



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Caracterização de argamassas com incorporação de grânulos de vidro reciclado expandido**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

**Vera Lúcia Costa Araújo**

Orientador

**Professora Doutora Julieta Maria Pires António**

**Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres**

Colaboração Institucional:



**ITeCons**

Instituto de Investigação e Desenvolvimento  
Tecnológico em Ciências da Construção

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, julho, 2013**

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível concretizar sem o apoio e compreensão de várias pessoas e aqui vou redigir o meu sincero obrigado.

O meu muito obrigado às minhas orientadoras Professora Doutora Julieta Maria Pires António e Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres pela disponibilidade demonstrada e por toda a compreensão, porque sem elas este trabalho não poderia ser realizado.

O meu obrigado à DIERA que disponibilizou as misturas e sempre se mostrou disponível para o esclarecimento da mesma.

Agradeço também às pessoas e instituições técnicas que tornaram possível este trabalho:

- Ao Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons) da Universidade de Coimbra pela cedência das instalações, informação, materiais e equipamentos;
- À Engenheira Gina Matias técnica superior do ITeCons pelas explicações e auxílio prestado na realização dos trabalhos experimentais e pela disponibilidade e paciência para esclarecer todo o tipo de dúvidas;
- À técnica de laboratório Sofia Tavares, pela disponibilidade e auxílio na realização de ensaios e esclarecimento de dúvidas.

A todas as minhas amigas que conheci na vida académica, Ana Abreu, Teresa Garcia, Kelly Teixeira, Rita Cardoso, Cátia Nascimento o meu muito obrigado pelos momentos de boa disposição, de estudo, de amizade, de convívio e mesmo de distração. A todos aqueles que de uma forma direta ou indireta contribuíram para eu atingir os meus objetivos, o meu muito obrigado.

Para finalizar quero dar o meu muito obrigado aos meus pais que sempre foram tiveram orgulho em mim, e acreditaram que eu iria conseguir mesmo nos momentos mais difíceis. Às minhas irmãs e restante família que sempre estiveram do meu lado para tudo. O último obrigado vai para o meu namorado, Hélder, que sempre esteve do meu lado nos bons e maus dias e sempre me apoiou em tudo com muita paciência e compreensão.

## RESUMO

Devido às exigências da legislação no domínio da térmica e da acústica, tem-se assistido nos últimos tempos, a uma preocupação crescente de melhorar os materiais utilizados na construção de edifícios tanto a nível de elementos da envolvente, como a nível de elementos de compartimentação. Por exemplo, no caso de paredes de alvenaria, têm aparecido no mercado os designados blocos acústicos e térmicos, no entanto, não tem sido dada tanta atenção ao desenvolvimento de produtos para o reboco das mesmas. O desenvolvimento de argamassas com propriedades acústicas e térmicas para aplicação em rebocos de paredes, será um passo adicional para o cumprimento das exigências requeridas. Por outro lado, o aumento de resíduos é um problema atual. A possibilidade de utilizar resíduos da execução de argamassas contribui para o aumento da sustentabilidade das mesmas. O desenvolvimento de rebocos que contenham resíduos leves poderá contribuir por um lado para o reaproveitamento do resíduo e por outro para a melhoria das suas propriedades.

No mercado começam a surgir algumas argamassas para o reboco, designadas por “térmicas” ou “acústicas”, mas este tipo de revestimento ainda não tem uma aplicação generalizada, talvez porque não há estudos que provem um benefício evidente da utilização destes materiais.

Este trabalho insere-se num estudo mais vasto, que tem como objetivo analisar o comportamento acústico e térmico de argamassas de cal que incorporam a reutilização de resíduos de vidro reciclado expandido. No presente trabalho, vai proceder-se à caracterização inicial das argamassas em termos das suas propriedades mecânicas e ao comportamento face à água. Para esse efeito realizaram-se ensaios de consistência por espalhamento, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão, resistência à compressão, absorção por capilaridade, retração e permeabilidade ao vapor de água.

Os ensaios foram efetuados com três argamassas distintas, uma argamassa de referência e duas argamassas contendo vidro reciclado e vermiculite. Destas duas últimas argamassas uma contém areia de sílica e a outra perlite.

## **ABSTRAC**

Owing to legal requirements in the thermal and acoustic domain, we have witnessed, in recent times, to a growing concern to improve the materials used in the construction of buildings, both the surrounding and subdivision elements. For example, in the case of the brickwork walls, it came out on the market the called thermal and acoustic blocks, however, it has not been given much attention to the development of products to plaster those walls. The development of plasters with acoustic and thermal properties to use in plastering walls will be an extra step to meet the legal requirements. On the other hand, the increase of waste is a current problem. The possibility of using plaster waste leads to an increase of the sustainability. The development of plasters containing lightweight waste may contribute on the one hand to reuse the waste and to improve their properties on the other.

In the market, it started to turn up some kinds of plastering mortar, known as "thermal" or "acoustic", but this type of covering does not have yet a widespread application, perhaps because there are no studies showing an evident benefit from using these materials.

This work is part of a wider study that aims to analyze the acoustic and thermal behavior of lime mortars that incorporate the reuse of expanded recycled glass waste. In the present work, it will be proceed to the initial characterization of mortars in terms of their mechanical properties and behavior towards the water. For this purpose, tests were consistently conducted by scattering, dynamic modulus of elasticity, flexing tensile strength, compressive strength, wicking, contraction, water steam permeability.

The tests were performed on three different kinds of mortars, a reference mortar and two mortars containing recycled glass and vermiculite. From these last two mortars, one of them contains silica sand and the other contains perlite.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRAC.....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE QUADROS.....	viii
SIMBOLOGIAS.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento geral.....	1
1.2 Objetivos e metodologias.....	3
1.3 Organização do trabalho.....	4
2 Argamassas.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Matérias-primas.....	8
2.2.1 Ligantes.....	8
2.2.2 Agregados.....	10
2.2.3 Aditivos.....	14
2.3 Argamassas leves.....	15
3 Procedimento experimental.....	16
3.1 Introdução.....	16
3.2 Descrição.....	16
3.2.1 Matérias-primas.....	16
3.2.2 Preparação de argamassas.....	17
3.2.3 Ensaio realizado sobre argamassas frescas.....	19
3.2.4 Moldagem dos provetes.....	20
3.2.5 Condições de cura e período de secagem.....	22
3.2.6 Ensaio sobre argamassas endurecidas.....	24
4 Resultados, análise e discussão.....	38
4.1 Ensaio de consistência por espalhamento.....	38
4.2 Módulo de elasticidade dinâmico.....	39
4.3 Ensaio de resistência à tração por flexão.....	40
4.4 Ensaio de resistência à compressão.....	42
4.5 Absorção de água por capilaridade.....	43
4.6 Retração.....	44
4.7 Permeabilidade ao vapor de água.....	45
4.8 Resultados dos ensaios após envelhecimento.....	46
4.8.1 Módulo de elasticidade dinâmico.....	46
4.8.2 Ensaio de resistência à tração por flexão.....	47
4.8.3 Ensaio de resistência à compressão.....	49

4.9	Discussão dos resultados.....	50
5	Conclusões.....	59
	Referências bibliográficas .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1:Diversos tipos de ligantes (Tomás, 2012) .....	8
Figura 2.2: a) Vermiculite em rocha e após fragmentação (FUNGIFUN@, 2013); b) Vermiculite expandida (ARGILAEEXPANDIDA@, 2013) .....	12
Figura 2.3: Perlite em rocha, fragmentada e expandida (PERLITE@, 2013).....	13
Figura 2.4: Vidro reciclado expandido com diferentes granulometrias (PORAVER@, 2013).....	14
Figura 3.1: Mistura em pó .....	17
Figura 3.2: Misturadora.....	18
Figura 3.3: Ensaio de espalhamento: a) mesa de espalhamento; b) argamassa sobre a mesa de espalhamento; c) paquímetro.....	20
Figura 3.4: Moldagem dos provetes: a) provetes de secção prisma quadrangular; b) provetes de secção prisma retangular (ensaio de retração) .....	21
Figura 3.5: Condicionamentos para os ensaios após envelhecimento: a)provetes completamente imersos; b) câmara a 60°C; c) câmara a 20°C.....	23
Figura 3.6: Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico com a fonte recetora .....	24
Figura 3.7: Ensaio de elasticidade dinâmico com a fonte emissora e recetora .....	25
Figura 3.8: Ensaio de resistência à tração por flexão: a) antes de se iniciar o ensaio; b) no final do ensaio.....	28
Figura 3.9: Ensaio de resistência por compressão: a) antes do início do ensaio; b) no final do ensaio .....	29
Figura 3.10: Provetes colocados dentro do exsiccador com sílica .....	31
Figura 3.11: Ensaio de absorção por capilaridade: a) tanque com os provetes e água; b) pormenor da água a subir nos provetes por capilaridade.....	31
Figura 3.12: Ensaio de retração: a) pormenor dos provetes utilizados no ensaio de retração; b) proвете no aparelho que mede a retração.....	33
Figura 3.13: Ensaio de permeabilidade ao vapor de água: a) tina com a solução de nitrato de potássio; b) tina com o provete selado de forma ideal para se iniciar o ensaio.....	35
Figura 4.1: Resultado de $E_{dL}$ para as diferentes argamassas.....	40
Figura 4.2: Resultado final de $R_f$ no ensaio de tração por flexão .....	41
Figura 4.3: Resultado de $R_c$ para as diferentes argamassas .....	43

