deformáveis melhorados
2FT	Cimentos-cola de presa rápida melhorados e com deslizamento reduzido
2FTS1	Cimentos-cola de presa rápida deformáveis melhorados e com deslizamento reduzido

Todavia, ainda há poucas décadas atrás, não existia a vasta gama de cimentos-cola que se tem agora ao dispor. A cola era executada em obra à base de cimento Portland com pequenas ou nenhuma adições de areia fina, criando assim uma pasta de cimento com características semelhantes às do cimento-cola atual e eram assim colados os ladrilhos e pedras naturais.

### 2.3.4 Propriedades

Segundo a NP EN 12004, as propriedades dos cimentos-cola em termos de aplicação, ou seja, no estado fresco são:

- Tempo de vida útil - Período de tempo durante o qual uma cola, armazenada em condições definidas, conserva as suas propriedades de aplicação (EN 12004);
- Tempo de repouso (maturação) - Período de tempo entre a preparação de uma cola e o momento em que esta deve ser aplicada (EN 12004);
- Tempo de vida - Máximo período de tempo após preparação de uma cola, durante o qual ela é utilizável (EN 1015-9);
- Tempo aberto - Máximo período de tempo para a fixação dos ladrilhos desde o momento da aplicação de uma cola, permitindo cumprir a tensão de aderência especificada (EN 1346);
- Poder molhante - Aptidão de uma camada de cola penteada para molhar os ladrilhos (EN 1347);

- Deslizamento - Deslocação sobre uma superfície vertical ou inclinada, de um ladrilho aplicado sobre uma camada de cola penteada (EN 1308);
- 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 (EN 12004).

As propriedades finais determinadas para os cimentos-cola são (NP EN 12004):

- Tensão de aderência - Força máxima de rutura por unidade de superfície, que pode ser medida com aplicação de uma força de tração ou de corte. A tensão de aderência pode ser avaliada segundo a EN 1348, EN 1324 ou EN 12003 conforme o tipo de cola utilizada;
- 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 (EN 12004);
- Deformação transversal - Deflexão registada no centro de uma camada de cola endurecida submetida a uma carga aplicada em três pontos. A deformação transversal pode ser utilizada para avaliar a deformabilidade de uma cola. É medida segundo o método descrito na EN 12002.

### **2.3.5 Ensaaios**

Segundo a NP EN 12004 os ensaios mais frequentes realizados em cimentos-cola são:

- Tempo aberto (EN 1346);
- Deslizamento (EN 1308);
- Colas de presa normal - Tensão de aderência inicial à tração (EN 1348);
- Colas de presa rápida - Tensão de aderência rápida à tração (EN 1348);
- Tensão de aderência inicial à tração após condicionamento (EN 1348);
- Deformação transversal (EN 12002);
- Resistência química (EN 12808-1).

## **2.4 Argamassas com incorporação de resíduos**

### **2.4.1 Viabilidade de argamassas com resíduos**

A incorporação de resíduos em argamassas e/ou betão é hoje em dia uma realidade em fase de construção. Estes, quando utilizados para substituir parcialmente o ligante (geralmente o cimento) no fabrico de argamassas, podem apresentar vantagens no que diz respeito à sua durabilidade e, conseqüentemente proporcionar uma poupança significativa na utilização de cimento com efeitos óbvios na poupança de recursos naturais e diminuição da quantidade de emissões de gases com efeito de estufa causados pelo fabrico de cimento.

Além das vantagens anteriormente descritas, é de conhecimento geral que muitos resíduos são colocados em aterro com risco de poluição do ar e da água. Posto isto, o aproveitamento de alguns destes resíduos na construção civil proporcionaria um avanço considerável na defesa da qualidade do ambiente.

Mas nem tudo são vantagens, é notório que em argamassas tradicionais de ligantes hidráulicos, nomeadamente à base de cimento, quanto menor for a percentagem de cimento na argamassa, menores serão as suas resistências mecânicas (compressão e flexão). Logicamente, em argamassas com substituição parcial do cimento por um resíduo, verificar-se-á a mesma situação.

Para se conhecer a viabilidade de um determinado resíduo para a confeção de argamassas é necessário e pertinente caracterizá-las experimentalmente através dos ensaios que se encontram regulamentados para argamassas tradicionais, descritos no subcapítulo 2.2.5.

### **2.4.2 Estudos anteriores sobre argamassas com incorporação de resíduos**

Neste subcapítulo expõem-se alguns estudos realizados anteriormente relacionados com argamassas com incorporação de resíduos. Especial destaque é dado aos diferentes resíduos que são utilizados, as percentagens parciais de substituição de cimento aplicadas e as principais conclusões retiradas a partir dos resultados das campanhas experimentais.

Nestes estudos, os autores seguiram a NP EN 196-1 (1996) e realizaram provetes/argamassas com substituição parcial do cimento entre 10 e 20% (em massa), utilizando resíduos que serão referidos de seguida, bem como argamassas de controlo (sem resíduos), permitindo assim realizar uma análise comparativa.

Nota também para o facto dos estudos apresentados centrarem-se na incorporação de resíduos em argamassas de ligantes hidráulicos, situação análoga à definida neste trabalho. Refira-se ainda que durante a pesquisa realizada encontraram-se diversos trabalhos com outro tipo de

ligante, por exemplo, argamassas de cal aérea com incorporação de cinzas de casca de arroz (Tiago, 2011).

- **Cinzas de resíduos sólidos urbanos (Cunha, 2013)**

As cinzas de resíduos sólidos municipais/urbanos em estudo são provenientes da incineração em massa, ou seja, sem remoção de vidros e metais, sendo que, este processo consiste em queimar os resíduos sem separação ou trituração, tal como são recebidos. Estes são gerados pelas atividades domésticas, comerciais e de construção e são recolhidos e tratados pelos municípios.

Os resíduos em estudo são constituídos por materiais combustíveis – papel e cartão, materiais fermentáveis, plásticos, e, em menor percentagem, têxteis e madeira de embalagem – e por uma fração inorgânica – vidro, metais, e outros, entre os quais materiais de construção. A Figura 2-2 mostra o aspeto que as cinzas apresentam durante a peneiração.



Figura 2-2: a) Material rejeitado pela peneiração (11,2 mm); b) Material resultante da peneiração (Cunha, 2013)

Neste estudo efetuaram-se substituições parciais do cimento em 10 e 20% e realizaram-se ensaios de caracterização para diferentes idades, sendo que as conclusões finais foram as seguintes:

- Perda das resistências mecânicas, sendo que a diminuição é significativa com o aumento da percentagem de resíduo, acentuando-se ainda com o aumento da idade;
- Melhoria da resistência à reação álcali-sílica, ou seja, melhoria da durabilidade do material;

- Os resultados das análises químicas mostraram que o resíduo possui uma quantidade elevada de óxido de cálcio, cerca de 14,71%, o que ultrapassa claramente os limites estipulados (NP EN 451-1 e NP EN 197-1).
- **Cinzas de pellets (Cunha, 2013)**

Os pellets de madeira podem ser produzidos a partir de resíduos de florestas, de terra arável, madeira que já foi utilizada ou a partir de material virgem. São combustíveis renováveis, produzidos na forma de cilindros, geralmente com pequenas partículas de madeira, compactadas e extremamente densas. Possuem uma dimensão pequena (6 a 8 mm de diâmetro e comprimento entre 12 a 38 mm), e um baixo teor de humidade (5 a 8 %). São constituídos por produtos naturais e, a maioria, não contém elementos tóxicos na sua composição. A Figura 2-3 mostra o aspeto dos pellets.



a)



b)

Figura 2-3: a) e b) Pellets comerciais (Cunha, 2013)

Neste estudo efetuaram-se substituições parciais do cimento em 10 e 20% e realizaram-se ensaios de caracterização para diferentes idades, sendo que as conclusões finais foram as seguintes:

- Todas as argamassas com cinzas de pellets verificaram uma perda significativa da resistência à compressão;
- A expansão por reação álcali-silica foi bastante inferior nas argamassas incorporando cinzas de pellets. A expansão diminuiu à medida que se aumenta a percentagem de substituição do cimento, ou seja, perda na durabilidade;
- A carbonatação mostrou-se exagerada nos provetes com cinzas de pellets e quanto maior a sua percentagem maior o grau de carbonatação;

- A resistência aos íões cloretos revelou-se baixa em todos os provetes, inclusive no de controlo;
- Os resultados das análises químicas disponíveis mostraram que o resíduo possui uma quantidade elevada de óxido de cálcio, cerca de 23,52%, o que ultrapassa os limites estipulados (NP EN 451-1 e NP EN 197-1).

- **Resíduos de vidro moídos (Matos, 2010)**

Quando os resíduos de vidro não são ou deixam de ser adequados para reciclagem com fim de formar novos produtos de vidro, o material, que é relativamente agregado, pode ser moído ou mesmo pulverizado e ser usado como um filler noutros materiais (Mata, 1998).

Reindl (1998) citado por Matos (2010) relatou o uso de casco de vidro em várias vertentes, tais como, na construção de estradas, pavimentação asfáltica, agregados de betão, construção de aplicações (azulejos, tijolos de vidro, painéis de parede, etc.), fibra de vidro para isolamento, fertilizantes agrícolas, paisagismo, louças, cimento hidráulico, entre outras aplicações. A Figura 2-4 mostra o resíduo obtido numa fábrica de reciclagem de vidro.

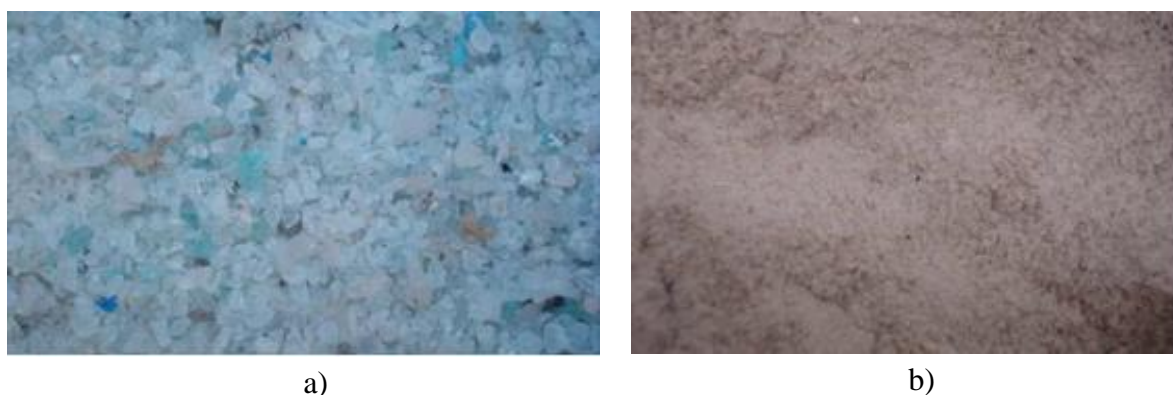


Figura 2-4: Resíduos de vidro com diferentes dimensões: a) Após britagem; b) Após moagem (Matos, 2010)

Neste estudo efetuaram-se substituições parciais do cimento em 10 e 20% e realizaram-se ensaios de caracterização para diferentes idades, sendo que as conclusões finais foram as seguintes:

- Os resultados das análises químicas disponíveis mostraram que o pó de vidro possui uma quantidade elevada de álcali, cerca de 17%, o que ultrapassa completamente os limites estipulados (NP EN 451-1 e NP EN 197-1). De qualquer forma não houve problemas evidentes no que diz respeito à expansão devido à reação álcali-sílica;

- No que se refere às resistências mecânicas, observou-se uma diminuição à medida que aumentava a idade dos provetes. Nas primeiras idades a diminuição de resistência foi bastante notória, cerca de 19% e 33% nas argamassas com substituição do cimento em 10% e 20% respetivamente. Porém, esta diminuição de resistência diminui bastante à medida que os provetes apresentam mais idade;
- No que se refere à carbonatação, este parâmetro foi claramente o ponto mais fraco deste material, uma vez que o seu desempenho se mostrou muito aquém quando comparado com as argamassas de controlo;
- O ataque por cloretos mostrou-se inferior quando as argamassas continham adição de pó de vidro;
- A expansão devido à reação álcali-sílica, que à partida seria um ponto reticente, foi bastante inferior nas argamassas incorporando resíduos. A expansão foi inferior cerca de 77% nos provetes com substituição de cimento em 20% e 26% nas argamassas com 10% de substituição de cimento;
- Relativamente à absorção de água por capilaridade, foi bastante semelhante nos provetes com pó de vidro e no de controlo, tanto ao nível do coeficiente de absorção, como ao nível da absorção ao longo do tempo.

## 2.5 Síntese do capítulo

Este capítulo referiu-se essencialmente ao estado da arte das argamassas de reboco, de colagem e com incorporação de resíduos.

Primeiramente fez-se uma breve descrição do conceito de argamassa e da necessidade de se continuar a trabalhar com argamassas tradicionais de ligantes hidráulicos em detrimento das monomassas.

Posteriormente foram descritos os principais aspetos a ter em conta em argamassas de reboco e de colagem, nomeadamente, a sua constituição, formulação, traço, propriedades e ensaios referentes a estes dois tipos de argamassa.

Por fim é abordado o tema das argamassas com incorporação de resíduos, com ênfase na descrição e análise de resultados de estudos anteriores.

## **3. Caracterização dos Materiais**

### **3.1 Agregados**

#### **3.1.1 Introdução**

Os agregados mais utilizados em rebocos tradicionais são as areias. Estes são materiais granulados e finos, que são aglomerados por um ou mais ligantes, constituindo o esqueleto da argamassa (Rodrigues, 2004).

A distribuição das partículas de um dado agregado segundo as suas dimensões designa-se por granulometria e tem uma enorme influência sobre as propriedades do betão e da argamassa, particularmente no que se refere à compactidade e à trabalhabilidade (Coutinho, 2002).

Os agregados utilizados para este estudo foram disponibilizados pelo Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV) (Figura 3-1) sendo pertinente caracterizá-los laboratorialmente, apesar de os mesmos terem sido obtidos de uma entidade devidamente certificada.

#### **3.1.2 Análise granulométrica**

Para quantificar o tamanho das partículas que integram as areias recorre-se normalmente à análise granulométrica, cujo resultado final é a respetiva curva granulométrica do agregado. Se a granulometria for contínua (partículas distribuídas uniformemente por todas as dimensões, da mais pequena à maior) e se as partículas tiverem uma forma adequada, consegue-se obter uma

argamassa mais compacta e resistente para uma dosagem mais reduzida de cimento (Coutinho, 2002).



Figura 3-1: Areia disponível com dimensões compreendidas entre 0,063 e 4 mm

Ao longo deste estudo optou-se por utilizar uma areia que cumprisse os limites de granulometria impostos pela EN 196-1 (1996) (Quadro 3-1). Uma vez que a areia disponível no laboratório apresentava dimensões compreendidas entre 0,063 e 4 mm, foi necessário corrigir a sua granulometria.

Quadro 3-1: Composição granulométrica da areia de referência CEN (NP EN 196-1)

Abertura dos peneiros com malha quadrada [mm]	Resíduos acumulados [%]
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 1

Consequentemente, a areia em estudo foi passada no peneiro com abertura em malha quadrada de 2 mm, rejeitando-se as partículas retidas, conforme ilustra a Figura 3-2.

De salientar o facto de se optar por utilizar a areia peneirada respeitando estes limites pois, como se sabe, a influência da granulometria da areia é uma variável importante nas argamassas. Como o estudo vai implicar a adição de resíduos na composição da argamassa considerou-se

essencial estabilizar o mais possível as propriedades dos agregados, garantindo que não surjam também como uma variável adicional.



Figura 3-2: Retidos e passados no peneiro #2 mm

A metodologia seguida nos ensaios de análise granulométrica das areias foi a indicada na NP EN 933-1 (2000). O método adotado foi o da peneiração, com lavagem seguida de peneiração a seco. O ensaio consiste na separação, por meio de um conjunto de peneiros de aberturas normalizadas, de malha quadrada, do material em diversas classes granulométricas, de granulometria decrescente.

Após a agitação mecânica durante 3 minutos (Figura 3-3 a), procede-se à pesagem das parcelas de agregado retidas em cada peneiro, sendo o resultado final o apresentado na Figura 3-3 b).



a)



b)

Figura 3-3: a) Equipamento de peneiração (agitador mecânico); b) Parcelas de areia peneiradas e separadas após pesagem

O Quadro 3-2 indica a massa das partículas retidas em cada peneiro após a peneiração mecânica, bem como os resultados dos cálculos efetuados à posteriori. O peso total da amostra ensaiada foi de 266,5 g.

Quadro 3-2: Análise granulométrica - Método de peneiração (NP EN 933-1)

Abertura do peneiro [mm]	Massa das partículas retidas [g]	Retidos [%]	Retidos acumulados [%]	Passados acumulados [%]
4,000	1,2	0,45	0,45	99,55
2,000	64,4	24,17	24,62	75,38
1,000	73,6	27,62	52,23	47,77
0,500	53,5	20,08	72,31	27,69
0,250	37,9	14,22	86,53	13,47
0,125	21,1	7,92	94,45	5,55
0,063	9,0	3,38	97,82	2,18
< 0,063	5,8	-	-	-

Esta informação permite o traçado da curva granulométrica do material em análise, representada na Figura 3-4:

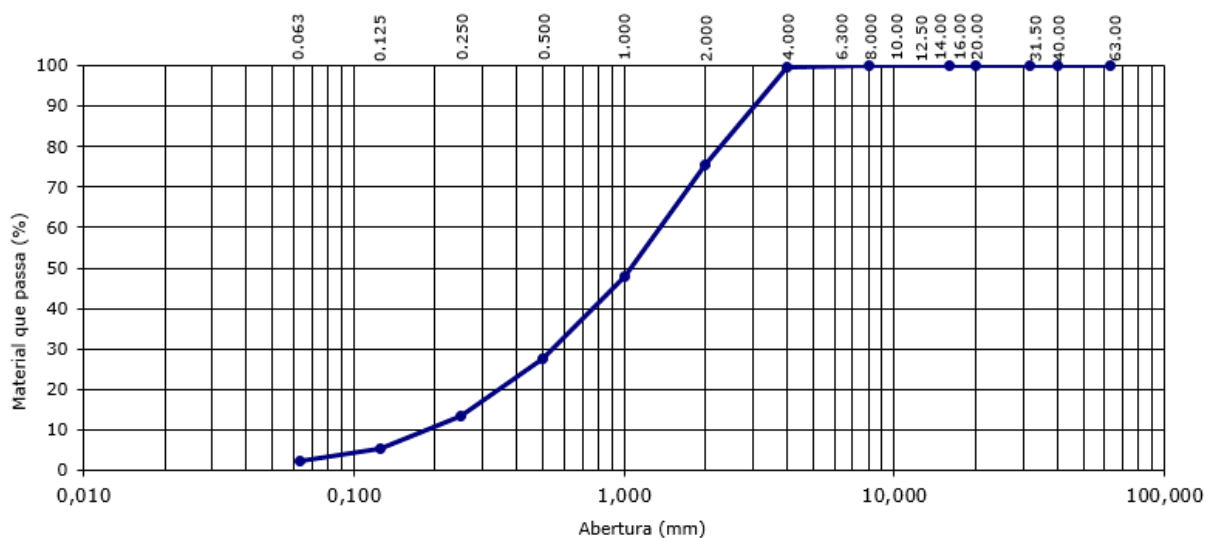


Figura 3-4: Curva granulométrica da areia em estudo

### 3.1.3 Determinação da baridade e do volume de vazios

Para a determinação da baridade e do volume de vazios dos agregados em estudo foi seguida a metodologia apresentada na NP EN 1097-3 (2002).