---

Figura 4.4: Resultados compilados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmica após envelhecimento .....	47
Figura 4.5: Resultados finais da resistência á tração por flexão após envelhecimento .....	48
Figura 4.6: Resultados do ensaio de resistência à compressão .....	50
Figura 4.7: Resistência à tração por flexão e módulo de elasticidade dinâmica .....	51
Figura 4.8: Resistência à tração por flexão e resistência à compressão .....	52
Figura 4.9: Resultado do ensaio de permeabilidade ao vapor de água e de absorção de água por capilaridade .....	53
Figura 4.10: Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão e do módulo de elasticidade dinâmico .....	55
Figura 4.11: Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico antes e após envelhecimento dos provetes .....	56
Figura 4.12: Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão antes e após envelhecimento .....	57
Figura 4.13; Resultados do ensaio de compressão antes e após o envelhecimento .....	58



## ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 3.1: Composição das argamassas em estudo.....	17
Tabela 4.1: Resultados do ensaio de consistência por espalhamento .....	38
Tabela 4.2: Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico .....	39
Tabela 4.3: Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão .....	41
Tabela 4.4: Resultados do ensaio de resistência à compressão .....	42
Tabela 4.5: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	44
Tabela 4.6: Resultados do ensaio da retração.....	45
Tabela 4.7: Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água .....	45
Tabela 4.8: Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmica após envelhecimento dos provetes.....	46
Tabela 4.9: Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão .....	48
Tabela 4.10: Resultados do ensaio de resistência à compressão .....	49
Tabela 4.11: Resultados da resistência à tração por flexão do módulo de elasticidade dinâmico e relação módulo de elasticidade/resistência à tração após envelhecimentos.....	51
Tabela 4.12: Resultados para ensaio de resistência à tração por flexão, módulo de elasticidade dinâmico .....	54

## **SIMBOLOGIAS**

$E_{dL}$  – Módulo de elasticidade dinâmico longitudinal

$\rho$  – Massa volúmica do provete

$I$  – Momento de inércia

$R_f$  – Resistência à tração por flexão

$R_c$  – Resistência à compressão

$F$  – Força máxima aplicada

$C_c$  – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Retração<sub>individual</sub> – Retração de cada provete

$\Delta m_{12}$  – Variação de massa num período de tempo

$W$  – Permeância ao vapor de água

$\Delta$  – Permeabilidade ao vapor de água

$\mu$  – Fator de resistência à difusão do vapor de água

$S_d$  – Espessura da camada de ar equivalente

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento geral

Atualmente, quando se pensa em construir algum edificado de raiz, deve-se dar especial atenção a toda a legislação em vigor, que neste momento tem um papel preponderante na satisfação dos requisitos acústicos, térmicos, mecânicos, etc. No entanto, estes requisitos não devem ser considerados só em construção nova mas também devem ser considerados e adaptados para as obras de reabilitação.

A legislação no domínio da térmica em edifícios de habitação tem evoluído ao longo dos anos.

A primeira legislação da térmica de edifícios surgiu em Portugal em meados do ano 1990 através do Decreto-Lei nº 40/90 de 6 de fevereiro. Este regulamento, apesar de pouco exigente, veio evoluir o mercado e exigir as condições regulamentares de isolamento térmico na construção.

Passado alguns anos devido a exigências de conforto das populações e a imposição de diretivas europeias, este regulamento foi revogado e deu origem a um novo, Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de abril. Este novo regulamento que se mantém em vigor até à atualidade descreve as regras a observar no projeto de todos os edifícios de habitação e serviços sem sistemas de climatização centralizados. No setor dos edifícios, a eficiência energética dos mesmos é um dos requisitos principais de desempenho como é evidenciado por vários documentos: diretiva 2012/27/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de outubro de 2012; Portaria nº 26/2011, de 10 de janeiro; Portaria nº 1316/2010 de 28 de dezembro; Decreto-Lei nº 50/2010 de 20 de maio; Decreto-Lei nº 319/2009 de 3 de novembro.

Em simultâneo com a eficiência energética, outro dos grandes requisitos para os edifícios é a sua sustentabilidade.

O setor da construção é responsável por grandes impactes a nível ambiental, social e económico, assim sendo, é necessário criar medidas numa perspetiva de desempenho ambiental.

Para atingir estes objetivos será necessário implementar diferentes medidas a nível de tecnologias e materiais de construção e também em termos de equipamentos.

É necessário atuar nos revestimentos exteriores de modo a melhorar as suas características e as suas funções primordiais.

Os revestimentos exteriores têm como função impermeabilizar, devem aderir ao suporte, e também tem função estética. Estes devem proteger o paramento exterior dos agentes atmosféricos (tais como chuva, o vento, etc.) e de todas as ações exteriores, para deste modo impedir a degradação.

Os revestimentos à base de reboco, podem ser constituídos por argamassas à base de cal e que são utilizadas na sua maioria para as reabilitações, e argamassas à base de cimento que são utilizadas maioritariamente para construção nova, com características adaptadas em função das necessidades básicas dos utilizadores.

Atendendo às necessidades de conforto, eficiência energética e aumento da sustentabilidade este estudo focalizou-se no estudo de duas argamassas de cal hidratada que contém cargas leves, nomeadamente microesferas de vidro reciclado expandido. Usou-se como comparação uma argamassa de cimento e cal (bastarda), que serviu como referência.

Os grânulos de vidro utilizados na composição desta argamassa são 100% provenientes da reciclagem. Apesar de o vidro ser uma matéria-prima 100% reciclável, no entanto não é aproveitada na sua totalidade, apenas 40% deste material utilizado pela população é transformado e reciclado (Oliveira e Santos, 2010).

Os resíduos de vidro reciclados são aquecidos a altas temperaturas e expandidos num processo industrial dando origem aos grânulos utilizados. A aplicação destes grânulos nas argamassas irão permitir aumentar a sustentabilidade das mesmas e, pretende-se também, que lhes imprimam características melhoradas em termos térmicos e acústicos.

A argamassa de referência tem como ligante o cimento e a cal hidratada e as outras duas argamassas (A e B) tem apenas cal hidratada como ligante.

## 1.2 Objetivos e metodologias

Este trabalho insere-se num estudo vasto que tem como objetivo analisar o comportamento acústico e térmico de argamassas de cal hidratada que incorporam resíduos de vidro reciclado e posteriormente expandido. Estas argamassas são pré doseadas.

Um dos aspetos que conduziu ao estudo com este componente (grânulos de vidro expandido) foi o aproveitamento de um material proveniente da reciclagem (vidro), que ao não ser aproveitado iria para aterro.

No presente trabalho vai realizar-se apenas a caracterização inicial das argamassas, não tendo sido possível realizarem-se ensaios acústicos e de condutibilidade térmica das mesmas.

Assim o objetivo deste trabalho é proceder à caracterização das argamassas no que diz respeito a características básicas, nomeadamente resistências mecânicas e comportamento face à água.

Para o efeito determinaram-se propriedades das argamassas frescas (consistência) e propriedades das argamassas endurecidas, nomeadamente as mecânicas (resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, retração) e comportamento face à água, (absorção da água por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água).

Outro dos objetivos do trabalho é verificar o comportamento das argamassas após envelhecimento. Para o efeito determinou-se a resistência à tração e à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico após sujeitar as amostras a radiação infra vermelha e a variações bruscas de temperatura.

A argamassa de referência é constituída por cimento, cal, areia de sílica e aditivos. A argamassa A é constituída por cal hidratada, esferas de vidro reciclado e expandido, vermiculite, perlite e aditivos. A argamassa B é constituída por cal hidratada, areia de sílica, esferas de vidro reciclado e expandido, vermiculite e aditivos.

### **1.3 Organização do trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

No presente (primeiro) capítulo designado por “Introdução” faz-se um enquadramento geral da dissertação, descreve-se de forma sucinta o objetivo da mesma e a sua organização.

No segundo capítulo faz-se uma revisão bibliográfica dos conceitos fundamentais para o presente estudo. Este capítulo divide-se em dois subcapítulos, o primeiro designado por considerações de base que está dividido em quatro partes, e o segundo sub capítulo designado de matérias-primas está dividido em três partes.

No terceiro capítulo relativo aos procedimentos experimentais, descrevem-se os materiais utilizados, os equipamentos e metodologias utilizadas na realização dos ensaios.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões gerais obtidas no decorrer deste trabalho, e sugerem-se trabalhos futuros que possam complementar o presente.

Finalmente apresentam-se as “Referências Bibliográficas” onde constam todos os documentos consultados.

## 2 ARGAMASSAS

### 2.1 Introdução

Pensa-se que o início da argamassa vem dos tempos do Antigo Egito e Médio Oriente, onde se considera como principal ligante o gesso. Mais tarde, ou seja na época dos Gregos e Romanos começou-se a utilizar argamassas à base de cal, e começou-se também a utilizar as pozolanas. Verificou-se que estas argamassas ofereciam resistência e durabilidade consideráveis (Cavaco, 2005). Ainda se encontram na atualidade construções com este tipo de revestimento, cal aérea, (Conímbriga, por exemplo). Uma outra propriedade para a mesma mistura é a sua elevada absorção por capilaridade e permeabilidade ao vapor de água também elevada, o que facilita a evaporação de água. A partir desses tempos, as argamassas foram sofrendo várias alterações em função da necessidade dos utilizadores e desse modo foram-se adicionando novas substâncias (aditivos, etc.) e introduziu-se um novo ligante (o cimento).

Uma argamassa pode ser definida como o material resultante da junção entre um ou mais ligantes, agregados e água, que podem ser misturados manual ou mecanicamente para desse modo formar uma mistura homogênea (Petrucci, 1976).

Uma argamassa tem que assegurar algumas funções básicas, entre elas destacam-se: a fixação entre dois elementos, garantir uma regularização, garantir simultaneamente impermeabilização da parede e também deve produzir um acabamento agradável da superfície onde é aplicado com a forma e textura desejados (Ferreira, 2011). No entanto, também é importante salientar que deve proteger a estrutura das ações exteriores atmosféricas, que podem danificá-las quer física, mecânica ou quimicamente (Leal, 2012). Resumindo, uma argamassa deve apresentar compacidade, resistência à compressão, impermeabilidade, boa aderência e ser resistente a longo período de tempo. No entanto estas qualidades dependem, da qualidade do aglomerado, da natureza do agregado, da granulometria dos agregados, da quantidade de água, das condições de fabrico e das condições de aplicação (Martins e Assunção, 2010).

As propriedades duma argamassa podem ser melhoradas através da junção de substâncias aditivas ou adjuvantes, obtendo-se um produto final com as características desejadas e ou mesmo melhoradas em relação a uma argamassa vulgar.

A junção de matérias-primas deve ser feita de forma cuidada e tendo em atenção a mistura dos componentes. Em primeiro lugar devem ser misturados os elementos sólidos (agregados e ligantes) e só posteriormente, (depois da mistura estar homogénea) é que deve ser introduzida a água.

O processo de mistura de uma argamassa, deve originar uma mistura plástica, que permitirá ligar pedras naturais ou artificiais e revestimentos.

As argamassas podem ser divididas em grupos em função dos ligantes utilizados: (Martins e Assunção, 2010)

- Argamassa aérea – endurece apenas ao ar e tem como ligante o gesso e a cal aérea. Este tipo de argamassa deve ser apenas aplicado no interior.
- Argamassa de gesso – endurece rapidamente, amassa-se em pequenas quantidades para serem aplicadas em curto período de tempo. Tem como ligante o gesso.
- Argamassa de cal ordinária – o ligante é a cal aérea, esta tem de ser de boa qualidade e bem preparada.
- Argamassa de cal hidráulica – o ligante é a cal hidráulica. Os grãos de agregado devem estar bem envolvidos e com aderência entre as matérias-primas.
- Argamassas bastardas – utilizam vários ligantes na mesma argamassa.
- Argamassa de cimento – o ligante é o cimento.

As argamassas devem ser usadas até 2h depois de ser produzidas, no entanto pode-se ir juntando água mas a sua resistência pode ser afetada (Martins e Assunção, 2010).

A constituição das argamassas depende essencialmente da sua aplicação.

As argamassas à base de cimento são normalmente utilizadas em construção atual, porque têm algumas vantagens em relação às outras, nomeadamente uma fácil preparação, aplicação e rápida secagem. Logo, estas argamassas à base de cimento não devem ser utilizadas na reabilitação de edifícios antigos (Tomás, 2012). Estas também podem ser utilizadas na reparação de alvenarias, na consolidação de paredes e quando existe necessidade de



substituição dos revestimentos quer no paramento interior, quer no paramento exterior (sempre em edifícios recentes) (Rodrigues, 2004).

Segundo Fröschl (1998) uma argamassa de cimento na reabilitação de edifícios antigos, em vez de ser uma solução para o problema em questão, esta ainda vai acentuar mais o problema. O problema significa que os tijolos antigos são muito absorventes o que não é compatível com uma argamassa de cimento.

As argamassas à base de cal aérea devem ser utilizadas na reabilitação de edifícios, devendo manter a forma estética, e as capacidades do edifício referentes à permeabilidade ao vapor de água e à absorção de água por capilaridade. Estas argamassas oferecem uma grande deformação na rotura e resistências mecânicas baixas, mas que podem ser aumentadas com a fixação de dióxido de carbono do ar (carbonatação de cal) (Rodrigues, 2004).

A argamassa à base de cal hidráulica é uma argamassa tradicional usada para reboco, elevação de alvenarias, enchimento e acabamentos. A cal hidráulica, também pode ser usada como ligante complementar de blocos para alvenaria, lancis, patelas, etc., ou então para filler nos pavimentos betuminosos. Mais recentemente também se tem utilizado como estabilizador de solos (argilosos e húmidos), onde diminui a humidade e o índice de plasticidade o que melhora a compactação (Miranda, 2009).

Com o decorrer do tempo, após aplicação, as argamassas podem apresentar algumas patologias, que podem trazer problemas graves para o edificado.

Uma das principais patologias das argamassas são o envelhecimento dos materiais constituintes, a incompatibilidade entre esses materiais e a presença dos sais solúveis nos mesmos (Ferreira, 2011).

O que se pretende na escolha da argamassa é que esta seja flexível (não fissure), adira ao suporte e seja o mais resistente possível às ações externas mantendo sempre boas características à permeabilidade ao vapor de água.

## 2.2 Matérias-primas

### 2.2.1 Ligantes

Os ligantes são produtos que têm como característica principal a aglomeração de uma porção elevada de materiais. Pode-se dizer que o ligante é a substância mais reativa da mistura (agregados, água e ligante).

Relativamente à sua origem, os ligantes podem ser de origem mineral, natural e que necessitam de cozedura (cal aérea, hidráulica e cimento) e ligantes minerais artificiais (cimentos e cais hidráulicas artificiais), no entanto também existem outros tipos de ligantes sintetizados na figura 2.1 que se designam por orgânicos (produto natural), sintéticos (polímeros).

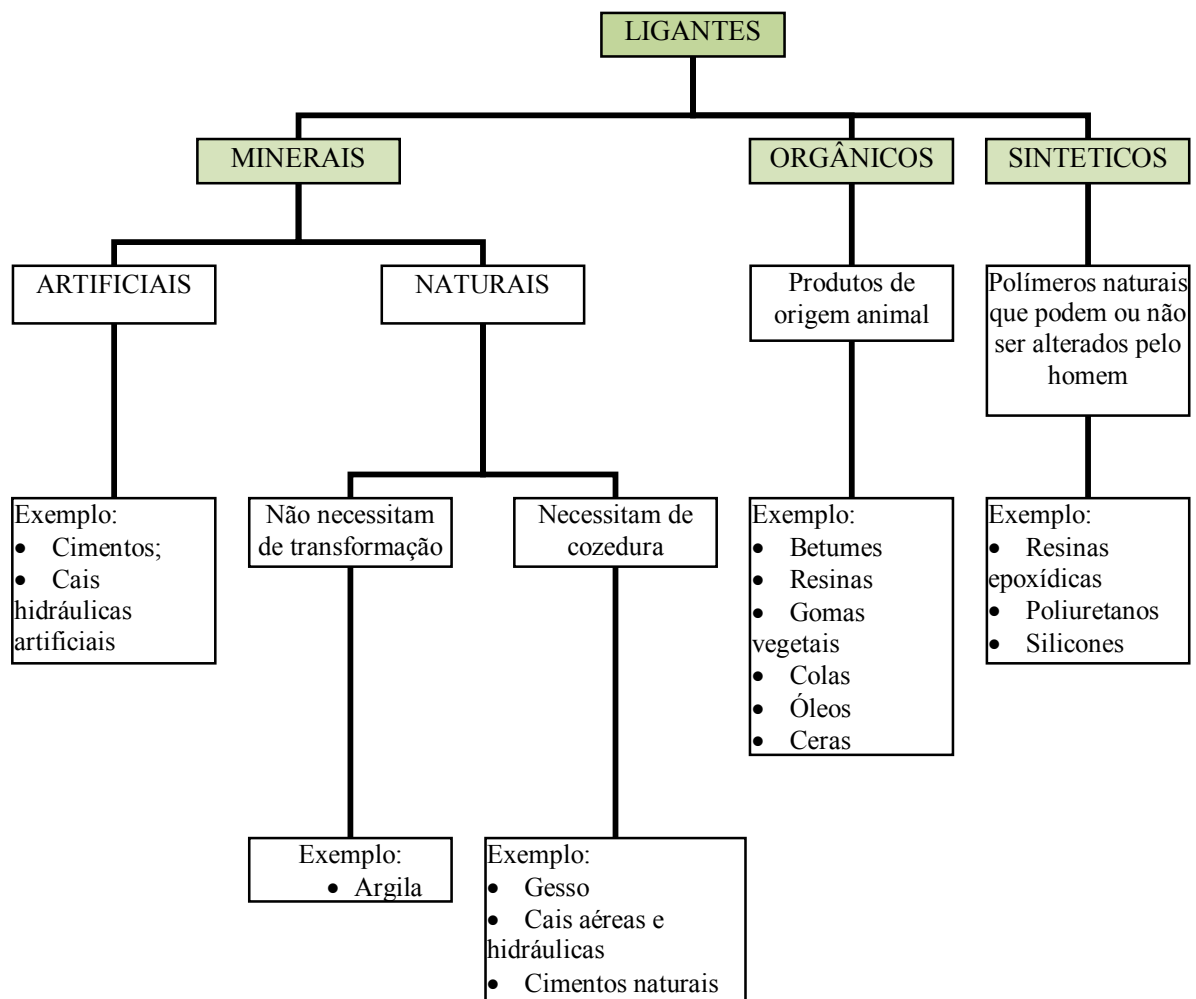


Figura 2.1:Diversos tipos de ligantes (Tomás, 2012)

### **2.2.1.1 Ligante hidráulico**

O ligante hidráulico tem na sua constituição um pó muito fino que depois de amassado (na presença de água) forma uma pasta, que através de reação química entre ambos, vai endurecer. Este endurecimento pode ser feito ao ar, mas também debaixo de água. (Rodrigues, 2004)

#### **2.2.1.1.1 Cimento Portland**

“O cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que ganha presa e endurece por reações e processos de hidratação e que depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água.” (Coimbra, 2008).