De acordo com a referida norma, baridade é o quociente entre a massa do agregado seco, preenchendo sem compactação um dado recipiente, e a capacidade do mesmo recipiente. O volume de vazios corresponde aos espaços preenchidos com ar entre as partículas do agregado contido no recipiente.

O procedimento laboratorial para determinação destas propriedades inicia-se com a preparação dos provetes elementares, sendo necessário que a amostra do agregado seja seca em estufa a  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  até se atingir massa constante (pesagens sucessivas efetuadas com 1 hora de intervalo mínimo, não diferindo mais de 0,1 %).

O procedimento do ensaio consistiu em pesar o recipiente vazio, seco e limpo, e registrar o valor como  $m_1$ . De seguida, enchê-lo com a ajuda de uma pá até transbordar, sendo que, durante o enchimento do mesmo, foi limitada a segregação apoiando a pá no bordo superior, uma vez que, em nenhum momento, o bordo da pá deverá estar a mais de 5 cm abaixo do bordo superior.

De seguida, foi removido com cuidado todo o excedente no topo do recipiente e nivelada a superfície do agregado com o auxílio de uma régua sem, compactar nenhuma parte da superfície superior. (Figura 3-5). Posteriormente foi pesado o recipiente cheio e registada a sua massa como sendo  $m_2$ . Este procedimento foi repetido em três provetes elementares.



Figura 3-5: Nivelamento da superfície dos agregados

A baridade foi calculada para cada provete elementar de acordo com o estabelecido na seguinte equação (3-1):

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3-1)$$

Em que:

- $\rho_b$  é a baridade [ $\text{kg}/\text{dm}^3$ ];

- $m_2$  é a massa do recipiente e do provete elementar [kg];
- $m_1$  é a massa do recipiente vazio [kg];
- $V$  é a capacidade do recipiente [l].

Cumprindo o estabelecido na normalização, o volume do recipiente utilizado foi de  $1 \text{ dm}^3$ , pelo que, corresponde a uma capacidade de 1 l.

Finalmente, a baridade final do agregado é registada como sendo a média aritmética dos três valores obtidos para cada provete elementar. Os resultados deste ensaio estão condensados no Quadro 3-3.

Quadro 3-3: Resultados da baridade

$m_1$ [kg]	$m_2$ [kg]	$\rho_b$ [kg/dm <sup>3</sup> ]
1,503	2,799	1,296
1,503	2,795	1,292
1,503	2,794	1,291
Média =		1,293

A baridade dos agregados em estudo foi de  $1,293 \text{ kg/dm}^3$ .

A percentagem de vazios foi calculada de acordo com o estabelecido na seguinte equação (3-2):

$$v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \times 100 \quad (3-2)$$

Em que:

- $v$  é a percentagem de vazios;
- $\rho_b$  é a baridade [kg/dm<sup>3</sup>];
- $\rho_p$  é a massa volúmica real do agregado seco em estufa, determinada de acordo com o princípio da EN 1097-6 usando um provete elementar obtido a partir da mesma amostra laboratorial [kg/dm<sup>3</sup>].

O valor de  $\rho_p$  é  $1,978 \text{ kg/dm}^3$  (determinado pelo DEC, pelo que, dispensou-se realizar o mesmo ensaio).

Deste modo, tem-se  $v = 34,6 \%$ .

### 3.1.4 Determinação do teor de humidade

A NP EN 1097-5 (2002) especifica o método de ensaio para a determinação do teor de humidade dos agregados por secagem em estufa ventilada. A mesma norma refere que a secagem em estufa permite obter uma medida da quantidade total de água livre presente num provete de agregado.

O princípio do ensaio consiste em colocar um provete numa estufa ventilada à temperatura de  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  previamente pesado. Posteriormente, são efetuadas pesagens sucessivas para determinar a massa constante do provete seco. Considera-se que o provete está seco quando após pesagens sucessivas a massa difere menos de 0,1 %. O teor de humidade é obtido pela diferença de massa entre as massas húmida e seca, e é expresso em percentagem da massa do provete seco, calculando-se a partir da seguinte equação (3-3):

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (3-3)$$

Em que:

- $w$  é o teor de humidade [%];
- $M_1$  é a massa da areia “húmida” [g];
- $M_2$  é a massa constante da areia seca [g].

Seguindo-se a metodologia proposta na norma, o ensaio foi realizado em dois provetes elementares, sendo o teor de humidade do agregado calculado como a média aritmética dos dois valores. O Quadro 3-4 sintetiza o cálculo efetuado.

Quadro 3-4: Massas e respetivo teor de humidade dos agregados em estudo

Massa do tabuleiro [g]	Massa com areia "húmida" [g]	Massa com areia seca [g]	$M_1$ [g]	$M_2$ [g]	$w$ [%]
10,7	66,5	64,6	55,8	53,9	3,5
10,8	69,5	67,4	58,7	56,6	3,7
Média =					3,6

O teor de humidade do agregado foi de 3,6% da massa do provete seco.

## 3.2 Ligantes

Neste estudo optou-se por utilizar dois ligantes hidráulicos para a confeção das argamassas, sendo estes, o cimento e a cal hidráulica.

Os constituintes e características destes dois materiais são descritos nas secções seguintes, tendo como base a informação apresentada nas respetivas fichas técnicas dos produtos.

### 3.2.1 Cimento Portland de calcário CEM II/ B-L 32,5 N

Os requisitos e os critérios de conformidade a que os cimentos devem obedecer estão descritos na EN 197-1. A Figura 3-6 mostra o aspeto do cimento utilizado neste estudo.

Os principais constituintes deste ligante são o clínquer e o calcário, obedecendo aos seguintes requisitos regulamentares:

$$65\% \leq \text{Clínquer} \leq 79\%$$

$$21\% \leq \text{Calcário} \leq 35\%$$

As características exigidas a este cimento são habitualmente agrupadas em químicas, físicas e mecânicas:

- Químicas

$$\text{Sulfatos (SO}_3) \leq 3,5\%$$

$$\text{Cloretos (Cl)} \leq 0,10\%$$

- Físicas

$$\text{Início de presa (min)} \geq 75$$

$$\text{Expansibilidade (mm)} \leq 10$$

- Mecânicas

Resistência à compressão (valores mínimos):

$$7 \text{ dias: } 16,0 \text{ MPa}$$

$$28 \text{ dias: } 32,5 \text{ MPa}$$



Figura 3-6: Amostra de cimento

### 3.2.2 Cal hidráulica HL 5

Os requisitos e os critérios de conformidade a que este material deve obedecer estão descritos na NP EN 459-1. A Figura 3-7 mostra o aspeto da cal hidráulica em estudo.

Os principais constituintes deste ligante são o calcário margoso cozido com extinção e moagem e o sulfato de cálcio que atua como regulador de presa.

As características exigidas a este material são habitualmente agrupadas em químicas, físicas e mecânicas:

- Químicas

Sulfatos ( $\text{SO}_3$ )  $\leq 3,0\%$

Cal disponível  $\geq 4\%$

- Físicas

Início de presa (min)  $\geq 60$

Expansibilidade (mm)  $\leq 20$

Resíduo a 0,090 mm  $\leq 15\%$

Baridade (g/l)  $\geq 600$

- Mecânicas

Resistência à compressão (valores mínimos):

7 dias: 2,0 MPa

28 dias: 5,0 MPa



Figura 3-7: Amostra de cal hidráulica

## 3.3 Resíduos

Os resíduos utilizados para este estudo foram disponibilizados pelo Departamento de Ambiente da ESTGV, sendo eles: cinzas de biomassa, lamas de papelreira e lamas de crómio. No decorrer do trabalho optou-se por designar as lamas de papelreira por lamas de cal, devido ao processo produtivo que as origina.

Nas secções seguintes apresenta-se uma descrição mais detalhada da proveniência, características e propriedades de cada um dos resíduos.

### 3.3.1 Cinzas de biomassa

Estas cinzas são originárias duma central termoelétrica situada no distrito de Viseu, sendo portanto provenientes do aproveitamento energético de resíduos florestais (Figura 3-8).

A biomassa florestal é a matéria vegetal proveniente da silvicultura e dos desperdícios de atividade florestal, incluindo apenas o material resultante das operações de condução, nomeadamente de desbaste e de desrama, de gestão de combustíveis e da exploração dos povoamentos florestais, como os ramos, bicadas, cepos, folhas, raízes e cascas.

Os constituintes das cinzas de biomassa são bastante diversos, dependendo do tipo de material original, do tipo de solo e da colheita. Em geral, os maiores elementos inorgânicos formados nas cinzas presentes nos combustíveis de biomassa são cálcio (Ca), potássio (K), sódio (Na), silício (Si) e fósforo (P). Alguns combustíveis de biomassa possuem elevado teor de silício (por exemplo, casca de arroz), já outros possuem elevado teor de metal alcalino (madeira) (Garcia, 2013).



Figura 3-8: a) e b) Cinzas de biomassa provenientes da central termoelétrica

A utilização de cinzas de resíduos de biomassa em betão é um meio sustentável para a sua eliminação e reutilização. De facto, atualmente, a maior parte das cinzas de biomassa produzida é reciclada em florestas ou usada como um complemento para melhorar a alcalinidade do solo, podendo ainda ser rejeitada para deposição em aterro, na maioria das vezes sem qualquer forma de controlo. Porém o descarte de cinzas de madeira em aterros deve ser devidamente projetado devido à facilidade de contaminação do ar por ação do vento, pois trata-se de partículas finas e leves, podendo causar problemas de saúde respiratórios à população residente perto do local da eliminação (Cunha, 2013).

Ban and Ramli (2011) demonstraram que as cinzas volantes de madeira podem ser utilizadas como material de substituição de cimento para a produção de betão estrutural, com grau aceitável de resistência e durabilidade e Elinwa et al (2008) analisaram e provaram a sua possível aplicação em betão auto-compactável.

As cinzas produzidas na combustão de biomassa representam um problema para o detentor, que é responsável pela gestão adequada dos resíduos que produz. O Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Outubro republicado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de junho, que estabelece o Regime Geral da Gestão de Resíduos, define as prioridades de gestão de resíduos. A eliminação definitiva é a última opção, só possível quando não existem soluções tecnicamente ou economicamente viáveis de prevenção, reutilização, reciclagem ou outras formas de valorização.

A Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março, adota a Lista Europeia de Resíduos (LER), com classificação harmonizada dos resíduos existentes nos mais variados setores de atividade. A LER é complementada com as características de perigo atribuíveis aos resíduos e com as operações de valorização e eliminação possíveis. De acordo com a LER, as cinzas de biomassa provenientes das centrais termoelétricas ou de cogeração podem ser classificadas com o código

10 01 01 (cinzas, escórias e poeiras de caldeiras) ou com o código 10 01 03 (cinzas volantes da combustão de turfa ou madeira não tratada), conforme a sua origem.

Atualmente, grande parte das cinzas de biomassa produzidas em centrais termoelétricas ou de cogeração em Portugal são depositadas em aterro ou recicladas na agricultura, a maioria das vezes sem qualquer tipo de controlo. Tendo em conta o aumento de produção de cinzas esperado num futuro próximo, é urgente criar um sistema sustentável da gestão destes recursos.

Não são conhecidas as quantidades de cinzas depositadas em aterro ou valorizadas em Portugal. Sabe-se que as centrais pertencentes à indústria papelreira têm por prática misturar as cinzas de biomassa com as lamas do processo produtivo, utilizando a mistura na agricultura e na compostagem (Coelho, 2010).

#### **3.3.2 Lamas de cal**

De forma a atender às necessidades dos clientes, a indústria da pasta e do papel fabrica produtos tais como, papel de impressão e escrita, jornais, revistas, embalagens, caixas e um grande número de papéis especiais (selos, filtros de ar, filtros de café, panificação, etc.), sendo que cada um destes produtos requer propriedades específicas e um processo de produção adequado (Surh, 2000).

Através das suas atividades de produção, a indústria papelreira torna-se responsável por uma grande quantidade de resíduos inorgânicos (cinzas), orgânicos (lamas) e ainda outros subprodutos. No entanto, existe cada vez mais interesse e preocupação na sua reutilização como recursos e não eliminá-los como resíduos (Nurmesniemi et al., 2007).

Neste âmbito, as preocupações ambientais e económicas têm incentivado o desenvolvimento de novas tecnologias de eliminação destes subprodutos (Hackett et al., 1999).

O aterro sanitário constitui a técnica mais comum de deposição (Reid, 1998), no entanto, fatores como a sua capacidade limitada, oposição pública e a produção de lixiviados tóxicos, têm demonstrado não ser uma solução viável do ponto de vista socioeconómico e ambiental (Lagacé et al., 1998).

A incineração, o segundo método mais utilizado, devido à subida do custo dos combustíveis, ao alto custo do capital e às preocupações relacionadas com poluição atmosférica apresenta atualmente diversas limitações, não constituindo uma alternativa viável para a valorização destes resíduos (Oliveira, 2009).

Diversos estudos têm demonstrado resultados benéficos da aplicação destes resíduos no solo, como uma melhoria significativa das propriedades físico-químicas deste e com um maior rendimento a nível de produção de culturas (Henry et al., 1993).

Segundo a LER, as lamas de cal resultantes do processo de produção de papel são classificadas com o código 03 03 09. Neste estudo irá ser analisada a possibilidade de incorporar este resíduo (lamas de cal) (Figura 3-9) em argamassas de construção.



a) b)  
Figura 3-9: a) e b) Aspeto das lamas de cal em estudo

O Quadro 3-5 (Tran, 2008) indica a composição química das lamas de cal provenientes da produção de papel.

Quadro 3-5: Valores típicos para lamas de cal (Tran, 2008)

	<b>Média [%]</b>	<b>Intervalo [%]</b>
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	95,00	92 – 97
<b>MgO</b>	1,04	0,4 – 1,6
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,50	0,1 – 0,4
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,14	0,05 – 0,4
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,05	0,01 – 0,4
<b>P<sub>2</sub>O<sub>6</sub></b>	0,86	0,2 – 1,4
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,14	0,5 – 1,6
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,09	0,04 – 0,12
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,91	0,3 – 2,5

### 3.3.3 Lamas de crómio

Este resíduo é proveniente de lamas de tratamento de águas residuais resultantes do processo de lacagem de superfícies (Figura 3-10).

Segundo a LER, as lamas de crómio do tratamento de superfícies tem o código 11 01 98, designado por “Outros resíduos contendo substâncias perigosas”, pertencente à secção dos resíduos da hidrometalurgia de metais não ferrosos inserido nos resíduos de tratamentos químicos e revestimentos de metais.

O setor industrial gera muitas vezes no seu processo produtivo resíduos considerados perigosos por apresentarem uma ou mais características de perigosidade constante. Este resíduo tem na sua composição crómio dissolvido que é muito tóxico para os organismos aquáticos podendo causar efeitos nefastos a longo prazo no meio aquático. Desta forma, com o objetivo de reduzir o seu impacto, foi estudada a possibilidade de o estabilizar e solidificar através da incorporação em argamassas.

A estabilização e solidificação permitem assim a redução da mobilidade do poluente integrando-o numa matriz sólida, proporcionando a ausência de líquidos livres e a diminuição da sua perigosidade por redução do seu contacto com o ambiente.



Figura 3-10: Aspeto das lamas de crómio em estudo

### 3.3.4 Caracterização química dos resíduos em estudo

No âmbito deste trabalho foram realizados ensaios iniciais para a caracterização de cada um dos resíduos isoladamente. Estes ensaios decorreram nos laboratórios do Departamento de Ambiente da ESTGV, tendo sido realizados por uma equipa especializada. O ensaio efetuado foi o de lixiviação, seguindo-se a metodologia indicada na norma europeia EN 12457-4 (2002),

que permite obter uma caracterização química do material. Os resultados referentes a esta caracterização estão descritos no Quadro 3-6.

Esta caracterização química serve essencialmente para verificar se os resultados se encontram abaixo dos valores limites de lixiviação para deposição em aterros de resíduos não perigosos citados no Decreto-Lei n.º 183/2009 e consequentemente avaliar a perigosidade de cada resíduo.

Apresenta-se também no Quadro 3-6 os resultados dos mesmos ensaios para o cimento Portland, permitindo assim uma análise comparativa, uma vez que todos estes materiais foram utilizados como ligantes nas argamassas produzidas no âmbito deste trabalho.

Quadro 3-6: Valores obtidos para as características químicas dos resíduos em estudo

<b>Parâmetros</b>	<b>Cinzas de biomassa</b>	<b>Lamas de cal</b>	<b>Lamas de crómio</b>	<b>Cimento</b>
<b>pH</b> [-]	11,6	10,5	7,5	12,6
<b>Condutividade</b> [ms/cm]	1,19	3,02	1,85	2,50
<b>Teor de humidade</b> [%]	0,03	33,70	8,08	0,41
<b>Teor de matéria orgânica</b> [%]	0,27	0,83	19,44	0,00
<b>Cinzas</b> [%]	99,7	99,2	78,9	-
<b>Concentração de crómio</b> [mg <sub>Cr</sub> /kg <sub>resíduo</sub> ]	0,51	0,64	36,39	-

Através da análise do Quadro 3-6 verifica-se que o pH é alcalino em todas as amostras, embora com menor intensidade nas lamas de crómio, tendo estas apresentado um valor próximo do neutro. Relativamente à condutividade, esta apresenta-se com valores semelhantes em todos os materiais. O resíduo com maior teor de humidade são as lamas de cal. As lamas de crómio apresentam um elevado teor de matéria orgânica quando comparado com os restantes resíduos. A percentagem de cinzas é ligeiramente superior nas cinzas resultantes da queima de biomassa e por fim, a concentração de crómio é evidentemente mais elevada nas lamas de crómio.

Segundo a legislação, os resíduos são classificados como não perigosos, à exceção das lamas de crómio que não se insere nesta classificação, uma vez que a concentração de crómio se encontra acima do valor limite de lixiviação (20 mg/Kg, base seca). Logo é considerado um resíduo perigoso.

Segundo o mesmo Decreto-Lei, todos os resíduos analisados são classificados como não inertes, uma vez que a concentração de crómio se encontra acima do valor limite de lixiviação (0,5 mg/Kg, base seca).

#### **3.4 Síntese do capítulo**

Este capítulo referiu-se à caracterização dos materiais utilizados para o estudo das argamassas com incorporação de resíduos.

Relativamente aos agregados foram realizados ensaios laboratoriais para a caracterização dos mesmos.

Em relação aos ligantes, as características destes materiais tiveram por base a informação apresentada nas respetivas fichas técnicas.

No que diz respeito aos resíduos foi apresentada uma descrição mais detalhada da proveniência e das características químicas de cada um.

## **4. Análise Preliminar de Sensibilidade**

### **4.1 Introdução**

A razão da existência deste capítulo prende-se com a necessidade de se seleccionar um ou mais resíduos que sejam capazes de satisfazer certos requisitos e exigências funcionais das argamassas.

Não existe uma norma ou procedimento que nos indique se um determinado resíduo é ou não adequado para substituir parte do ligante numa argamassa. Contudo, foi considerado que a forma mais prática de efetuar essa análise passaria por verificar se a mesma apresentaria estabilidade suficiente depois de um certo tempo de cura. Para isso, decidiu-se realizar ensaios mecânicos (à flexão e à compressão) em diferentes argamassas, com e sem resíduos, para uma posterior comparação de resultados, permitindo assim uma análise preliminar acerca dos materiais que poderão ser estudados mais aprofundadamente no capítulo seguinte.

### **4.2 Preparação das argamassas**

Antes de se prosseguir para a composição e preparação dos provetes, importa referir que os resíduos em estudo foram sujeitos ao processo de peneiração, tendo sido passados no peneiro com abertura em malha quadrada de 0,250 mm. O objetivo deste procedimento prende-se com o facto de se pretender uma granulometria idêntica à do cimento e da cal hidráulica.