Ao longo do tempo o cimento tem vindo a sofrer ligeiras alterações de modo a acompanhar a evolução da construção onde se foram introduzindo novas matérias-primas para melhorar as suas propriedades. Estas alterações foram ao nível do preço e a nível ecológico, no entanto, o produto final foi alterado para se adaptar às necessidades e requisitos das diferentes construções (Coimbra, 2008).

O processo de fabricação do cimento é um processo complexo. A fábrica de cimento localiza-se perto da pedreira, tentando também que esta fique o mais próximo possível do consumidor. O primeiro passo designado “preparação do crú” que consiste empilhar o material moído e de seguida receber adições de argila. Para finalizar este passo coloca-se a mistura em silos e realiza-se uma análise química (raio X). (Coutinho 1988)

A etapa seguinte é a cozedura (1700°C) que transforma o crú num produto intermédio (o clínquer). (Coutinho, 1988)

Para finalizar realiza-se a moagem muito fina do clínquer com adjuvantes (o gesso), para dar origem aos diversos cimentos. (Coutinho 1988)

### **2.2.1.2 Ligante aéreo (cal aérea ou hidratada ou apagada)**

A cal aérea é um ligante, que deriva da separação, através de tratamento térmico, de uma rocha calcária com um baixo índice de impurezas. Esta cal não endurece na presença de água porque tem propriedades hidráulicas, logo é utilizada na construção através de argamassas de reboco e caiação de muros (Gonçalves, 2011).

O processo de fabricação da cal aérea consiste na decomposição de carbonato de cálcio do calcário aquecido em fornos de cal (temperatura de 900°C a 1000°C) e que vai formar óxido de cálcio e a liberação de dióxido de carbono (Gonçalves, 2011) de acordo com a reação.



### **2.2.2 Agregados**

Os agregados são materiais granulados usados na construção. Estes podem ser classificados como naturais, artificiais ou reciclados. Os agregados naturais têm a sua origem em fontes minerais, no entanto estão sujeitos apenas a tratamento mecânico (exemplo: areia e godo). Os agregados artificiais são de origem mineral, resultam de um processo industrial que envolvem diversos tratamentos tais como, térmicos e outros (exemplo: xisto expandido e argila expandida). E por último os agregados reciclados são o resultado dos excedentes de materiais inorgânicos usados na construção (exemplo: betão britado, e misturas betuminosas).

A resistência e rigidez dos agregados dependem da sua composição, textura e estrutura e vão influenciar a resistência à compressão da argamassa (Alves, 2010).

#### **2.2.2.1 Areia**

As areias são agregados de fina dimensão, que com a adição de um ligante, vão formar o esqueleto da argamassa. Estas areias são provenientes de uma ação mecânica (desagregação) de uma rocha, para formar os grânulos mais pequenos e finos (Rodrigues, 2004).

As areias podem ser divididas em dois tipos, areias calcárias e areias siliciosas. As areias calcárias resultam de rochas calcárias ou mesmo de desperdícios dessas rochas. As areias siliciosas resultantes de rochas de quartzo ou granito, são geralmente do rio ou do areeiro (Rodrigues, 2004).

### 2.2.2.2 Agregados leves

Os agregados leves são produtos de origem natural ou mineral, como por exemplo a madeira, a cortiça, a borracha, ou produtos de origem artificial fabricados com essa intenção, por exemplo, a argila expandida, xisto expandido, perlite expandida, vermiculite expandida e desperdícios industriais ou de construção como por exemplo, escórias expandidas e vidro expandido (Alves, 2010).

Os agregados leves que são incorporados nos betões, e desse modo vão dar origem a betões leves, tem elevada aplicação estrutural em edifícios, por exemplo, o Coliseu ou o Panteão de Roma (Alves, 2010).

Estes agregados têm como vantagem o seu peso reduzido, menores custos e facilidades de transporte. Descrevem-se a seguir apenas os agregados leves que fazem parte da composição das argamassas estudadas no presente trabalho.

#### ***Vermiculite expandida***

A vermiculite é um mineral composto por silicatos de alumínio, magnésio e ferro. A sua fórmula química é  $[(MgFeAl)_3(AlSi)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O]$  (Gonçalves, 2011).

A vermiculite expandida resulta de um tratamento térmico, onde as temperaturas podem rondar os 700°C. É devido a estas temperaturas que a vermiculite se expande e se separa em porções e assim o seu volume final aumenta entre 20 a 30 vezes em relação ao seu volume inicial (Sousa, 2010).

Este agregado tem boas características térmicas e por isso é utilizada na construção de pré-fabricados, em locais onde é necessário um bom comportamento térmico e para proteger contra incêndios (Sousa, 2010).

Além das aplicações mencionadas anteriormente, é também de extrema importância referir as propriedades físico-químicas da vermiculite. Esta apresenta estabilidade química, ou seja, não apresenta toxicidade e desempenha um papel passivo quando interage com outros componentes, apresenta baixa massa volúmica, ou seja, varia entre valores de 80 a 120 Kg/m<sup>3</sup>, tem baixa transmissão acústica, podem reduzir os ruídos até 62%, elevada durabilidade e capacidade de absorção de água (Gonçalves, 2011).

A sua condutibilidade térmica é a uma temperatura de 20°C e varia entre 0,04 e 0,05 W/m.K. E atinge o seu ponto de fusão entre 1300 e 1400°C (Sousa, 2010).

Na figura 2.2 podem observar-se fotografias de vermiculite em rocha e da vermiculite expandida.

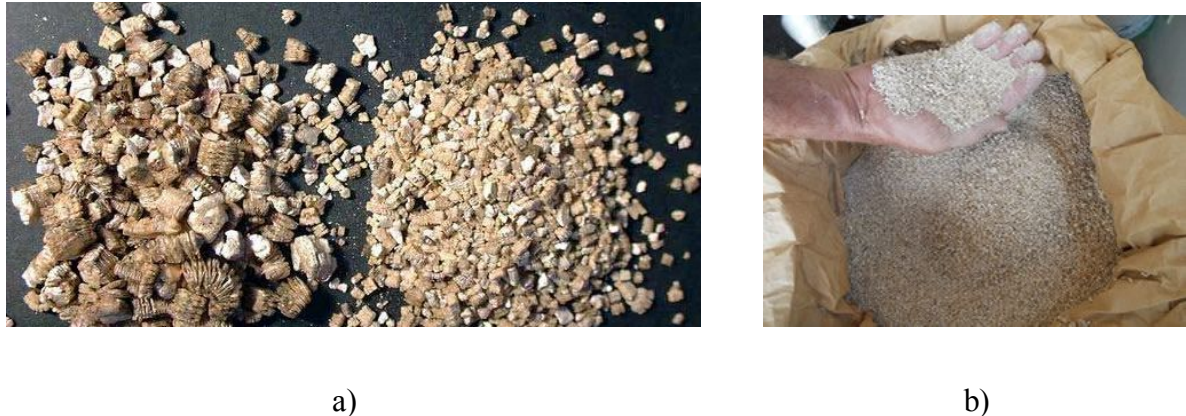


Figura 2.2: a) Vermiculite em rocha e após fragmentação (FUNGIFUN@, 2013);  
b) Vermiculite expandida (ARGILAEXPANDIDA@, 2013)

### ***Perlite expandida***

A perlite é um silicato de uma rocha vulcânica que desempenha um papel passivo ao interagir com outros componentes e pode ser expandido entre 10 a 20 vezes o seu volume inicial, quando atinge valores de temperatura compreendidos entre 700 a 1200°C (Sari, 2012).

A perlite é extraída a partir da rocha vulcânica, de seguida é fragmentada para dimensões apropriadas e para se obter perlite expandida esta é colocada num forno a temperaturas de 900°C onde existe a libertação de vapor de água (Sousa, 2010).

A composição química da perlite baseia-se em: óxido de silício, óxido de alumínio, óxido de potássio, óxido de sódio, água, óxido de cálcio e óxido de ferro (Sousa, 2010).

O agregado leve, perlite, tem boas características como isolante térmico e acústico, além disso também resiste ao fogo. Além destas características, a perlite tem elevada porosidade, elevada permeabilidade ao vapor de água (Sari, 2012).