É de salientar que tanto as lamas de cal como as lamas de crómio apresentaram valores elevados para o teor de humidade. Posto isto, colocaram-se, separadamente, amostras destes dois

resíduos em estufa ventilada à temperatura de  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Após se retirarem os resíduos da estufa, esperou-se cerca de 1 h até atingirem a temperatura ambiente.

Verificou-se que as lamas de crómio, apesar de secas, continuavam a apresentar uma granulometria exageradamente grande, pelo que foi necessário proceder à moagem deste material com auxílio de um tabuleiro e pilão apropriados, conforme representado na Figura 4-1.



a) b)  
Figura 4-1: a) e b) Moagem das lamas de crómio

Tal como já tinha sido referido, após o esmagamento das partículas de maior dimensão, o material foi passado no peneiro com abertura em malha quadrada de 0,250 mm (Figura 4-2 a)), conforme ilustrado na Figura 4-2 b).



a) b)  
Figura 4-2: a) Peneiro com abertura em malha quadrada de 0,250 mm; b) Material passado no peneiro

Este processo foi também aplicado nas lamas de cal, no entanto, neste caso específico, não houve necessidade de se proceder à moagem do referido resíduo, sendo que foi apenas sujeito a peneiração. No que diz respeito às cinzas de biomassa, estas foram igualmente passadas no peneiro já referido, sem ir à estufa.

Para a confeção das argamassas foi seguida a NP EN 196-1 (1996). No que diz respeito à sua composição, a referida norma indica que o traço (em peso) é de 1:3 (cimento : agregados) e a relação água / cimento é de 0.50, ou seja, cada amassadura para três provetes deve conter  $(450 \pm 2)$  g de cimento,  $(1350 \pm 5)$  g de areia e  $(225 \pm 1)$  g ou ml de água. No entanto, foi adotado o traço 1:1:5 (cimento : cal hidráulica : agregados) para as argamassas em estudo. A razão pela escolha deste traço prende-se com o facto de se pretender uma argamassa de reboco, sendo este um traço usualmente praticado em obra (Almeida, 2010).

Posto isto, a composição da amassadura em estudo para um traço de 1:1:5 (em peso) e razão a/c = 0,5 é:

- Cimento: 260 g;
- Cal hidráulica: 260 g;
- Areia: 1300 g;
- Água: 260 ml.

Como o objetivo desta análise preliminar de sensibilidade é determinar a viabilidade de cada resíduo, foi efetuada uma substituição parcial de 20% do ligante (cimento + cal hidráulica) na composição das argamassas, uma vez que essa percentagem é o caso mais desfavorável neste estudo.

Para realizar a referida comparação de resultados foram confeccionadas cinco argamassas distintas:

- Argamassa de controlo com traço 1:1:5, designada por *Arg. 1:1:5*;
- Argamassa de controlo com traço 1:2,5 (cimento : agregados), designada por *Arg. 1:2,5*;
- Argamassa com substituição do ligante em 20% de cinzas de biomassa, designada por *Cz. 20*;
- Argamassa com substituição do ligante em 20% de lamas de cal, designada por *Lm. 20*;
- Argamassa com substituição do ligante em 20% de lamas de crómio, designada por *Cr. 20*.

O Quadro 4-1 indica a composição, em gramas, dos provetes para as misturas referidas acima.

Quadro 4-1: Composição dos provetes das argamassas

Constituinte	Arg. 1:1:5	Arg. 1:2,5	Cz. 20	Lm. 20	Cr. 20
Cimento [g]	260	520	208	208	208
Cal hidráulica [g]	260	0	208	208	208
Cinzas de biomassa [g]	0	0	104	0	0
Lamas de cal [g]	0	0	0	104	0
Lamas de crómio [g]	0	0	0	0	104
Areia [g]	1300	1300	1300	1300	1300
Água [ml]	260	260	260	260	260

Para avaliar a diferença de uma argamassa com um só ligante (cimento) e de uma argamassa com dois ligantes (cimento e cal hidráulica) foi realizada a argamassa de controlo com traço 1:2,5. Sabe-se à partida que a *Arg. 1:2,5* apresentará valores superiores nos ensaios mecânicos, contudo, será importante verificar a variância de resultados em cada uma destas argamassas nos ensaios referidos.

Primeiramente pesaram-se todos os constituintes numa balança com precisão até três casas decimais. De seguida, procedeu-se à amassadura de cada argamassa, respeitando as exigências descritas na NP EN 196-1, isto é, deitou-se a água no recipiente do misturador e introduziu-se de seguida o ligante, colocando imediatamente o misturador em funcionamento à velocidade lenta durante 30 segundos (Figura 4-3 a)). Após esse processo, inseriu-se regularmente toda a areia durante os 30 segundos seguintes e de seguida colocou-se o misturador à velocidade rápida e continuou-se a amassadura durante 1 minuto e 30 segundos. Parou-se o misturador durante 1 minuto e 30 segundos e durante esse tempo raspou-se toda a argamassa que aderiu às paredes e ao fundo do recipiente por meio de uma espátula (Figura 4-3 b)). Por fim, continuou-se a amassadura à velocidade rápida durante 60 segundos.



Figura 4-3: a) Mistura do ligante com água; b) Mistura com areia

Relativamente à preparação dos provetes prismáticos, estes devem conter as dimensões 40 x 40 x 160 [mm<sup>3</sup>]. Estes devem ser moldados imediatamente a seguir à preparação das argamassas, conforme indica a NP EN 196-1.

Importa referir que antes da confeção das argamassas, untaram-se as superfícies dos moldes com óleo mineral com o objetivo de servir de material lubrificante a fim de se proceder á desmoldagem com eficiência.

Nota também para o facto de apenas se ter disponíveis três provetes prismáticos, o que significa a impossibilidade de se confeccionarem todas as argamassas num só dia.

Na moldagem dos provetes começou-se por introduzir a primeira de duas camadas de argamassa em cada compartimento do molde com auxílio de uma colher (Figura 4-4 a)), estendendo a camada uniformemente, utilizando uma espátula metálica mantida na vertical com movimento vaivém (Figura 4-4 b)).



Figura 4-4: a) Enchimento da primeira camada dos provetes; b) Distribuição uniforme da argamassa

De seguida, compactou-se a primeira camada de argamassa com 60 pancadas na mesa de espalhamento (Figura 4-5 a)). Introduziu-se a segunda camada de argamassa, nivelou-se com a espátula e compactou-se de novo com 60 pancadas. Retirou-se o excesso de argamassa com a colher e nivelou-se a superfície dos provetes utilizando a mesma quase na horizontal (Figura 4-5 b)).



Figura 4-5: a) Compactação da primeira camada; b) Nivelamento da superfície

Depois de concluída esta etapa, identificou-se devidamente cada provete, deixando-o exposto ao ar húmido no local da amassadura (Figura 4-6 a)).

A desmoldagem dos provetes foi efetuada após 48 h (Figura 4-6 b)). O motivo que levou a este tempo de espera deve-se ao facto das argamassas em estudo conterem cal hidráulica e resíduos, uma vez que, pretende-se que estas adquiram resistência suficiente para serem manejadas sem risco de se danificarem.



Figura 4-6: a) Identificação dos provetes; b) Desmoldagem dos provetes

Os provetes foram totalmente imersos em água à temperatura de  $20 \pm 1$  °C proporcionando assim uma condição de cura adequada. Estes foram retirados da água 7 dias depois da amassadura para a realização dos ensaios mecânicos descritos na NP EN 196-1.

## 4.3 Ensaio mecânicos

### 4.3.1 Determinação da resistência à flexão

Para determinar a resistência à flexão, a norma indica a utilização do método de carga concentrada a meio vão utilizando uma prensa apropriada para o efeito (Figura 4-7). O método consiste em colocar cada provete prismático sobre os cilindros de apoio e com o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios. Faz-se descer o cutelo da máquina até que se estabeleça o contacto com a face superior do provete, a meio vão, aplicando em seguida uma força gradualmente crescente, de modo contínuo e sem choques, ao ritmo de  $50 \pm 10$  N/s, até à rotura do provete. O valor da força de rotura é registado automaticamente pela máquina de ensaio e é dado em [kg.f].

O cálculo da resistência à flexão é determinado através da seguinte equação (4-1):

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (4-1)$$

Em que:

- $R_f$  é a resistência à flexão [MPa];
- $b$  é o lado da secção quadrada do prisma [mm];
- $F_f$  é a carga aplicada ao centro do prisma na rotura [N];
- $l$  é a distância entre apoios [mm].

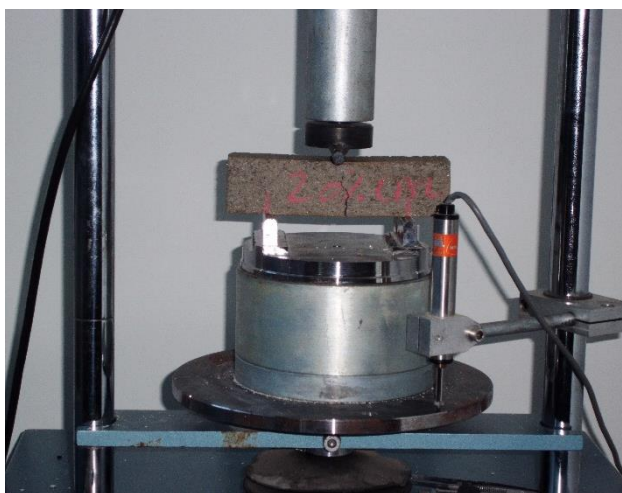


Figura 4-7: Prensa utilizada no ensaio à flexão

### 4.3.2 Determinação da resistência à compressão

Os meios-prismas resultantes do ensaio de flexão são aproveitados para este ensaio. Inicialmente procedeu-se à retificação dos provetes numa máquina de corte (Figura 4-8), respeitando as dimensões de 40 x 40 [mm<sup>2</sup>].



Figura 4-8: Máquina de corte

O ensaio para determinar a resistência à compressão consiste em colocar os cubos resultantes da retificação referida anteriormente sobre a placa do prato inferior da máquina, devidamente centrado. Desce-se o prato superior da máquina até estabelecer contacto com a face superior do provete e aplica-se uma força gradualmente crescente, de modo contínuo e sem choques, ao ritmo de  $2400 \pm 200$  N/s, até à rotura do provete (Figura 4-9). Por fim, regista-se o valor máximo da carga aplicada, em [kg.f].

O cálculo da resistência à compressão é determinado através da seguinte equação (4-2):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4-2)$$

Em que:

- $R_c$  é a resistência à compressão [MPa];
- $F_c$  é a carga máxima na rotura [N];
- 1600 é a área comprimida pelas placas, que resulta do cálculo (40 mm x 40 mm) [mm<sup>2</sup>].

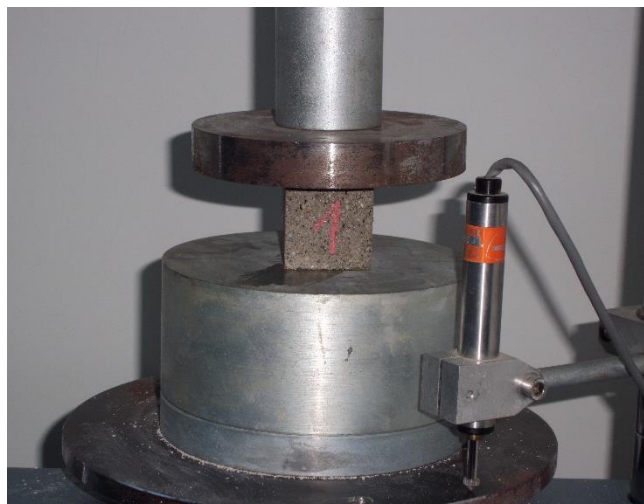


Figura 4-9: Ensaio de resistência à compressão

#### 4.4 Resultados e análise crítica

Relativamente aos resultados das cinco argamassas em estudo, a argamassa *Cr.20* (com substituição do ligante em 20% de lamias de crómio) foi imediatamente descartada dos ensaios mecânicos referidos por se encontrar danificada no ato da desmoldagem. Em termos de aspeto, esta argamassa apresentou falta de aglomeração aos agregados, pelo que, bastou tocar com as mãos sobre a mesma para se começar a desfazer (Figura 4-10).

Assim, a primeira conclusão a retirar desta análise preliminar é a eliminação do resíduo lamias de crómio para o decorrer do estudo, pois admite-se que este não serve para incorporar os constituintes de uma argamassa.



a)



b)

Figura 4-10: a) e b) Aspeto dos provetes da argamassa com incorporação de lamias de crómio

#### 4.4.1 Resistência à flexão

As restantes quatro argamassas foram ensaiadas aos 7 dias. A Figura 4-11 indica o valor para a resistência à flexão de cada argamassa em estudo. Conforme se pode verificar na leitura do gráfico, não houve uma variação significativa em relação às argamassas sem incorporação de resíduos, sendo que a sua constituição apenas difere no ligante.

Comparando agora a *Arg. 1:1:5* com as argamassas *Cz. 20* e *Lm. 20* verifica-se que a argamassa com substituição parcial de 20% do ligante por cinzas de biomassa teve uma redução de resistência à flexão em cerca de 20% , enquanto a resistência à flexão da argamassa com substituição parcial de 20% do ligante por lamas de cal diminuiu cerca de 50%.

Em suma, os resultados não são plenamente conclusivos uma vez que as argamassas foram sujeitas a ensaios em apenas um tempo de cura (7 dias). Importa agora saber qual o comportamento destas misturas para idades mais avançadas.

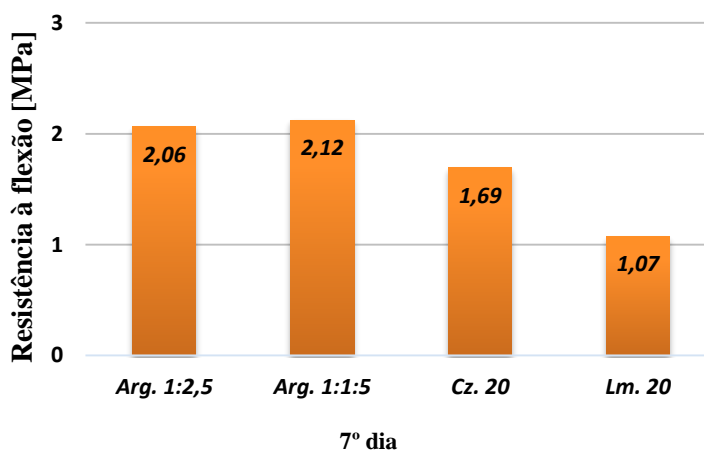


Figura 4-11: Resultados do ensaio de resistência à flexão

O Quadro 4-2 indica os resultados para cada provete prismático (V1, V2 e V3), respetiva média e desvio padrão para o ensaio referido. A apresentação deste quadro serve para apurar a variação de resultados para a mesma argamassa.

Quadro 4-2: Resultados do ensaio de resistência à flexão

		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à flexão [MPa]	Desvio Padrão
<b>Arg. 1:2,5</b>	<b>Provete</b>				
	V1	113	1108,53	2,60	
	V2	65	637,65	1,49	
	V3	91	892,71	2,09	
	Média			2,06	0,55
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à flexão [MPa]	Desvio Padrão
<b>Arg. 1:1:5</b>	<b>Provete</b>				
	V1	81	794,61	1,86	
	V2	105	1030,05	2,41	
	V3	91	892,71	2,09	
	Média			2,12	0,28
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à flexão [MPa]	Desvio Padrão
<b>Cz. 20</b>	<b>Provete</b>				
	V1	76	745,56	1,75	
	V2	70	686,70	1,61	
	V3	75	735,75	1,72	
	Média			1,69	0,07
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à flexão [MPa]	Desvio Padrão
<b>Lm. 20</b>	<b>Provete</b>				
	V1	51	500,31	1,17	
	V2	28	274,68	0,64	
	V3	61	598,41	1,40	
	Média			1,07	0,39

Através da leitura do Quadro 4-2 verifica-se que há uma diferença significativa na variação de resultados (desvio padrão) da *Arg. 1:1:5* comparativamente à *Arg. 1:2,5*, o que é um bom indício para o estudo, uma vez que as argamassas desenvolvidas futuramente irão conter cimento e cal hidráulica na sua constituição, sendo a *Arg. 1:1:5* a sua argamassa de controlo correspondente.

Já no que diz respeito à argamassa *Cz. 20*, constata-se que esta apresentou bastante regularidade nos três provetes, tendo sofrido uma variação quase nula nos seus resultados.

Em relação à *Lm. 20*, esta apresentou desvios consideráveis nos seus resultados, tendo sido a argamassa com incorporação de resíduos que evidenciou maior variabilidade.

De destacar que os desvios padrão apresentados são correspondentes a apenas três provetes para cada argamassa. Naturalmente que quanto maior fosse o número de provetes realizados, mais fíaveis seriam os seus resultados e consequentes conclusões.

#### 4.4.2 Resistência à compressão

A Figura 4-12 representa os valores de resistência à compressão correspondentes a cada argamassa, ao 7º dia.

A primeira nota a assinalar é que a argamassa que contém apenas cimento como ligante (*Arg. 1:2,5*) apresentou resultados superiores comparativamente à *Arg. 1:1:5* (cimento + cal hidráulica), tal como seria previsto. Verifica-se uma diminuição de resistência de cerca de 22% da *Arg. 1:2,5* para a *Arg. 1:1:5*.

Em relação às argamassas com incorporação de resíduos, constata-se que estas sofreram uma redução significativa comparativamente à sua argamassa de referência (*Arg. 1:1:5*). A resistência à compressão da *Cz. 20* decresceu cerca de 46%, a *Lm. 20* teve uma redução na ordem dos 61%.

Contudo, é importante frisar que o tempo de cura das argamassas estudadas foi 7 dias, pelo que, será interessante investigar a evolução desta resistência mecânica para idades mais avançadas.

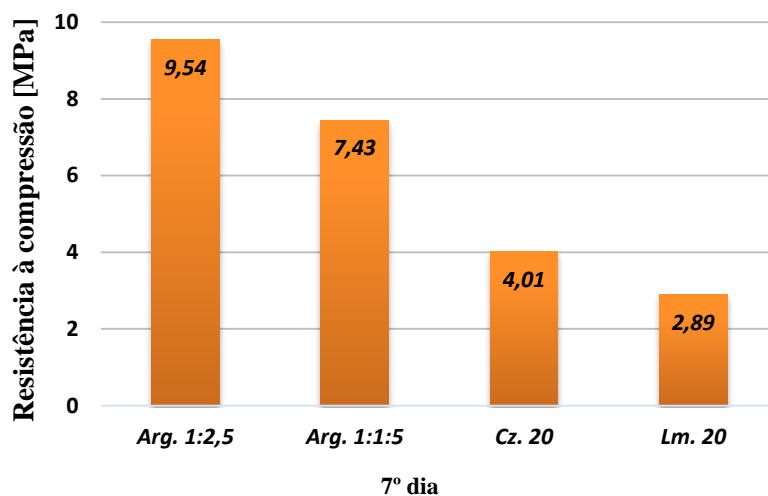


Figura 4-12: Resultados do ensaio de resistência à compressão

A par do sucedido na análise crítica da determinação da resistência à flexão, apresenta-se também neste subcapítulo o Quadro 4-3 com os resultados mais detalhados do ensaio de compressão das quatro argamassas em estudo.

Quadro 4-3: Resultados do ensaio de resistência à compressão

		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Arg. I:2,5</i>	<b>Provete</b>				
	V1	1810	17756,1	11,10	
	V1	1612	15813,72	9,88	
	V2	1240	12164,40	7,60	
	V2	1567	15372,27	9,61	
	V3	1443	14155,83	8,85	
	V3	1665	16333,65	10,21	
	Média				9,54
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Arg. I:1:5</i>	<b>Provete</b>				
	V1	1208	11850,48	7,41	
	V1	1144	11222,64	7,01	
	V2	1134	11124,54	6,95	
	V2	1288	12635,28	7,90	
	V3	1270	12458,70	7,79	
	V3	1231	12076,11	7,55	
	Média				7,43
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Cz. 20</i>	<b>Provete</b>				
	V1	703	6896,43	4,31	
	V1	623	6111,63	3,82	
	V2	638	6258,78	3,91	
	V2	714	7004,34	4,38	
	V3	597	5856,57	3,66	
	V3	650	6376,50	3,99	
	Média				4,01
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Lm. 20</i>	<b>Provete</b>				
	V1	524	5140,44	3,21	
	V1	581	5699,61	3,56	
	V2	499	4895,19	3,06	
	V2	286	2805,66	1,75	
	V3	469	4600,89	2,88	
	V3	466	4571,46	2,86	
	Média				2,89

Analisando o Quadro 4-3 verifica-se que neste ensaio, a *Arg. 1:2,5* apresenta um valor de desvio padrão consideravelmente superior ao da *Arg. 1:1:5*. No que diz respeito à *Cz. 20*, esta apresenta novamente menos variabilidade de resultados.

### 4.5 Síntese do capítulo

Em síntese, esta análise preliminar permitiu eliminar para o restante trabalho um dos três resíduos em estudo, as lamas de crómio. Sob o ponto de vista ambiental seria muito interessante integrar este resíduo em argamassas de construção uma vez que, isoladamente, se trata de um resíduo perigoso.

Comparando os registos da *Arg. 1:1:5* com a *Arg. 1:2,5* conclui-se que a argamassa à base de cimento e cal hidráulica apresenta valores com menor variabilidade.

Após a análise de resultados dos ensaios mecânicos realizados verificou-se que as argamassas com incorporação de resíduos evidenciaram uma diminuição de resistência tanto à flexão como à compressão em relação à sua argamassa de controlo (*Arg. 1:1:5*).

Comparando agora os resultados com os estudos referidos no subcapítulo 2.4.2, mais concretamente no ensaio à compressão ao 7º dia e nas argamassas com substituições do ligante por 20% de resíduo, tem-se:

- 35% de perda de resistência nas cinzas de resíduos sólidos urbanos em relação à sua argamassa de controlo (Cunha, 2013);
- 49% de perda de resistência nas cinzas de pellets em relação à sua argamassa de controlo (Cunha, 2013);
- 33% de perda de resistência nos resíduos de vidro moídos em relação à sua argamassa de controlo (Matos, 2010).

Neste estudo, a *Cz. 20* perdeu cerca de 46% da resistência e a *Lm. 20* sofreu uma perda na ordem dos 61% em relação à sua argamassa de controlo.

É importante voltar a referir que as argamassas de controlo dos estudos mencionados são diferentes das deste estudo, nomeadamente no seu traço (1:3), porém mantendo a relação a/c igual a 0,5.

## **5. Campanha Experimental e Análise de Resultados**

### **5.1 Introdução**

Os objetivos principais desta campanha experimental são o estudo das características mecânicas (flexão e compressão) de argamassas, com incorporação dos resíduos que apresentaram viabilidade na análise preliminar (cinzas de biomassa e lamas de cal). Além deste ensaio, pretende-se construir uma parede de teste em alvenaria, com revestimento cerâmico numa das faces, com o objetivo de se poder aplicar as várias argamassas de colagem e, na outra face, as de reboco para posteriormente se realizar ensaios de arrancamento por tração (*pull-off*).

A metodologia adotada neste estudo consiste em analisar o desempenho de argamassas de construção com e sem incorporação de resíduos, nomeadamente argamassas de reboco e argamassas de colagem.

No decorrer deste capítulo optou-se por designar as argamassas de colagem por cimentos-cola para mais facilmente as distinguir das argamassas de reboco.

Segundo a NP EN 196-1 (1996), a confeção das argamassas deve respeitar o traço em peso de 1:3 e relação a/c de 0,50. No entanto, a aplicação em obra de argamassas de reboco com esta quantidade de água é impensável, uma vez que se pretende uma mistura mais trabalhável, ou seja, mais fluida, com mais água.

Para a realização deste estudo foi construída uma parede de alvenaria com o objetivo de simular uma situação mais próxima da existente em obra. Numa das faces da parede foram aplicadas as

argamassas de reboco. Na outra face, colaram-se azulejos sobre um reboco tradicional utilizando os cimentos-cola.

Para avaliar o desempenho destas argamassas foi estabelecida uma campanha experimental que envolve a realização de ensaios de flexão e de compressão semelhantes aos realizados no capítulo anterior e, com a execução da parede, foi também possível realizar ensaios de arrancamento por tração (*pull-off*) aos dois tipos de argamassas.

Por fim foram também efetuadas análises químicas às argamassas, no estado endurecido, nomeadamente ensaios de lixiviação.

### 5.2 Construção da parede de alvenaria

A parede de alvenaria é constituída por 21 blocos térmicos de 20 cm de espessura e tem aproximadamente 3,5 m de comprimento e 60 cm de altura (Figura 5-1 b)).

A argamassa de assentamento foi preparada no local e tem um traço em peso de 1:4:0,5. A primeira fiada foi assente diretamente em cima da plataforma de trabalho sem argamassa. As restantes duas fiadas foram somente assentes longitudinalmente com argamassa, uma vez que os próprios blocos já continham o devido encaixe na vertical. A Figura 5-1 a) ilustra a colocação da argamassa no assentamento da última fiada de blocos.



Figura 5-1: a) Assentamento da última fiada de blocos; b) Parede de alvenaria

Após uma semana, aplicou-se a primeira camada dos revestimentos tradicionais de ligantes hidráulicos, designada por chapisco (crespido ou salpico) nas duas faces da parede. Esta destina-se a assegurar a aderência do revestimento ao suporte (parede de alvenaria). A argamassa foi doseada e preparada no local com um traço em peso de 1:2, ou seja, fortemente doseada em cimento e bastante fluida. Esta foi projetada manualmente com auxílio de uma

colher (Figura 5-2 a)) até apresentar uma estrutura rugosa para proporcionar boa aderência à camada seguinte (Figura 5-2 b)). A espessura desta camada varia entre 3 a 5 mm.

É de salientar que a aplicação do chapisco deve ser iniciada após a retração da alvenaria (no mínimo um mês). Contudo, obviamente não foi respeitada essa condição uma vez que se trata de um troço de parede meramente experimental.



Figura 5-2: a) Projeção manual do chapisco; b) Aspetto final da parede com chapisco

Uma vez que ficou definido que numa das faces da parede iriam ser aplicados os cimentos-cola, a mesma foi rebocada com uma argamassa com traço em peso de 1:1:5 (cimento, cal hidráulica, areia) servindo assim como camada de base (emboço) à colagem dos azulejos.

Três dias após a aplicação do chapisco foi rebocada a face da parede utilizando o mesmo método de projeção manual com colher. Depois de projetada, foi retirado o excesso de argamassa na parede com auxílio de uma régua de madeira (Figura 5-3 a)) e de seguida procedeu-se ao alisamento da superfície com a talocha, permitindo assim uma boa planeza e rugosidade da mesma (Figura 5-3 b)).

A espessura desta camada deve estar compreendida entre 10 a 15 mm. Neste caso específico, foram colocadas régua de madeira no topo do suporte, com o comprimento da parede e com uma saliência de aproximadamente 10 mm para se realizar o enchimento da mesma, funcionando como pontos de referência e fazendo o mesmo papel que as mestras.



Figura 5-3: a) Eliminação do excesso de argamassa; b) Alisamento da superfície com talocha

## 5.3 Estudo e aplicação dos cimentos-cola

### 5.3.1 Metodologia

O procedimento adotado para esta parte do estudo baseou-se na colagem de peças cerâmicas de 15 x 15 [cm<sup>2</sup>] e 7 mm de espessura, sobre a parede utilizando diferentes cimentos-cola.

A análise implica a preparação e fabrico de nove cimentos-cola, sendo que um deles é comercial e vulgarmente utilizado em obra. O objetivo é testar e comparar as resistências mecânicas e a resistência ao arrancamento por tração de cada uma das diferentes misturas.

Ainda há poucas décadas atrás não existia a vasta gama de cimentos-cola que atualmente se tem ao dispor. As argamassas utilizadas eram executada em obra à base de cimento com pequenas ou nenhuma adições de areia fina. Assim, procurou produzir-se cimentos-cola com base nesse pressuposto através da substituição parcial do ligante (cimento e cal hidráulica) pelos resíduos que estão a ser estudados neste trabalho. Foram, também, confeccionadas argamassas sem qualquer agregado, com e sem incorporação de resíduos com vista a uma posterior comparação com o cimento-cola comercial.

Tendo em conta as dimensões da parede e dos azulejos, decidiu-se dividir os cimentos-cola por colunas, isto é, colar 8 azulejos com cada cimento-cola, adotando um espaçamento de 5 cm entre eles, conforme representado na Figura 5-4.

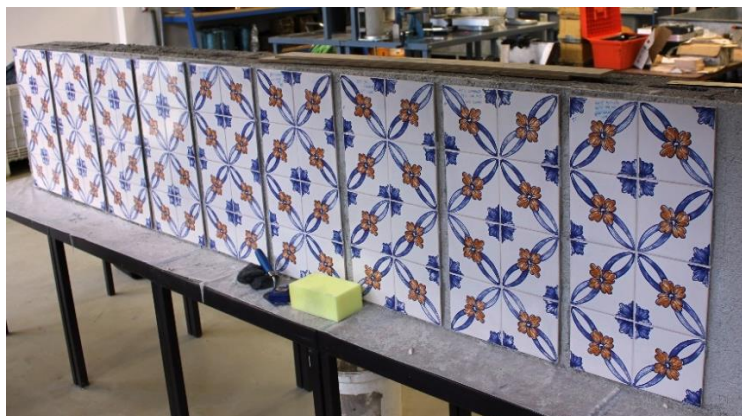


Figura 5-4: Esquema de aplicação dos diferentes cimentos-cola

Esta campanha envolveu, para além do cimento-cola comercial, oito argamassas distintas de cimentos-cola, tendo-se adotado as seguintes nomenclaturas:

- Cimento-cola com 100% de cimento, designado por *CIM. 100*;
- Cimento-cola com 90% de cimento e 10% de cinzas de biomassa, designado por *CIM. 90 CZ. 10*;
- Cimento-cola com 80% de cimento e 20% de cinzas de biomassa, designado por *CIM. 80 CZ. 20*;
- Cimento-cola com 90% de cimento e 10% de lamas de cal, designado por *CIM. 90 LM. 10*;
- Cimento-cola com 80% de cimento e 20% de lamas de cal, designado por *CIM. 80 LM. 20*;
- Cimento-cola com 50% de cimento e 50% de cal hidráulica, designado por *CIM. 50 CAL 50*;
- Cimento-cola com 45% de cimento, 45% de cal hidráulica e 10% de cinzas de biomassa, designado por *CIM. 45 CAL 45 CZ. 10*;
- Cimento-cola com 45% de cimento, 45% de cal hidráulica e 10% de lamas de cal, designado por *CIM. 45 CAL 45 CZ. 10*.

Quanto à quantidade de material necessário para cada mistura, teve-se em conta a área de aplicação na parede e a espessura de cola a utilizar, sendo que esta última dependeu da dimensão dos dentes da talocha (7 mm). Com base nesse critério, considerou-se que 1 kg de material (não

incluindo a água) seria suficiente para cada mistura. A constituição dos cimentos-cola está representada no Quadro 5-1:

Quadro 5-1: Constituintes dos cimentos-cola em estudo

Constituinte/ Misturas	Cimento [g]	Cal hidráulica [g]	Cinzas de biomassa [g]	Lamas de cal [g]	Água [ml]
<i>CIM. 100</i>	1000	-	-	-	400
<i>CIM. 90 CZ. 10</i>	900	-	100	-	400
<i>CIM. 80 CZ. 20</i>	800	-	200	-	400
<i>CIM. 90 LM. 10</i>	900	-	-	100	400
<i>CIM. 80 LM. 20</i>	800	-	-	200	400
<i>CIM. 50 CAL 50</i>	500	500	-	-	400
<i>CIM. 45 CAL 45 CZ.10</i>	450	450	100	-	400
<i>CIM. 45 CAL 45 LM. 10</i>	450	450	-	100	400

De salientar que antes de se definir a quantidade correta de água de amassadura, realizou-se a experiência de se confeccionar uma pasta com 100% de cimento e ir acrescentando água até se obter uma mistura com trabalhabilidade adequada para o efeito. Assim, chegou-se a 400 ml de água para 1 kg de material.

A quantidade de água de amassadura é igual para todas as misturas, à exceção do cimento-cola comercial que necessitou apenas de 200 ml de água para 1 kg de material. A confeção deste teve em conta as recomendações descritas na sua ficha técnica no que diz respeito à dosagem de água e condições de aplicação.

### 5.3.2 Colagem dos ladrilhos cerâmicos

As nove amassaduras foram efetuadas todas no mesmo dia. O cimento-cola comercial foi o primeiro a ser aplicado, tendo-se começado por espalhar a cola na parede com auxílio de uma colher (Figura 5-5 a)) e posteriormente com a talocha dentada. Este utensílio permite regular a espessura de cola a utilizar, além de proporcionar uma aderência mais eficiente ao azulejo (Figura 5-5 b)).

Após a passagem da talocha comprimiram-se os azulejos manualmente contra a parede permitindo assim que os mesmos permanecessem inteiramente em contacto com a cola (Figura 5-5 c)). Foram utilizadas cruzetas de 2 mm para as juntas de assentamento entre ladrilhos (Figura 5-5 d)).

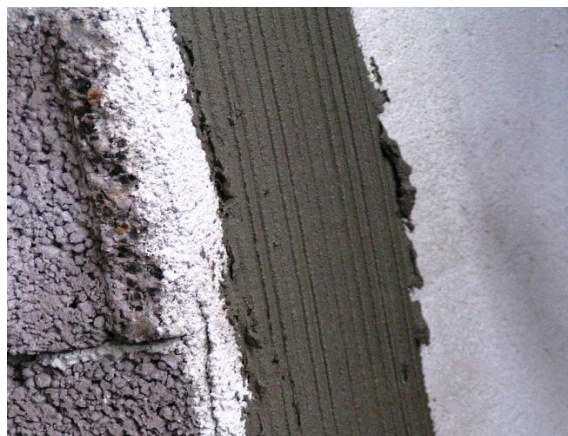
O método de colagem dos restantes oito cimentos-cola diferiu em alguns aspetos, os azulejos foram previamente saturados em água com o objetivo de evitar que o suporte absorvesse

rapidamente a água de amassadura da mistura (Figura 5-5 e)). Outro aspeto a ter em conta foi a colocação prévia da cola no ladrilho em vez da aplicação direta na parede (Figura 5-5 f)), uma vez que se verificou que todas as colas tinham um tempo aberto muito curto e um baixo poder molhante comparativamente com o cimento-cola comercial.

Durante a colagem verificou-se um baixo tempo de ajustabilidade nas misturas e um deficiente deslizamento das mesmas. Tal aconteceu porque todas as misturas em estudo contêm cimento na sua constituição, sem adjuvantes, ao contrário do cimento-cola comercial.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 5-5: a) Espalhamento da cola com a colher; b) Passagem da talocha dentada; c) Aplicação dos azulejos sobre a zona de colagem; d) Posição das cruzetas nos azulejos; e) Saturação dos azulejos em água; f) Colocação de cola sobre o azulejo

Para avaliar o desempenho mecânico à flexão e à compressão foram preparados provetes prismáticos, utilizando o mesmo método descrito no subcapítulo 4.2. A confecção dos nove cimentos-cola em estudo teve que ser realizada em três dias distintos devido ao número limitado de moldes.

Por limitação de tempo, apenas se efetuou, para cada mistura de cimento-cola, um provete para avaliar a resistência à flexão, e, conseqüentemente, dois para avaliar a resistência à compressão.

### 5.3.3 Resistência à flexão

A determinação da resistência à flexão seguiu a mesma metodologia que se encontra descrita no subcapítulo 4.3.1. Os cimentos-cola em estudo foram submetidos a ensaios de flexão com uma idade de 28 dias.

O ensaio foi realizado na mesma prensa que foi utilizada para os ensaios exibidos no capítulo 4 (Figura 5-6 a)).

A Figura 5-6 b) mostra o aspecto dos provetes prismáticos após o ensaio em questão.



a)



b)

Figura 5-6: a) Prensa utilizada no ensaio; b) Rotura dos cimentos-cola após o ensaio

A Figura 5-7 ilustra os resultados do ensaio de flexão para os nove cimentos-cola em estudo:

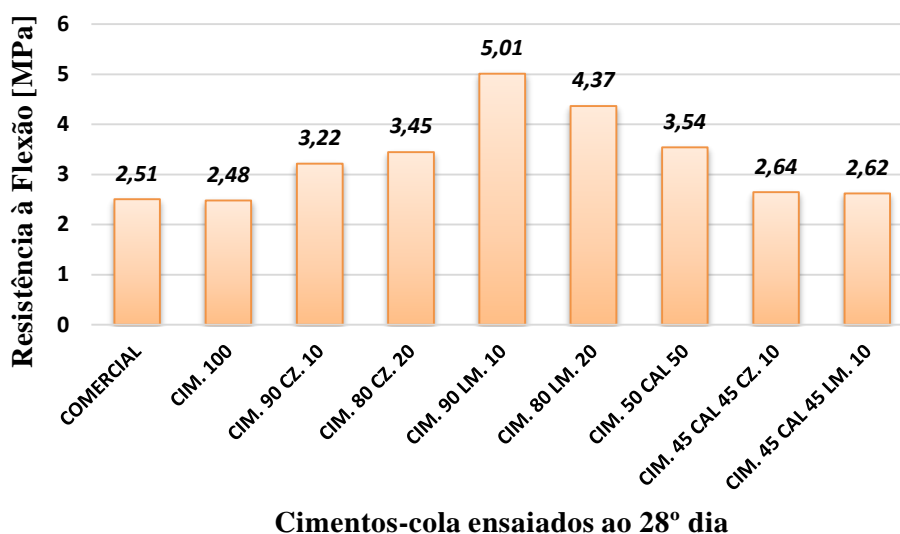


Figura 5-7: Resultados do ensaio de flexão dos cimentos-cola

Analisando os resultados expostos, a primeira nota a reter é que o *CIM. 90 LM. 10* (cimento-cola com 90% de cimento e 10% de lamas de cal) apresentou o valor mais elevado de resistência à flexão.

Segundo os resultados apresentados pode-se afirmar que, em geral, a incorporação de resíduos fez aumentar a resistência à flexão das misturas, pois dois dos três cimentos-cola que não contêm resíduos na sua constituição (*COMERCIAL* e *CIM. 100*) foram os que apresentaram os dois valores mais baixos, à exceção do *CIM. 50 CAL 50*.

Comparando agora o *CIM. 100* (cimento-cola de controlo / referência) com os cimentos-cola resultantes das substituições de 10 e 20% para cada resíduo em estudo, observa-se que as lamas de cal exibiram melhores resultados do que as cinzas de biomassa, sendo que, ambos os resíduos proporcionaram melhorias significativas de resistência à flexão nas misturas à base de cimento.

Analisando cada resíduo individualmente e comparando uma vez mais com o *CIM. 100*, verificou-se que o *CIM. 90 CZ. 10* teve um aumento de resistência na ordem dos 30% e o *CIM. 80 CZ. 20* obteve uma resistência superior em cerca de 39%, o que nos indica que, surpreendentemente, o incremento de cinzas de biomassa em 20% proporcionou melhores resultados. No caso das lamas de cal sucedeu-se o contrário, isto é, obteve-se resultados mais satisfatórios para 10% de resíduo ao invés de 20%. Quanto ao acréscimo de resistência, o *CIM. 90 LM. 10* registou um aumento de 102%, destacando-se como a mistura mais resistente. Já o *CIM. 80 LM. 20* teve uma resistência 76% superior à do cimento-cola de referência.