As aplicações da perlite baseiam-se em aligeirar o peso em coberturas ajardinadas, utilizado como isolamento e regularização de pisos e como catalizador de explosivos (Sousa, 2010).

A condutibilidade térmica deste agregado leve é a uma temperatura de 20°C é de 0,05W/m.K (Sousa, 2010).

A figura 2.3 mostra a rocha vulcânica antes de qualquer tipo de processamento, depois de fragmentação e por último a perlite expandida.



Figura 2.3: Perlite em rocha, fragmentada e expandida (PERLITE@, 2013)

### ***Vidro expandido***

“O vidro é uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogênea” (Penacho, 2012).

O vidro é composto por sílica, alumina, sódio, cálcio, magnésio e potássio.

O elemento que se encontra presente em qualquer tipo de vidro é a sílica, que é a base do mesmo, as suas composições variam, o que vai alterar também o tipo de vidro e as suas propriedades (Penacho, 2012).

O vidro expandido resulta do aproveitamento do vidro doméstico e do vidro industrial após a sua utilização. Depois deste vidro utilizado e reciclado, este é moído e misturado com um agente expansor. Após se obter a mistura coloca-se num forno a elevadas temperaturas e este expande-se (Sousa, 2010).

A figura 2.4 mostra o vidro reciclado expandido com diferentes granulometrias.

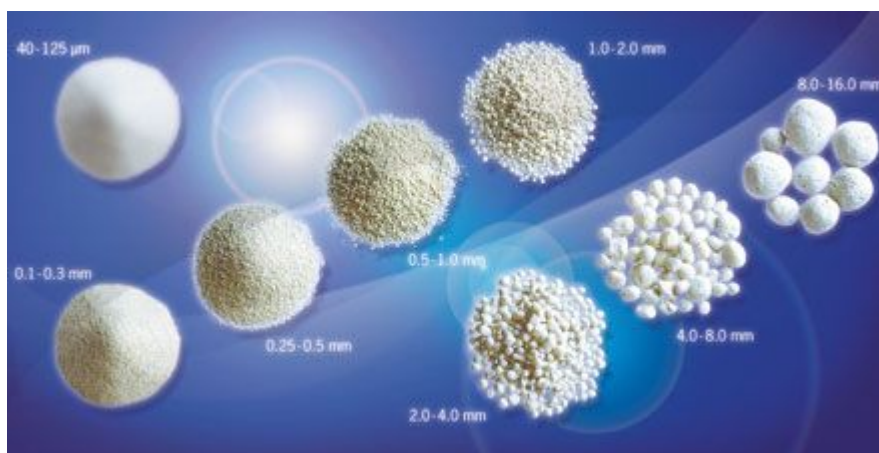


Figura 2.4: Vidro reciclado expandido com diferentes granulometrias (PORAVER@, 2013)

### 2.2.3 Aditivos

Aditivo é todo o material orgânico ou inorgânico que tem a finalidade de modificar as propriedades das argamassas frescas ou endurecidas, sendo este utilizado sempre em pequenas quantidades (Sousa, 2010).

Os aditivos são cada vez mais uma opção na composição de argamassas, estes têm como papel preponderante obter uma determinada prestação específica. Além disso o desenvolvimento global obriga a uma evolução dos materiais da construção para cumprir novas necessidades (Sousa, 2010).

Os aditivos podem ser utilizados para obter uma melhor trabalhabilidade, como acelerador ou retardador de presa, para aumentar a resistência aos ciclos gelo/degelo, diminuir a permeabilidade aos líquidos, produzir argamassas coloridas, entre outros. Além destas funcionalidades os aditivos podem ter a capacidade de produzir argamassas leves (Sousa, 2010).



### 2.3 Argamassas leves

As argamassas leves surgem como alternativa às argamassas correntes, dadas as vantagens dos materiais de baixa densidade. Algumas das vantagens a enunciar acerca destas argamassas são, a maior rapidez na construção, custos mais baixos, facilidade no transporte e funciona como bom isolamento térmico e acústico.

No entanto já existe estudos acerca de argamassas deles, entre eles destacam-se:

- “Estudo da influência de cargas leves nas propriedades de uma argamassa bastarda” (Ribeiro et al, 2005).
- “Estudo que avalia a influência da adição de agregados leves na concepção de argamassas leves para revestimentos de paredes” (Torres e Garcia-Ruiz, 2008).
- “Estudo com o objetivo de conhecer as vantagens do uso de hidrófobos nas argamassas leves” (Frattolillo et al, 2004).
- “Trabalho que pretende formular uma argamassa leve para uso na construção civil com adição de aditivos” (Coimbra et al, 1999).
- “Argamassas leves para execução de camadas de regularização e enchimento de pavimentos” (Alves, 2009).
- “Argamassas industriais com incorporação de grânulos de cortiça” (Frade et al, 2012).
- “Determinação da condutibilidade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve” (Stancato, 2000).

## **3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **3.1 Introdução**

Neste capítulo vão ser descritos os procedimentos do ensaio de, consistência por espalhamento, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, retração, permeabilidade ao vapor de água. Posteriormente ainda foram submetidos os provetes a ciclos de envelhecimento e depois realizaram-se os ensaios de, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão e resistência à compressão.

Também neste capítulo descreve-se as composições das argamassas, como foram preparadas e todos os equipamentos utilizados para a realização dos respetivos ensaios.

Todos os ensaios foram realizados no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons).

### **3.2 Descrição**

#### **3.2.1 Matérias-primas**

Para a realização deste trabalho experimental foram utilizados três tipos de argamassas pré doseadas. Uma com areia, cimento e cal (argamassa de referencia), e as outras duas com cal hidratada, vermiculite, esferas de vidro reciclado expandido, e ainda a argamassa A com perlite e a argamassa B com areia de sílica. O objetivo foi comparar as suas propriedades de forma a avaliar as vantagens da incorporação de grânulos de vidro reciclado expandido em argamassas.

Estas três argamassas pré-doseadas encontravam-se armazenadas em laboratório, em sacos selados, de modo a manterem-se todas as suas propriedades intactas e foram cedidas pela DIERA. Na figura 3.1 mostra-se uma das misturas em pó.



Figura 3.1: Mistura em pó

### 3.2.2 Preparação de argamassas

A constituição das argamassas e a respetiva quantidade de água podem ser consultadas na tabela 3.1. A quantidade de água foi estabelecida através de uma percentagem do peso da mistura em pó.

Tabela 3.1: Composição das argamassas em estudo

ARGAMASSA	COMPOSIÇÃO	QUANTIDADE DE ÁGUA (%)
Argamassa B	Cal hidratada; areia de sílica; vermiculite; esferas de vidro reciclado e posteriormente expandido; aditivos	53
Argamassa A	Cal hidratada; vermiculite; perlite; esferas de vidro reciclado e posteriormente expandido; aditivos	90
Argamassa de referência	Cimento; cal; areia de sílica; aditivos	15

Após a pesagem da mistura (com uma balança devidamente calibrada e com uma precisão de 0,01g) esta foi colocada no balde da misturadora, seguida da quantidade de água necessária. Procedeu-se ao envolvimento destes componentes (figura 3.2) durante um minuto e trinta segundos (o tempo foi controlado com a ajuda de um cronómetro). Após este tempo, para-se a misturadora e remove-se o material depositado nas bordas do balde e volta-se a ligar a misturadora durante mais um minuto e trinta segundos.

No final deste procedimento realiza-se o ensaio de consistência por espalhamento e inicia-se o enchimento dos diferentes moldes para realizar os provetes. A quantidade de água utilizada para cada argamassa foi contabilizada em função do peso da mistura, de acordo com o indicado na tabela 3.1.



Figura 3.2: Misturadora

Foram realizados diferentes tipos de provetes, em função dos ensaios realizados e das diferentes argamassas em estudo, de acordo com as dimensões previstas nas normas de ensaio:

- 15 Provetes circulares ( $\pm 190$  mm de diâmetro interno e entre 14 a 19 milímetros de espessura), que foram utilizados para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água. Foram moldados cinco provetes de cada argamassa
- 9 Provetes prismáticos (160mm de comprimento, 10 mm de largura e 40 mm de altura), que foram utilizados para o ensaio da determinação da retração; (três para cada argamassa)
- 27 Provetes prismáticos (160mm de comprimento, 40mm de largura e 40mm de altura), que foram utilizados para os restantes ensaios.

### **3.2.3 Ensaio realizados sobre argamassas frescas**

#### **3.2.3.1 Ensaio de consistência por espalhamento**

Este ensaio consiste em medir o diâmetro da argamassa numa mesa de espalhamento depois das devidas compactações, para desse modo se calcular o espalhamento da argamassa. Quanto maior for o diâmetro que a argamassa forma na mesa de espalhamento, melhor vai ser a sua trabalhabilidade.

A trabalhabilidade está ligada com a consistência, ou seja, com o grau de humidade da mistura, que está ligado também com o grau de plasticidade da massa (Miranda, 2009).

Pode-se dizer que uma argamassa tem boa trabalhabilidade quando a sua distribuição é fácil, não se cola aos utensílios usados, não segrega no transporte, não endurece quando está em contato com superfícies absorventes e permanece com características plásticas até ao final da operação (Miranda, 2009).