Em relação à comparação de resultados entre o *CIM. 50 CAL 50* (cimento-cola com 50% de cimento e 50% de cal hidráulica) com o *CIM 45 CAL 45 CZ. 10* e *CIM 45 CAL 45 LM. 10* observou-se uma redução de cerca de 25% e 26% de resistência à flexão, respetivamente.

Por fim, chama-se a atenção para a diferença de resultados quase nula entre o cimento-cola *COMERCIAL* e o *CIM. 100*. De realçar também o aumento de resistência em cerca de 43% por parte do *CIM. 50 CAL 50* em relação a este último, querendo isto mostrar que, segundo os resultados obtidos, o cimento-cola com cal hidráulica e cimento teve um comportamento mais resistente à flexão comparativamente ao cimento-cola composto exclusivamente por cimento.

### 5.3.4 Resistência à compressão

A avaliação da resistência à compressão seguiu a mesma metodologia que se encontra descrita no subcapítulo 4.3.2. Os cimentos-cola em estudo foram submetidos a ensaios de compressão 28 dias após a sua confeção.

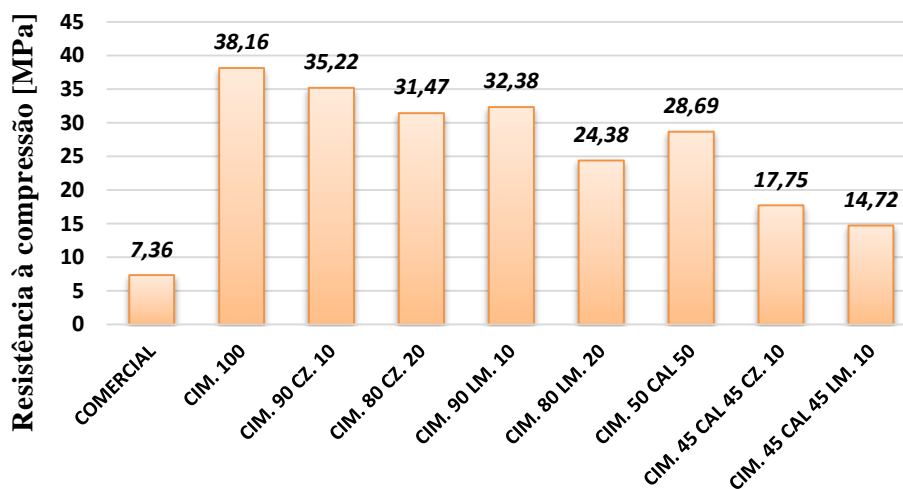
Ao contrário do sucedido no ensaio à flexão, o ensaio à compressão não foi realizado no mesmo equipamento utilizado para os ensaios exibidos no capítulo 4, uma vez que a carga máxima admissível da prensa está fixada nos 5000 kg.f, equivalente a uma resistência de 30,66 MPa. Como estava previsto que alguns dos cimentos-cola em estudo ultrapassassem esse valor, optou-se por realizar o ensaio numa outra prensa com capacidade até 3000 kN (1875 MPa) (Figura 5-8).



Figura 5-8: Prensa utilizada no ensaio de compressão dos cimentos-cola

A par do sucedido no subcapítulo 4.3.2, os meios-prismas resultantes do ensaio de flexão foram aproveitados para este ensaio, procedendo-se à sua retificação na mesma máquina de corte, respeitando as dimensões de 40 x 40 [mm<sup>2</sup>].

A Figura 5-9 ilustra os resultados do ensaio de compressão para os nove cimentos-cola em estudo.



#### Cimentos-cola ensaiados ao 28º dia

Figura 5-9: Resultados do ensaio de compressão dos cimentos-cola

Analisando o gráfico e ao contrário do sucedido nos resultados dos ensaios de flexão, os cimentos-cola com incorporação de resíduos tiveram uma resistência à compressão inferior.

Destaca-se a baixa resistência do cimento-cola *COMERCIAL* comparativamente a todos os outros. Em contrapartida o *CIM. 100* apresenta naturalmente o valor mais elevado.

Comparando agora o *CIM. 100* (cimento-cola de controlo / referência) com os cimentos-cola com incorporação de resíduos, observa-se que as cinzas de biomassa exibiram melhores resultados do que as lamas de cal.

Analisando cada resíduo individualmente e comparando uma vez mais com o *CIM. 100*, verificou-se que o *CIM. 90 CZ. 10* teve uma resistência inferior em cerca de 8%, quanto ao *CIM. 80 CZ. 20* a resistência diminuiu em cerca de 18%, o que nos indica que o aumento da percentagem de substituição de resíduo por cimento reduz a resistência à compressão das misturas. No caso das lamas de cal aconteceu o mesmo, isto é, obteve-se resultados mais satisfatórios para 10% de resíduo em vez de 20%. Quanto à diminuição da resistência, o *CIM. 90 LM. 10* registou um decréscimo de cerca de 15%, enquanto o *CIM. 80 LM. 20* teve uma redução de 36% da resistência em relação à do cimento-cola de referência.

Comparando os resultados entre o *CIM. 50 CAL 50* (cimento-cola com 50% de cimento e 50% de cal hidráulica) com o *CIM 45 CAL 45 CZ. 10* e *CIM 45 CAL 45 LM. 10* observou-se uma redução de resistência à compressão de cerca de 38% e 49% , respetivamente.

É importante salientar também a redução de resistência em cerca de 25% por parte do *CIM. 50 CAL 50* relativamente ao *CIM. 100*.

### 5.3.5 Arrancamento por tração (*Pull-off*)

A metodologia adotada para este ensaio segue as especificações prescritas na EN 1015-12 (2000).

O ensaio de arrancamento por tração consiste na determinação da força necessária para arrancar uma pastilha metálica com 50 mm diâmetro previamente colada ao suporte cuja aderência se pretende avaliar.

Segundo Amaral (2013), distinguem-se quatro tipos de rotura nas ligações ladrilho-cola-suporte (Figura 5-10).

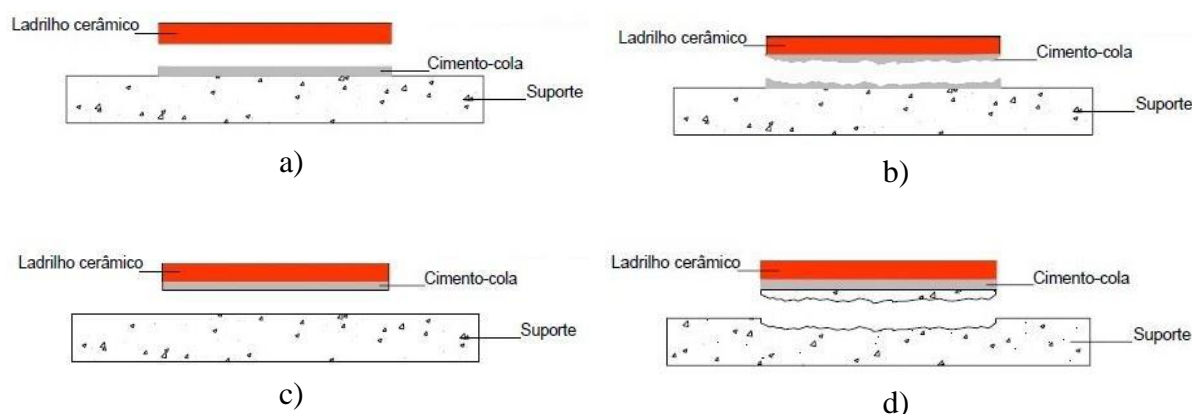


Figura 5-10: a) Rotura adesiva ladrilho-cola; b) Rotura coesiva da cola; c) Rotura adesiva cola-suporte; d) Rotura coesiva do suporte

Realizou-se o ensaio nos nove cimentos-cola em estudo, permitindo assim determinar o valor da tensão média de aderência, bem como o tipo de rotura inerente a cada mistura.

Este ensaio foi realizado 60 dias após a colagem dos ladrilhos cerâmicos, tendo-se efetuado 8 arrancamentos por cada cimento-cola (uma extração por azulejo), registando um total de 72 ensaios.

O método adotado consistiu em efetuar um pré-corte no azulejo com uma coroa dentada de 50 mm de diâmetro antes da colagem da pastilha circular. Conforme se pode observar na Figura 5-11 a), utilizou-se um molde em madeira, garantindo assim a colocação correta do berbequim perpendicularmente ao azulejo para que o corte fosse realizado sem deslocamentos, bem como um espaçador metálico para garantir a profundidade de corte desejada (Figura 5-11 b)).



Figura 5-11: a) Execução do pré-corte; b) Aspeto após o pré-corte

Uma vez que se tem 8 azulejos para cada cimento-cola, decidiu-se realizar dois pré-cortes distintos: pré-corte na espessura do azulejo (7 mm de profundidade) e pré-corte na espessura do azulejo + cimento-cola (14 mm de profundidade), sendo que, a convenção adotada foi que os 4 azulejos inferiores ficariam com pré-corte no azulejo e os 4 superiores com pré-corte no azulejo + cimento-cola.

Após efetuado o pré-corte procedeu-se à colagem das pastilhas metálicas com recurso a uma cola epóxi (cola de mistura de dois componentes (adesivo + endurecedor) apropriada para o efeito), aplicando-se uma camada fina e bem distribuída por toda a pastilha e exercendo uma pressão moderada sobre a peça com o objetivo de garantir uma colagem eficiente. Como se tinham disponíveis 10 pastilhas, tentou realizar-se o máximo de colagens possíveis de uma só vez, sendo que para isso foi necessário cortar algumas ripas de madeira à medida para auxiliarem no suporte das pastilhas durante os primeiros 20 minutos de colagem (Figura 5-12).



Figura 5-12: a) Apoios na colagem das pastilhas com pré-corte no azulejo; b) Apoios na colagem das pastilhas com pré-corte no azulejo + cimento-cola.

Na ficha técnica da cola epóxi está descrito que esta atinge a sua resistência máxima após 24 horas. Contudo, pretende-se apenas que a mesma atinga resistência suficiente para que no momento do arrancamento por tração não rompa pela sua interface com a pastilha. Com isto, experimentou realizar-se o ensaio após 1 hora de secagem, sendo que o resultado foi positivo e seguiu-se, portanto, este método para as restantes amostras (Figura 5-13 a).

Na Figura 5-13 ilustra-se o modo como o ensaio foi realizado.

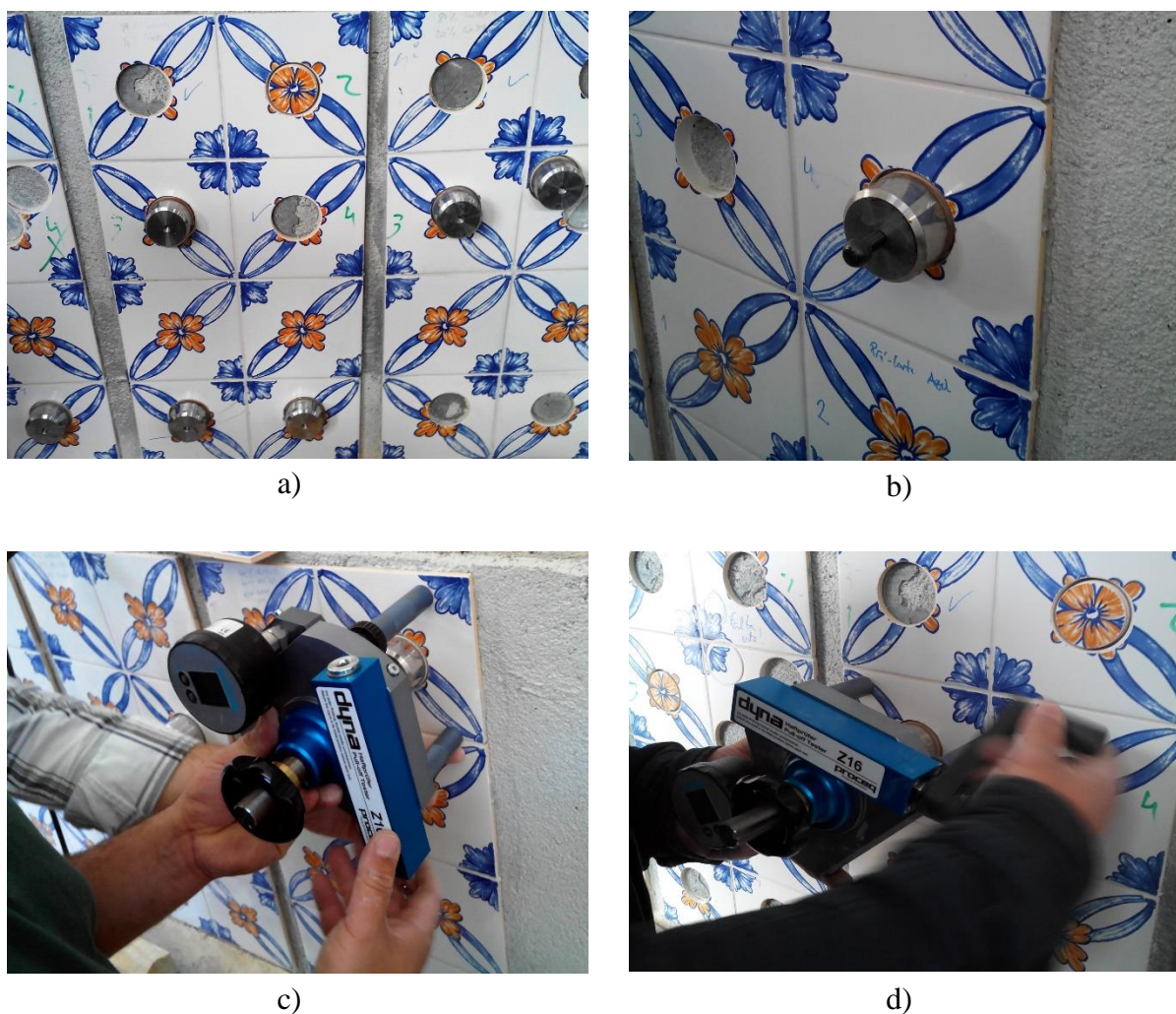


Figura 5-13: a) Pastilhas após 1 hora de secagem da cola; b) Colocação do parafuso de cabeça esférica; c) Ajustamento do aparelho sobre a pastilha a ensaiar; d) Aplicação da força de tração

No final do ensaio foi registada a força de tração máxima e analisado o tipo de rotura correspondente.

É importante referir que a análise das roturas não se revelou uma tarefa clara devido à dificuldade em se identificar o local exato onde se desenvolveu a dita fratura.

A Figura 5-14 a) mostra o aspeto de uma pastilha metálica após o arrancamento verificando-se que parte da argamassa de reboco (suporte) veio junto com a mesma, portanto, segundo a descrição da Figura 5-10 d) é uma rotura coesiva do suporte. A Figura 5-14 b) ilustra um modo de ruína misto, pois verifica-se que ficou cerca de metade do cimento-cola fixado no azulejo e a outra metade no suporte. Observando a Figura 5-10 pode dizer-se que estamos entre a situação a) e c), no entanto, foi admitido que se tratou de uma rotura coesiva da cola (Figura 5-10 b).

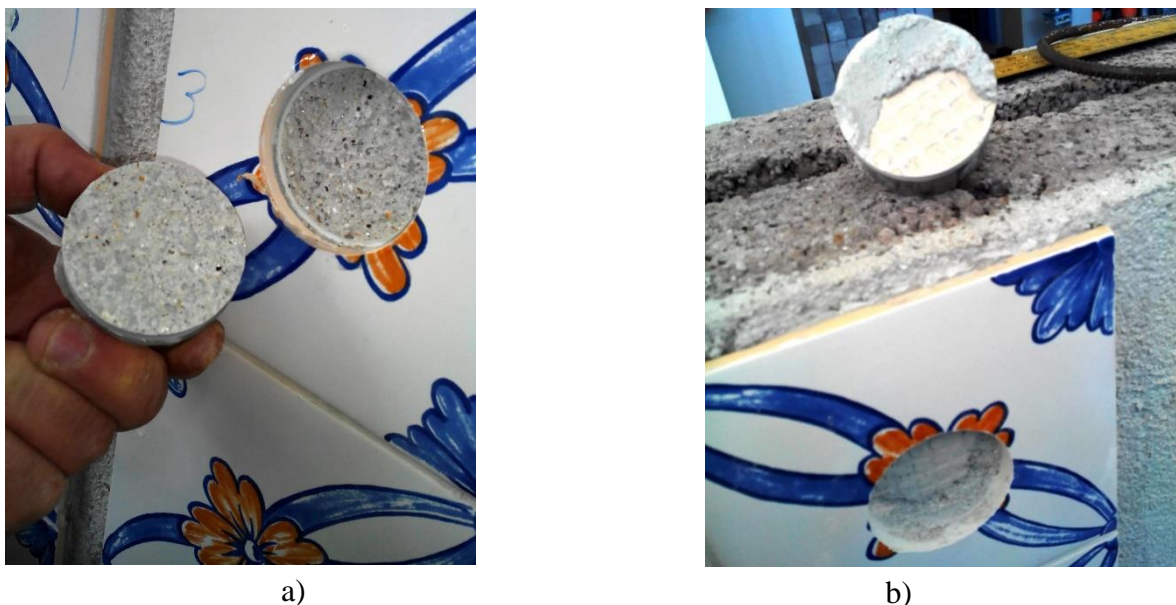


Figura 5-14: a) Exemplo de rotura coesiva do suporte; Exemplo de rotura coesiva da cola

O cálculo da tensão de rotura de arrancamento (tensão de aderência) é determinado através da seguinte equação (4-2):

$$\sigma_a = \frac{F_r}{A} \quad (5-1)$$

Em que:

- $\sigma_a$  é a tensão de rotura de arrancamento (tensão de aderência) [MPa];
- $F_r$  é a força de rotura registada pelo aparelho [N];
- $A$  é área da superfície circular da pastilha metálica com 50 mm de diâmetro [mm<sup>2</sup>].

A Figura 5-15 ilustra os resultados do ensaio de arrancamento por tração realizados nos nove cimentos-cola em estudo e para os dois tipos de pré-cortes referidos anteriormente.

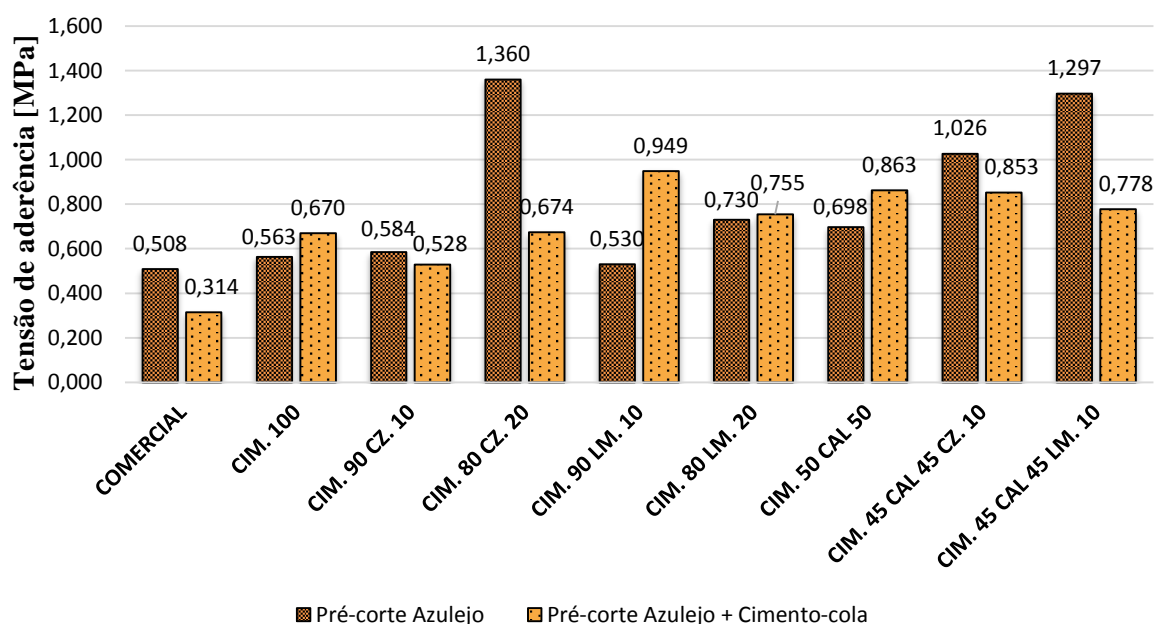


Figura 5-15: Resultados do ensaio de arrancamento por tração nos cimentos-cola

Segundo os resultados apresentados pode-se afirmar que, em geral, a incorporação de resíduos fez aumentar a aderência das misturas, com maior relevância nos ensaios efetuados com pré-corte no azulejo.

Abordando os resultados do pré-corte no azulejo e comparando o *CIM. 100* (cimento-cola de controlo / referência) com os cimentos-cola resultantes das substituições de 10% e 20% de ligante pelos resíduos em estudo, observa-se que as cinzas de biomassa exibiram melhores resultados do que as lamas de cal, sendo que, ambos os resíduos proporcionaram melhorias nas misturas, à exceção do *CIM. 90 LM. 10*. No que respeita aos resultados do pré-corte azulejo + cimento-cola e partindo do termo de comparação anterior observa-se que as lamas de cal exibiram melhores resultados do que as cinzas de biomassa, sendo que, em geral, as lamas de cal proporcionaram acréscimos na resistência ao arrancamento por tração. Nas cinzas de biomassa a aderência manteve-se praticamente inalterável no *CIM. 80 CZ. 20* e registou-se uma diminuição de resistência no *CIM. 90 CZ. 10*.

Destaque para o aumento da resistência ao arrancamento em cerca de 121% por parte do *CIM. 80 CZ. 20* comparativamente com o *CIM. 100* nos registos de pré-corte no azulejo.

No caso das misturas com lamas de cal verificou-se que os resultados registaram valores aproximados em ambos os tipos de pré-corte.

Em relação à comparação de resultados entre o *CIM. 50 CAL 50* (cimento-cola com 50% de cimento e 50% de cal hidráulica) com o *CIM. 45 CAL 45 CZ. 10* e *CIM. 45 CAL 45 LM. 10* observou-se, respetivamente, um aumento aproximado de 47% e de 86% da resistência ao

arrancamento por tração para o pré-corte no azulejo e mantiveram relativamente os mesmos resultados no pré-corte do azulejo + cimento-cola.

Nota para a diferença de aderência de aproximadamente 10% entre o *COMERCIAL* e o *CIM. 100* no pré-corte do azulejo e de 106% no pré-corte azulejo + cimento-cola. De realçar também o aumento de resistência por parte do *CIM. 50 CAL 50* em relação ao *CIM. 100* em ambos os tipos de pré-corte.

Identificaram-se os modos de ruína associados a cada cimento-cola e a cada tipo de pré-corte, com base na Figura 5-10. As ruínas registadas foram: a) rotura adesiva ladrilho-cola; b) rotura coesiva da cola; c) rotura adesiva cola-suporte; d) rotura coesiva do suporte.

No Quadro 5-2 indicam-se os diversos tipos de rotura identificados, sendo que, os resultados expostos correspondem a uma média de quatro leituras para cada tipo de pré-corte e para cada cimento-cola.

Quadro 5-2: Tipo de rotura nas ligações ladrilho-cola-suporte

	Pré-Corte Azulejo	Pré-Corte Azulejo + Cimento-cola
<i>COMERCIAL</i>	a)	a)
<i>CIM. 100</i>	b)	b)
<i>CIM. 90 CZ. 10</i>	b)	b)
<i>CIM. 80 CZ. 20</i>	a)	a)
<i>CIM. 90 LM. 10</i>	a)	a)
<i>CIM. 80 LM. 20</i>	a)	a)
<i>CIM. 50 CAL 50</i>	b)	b)
<i>CIM. 45 CAL 45 CZ. 10</i>	d)	a)
<i>CIM. 45 CAL 45 LM. 10</i>	d)	a)

Verificou-se que praticamente todos os cimentos-cola exibiram o mesmo tipo de rotura nos dois pré-cortes, à exceção do *CIM. 45 CAL 45 CZ. 10* e *CIM. 45 CAL 45 LM. 10*. O tipo de rotura que se exibiu com mais preponderância foi a rotura adesiva ladrilho-cola, querendo isto dizer que a aderência do cimento-cola ao ladrilho cerâmico é o elemento mais frágil da interface de ligação.

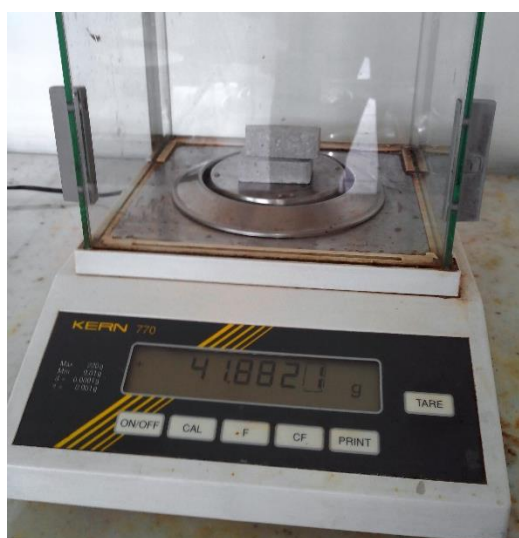
### 5.3.6 Ensaio de lixiviação

Para avaliar alguns parâmetros de caracterização química, nomeadamente, a condutividade, pH, potencial de oxidação-redução e ainda concentração de sulfatos e de cloretos foi realizado o ensaio de conformidade de lixiviação de materiais de resíduos granulares e de lamas segundo a EN 12457-4 (2002).

Este ensaio foi efetuado aos 28 dias para todos os cimentos-cola à exceção do *COMERCIAL*, uma vez que se trata de um ensaio dotado para análise de resíduos. Para a sua realização foram aproveitadas partes dos provetes prismáticos resultantes dos ensaios mecânicos.

Tal como indica a referida norma, os ensaios devem respeitar o rácio de 10 l/kg (volume de água/massa de amostra), sendo que, para este estudo, ficou definido que as amostras deveriam conter aproximadamente 40 g para 400 ml de água desionizada.

Primeiramente preparam-se e pesaram-se as amostras numa balança analítica até se obter sensivelmente uma massa de 40,0000 g (Figura 5-16 a)) para posteriormente serem colocadas dentro de uma garrafa de vidro com capacidade de 500 ml (Figura 5-16 b)). Foi adicionada a água desionizada equivalente a 10 vezes a massa a ensaiar.



a)



b)

Figura 5-16: a) Pesagem da amostra; b) Colocação da amostra na garrafa de vidro

Foram realizados dois ensaios para cada cimento-cola em estudo. Após se identificar devidamente cada garrafa (Figura 5-17 a)), estas foram colocadas num agitador mecânico durante 24 horas à temperatura de 20° C (Figura 5-17 b)) para fazer face às prescrições mencionadas na norma.



a)

b)

Figura 5-17: a) Identificação de cada amostra; b) Colocação das amostras no agitador mecânico

Após cumpridas as 24 horas, a água contida em cada garrafa foi filtrada para se proceder às medições dos parâmetros condutividade, pH e potencial de oxidação-redução através do medidor multiparâmetros (Figura 5-18). Posteriormente foram efetuadas análises para a determinação da concentração de sulfatos e cloretos.



Figura 5-18: Medidor multiparâmetros

A determinação da concentração de sulfatos e de cloretos permitiu verificar se os provetes analisados respeitam os valores limites de lixiviação impostos pelo Decreto-lei nº183/2009 de 10 de Agosto. Segundo o mesmo Decreto-lei, os valores limites de lixiviação são de 20 000 mg/kg de matéria seca para os sulfatos e de 50 000 mg/kg de matéria seca para os cloretos. O teor de sulfatos foi determinado por espectroscopia visível e o de cloretos através do método de Mohr.

O Quadro 5-3 apresenta os resultados referentes ao ensaio de lixiviação para os cimentos-cola em estudo:

Quadro 5-3: Parâmetros químicos dos cimentos-cola em estudo

	Condutividade [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	pH	Potencial Redox [mV]	Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) [mg/kg]	Cloretos (Cl <sup>-</sup> ) [mg/kg]
<i>CIM. 100</i>	2051	12,06	-7,60	67	496
<i>CIM. 90 CZ. 10</i>	1831	12,02	2,55	30	261
<i>CIM. 80 CZ. 20</i>	1674	11,98	10,05	< LD	223
<i>CIM. 90 LM. 10</i>	1793	12,01	9,65	< LD	236
<i>CIM. 80 LM. 20</i>	1778	11,99	14,80	< LD	261
<i>CIM. 50 CAL 50</i>	2310	12,11	11,35	< LD	347
<i>CIM. 45 CAL 45 CZ.10</i>	2008	12,01	0,35	24	236
<i>CIM. 45 CAL 45 LM. 10</i>	2226	12,03	1,00	46	310

Nota: < LD – inferior ao limite de deteção

Globalmente, com os ensaios de lixiviação obtém-se a informação relativa às espécies que são libertadas do material sólido, na presença de água. Foram escolhidos estes parâmetros porque caracterizam facilmente a amostra. Relativamente à determinação da concentração dos sulfatos e dos cloretos, prende-se com as características iniciais dos resíduos. Isto é, uma das características das lamas é o seu teor elevado de sulfatos. Através desta metodologia de imobilização pretendeu-se controlar a estabilização deste componente no interior da matriz sólida.

Analisando o Quadro 5-3 pode-se afirmar que o comportamento químico do cimento-cola não foi afetado em grande extensão pela adição dos diferentes materiais em estudo. De facto, a adição de cinzas e lamas reduz a lixiviação, quer no CIM. 100 quer no CIM. 50 CAL 50.

Quanto à condutividade pode observar-se que esta diminuiu nos cimentos-cola com incorporação de resíduos. Isto verifica-se a nível de iões lixiviados que conferem condutividade à solução, mas também em iões alcalinos, que ficam imobilizados na matriz sólida. Todas as misturas apresentaram um pH básico, notando-se uma ligeira redução do pH nas amostras com adição de cinzas e lamas. O mesmo se verifica pela diminuição da lixiviação de sulfatos e cloretos.

O potencial redox, também característico das espécies presentes em solução, dá a informação se estas têm um carácter mais redutor, espécies que têm tendência de perder eletrões, ou oxidante, tendência de ganhar eletrões. Isto é, valores maiores indicam que predominantemente existem espécies com tendência para ganharem electrões.

Tanto as concentrações de sulfatos como de cloretos mostraram estar muito abaixo dos valores limite considerados para representar perigosidade para o meio ambiente. Saliente-se ainda que em quatro cimentos-cola a concentração de sulfatos situou-se abaixo do limite de deteção do método, isto é, não foi possível detetar este composto nas amostras.

## 5.4 Estudo e aplicação das argamassas de reboco

### 5.4.1 Metodologia

A última parte do estudo consistiu na aplicação de argamassas tradicionais de ligantes hidráulicos (rebocos) sobre a parede construída como objetivo de testar e comparar as resistências mecânicas e a resistência ao arrancamento por tração de cada uma das diferentes misturas.

A análise implica a preparação e fabrico de seis argamassas de reboco, sendo que uma delas é uma argamassa de reboco comercial e vulgarmente utilizada em obra.

As argamassas de reboco que se seguem adotaram o mesmo tipo de nomenclatura apresentada no subcapítulo 4.2 aquando da análise preliminar de sensibilidade, sendo estas:

- Argamassa de controlo com traço em peso 1:1:5 (cimento; cal hidráulica; areia), designada por *Arg. 1:1:5*;
- Argamassa com substituição do ligante em 10% de cinzas de biomassa, designada por *Cz. 10*;
- Argamassa com substituição do ligante em 20% de cinzas de biomassa, designada por *Cz. 20*;
- Argamassa com substituição do ligante em 10% de lamas de cal, designada por *Lm. 10*;
- Argamassa com substituição do ligante em 20% de lamas de cal, designada por *Lm. 20*;
- Argamassa de reboco (comercial) designada por *Reboco comercial*.

Como se sabe, o traço de uma argamassa fica completo com a descrição da relação água/ligante a utilizar, sendo que, para este estudo foi adotado uma relação a/c de 0,75. Antes de se definir a quantidade de água de amassadura, realizou-se a experiência de se confeccionar uma argamassa com os mesmos constituintes e ir acrescentando água até se obter uma mistura com trabalhabilidade adequada para o efeito.

Quanto à quantidade de material necessário para cada mistura, teve-se em conta a área de aplicação na parede, a espessura de reboco desejável e o material necessário para a preparação dos provetes prismáticos para os ensaios mecânicos. Considerou-se, então, que uma quantidade de 10200 g de material (incluindo a água), para cada mistura, seria suficiente para o enchimento de nove provetes prismáticos (três provetes para três idades distintas) e para aplicação como reboco na parede. O reboco foi aplicado numa superfície com 35 x 60 [cm<sup>2</sup>] e com 1 cm de espessura.

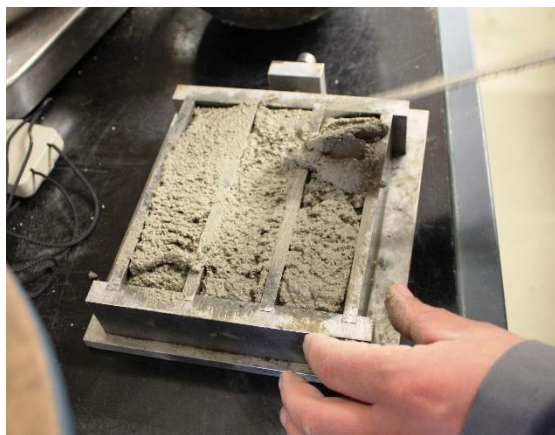
A confeção do *Reboco comercial* teve em conta as recomendações descritas na sua ficha técnica no que diz respeito à dosagem de água e às condições de aplicação (5 l de água para cada 30 kg de material).

A constituição das argamassas de reboco em estudo está representada no Quadro 5-4:

Quadro 5-4: Constituintes das argamassas de reboco em estudo

Argamassas	Cimento [g]	Cal hidráulica [g]	Areia [g]	Cinzas de biomassa [g]	Lamas de cal [g]	Água [ml]
<i>Arg. 1:1:5</i>	1200	1200	6000	-	-	1800
<i>Cz. 10</i>	1080	1080	6000	240	-	1800
<i>Cz. 20</i>	960	960	6000	480	-	1800
<i>Lm. 10</i>	1080	1080	6000	-	240	1800
<i>Lm. 20</i>	960	960	6000	-	480	1800

A preparação dos provetes prismáticos seguiu as indicações descritas na NP EN 196-1 (1996) e mencionadas no subcapítulo 4.2, no entanto com alteração de alguns procedimentos, nomeadamente na moldagem dos provetes (Figura 5-19 a)). Para evitar a desagregação da argamassa, uma vez que a relação água/ligante é elevada, a sua compactação foi realizada com 20 pancadas em duas fases, ao contrário das 60 preconizadas na norma (Figura 5-19 b)).



a)



b)

Figura 5-19: a) Enchimento do molde; b) Compactação com 20 pancadas

Tal como já foi referido neste estudo, as argamassas de reboco foram ensaiadas à flexão e compressão em três idades distintas (7, 14 e 28 dias) e por isso, necessitou-se realizar três moldes para cada idade (Figura 5-20 a)).

A cura das argamassas, após a desmoldagem dos provetes, foi efetuada colocando os provetes submersos em água com o objetivo de se processar uma evaporação lenta da água da amassadura, tal como foi praticado no subcapítulo 4.2 (Figura 5-20 b)).



Figura 5-20: a) Três moldes para cada amassadura; b) Cura dos provetes submersos em água

### 5.4.2 Aplicação das argamassas sobre o suporte

As argamassas foram preparadas e doseadas de 48 em 48 horas por limitação do número de moldes disponíveis.

Tal como foi referido no subcapítulo 5.2 (Construção da parede de alvenaria) a face da parede destinada à aplicação destas argamassas de reboco já se encontrava com a primeira camada de revestimento (o chapisco) e portanto já estava preparada para receber os rebocos em estudo.

A primeira argamassa a ser rebocada na parede foi a *Arg. 1:1:5* (tradicional) utilizando o mesmo método de projeção manual com colher. Depois de projetada foi retirado o excesso de argamassa na parede através de uma régua de madeira e de seguida procedeu-se ao alisamento da superfície com a talocha (Figura 5-21 a)).

Relativamente à espessura desta camada foram colocadas régua de madeira no topo e nas laterais da parede com uma saliência de aproximadamente 10 mm para se realizar o enchimento da mesma, funcionando como pontos de referência e fazendo o mesmo papel das mestras (Figura 5-21 b)).



Figura 5-21: a) Alisamento da superfície com talocha; b) Colocação das régua de madeira

O mesmo processo foi repetido para as restantes argamassas de reboco, tal como se ilustra na Figura 5-22.



Figura 5-22: a) e b) Método de aplicação dos rebocos sobre a parede

É importante referir que o *Reboco comercial* foi aplicado manualmente sobre a parede tal como os outros, bem como realizados os provetes para os ensaios mecânicos correspondentes. Contudo, não serão apresentados os resultados destes ensaios devido ao facto de terem exibido resultados demasiado baixos, não correspondendo ao descrito da sua ficha técnica. O motivo para estes resultados se apresentarem tão baixos poderá ter sido originado pelo método de cura efetuada, uma vez que este foi igual ao realizado nas outras argamassas.

### 5.4.3 Resistência à flexão

A determinação da resistência à flexão seguiu a mesma metodologia que se encontra descrita no subcapítulo 4.3.1. As argamassas de reboco foram submetidas a ensaios de flexão para três idades distintas, 7, 14 e 28 dias.

Os resultados deste ensaio estão representados no gráfico da Figura 5-23.

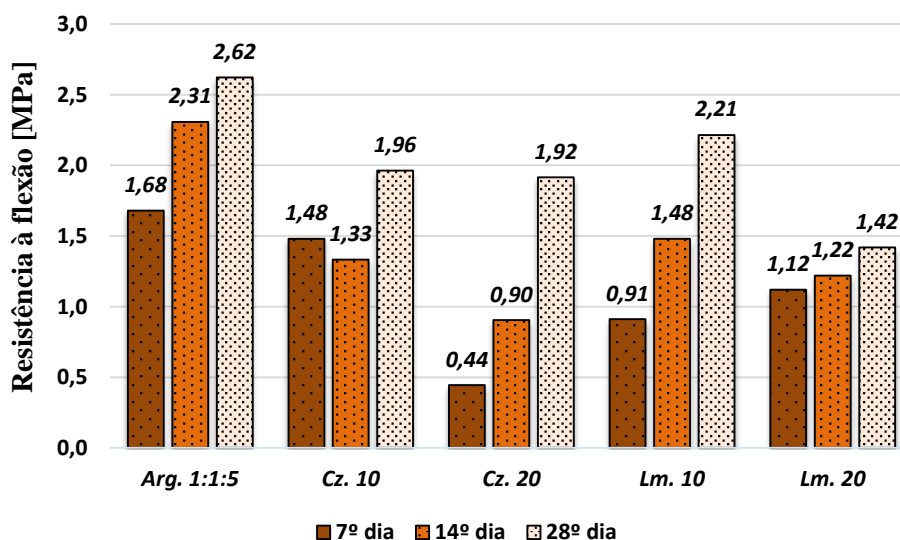


Figura 5-23: Resultados do ensaio de flexão das argamassas de reboco

A análise dos resultados permite observar que a substituição parcial do ligante (cimento + cal hidráulica) pelos resíduos em estudo conduz a uma diminuição de resistência, mostrando, neste caso, a Arg. 1:1:5 o melhor desempenho.