A trabalhabilidade da argamassa depende do seu manuseamento, ou seja, quanto melhor for a trabalhabilidade melhor será o seu espalhamento o que permite uma melhor aplicação, compacidade e o respetivo rendimento. Deste modo, também é importante obter capacidade de aderência ao suporte e um melhor trabalho na superfície para se ter o acabamento desejado.

Para determinação da consistência de uma argamassa recorreu-se à norma EN 1015-3:1999 (CEN, 1999 a)).

Este ensaio foi realizado na mesa de espalhamento, (Figura 3.3 a) onde a superfície da mesma e o molde devem estar limpos. Na superfície do disco encontra-se marcado um círculo onde se deve centrar o molde metálico para a realização do ensaio. Após este requisito estar cumprido pode ser iniciado o ensaio.

Começa-se por se proceder ao enchimento do molde até meio, segue-se a compactação da massa com a ajuda de um pilão, e com um mínimo de 10 pancadas (para as diferentes argamassas o número de pancadas foi diferente devido à falta de trabalhabilidade, garantindo-se sempre o mínimo). De seguida, enche-se o molde até cima, deixando passar a argamassa ligeiramente acima do topo do mesmo, voltando-se a repetir a compactação com o pilão e com o mínimo de 10 pancadas. Seguidamente, recorre-se a uma espátula para retirar o excesso de argamassa. Depois, retira-se o molde cuidadosamente e realiza-se nova

compactação com a ajuda da mesa de espalhamento, rodando-se a manivela e imprimindo-se 15 pancadas com intervalo de 1 segundo.

Recorrendo a um paquímetro (Figura 3.3 b) como aparelho auxiliar, mediu-se o diâmetro da mistura espalhada (Figura 3.3 c) em duas direções opostas. Para a apresentação dos resultados considerou-se a média dos dois diâmetros recolhidos.



a)



b)



c)

Figura 3.3: Ensaio de espalhamento: a) mesa de espalhamento; b) argamassa sobre a mesa de espalhamento; c) paquímetro

### 3.2.4 Moldagem dos provetes

#### 3.2.4.1 Provetes prismáticos

Neste grupo de provetes encontram-se os provetes prismáticos de 160mm de comprimento, 10 mm de largura e 40 mm de altura que foram utilizados para os ensaios de retração e os provetes de 160mm de comprimento, 40mm de largura e 40mm de altura para os restantes ensaios exceto os de permeabilidade ao vapor de água.

Para a realização correta da moldagem dos provetes, os moldes metálicos tiveram que ser corretamente montados e revestidos com óleo descofrante em quantidade adequada, de modo a facilitar uma posterior descofragem.

No caso dos moldes dos provetes com 160x40x40 colocou-se a mistura até aproximadamente meio do molde e compactou-se com 25 pancadas com ajuda de um pilão de pequenas dimensões. Depois encheu-se o molde até cima e voltou-se a compactar da mesma forma. Para finalizar, retirou-se o excesso de argamassa com a ajuda de uma espátula.

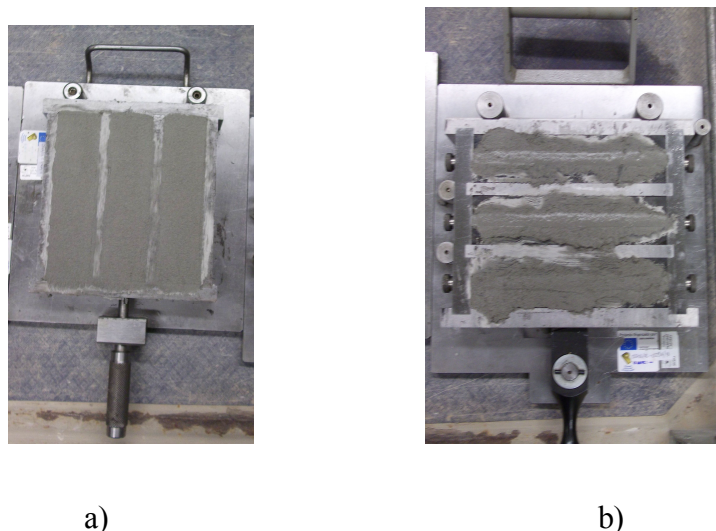


Figura 3.4: Moldagem dos provetes: a) provetes de secção prisma quadrangular; b) provetes de secção prisma retangular (ensaio de retração)

No caso dos provetes com 160x40x10 o processo de moldagem foi ligeiramente diferente, ou seja, colocou-se o molde no compactador mecânico. Encheu-se o molde até meio e realizou-se a compactação com a ajuda do compactador programando-o para 60 pancadas. De seguida encheu-se o molde até cima e voltou-se a fazer a compactação da mesma forma da anterior e mantendo o número de pancadas (60 pancadas). Para finalizar, raspou-se com a ajuda de uma espátula o excesso de argamassa.

Este procedimento para a compactação é diferente dos provetes 160x40x40, devido à reduzida dimensão do molde. A compactação com o pilão não iria ser realizada nas melhores condições e por esse motivo recorreu-se à compactação no compactador mecânico.

#### 3.2.4.2 Provetes circulares

Estes provetes foram utilizados para o ensaio à permeabilidade de vapor de água. Os moldes circulares foram efetuados cortando-se um tubo de PVC com 190 milímetros de diâmetro interno com uma espessura entre 15 a 20 milímetros de espessura. Forrou-se uma tábua com plástico preto e colaram-se os moldes de tubo de PVC com o auxílio de silicone. Colocou-se óleo descofrante em quantidade adequada no interior dos tubos de PVC e no plástico. Com uma espátula colocou-se argamassa dentro do molde mais ou menos até meio deste, e realizou-se a compactação de 25 pancadas com a ajuda de um pilão. De seguida encheu-se o molde até cima e realizou-se novamente a compactação com o pilão em 25 pancadas. Retirou-

se o excesso de argamassa com a ajuda de uma espátula e tentou-se raspar a superfície de cima para esta ficar o mais nivelada possível.

Após um período de cura adequado os provetes foram desmoldados tendo-se especial atenção porque estes eram de fácil degradação o que poderia provocar a fragmentação. A argamassa de referência e argamassa A ficaram 5 dias dentro do molde e 23 dias fora do molde, enquanto que a argamassa B esteve os 28 dias dentro do molde devido à mesma não ter resistência suficiente para ser desmoldada ao fim do tempo que a norma recomenda, com as condições requeridas.

### **3.2.5 Condições de cura e período de secagem**

Os moldes prismáticos (das duas dimensões) contendo os provetes foram colocados dentro de sacos de plástico bem vedados durante 2 dias para se manter uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $95\% \pm 5\%$ . Após esse período os provetes foram desmoldados e colocados novamente dentro dos sacos à temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $95\% \pm 5\%$  durante 5 dias. As condições seguintes foram manter os provetes durante 21 dias a uma humidade relativa de  $65\% \pm 5\%$  e uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Os provetes circulares, dentro dos moldes foram colocados durante 2 dias no interior de sacos de plástico vedados a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $95\% \pm 5\%$ . Posteriormente foram desmoldados exceto os da argamassa B (devido à falta de resistência) e mantidos em câmara a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $65\% \pm 5\%$  durante 26 dias.

Como se pretendeu também estudar o comportamento das argamassas a longo prazo, procedeu-se ao envelhecimento acelerado de alguns provetes. Este envelhecimento foi realizado segundo a norma EN 1015-21:2002 (CEN, 2002 b). Após a cura inicial de 28 dias anteriormente referida realizaram-se duas séries de condicionamentos de quatro ciclos cada. Entre as séries os provetes foram condicionados, 48 horas, a  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $65\% \pm 5\%$ .

A primeira série consiste em colocar os provetes durante  $8 \text{ horas} \pm 15 \text{ minutos}$  com radiação infra vermelha a incidir e manter a temperatura da superfície de  $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , de seguida colocou-se numa câmara durante  $30 \text{ minutos} \pm 2 \text{ minutos}$  a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $65\% \pm 5\%$ , depois armazenou-se numa câmara a uma temperatura de  $-15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$  durante  $15 \text{ horas} \pm 15 \text{ minutos}$  e para finalizar esta série colocou-se as amostras



numa câmara a  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $65\% \pm 5\%$  durante um período de tempo de 30 minutos  $\pm 2$  minutos.

A segunda série de condicionamento iniciou-se com a imersão total das amostras num tanque com água a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 8 horas  $\pm 15$  minutos, de seguida as amostras foram colocadas numa câmara a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $65\% \pm 5\%$  durante 30 minutos  $\pm 2$  minutos, depois colocou-se as amostras numa câmara congeladora a uma temperatura de  $-15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  durante um período de 15 horas  $\pm 15$  minutos e para finalizar colocou-se as amostras numa câmara a  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $65\% \pm 5\%$  durante um período de 30 minutos  $\pm 2$  minutos.

Na figura 3.5 apresentam-se os aparelhos utilizados nos diferentes condicionamentos.



a)



b)



c)

Figura 3.5: Condicionamentos para os ensaios após envelhecimento: a) provetes completamente imersos; b) câmara a  $60^{\circ}\text{C}$ ; c) câmara a  $20^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.6 Ensaio sobre argamassas endurecidas

#### 3.2.6.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Este ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 14146:2006 (IPQ,2006), mas com algumas alterações, pois esta norma é referente a pedras naturais. Os provetes utilizados para a realização deste ensaio foram os de dimensão 160x40x40mm. Estes foram mantidos nas condições referidas na secção anterior e algum tempo antes foram colocados no exsiccador que serve para evitar que haja absorção de humidade do ar por parte dos provetes, na fase de arrefecimento.

Este ensaio consiste em provocar um impacto numa extremidade do prisma, o que vai fazer com que haja uma excitação nas partículas e provoca uma onda de vibração em todo o provete. As amplitudes de vibração (acelerações) em função da frequência foram medidas na extremidade oposta do provete e registadas utilizando um software adequado.

Para ser iniciado o ensaio, colocaram-se dois apoios prismáticos de secção triangular em metal rígido com um comprimento superior à largura do provete e colocou-se o provete sobre esses apoios, como se mostra na figura 3.5.

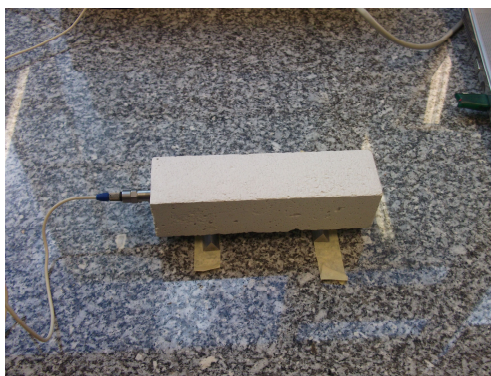


Figura 3.6: Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico com a fonte recetora

Colocou-se um acelerómetro numa das extremidades do provete e na extremidade oposta aplicaram-se impactos repetidos com um ritmo constante (figura 3.6), com um martelo de impacto modelo 8206, da marca "Bruel & Kjaer". O acelerómetro, modelo 8339, da marca

"Bruel & Kjaer", está ligado a um multi analisador de sinal, PulseTM, modelo 3560-C, da marca "Bruel & Kjaer" que em conjunto com software adequado nos permite visualizar o espectro de vibração do provete. Nesse gráfico é possível identificar a frequência de ressonância do provete que nos permitirá efetuar o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico.

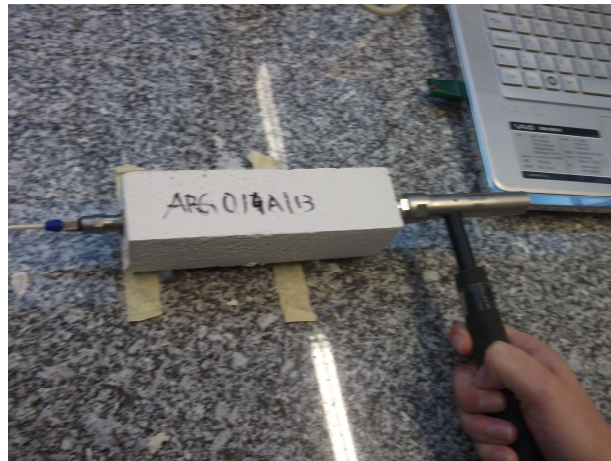


Figura 3.7: Ensaio de elasticidade dinâmico com a fonte emissora e recetora

Calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal através da seguinte expressão:

$$Ed_l = 4 \times 10^{-6} \times l^2 \times F_l^2 \times \rho \times T$$

$\rho$  – Massa volúmica do provete [ $\text{g}/\text{mm}^3$ ];

T – coeficiente de correção:

$$T = 1 + \frac{\pi^2 \times \nu^2 \times i^2}{l^2}$$

$\nu$  – Coeficiente de Poisson;

l – comprimento do provete [mm];

$i$  – raio de giração da secção do provete [mm]

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$A$  – área do provete [mm<sup>2</sup>]

$I$  – momento de inércia do provete [mm<sup>4</sup>]

Para provetes prismáticos de base quadrada:  $I = \frac{b^4}{12}$

$b$  – lado da base (quadrado) [mm]

Calculou-se a massa volúmica de cada provete, pelo processo de cubicagem, usando as dimensões do provete, através da expressão:

$$\rho = \frac{m_d}{l \times A} [g / mm^3]$$

$\rho$  – Massa volúmica [g/mm<sup>3</sup>];

$m_d$  – massa do provete seco [g];

$A$  – área da secção transversal do provete [mm<sup>2</sup>];

$l$  – comprimento do provete [mm].

### 3.2.6.2 Ensaio de resistência à tração por flexão

Este ensaio consiste na colocação do provete num equipamento adequado, centrado sobre dois apoios que estão a uma distância de 100 milímetros entre eles. E aplica-se uma força no centro do provete até se atingir a rotura.

Existem dois fatores preponderantes de que depende a resistência mecânica de uma argamassa, a coesão entre as matérias-primas depois de hidratadas e a aderência (Coimbra, 2008).

A resistência mecânica está relacionada com o módulo de elasticidade, o que condiciona a trabalhabilidade e a resistência de deformação. Ou seja, quanto maior é o módulo de elasticidade menor é a flexibilidade da argamassa maior a probabilidade de ocorrer fendilhação.

No entanto, deve-se ter em atenção ao equilíbrio existente entre resistência e deformação de forma a ser garantido uma boa trabalhabilidade e evitar demasiada rigidez (Miranda, 2009).

Para testar as argamassas quanto às resistências mecânicas, foram realizados ensaios à tração por flexão e ensaios à compressão.

Os provetes utilizados neste ensaio foram de dimensão 160x40x40 milímetros. Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-11:1999 (CEN, 1999 b).

Os provetes devidamente limpos, foram colocados no equipamento adequado, sobre dois apoios tendo-se o cuidado do provete ficar centrado e com a face superior da moldagem virada para a frente, ou seja a face que recebeu a carga e a face oposta à mesma foram faces que estiveram em contacto com o molde durante a cura.

Este ensaio consiste em colocar o provete sobre dois apoios (distanciados de 100 milímetros e com o dispositivo indicado pela norma para o ensaio de tração por flexão) e aplicar-lhe uma carga de compressão na zona central com uma máquina universal marca “Instron” a uma taxa constante (como se mostra na figura 3.7), ficando estes sujeitos a um esforço de flexão até se atingir a rotura.

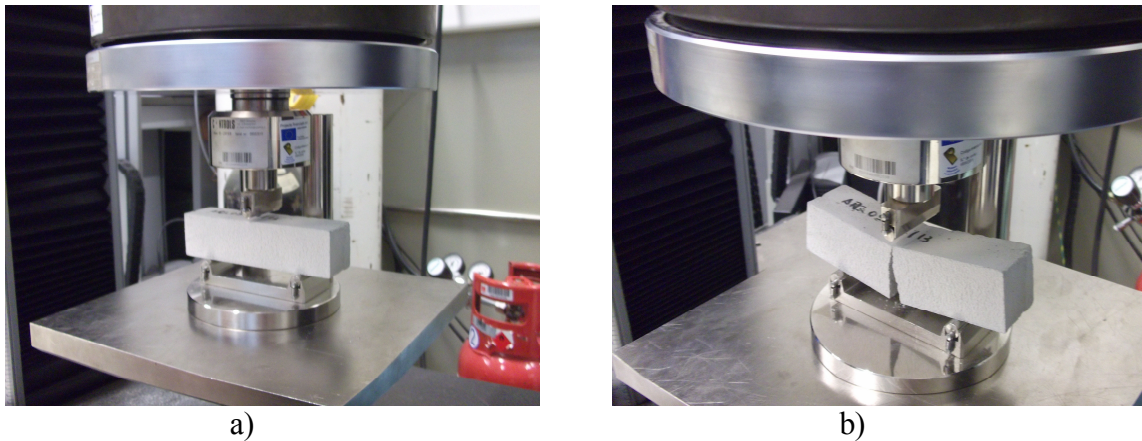


Figura 3.8: Ensaio de resistência à tração por flexão: a) antes de se iniciar o ensaio; b) no final do ensaio

O cálculo da resistência à tração por flexão realizou-se através da seguinte expressão:

$$R_f = 1,5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} [N / mm^2]$$

Onde:

F – força máxima aplicada [N];

l – distância entre os eixos de apoio do provete [=100mm];

b – largura do provete [=40mm];

d – espessura do provete [=40mm]

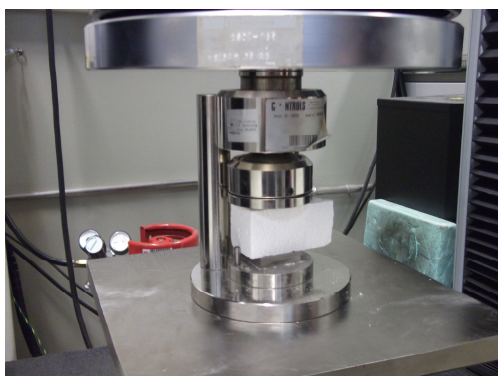
### 3.2.6.3 Ensaio de resistência à compressão

Este ensaio consiste na colocação de um provete num equipamento adequado, apoiado num apoio metálico. Tendo-se o cuidado de que a face que está sobre o apoio e a oposta fossem as faces que estiveram em cura em contacto com o molde metálico. E aplica-se uma carga de compressão no provete até ocorrer a rotura.

Os provetes utilizados para este ensaio foram uma das metades dos utilizados no ensaio de tração por flexão. Este ensaio foi realizado segundo a norma EN1015-11:1999 (CEN, 1999 b).