A incorporação de resíduos fez diminuir a resistência à flexão das misturas à medida que a percentagem de resíduo incorporado aumentou. Em todas as argamassas a resistência à flexão aumentou com a idade, à exceção da Cz. 10 que, surpreendentemente, registou um valor aos 14 dias inferior ao obtido ao 7º dia.

Analisando individualmente cada argamassa, verificou-se que a evolução das resistências com a idade foi notoriamente diferente, conforme se pode observar ao comparar a Cz. 10 com a Lm. 10 e a Cz. 20 com a Lm. 20.

Comparando apenas as argamassas com incorporação de resíduos pode-se dizer que a Lm. 10 foi a que apresentou melhores resultados, tendo registado o valor mais elevado ao 14º dia e ao 28º dia.

#### 5.4.4 Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão seguiu a mesma metodologia que se encontra descrita no subcapítulo 4.3.2. As argamassas de reboco foram submetidas a ensaios de compressão em três idades distintas, 7, 14 e 28 dias.

O gráfico da Figura 5-24 ilustra os resultados obtidos neste ensaio.

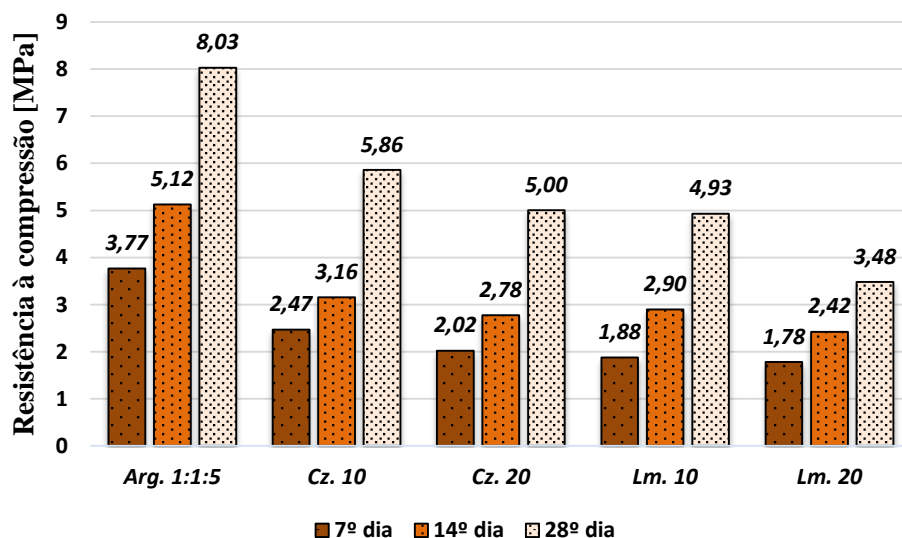


Figura 5-24: Resultados do ensaio de compressão das argamassas de reboco

Pela análise dos resultados depreende-se que a substituição parcial do ligante (cimento + cal hidráulica) pelos resíduos em estudo resultou numa redução da resistência. Também neste ensaio, o melhor desempenho foi registado para a argamassa *Arg. 1:1:5*.

A incorporação de resíduos fez diminuir a resistência à compressão das misturas à medida que a substituição parcial do ligante aumentou. Em todas as argamassas a resistência à compressão aumentou com a idade.

Analisando individualmente cada argamassa, verificou-se que a evolução das resistências com a idade foi semelhante em todas as misturas.

Comparando apenas as argamassas com incorporação de resíduos pode-se dizer que a *Cz. 10* foi a que apresentou melhores resultados, tendo registado o valor mais elevado em todas as idades.

### 5.4.5 Influência da relação água/ligante nos ensaios mecânicos

Uma vez que as argamassas produzidas no capítulo 4 contém uma relação água/ligante de 0,50 e as argamassas desenvolvidas no presente capítulo apresentam uma relação água/ligante de 0,75, torna-se viável comparar os resultados referentes à determinação da resistência à flexão e à compressão para a mesma idade (7 dias). O objetivo é verificar qual a influência deste parâmetro na resistência das argamassas.

O Quadro 5-5 assinala a diferença de resultados para os ensaios de resistência à flexão e compressão de cada argamassa, sendo que, os desvios padrão exibidos são inerentes à média de três e seis amostras respetivamente.

Quadro 5-5: Comparação de resultados das argamassas em função da relação água/ligante

	a/c = 0,50			a/c = 0,75		
	<i>Arg. 1:1:5</i>	<i>Cz. 20</i>	<i>Lm. 20</i>	<i>Arg. 1:1:5</i>	<i>Cz. 20</i>	<i>Lm. 20</i>
Flexão [MPa]	2,12	1,69	1,07	1,68	0,44	1,12
Desvio padrão	0,28	0,07	0,39	0,13	0,05	0,07
Compressão [MPa]	7,49	4,01	2,89	3,77	2,02	1,78
Desvio padrão	0,39	0,28	0,61	0,35	0,17	0,10

Tal como seria de esperar, o aumento da quantidade de água de amassadura fez, em geral, diminuir as resistências à flexão e à compressão das argamassas.

Relativamente à flexão, a *Arg. 1:1:5* (argamassa de controlo) registou um decréscimo de 21% e a *Cz. 20* teve uma redução de resistência em cerca de 4 vezes. Apenas a *Lm. 20* registou um ligeiro aumento de resistência em cerca de 5%.

Quanto à compressão todas as argamassas registaram um decréscimo de resistência com o aumento de água na amassadura, tendo-se verificado reduções de aproximadamente 50%.

Em termos de desvios padrão verificou-se que a *Lm. 20* registou o valor mais elevado tanto à flexão como à compressão na relação a/c de 0,50, contudo, a mesma argamassa com uma relação a/c de 0,75 apresentou valores mais baixos comparativamente às outras duas.

Comparando os desvios padrão entre cada relação a/c, verificou-se que em todas as argamassas houve uma redução dos mesmos com o aumento de água na amassadura.

### 5.4.6 Arrancamento por tração (*Pull-off*)

A determinação da tensão de rotura de arrancamento seguiu a mesma metodologia que se encontra descrita no subcapítulo 5.3.5.

O ensaio foi executado para as seis argamassas de reboco em estudo, permitindo assim determinar o valor da tensão média de aderência.

Este ensaio foi realizado 60 dias após a aplicação das argamassas sobre a parede, tendo-se efetuado 4 arrancamentos por reboco, registando um total de 24 resultados. O pré-corte foi efetuado diretamente sobre o suporte atingindo a espessura total do reboco (cerca de 14 mm), incluindo o chapisco. A Figura 5-25 mostra o aspeto final da parede após o dito ensaio.



Figura 5-25: Aspeto final da parede após o ensaio

A Figura 5-26 ilustra os resultados do ensaio de arrancamento por tração realizados nas seis argamassas de reboco em estudo.

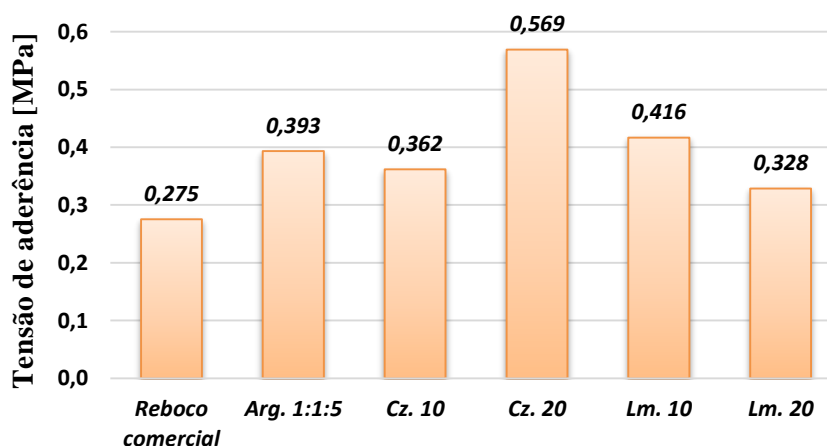


Figura 5-26: Resultados do ensaio de arrancamento por tração nos rebocos

Da análise dos resultados constata-se que o *Reboco comercial* apresentou o valor mais baixo de tensão de aderência.

Comparando a *Arg. 1:1:5* (argamassa de controlo/referência) com as restantes argamassas com incorporação de resíduos, foi possível observar que não houve uma diminuição significativa da tensão de rotura de arrancamento, tendo-se registado até valores superiores.

As reduções de aderência foram de cerca de 8% e 20% para a *Cz. 10* e a *Lm. 20*, respetivamente, quando comparadas com a *Arg. 1:1:5*. Os acréscimos de aderência foram de cerca de 45% e 6% para a *Cz. 20* e a *Lm. 10*, respetivamente, quando comparadas com a argamassa de referência.

Destaque para a argamassa com substituição parcial do ligante em 20% de cinzas de biomassa que registou o maior valor de tensão de aderência (0,568 MPa) de todas as argamassas em estudo.

De salientar o facto de o *Reboco comercial* ter registado um valor muito próximo ao referido na sua ficha técnica (0,300 MPa).

### **5.4.7 Ensaio de lixiviação**

O ensaio de lixiviação foi efetuado adotando a mesma metodologia e procedimentos descritos no subcapítulo 5.3.6.

O ensaio permitiu estudar os mesmos parâmetros de caracterização química.

Este ensaio foi efetuado aos 28 dias para todas as argamassas tradicionais com e sem incorporação de resíduos. É certo que se trata de um ensaio dotado para análise de resíduos e seria viável ter também os resultados do *Reboco comercial* para uma posterior comparação de resultados, no entanto não foi realizado o ensaio nessa argamassa. Tal como nos cimentos-cola, para a realização deste ensaio foram aproveitadas partes dos provetes prismáticos que restaram dos ensaios mecânicos.

Os resultados referentes ao ensaio de lixiviação das argamassas de reboco estão descritos no Quadro 5-6.

Quadro 5-6: Parâmetros químicos das argamassas com incorporação de resíduos

	Condutividade [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	pH	Potencial Redox [mV]	Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) [mg/kg]	Cloretos (Cl <sup>-</sup> ) [mg/kg]
<i>Arg. 1:1:5</i>	1753	12,01	10,36	51	327
<i>Cz. 10</i>	1308	11,82	15,95	20	298
<i>Cz. 20</i>	1278	11,81	23,35	< LD	124
<i>Lm. 10</i>	1600	11,89	21,50	49	236
<i>Lm. 20</i>	1522	11,86	21,95	25	186

Nota: < LD – inferior ao limite de detecção

Cada resultado exposto representa a média de duas amostras ensaiadas. A condutividade das argamassas com incorporação de cinzas de biomassa e de lamas de cal foi inferior quando comparada com a *Arg. 1:1:5*.

Todas as misturas apresentaram um pH básico, notando-se uma ligeira redução do pH nas amostras com adição de resíduos.

Dada a grandeza dos valores, verificou-se que a incorporação dos resíduos em estudo conferem à argamassa uma tendência para ganhar electrões.

Como se pode verificar no Quadro 5-6, tanto as concentrações de sulfatos como de cloretos mostraram estar muito abaixo dos valores limite considerados para representar perigosidade para o meio ambiente. Saliente-se ainda que a concentração de sulfatos de uma das argamassas (*Cz. 20*) situou-se abaixo do limite de detecção do método, isto é, não foi possível detetar este composto nas amostras.

## 5.5 Síntese do capítulo

Neste capítulo descreveu-se a campanha experimental efetuada nas nove argamassas de colagem (cimentos-cola) e nas seis argamassas de reboco, com e sem incorporação de resíduos, tendo-se também procedido à análise dos resultados obtidos.

Para a realização da campanha foi construída um troço de parede de alvenaria onde se aplicaram os dois tipos de argamassas. Esta parte do estudo teve por objetivo avaliar a aderência destes materiais através da execução do ensaio de arrancamento por tração (*Pull-off*). Paralelamente a este estudo, procedeu-se à avaliação do desempenho mecânico destas argamassas através da realização de ensaios de flexão e de compressão.

Relativamente ao estudo dos nove cimentos-cola é de salientar que foram realizados ensaios de flexão e de compressão para se perceber qual a influência da incorporação dos resíduos na

matriz do cimento-cola de referência. Contudo, neste estudo, apenas foi ensaiado um provete para cada amassadura.

Em relação ao estudo das seis argamassas de reboco destaca-se o facto de se terem realizado ensaios de flexão e de compressão para três idades distintas.

Quanto ao ensaio de arrancamento por tração importa referir que foram realizados oito arrancamentos para cada cimento-cola e quatro nas argamassas de reboco.

Por fim foram também efetuadas análises químicas às argamassas em estudo, no estado endurecido, nomeadamente ensaios de lixiviação.

Através da análise de resultados observou-se que ambos os resíduos apresentaram viabilidade para incorporar as argamassas de construção em estudo, tendo-se verificado um melhor desempenho nas cinzas de biomassa.

Nos Apêndices 1 e 2 são apresentados os resultados detalhados com todos os registos de dados pertencentes aos ensaios de flexão, de compressão e de arrancamento por tração.

## 6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

### 6.1 Conclusões gerais

As argamassas de colagem e de reboco desenvolvidas neste estudo foram submetidas a ensaios mecânicos (flexão e compressão), arrancamento por tração (*pull-off*) e ensaios de lixiviação, sendo que os resultados mais relevantes foram os seguintes:

- No estudo dos cimentos-cola a *CIM. 90 LM. 10* (cimento-cola com 90% de cimento e 10% de lamas de cal) apresentou o valor mais elevado de resistência à flexão comparativamente às outras oito misturas, incluindo o seu cimento-cola de controlo e o comercial. Em termos de resistência à compressão registou-se um decréscimo em todos os cimentos-cola com incorporação de resíduos relativamente ao *CIM. 100* (cimento-cola com 100% de cimento), embora não muito significativo;
- No que diz respeito ao ensaio de arrancamento por tração nos cimentos-cola, ficou registado que o *CIM. 80 CZ. 20* (cimento-cola com 80% de cimento e 20% de cinzas de biomassa) atingiu o maior valor de tensão de aderência ao suporte;
- Relativamente ao estudo das argamassas de reboco concluiu-se que, tanto à flexão como à compressão, a *Arg. 1:1:5* (argamassa de controlo/referência) apresentou melhor desempenho comparativamente às argamassas com substituição parcial do ligante em 10 e 20% pelos resíduos em estudo (cinzas de biomassa e lamas de cal);
- Já no ensaio de arrancamento por tração, a *Cz. 20* (argamassa com substituição do ligante em 20% de cinzas de biomassa) registou o maior valor de tensão de aderência ao suporte.;

Globalmente, na comparação de resultados, verificou-se que a incorporação de cinzas de biomassa e lamas de cal nas argamassas, apesar de reduzirem as suas resistências mecânicas, fizeram aumentar a tensão de arrancamento por tração nas misturas.

A construção de uma parede de alvenaria, com o objetivo de simular uma situação correntemente praticável em obras de construção, permitiu uma base sólida de sustentação das principais conclusões deste trabalho, enriquecendo-o em termos de originalidade.

A incorporação de resíduos na fabricação de argamassas e/ou betão pode fornecer uma solução satisfatória para os problemas colocados pela gestão de resíduos, contribuindo assim para um desenvolvimento mais sustentável e para a evolução no sentido de uma engenharia civil mais amiga do ambiente.

## **6.2 Desenvolvimentos futuros**

O estudo realizado e apresentado nesta dissertação não abrangeu na totalidade os diversos ensaios inerentes ao estudo das argamassas de construção desenvolvidas. Seria portanto interessante tornar objeto de estudo os seguintes ensaios:

Em argamassas de reboco no estado fresco:

- Consistência por espalhamento (NP EN 12350-8: 2010);
- Determinação do tempo de presa e da expansibilidade (NP EN 196-3: 2006);
- Determinação da massa volúmica (NP EN 12350-6: 2009);
- Estimativa do volume de vazios (EN 1015-6: 1998);
- Retenção de água (EN 1015-8: 1999).

No estado endurecido:

- Variação dimensional (Ensaio de retração) (LNEC E 398: 1993);
- Absorção de água por capilaridade (EN 1015-18: 2002);
- Absorção de água por imersão (LNEC E 394: 1993);
- Determinação da massa volúmica (NP EN 12390-7: 2009);
- Determinação da resistência à carbonatação (LNEC E 391: 1993);
- Penetração por cloretos (LNEC E 463: 2004);
- Reação álcalis-sílica (ASTM C 1567-08);

- Ataque por sulfatos (LNEC E 462: 2004).

Relativamente aos cimentos-cola seria viável a realização dos seguintes ensaios:

- Tempo aberto (EN 1346);
- Deslizamento (EN 1308);
- Deformação transversal (EN 12002);
- Resistência química (EN 12808-1).

Tendo em conta os resultados da campanha experimental propõe-se a realização de outros tipos de argamassas ligados ao setor da construção, por exemplo, argamassas de assentamento.



## REFERÊNCIAS

Almeida, J. L. M. S. L., 2010. *Argamassas tradicionais e industriais de alvenaria em edifícios*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do Grau de Mestre em Engenharia Civil – especialização em materiais e processos de construção. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Amaral, M. A. P. S., 2013. *Patologias e reabilitação de edifícios*. Aulas teóricas do Curso de Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV).

ASTM C 1567-08. *Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)*.

Ban, C. C., & Ramli, M., 2011. *The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: an overview*. Resources, Conservation and Recycling. pp. 669-685.

Cavaco, L. S. R. G., 2005. *Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Construção. Universidade Técnica de Lisboa.

CEN - Comité Européen de Normalisation, 1998. *EN 1015-6 – Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. CEN, Brussels, Belgium.

CEN - Comité Européen de Normalisation, 1999. *EN 1015-8 – Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retention*. CEN, Brussels, Belgium.

CEN - Comité Européen de Normalisation, 2000. *EN 1015-12 – Methods of test for mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*. CEN, Brussels, Belgium.

CEN - Comité Européen de Normalisation, 2002. *EN 1015-18 – Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillarity action of hardened mortar*. CEN, Brussels, Belgium.

CEN - Comité Européen de Normalisation, 2002. *EN 12457-4 – Characterization of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm (without or with size reduction)*. CEN, Brussels, Belgium.

Coelho, A. M. S. L., 2010. *Gestão de cinzas produzidas em centrais de cogeração operadas com biomassa*. Dissertação para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade de Aveiro.

Coutinho, J. S., 2002. *Agregados para argamassas e betões*. Ciência de Materiais - 1ª Parte, Documento Provisório.

Cruz, N. T. C. C., 2008. *Estudo da influência da granulometria das areias no desempenho de rebocos de ligante hidráulico*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa.

Cunha, A. I. T., 2013. *Estudo da possibilidade de utilização de resíduos em materiais cimentícios*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do Grau de Mestre em Engenharia Civil – especialização em materiais e processos de construção. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Decreto-Lei n.º 183/2009. Diário da República, 1.ª série - N.º 153 - 10 de Agosto de 2009.

Decreto-Lei n.º 73/2011. Diário da República, 1.ª série - N.º 116 - 17 de Junho de 2011.

Elinwa, A. U., Ejeh, P. S., & Mamuda, A. M., 2008. *Assessing of the fresh concrete properties of self-compacting concrete containing sawdust ash*. Construction and Building Materials. pp. 1178-1182.

Garcia, M. L., & Sousa-Coutinho, J., 2013. *Strength and durability of cement with forest waste bottom ash*. Construction and Building. pp. 897-910.

Hackett, G., Easton, C., & Duff, S., 1999. *Composting of pulp and paper mill fly ash with wastewater treatment sludge*. Bioresource Technology J. pp. 217-224.

Henry, C., Cole, D., Hincky, T., & Harrison, R., 1993. *The use of municipal and pulp sludge to increase production in forestry*. Sustainable Forestry J. pp. 41-56.

Instituto Português da Qualidade - *Água de amassadura para betão. NP EN 1008*. Lisboa, IPQ, 2003.

Instituto Português da Qualidade - *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. NP EN 197-1*. Lisboa, IPQ, 2012.

Instituto Português da Qualidade - *Colas para ladrilhos. Requisitos, avaliação da conformidade, classificação e designação. NP EN 12004*. Lisboa, IPQ, 2008.

Instituto Português da Qualidade - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. NP EN 933-1*. Lisboa, IPQ, 2000.

Instituto Português da Qualidade - *Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. NP EN 1097-3.* Lisboa, IPQ, 2002.

Instituto Português da Qualidade - *Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 5: Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada. NP EN 1097-5.* Lisboa, IPQ, 2002.

Instituto Português da Qualidade - *Ensaios do betão endurecido. Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido. NP EN 12390-7.* Lisboa, IPQ, 2009.

Instituto Português da Qualidade - *Ensaios do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica. NP EN 12350-6.* Lisboa, IPQ, 2009.

Instituto Português da Qualidade - *Ensaios do betão fresco. Parte 8: Betão auto-compactável - Ensaio de espalhamento. NP EN 12350-8.* Lisboa, IPQ, 2010.

Instituto Português da Qualidade - *Métodos de ensaios das cinzas volantes. Parte 1. NP EN 451-1.* Lisboa, IPQ, 2006.

Instituto Português da Qualidade - *Métodos de ensaios de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. NP EN 196-1.* Lisboa, IPQ, 1996.

Instituto Português da Qualidade - *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. NP EN 196-3.* Lisboa, IPQ, 2006.

Lagacé, P., Bourdages, G., Steinback, B., & Levis, C., 1998. *Exploring the value of sludge.* 84th Annual Meeting of the Technical Section, CPPA, vol. 2. pp. 331-335.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993. *E 391 - Betões. Determinação da resistência à carbonatação.* Lisboa, LNEC, 1993.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993. *E 394 - Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica.* Lisboa, LNEC, 1993.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993. *E 398 - Betões. Determinação da retração e da expansão.* Lisboa, LNEC, 1993.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004. *E 462 - Cimentos. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos.* Lisboa, LNEC, 2004.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004. *E 463 - Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.* Lisboa, LNEC, 2004.

Martins, A. M. M., 2008. *Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa.

Mata, T. M. C. P., 1998. *Comparação de processos de reutilização/reciclagem usando a metodologia de análise de ciclo-de-vida*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Matos, A. M., 2010. *Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do Grau de Mestre em Engenharia Civil – especialização em materiais e processos de construção. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Miranda, L. F. R., 2000. *Estudo de factores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Nurmesniemi, H., Poykio, R., & Keiski, R. L., 2007. *A case study of waste management at the Northern Finnish pulp and paper mill complex of Stora Enso Veitsiluoto Mills*. Waste Management J. pp. 1939–1948.

Oliveira, S. C. G., 2008. *Desenvolvimento de métodos expeditos de caracterização de argamassa de construção de um fabricante do mercado Português*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.

Oliveira, V. F. S., 2009. *Valorização de resíduos da indústria da pasta e papel – compostagem e aplicação do composto no solo*. Mestrado em Engenharia do Ambiente e Tecnologias Ambientais. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve.

Pereira, I. G., 2008. *Cinza de casca de arroz – uma adição sustentável*. Projeto de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Portaria n.º 209/2004, 2004. *Lista Europeia de Resíduos (LER)*. Diário da República, Série N.º209, 3 de Março de 2004.

Rato, V. N. P. M., 2006. *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese apresentada para a obtenção do Grau Académico de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de reabilitação do património edificado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Reid, I. D., 1998. *Solid residues generation and management at Canadian pulp and paper mills in 1994 and 1995*. Pulp Paper Canada J. pp. 49-52.

Resende, M. M., 2001. *Patologia dos revestimentos de argamassa*. Tecnologia de Produção de Revestimentos do departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Rodrigues, M. P. S. F. F., 2004. *Argamassas de revestimentos para alvenarias antigas – contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese apresentada para a obtenção do

Grau Académico de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de reabilitação do património edificado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Silva, J. R. M. C., 2006. *Incorporação de resíduos de barro vermelho em argamassas cimentícias*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Construção. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

Surh, M., 2000. *European conference on “The Sevilla Process: a driver for environmental performance in industry”*. Federal Environmental Agency (European IPPC).

Tiago, J. C. D., 2011. *Argamassas de cal aérea com incorporação de cinzas de casca de arroz. Estudo da influência da granulometria das cinzas*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa.

Tran, H., 2008. *Lime kiln chemistry and effects on kiln operations*. Pulp & Paper Centre and Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry. University of Toronto, Canadá.

Usón, A. A., López-Sabirón, A. M., Ferreira, G., & Sastresa, E. L., 2013. *Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. pp. 242-260.

Veiga, M. R. S., 1998. *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes – contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).



## APÊNDICE 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CIMENTOS-COLA

### Ensaio mecânicos

- Flexão

<i>CIMENTO-COLA</i>	Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à flexão [MPa]
<i>COMERCIAL</i>	109	1069	2,51
<i>CIM. 100</i>	108	1059	2,48
<i>CIM. 90 CZ. 10</i>	140	1373	3,22
<i>CIM. 80 CZ. 20</i>	150	1472	3,45
<i>CIM. 90 LM. 10</i>	218	2139	5,01
<i>CIM. 80 LM. 20</i>	190	1864	4,37
<i>CIM. 50 CAL 50</i>	154	1511	3,54
<i>CIM. 45 CAL 45 CZ. 10</i>	115	1128	2,64
<i>CIM. 45 CAL 45 LM. 10</i>	114	1118	2,62

- Compressão

<i>CIMENTO-COLA</i>	Força de rotura (Provete 1) [Kg.f]	Força de rotura (Provete 2) [Kg.f]	Força média de rotura [Kg.f]	Força média de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]
<i>COMERCIAL</i>	1282	1117	1200	11770	7,36
<i>CIM. 100</i>	6300	6147	6223	61050	38,16
<i>CIM. 90 CZ. 10</i>	5943	5545	5744	56350	35,22
<i>CIM. 80 CZ. 20</i>	5168	5097	5133	50350	31,47
<i>CIM. 90 LM. 10</i>	5392	5168	5280	51800	32,38
<i>CIM. 80 LM. 20</i>	3926	4029	3977	39015	24,38
<i>CIM. 50 CAL 50</i>	4659	4699	4679	45900	28,69
<i>CIM. 45 CAL 45 CZ. 10</i>	2885	2905	2895	28400	17,75
<i>CIM. 45 CAL 45 LM. 10</i>	2396	2406	2401	23550	14,72

## Ensaio de arrancamento por tração

- Pré-corte: Azulejo

<i>COMERCIAL</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,94	0,479
2	1,20	0,611
3	0,42	0,214
4	1,43	0,728
Média	1,00	0,508

<i>CIM. 80 LM. 20</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,96	0,489
2	2,63	1,339
3	0,42	0,214
4	1,72	0,876
Média	1,43	0,730

<i>CIM. 100</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	2,29	1,166
2	0,49	0,250
3	1,04	0,530
4	0,60	0,306
Média	1,11	0,563

<i>CIM. 50 CAL 50</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	1,66	0,845
2	1,22	0,621
3	1,51	0,769
4	1,09	0,555
Média	1,37	0,698

<i>CIM. 90 CZ. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	1,43	0,728
2	1,14	0,581
3	1,08	0,550
4	0,94	0,479
Média	1,15	0,584

<i>CIM. 45 CAL 45 CZ. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	2,78	1,416
2	2,39	1,217
3	1,77	0,901
4	1,12	0,570
Média	2,02	1,026

<i>CIM. 80 CZ. 20</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	2,76	1,406
2	2,96	1,508
3	2,52	1,283
4	2,44	1,243
Média	2,67	1,360

<i>CIM. 45 CAL 45 LM. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	2,57	1,309
2	3,20	1,630
3	2,24	1,141
4	2,18	1,110
Média	2,55	1,297

<i>CIM. 90 LM. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	2,03	1,034
2	0,29	0,148
3	1,16	0,591
4	0,68	0,346
Média	1,04	0,530

- **Pré-corte: Azulejo + Cimento-cola**

<i>COMERCIAL</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,26	0,132
2	0,36	0,183
3	0,94	0,479
4	0,91	0,463
Média	0,62	0,314

<i>CIM. 80 LM. 20</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	1,27	0,647
2	1,12	0,570
3	2,24	1,141
4	1,30	0,662
Média	1,48	0,755

<i>CIM. 100</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	1,85	0,942
2	0,51	0,260
3	1,13	0,576
4	1,77	0,901
Média	1,32	0,670

<i>CIM. 50 CAL 50</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,96	0,489
2	2,05	1,044
3	2,11	1,075
4	1,66	0,845
Média	1,70	0,863

<i>CIM. 90 CZ. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,66	0,336
2	0,89	0,453
3	1,59	0,810
4	1,01	0,514
Média	1,04	0,528

<i>CIM. 45 CAL 45 CZ. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	1,61	0,820
2	1,04	0,530
3	1,53	0,779
4	2,52	1,283
Média	1,68	0,853

<i>CIM. 80 CZ. 20</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,94	0,479
2	1,46	0,744
3	1,38	0,703
4	1,51	0,769
Média	1,32	0,674

<i>CIM. 45 CAL 45 LM. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,78	0,397
2	1,07	0,545
3	1,87	0,952
4	2,39	1,217
Média	1,53	0,778

<i>CIM. 90 LM. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	2,01	1,024
2	1,22	0,621
3	2,63	1,339
4	1,59	0,810
Média	1,86	0,949



## APÊNDICE 2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS NAS ARGAMASSAS DE REBOCO

### Ensaio mecânicos

- Flexão

Aos 7 dias:

<b>Arg. 1:1:5</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	79	774,99	1,82	
	V2	72	706,32	1,66	
	V3	68	667,08	1,56	
	Média			1,68	
<b>Cz. 10</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	63	618,03	1,45	
	V2	60	588,6	1,38	
	V3	70	686,7	1,61	
	Média			1,48	
<b>Cz. 20</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	20	196,2	0,46	
	V2	17	166,77	0,39	
	V3	21	206,01	0,48	
	Média			0,44	
<b>Lm. 10</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	51	500,31	1,17	
	V2	39	382,59	0,90	
	V3	29	284,49	0,67	
	Média			0,91	
<b>Lm. 20</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	51	500,31	1,17	
	V2	45	441,45	1,03	
	V3	50	490,5	1,15	
	Média			1,12	

Aos 14 dias:

<b>Arg. 1:1:5</b>	<b>Proвете</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	106	1039,86	2,44	
	V2	104	1020,24	2,39	
	V3	91	892,71	2,09	
	Média				2,31
<b>Cz. 10</b>	<b>Proвете</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	68	667,08	1,56	
	V2	65	637,65	1,49	
	V3	41	402,21	0,94	
	Média				1,33
<b>Cz. 20</b>	<b>Proвете</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	38	372,78	0,87	
	V2	41	402,21	0,94	
	V3	39	382,59	0,90	
	Média				0,90
<b>Lm. 10</b>	<b>Proвете</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	75	735,75	1,72	
	V2	73	716,13	1,68	
	V3	45	441,45	1,03	
	Média				1,48
<b>Lm. 20</b>	<b>Proвете</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	60	588,6	1,38	
	V2	51	500,31	1,17	
	V3	48	470,88	1,10	
	Média				1,22

Aos 28 dias:

<b>Arg. 1:1:5</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	121	1187,01	2,78	
	V2	126	1236,06	2,90	
	V3	95	931,95	2,18	
	Média				2,62
<b>Cz. 10</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	92	902,52	2,12	
	V2	87	853,47	2,00	
	V3	77	755,37	1,77	
	Média				1,96
<b>Cz. 20</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	81	794,61	1,86	
	V2	87	853,47	2,00	
	V3	82	804,42	1,89	
	Média				1,92
<b>Lm. 10</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	86	843,66	1,98	
	V2	83	814,23	1,91	
	V3	120	1177,2	2,76	
	Média				2,21
<b>Lm. 20</b>	<b>Provete</b>	<b>Força de rotura [Kg.f]</b>	<b>Força de rotura [N]</b>	<b>Resistência à flexão [MPa]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	V1	52	510,12	1,20	
	V2	68	667,08	1,56	
	V3	65	637,65	1,49	
	Média				1,42

- Compressão

Aos 7 dias:

		Força de rotura	Força de rotura	Resistência à compressão	Desvio Padrão
		[Kg.f]	[N]	[MPa]	
<i>Arg. 1:1:5</i>	<b>Provete</b>				
	V1	665	6523,65	4,08	
	V1	698	6847,38	4,28	
	V2	622	6101,82	3,81	
	V2	562	5513,22	3,45	
	V3	555	5444,55	3,40	
	V3	585	5738,85	3,59	
		Média		3,77	0,35
<hr/>					
		Força de rotura	Força de rotura	Resistência à compressão	Desvio Padrão
		[Kg.f]	[N]	[MPa]	
<i>Cz. 10</i>	<b>Provete</b>				
	V1	407	3992,67	2,50	
	V1	438	4296,78	2,69	
	V2	385	3776,85	2,36	
	V2	372	3649,32	2,28	
	V3	415	4071,15	2,54	
	V3	399	3914,19	2,45	
		Média		2,47	0,14
<hr/>					
		Força de rotura	Força de rotura	Resistência à compressão	Desvio Padrão
		[Kg.f]	[N]	[MPa]	
<i>Cz. 20</i>	<b>Provete</b>				
	V1	353	3462,93	2,16	
	V1	368	3610,08	2,26	
	V2	290	2844,90	1,78	
	V2	324	3178,44	1,99	
	V3	326	3198,06	2,00	
	V3	314	3080,34	1,93	
		Média		2,02	0,17
<hr/>					
		Força de rotura	Força de rotura	Resistência à compressão	Desvio Padrão
		[Kg.f]	[N]	[MPa]	
<i>Ln. 10</i>	<b>Provete</b>				
	V1	304	2982,24	1,86	
	V1	304	2982,24	1,86	
	V2	287	2815,47	1,76	
	V2	269	2638,89	1,65	
	V3	323	3168,63	1,98	
	V3	349	3423,69	2,14	
		Média		1,88	0,17
<hr/>					
		Força de rotura	Força de rotura	Resistência à compressão	Desvio Padrão
		[Kg.f]	[N]	[MPa]	
<i>Ln. 20</i>	<b>Provete</b>				
	V1	297	2913,57	1,82	
	V1	280	2746,8	1,72	
	V2	285	2795,85	1,75	
	V2	276	2707,56	1,69	
	V3	320	3139,2	1,96	
	V3	287	2815,47	1,76	
		Média		1,78	0,10

Aos 14 dias:

		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Arg. 1:1:5</i>	<b>Provete</b>				
	V1	921	9035,01	5,65	
	V1	842	8260,02	5,16	
	V2	874	8573,94	5,36	
	V2	861	8446,41	5,28	
	V3	808	7926,48	4,95	
	V3	708	6945,48	4,34	
Média				5,12	0,45
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Cz. 10</i>	<b>Provete</b>				
	V1	482	4728,42	2,96	
	V1	571	5601,51	3,50	
	V2	475	4659,75	2,91	
	V2	448	4394,88	2,75	
	V3	573	5621,13	3,51	
	V3	540	5297,4	3,31	
Média				3,16	0,33
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Cz. 20</i>	<b>Provete</b>				
	V1	436	4277,16	2,67	
	V1	475	4659,75	2,91	
	V2	547	5366,07	3,35	
	V2	418	4100,58	2,56	
	V3	394	3865,14	2,42	
	V3	447	4385,07	2,74	
Média				2,78	0,33
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Im. 10</i>	<b>Provete</b>				
	V1	496	4865,76	3,04	
	V1	397	3894,57	2,43	
	V2	533	5228,73	3,27	
	V2	531	5209,11	3,26	
	V3	495	4855,95	3,03	
	V3	384	3767,04	2,35	
Média				2,90	0,40
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Im. 20</i>	<b>Provete</b>				
	V1	380	3727,8	2,33	
	V1	399	3914,19	2,45	
	V2	305	2992,05	1,87	
	V2	384	3767,04	2,35	
	V3	457	4483,17	2,80	
	V3	444	4355,64	2,72	
Média				2,42	0,33

Aos 28 dias:

		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Arg. 1:1:5</i>	<b>Provete</b>				
	V1	1298	12733,38	7,96	
	V1	1313	12880,53	8,05	
	V2	1279	12546,99	7,84	
	V2	1354	13282,74	8,30	
	V3	1313	12880,53	8,05	
	V3	1301	12762,81	7,98	
Média				8,03	0,15
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Cz. 10</i>	<b>Provete</b>				
	V1	960	9417,6	5,89	
	V1	899	8819,19	5,51	
	V2	958	9397,98	5,87	
	V2	1007	9878,67	6,17	
	V3	995	9760,95	6,10	
	V3	913	8956,53	5,60	
Média				5,86	0,26
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Cz. 20</i>	<b>Provete</b>				
	V1	877	8603,37	5,38	
	V1	790	7749,90	4,84	
	V2	801	7857,81	4,91	
	V2	651	6386,31	3,99	
	V3	942	9241,02	5,78	
	V3	833	8171,73	5,11	
Média				5,00	0,60
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Lm. 10</i>	<b>Provete</b>				
	V1	797	7818,57	4,89	
	V1	760	7455,6	4,66	
	V2	768	7534,08	4,71	
	V2	768	7534,08	4,71	
	V3	883	8662,23	5,41	
	V3	846	8299,26	5,19	
Média				4,93	0,31
		Força de rotura [Kg.f]	Força de rotura [N]	Resistência à compressão [MPa]	Desvio Padrão
<i>Lm. 20</i>	<b>Provete</b>				
	V1	522	5120,82	3,20	
	V1	568	5572,08	3,48	
	V2	600	5886	3,68	
	V2	587	5758,47	3,60	
	V3	599	5876,19	3,67	
	V3	529	5189,49	3,24	
Média				3,48	0,21

## Ensaio de arrancamento por tração

<i>REBOCO COMERCIAL</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,57	0,290
2	0,55	0,280
3	0,42	0,214
4	0,62	0,316
Média	0,54	0,275

<i>Cz. 20</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	1,25	0,637
2	0,75	0,382
3	1,27	0,647
4	1,20	0,611
Média	1,12	0,569

<i>Arg. 1:1:5 (TRADICIONAL)</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,60	0,306
2	0,88	0,448
3	0,65	0,331
4	0,96	0,489
Média	0,77	0,393

<i>Lm. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,70	0,357
2	0,83	0,423
3	0,70	0,357
4	1,04	0,530
Média	0,82	0,416

<i>Cz. 10</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,94	0,479
2	0,73	0,372
3	0,65	0,331
4	0,52	0,265
Média	0,71	0,362

<i>Lm. 20</i>		
Zona	Força (KN)	Tensão (MPa)
1	0,81	0,413
2	0,60	0,306
3	0,44	0,224
4	0,73	0,372
Média	0,65	0,328