Limparam-se os provetes para remover todos os desperdícios e para o ensaio ser realizado com as devidas condições. Colocou-se o provete na máquina universal de marca “Instron” de compressão sobre um apoio metálico, com as dimensões 40x40 milímetros (dispositivo indicado pela norma para o ensaio de compressão). Também teve-se que ter em atenção que as faces em contacto com o aparelho (superior e inferior) fossem as faces que estiveram em contacto com o molde no período da cura.

Foi aplicada uma carga de compressão a uma taxa constante e assim que ocorrer a rotura no provete registou-se a carga máxima aplicada (figura 3.8).



a)



b)

Figura 3.9: Ensaio de resistência por compressão: a) antes do início do ensaio; b) no final do ensaio

O cálculo da resistência à compressão realizou-se através da seguinte expressão:

$$R_c = \frac{F}{A_c} [N / mm^2]$$

Onde:

F – Força máxima aplicada [N];

$A_c$  – área de carga [ $\text{mm}^2$ ] →  $A_c=40\text{mm}\times 40\text{mm}=1600\text{mm}^2$

#### **3.2.6.4 Absorção de água por capilaridade**

Este ensaio consiste inicialmente na secagem dos provetes, para se atingir uma diferença mínima entre pesagens. De seguida revestem-se os provetes com película aderente e pesam-se. Posteriormente colocam-se os provetes revestidos num tanque com uma altura mínima de água e para finalizar faz-se uma pesagem ao fim de 10 minutos, e outra ao fim de 90 minutos para se calcular o coeficiente de absorção por capilaridade.

Este ensaio foi realizado com os meios provetes resultantes do ensaio de tração por flexão. Este ensaio foi realizado segundo a norma EN1015-18:2002 (CEN, 2002 a))

Os provetes foram colocados numa estufa para se realizar a secagem dos mesmo, com as condições de uma temperatura de  $60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , até se atingir uma massa constante. Isto verifica-se quando em duas pesagens consecutivas com um intervalo de 24h a perda de massa não seja superior a 0,2% relativamente à massa total.

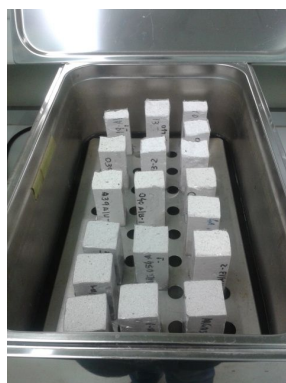
Depois dos provetes bem secos colocaram-se no exsiccador juntamente com um pouco de sílica, como se mostra na figura 3.9, para se baixar a temperatura sem aumentar o teor de humidade. De seguida revestiram-se todos os provetes com película aderente deixando apenas livre a base inferior e a face superior, para desse modo se garantir que a água apenas era absorvida pela base.





Figura 3.10: Provete colocados dentro do exsiccador com sílica

Os provetes foram pesados ( $M_0$ ) colocados num tanque com a base imersa em água até 5 a 10 milímetros. Colocaram-se os provetes dentro do tanque como se mostra na figura 3.10 e passado 10 minutos ( $M_1$ ) pesaram-se novamente, limpando sempre a superfície que se encontra em contato com a água. No intervalo seguinte entre as pesagens de 10 minutos e 90 minutos teve que se verificar algumas vezes a altura de água do tanque e caso a altura baixasse colocava-se mais água. Ao fim dos 90 minutos ( $M_2$ ) após o início do ensaio realizou-se nova pesagem e registaram-se os valores obtidos, recorrendo ao mesmo método de limpeza da base do provete.



a)



b)

Figura 3.11: Ensaio de absorção por capilaridade: a) tanque com os provetes e água; b) pormenor da água a subir nos provetes por capilaridade.

Para o cálculo do coeficiente de capilaridade, usa-se a seguinte expressão:

$$C_{construção} = 0,1 \times (M_2 - M_1) \left[ \text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5} \right]$$

$C_{construção}$  – coeficiente de capilaridade (para argamassas de construção)

$M_1$  – massa do provete ao fim de 10 minutos (g);

$M_2$  – massa do provete ao fim de 90 minutos (g)

### 3.2.6.5 Retração

Este ensaio consiste na leitura do comprimento equivalente dos provetes em relação a uma barra de referência em dois períodos de tempo (24 horas mais 27 dias). Este ensaio está interligado com a durabilidade e qualidade do edificado, porque quando a argamassa é colocada sobre uma base é impedida de retrair devido à sua aderência, o que pode provocar tensões de tração que podem causar fissuração das argamassas.

Os provetes utilizados na realização deste ensaio foram os provetes prismáticos com 160x40x10 milímetros. Este ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 12808-4 (IPQ, 2007).

Após 24 horas de condicionamentos os provetes foram desmoldados e procedeu-se à medição do seu comprimento com um comparador calibrado através da sua barra de referência.

Colocaram-se os provetes novamente nas condições normalizadas,  $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  e uma humidade relativa de  $50\% \pm 5\%$ , durante 27 dias e, ao fim deste período foram de novo medidos no aparelho adequado e em relação à mesma barra de referência como se mostra na figura 3.11.



a)

b)

Figura 3.12: Ensaio de retração: a) pormenor dos provetes utilizados no ensaio de retração; b) provete no aparelho que mede a retração.

Para o cálculo da retração utiliza-se a seguinte expressão:

$$\text{Retração}_{\text{individual}} = \frac{R_{27\text{ dias}} - R_{\text{inicial}}}{C_{\text{barra\_de\_referencia}}} * 1000$$

Retração *individual* – retração de cada provete

$R_{\text{inicial}}$  – retração no instante inicial

$R_{27\text{ dias}}$  – retração ao fim de 27 dias

$C_{\text{barra\_de\_referencia}}$  – comprimento do provete (mm)

### 3.2.6.6 Permeabilidade ao vapor de água

Este ensaio consiste na colocação de uma solução aquosa dentro de uma tina para se conseguir manter uma humidade relativa de 93,2% e colocar o provete bem selado na tina de modo a se conseguir manter um espaço livre entre a solução aquosa e o provete de 1,5 centímetros. Realiza-se a primeira pesagem no final deste procedimento e as seguintes são realizadas de 24 em 24 horas até se conseguir manter um fluxo de vapor de água através dos provetes constante.

O reboco não deve ser completamente impermeável, porque este tem que permitir as trocas de vapor de água entre o interior e o exterior, de modo a não existir condensações no interior dos edifícios. (Miranda, 2009)

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi realizado com os provetes circulares de 190 milímetros de diâmetro e espessura compreendida entre 14 a 20 milímetros. Este ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 1015-19:2008 (IPQ,2008) no entanto teve também que se recorrer à norma ISO 12572:2001 (ISO, 2001).

Pesaram-se os provetes de ensaio e mediu-se a sua espessura em três pontos opostos. Colocaram-se dentro das tinas (que são recipientes com um diâmetro menor na parte inferior onde se coloca a solução aquosa e na parte superior o diâmetro é maior onde se coloca o provete selado) numa parte inferior uma solução de nitrato de potássio com uma altura de 5 milímetros de modo a se garantir uma pequena folga de  $10\text{mm} \pm 5\text{mm}$  entre a superfície do provete e a superfície da solução.

Colocaram-se os provetes nas tinas e selaram-se os bordos com silicone de modo a não existir nenhuma passagem de vapor pelas laterais como se mostra na figura 3.12.

Realizou-se uma primeira pesagem logo após a selagem e de seguida colocaram-se todos os provetes na câmara climática a temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $50\% \pm 5\%$ . Teve-se especial atenção no manuseamento das tinas porque a solução não pode em nenhuma circunstância molhar o provete.

Após 24 horas voltaram a fazer-se novas pesagens e registaram-se os resultados. As pesagens foram feitas com intervalos de aproximadamente 24 horas e foi feito um gráfico com a relação entre a massa dos provetes e o tempo. O ensaio termina quando conseguimos colocar três pontos do gráfico alinhados numa linha reta.



a)

b)

Figura 3.13: Ensaio de permeabilidade ao vapor de água: a) tina com a solução de nitrato de potássio; b) tina com o provete selado de forma ideal para se iniciar o ensaio.

Para calcular a permeabilidade foi necessário realizar alguns cálculos. A relação entre a variação de massa e o tempo,  $\Delta m_{12}$ , é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} [\text{kg} / \text{s}]$$

$\Delta m_{12}$  – variação de massa e o tempo [kg/s]

$m_1$  – massa do conjunto provete, tina e solução, no instante  $t_1$  [kg]

$m_2$  – massa do conjunto provete, tina e solução, no instante  $t_2$  [kg]

$t_1$  e  $t_2$  – tempos relativo a duas pesagens consecutivas [s]

Quando o valor da variação de massa por intervalo de tempo ( $\Delta m_{12}$ ) se torna constante, assume-se esse valor de fluxo de difusão de vapor de água,  $G$  [kg/s].

Para o cálculo da densidade do fluxo de difusão de vapor de água, foi calculado pela seguinte expressão:

$$g = \frac{G}{A} [kg \cdot m^2 / s]$$

A – área do provete exposta [m<sup>2</sup>]

A permeância ao vapor de água, W, foi calculada:

$$W = \frac{g}{\Delta p_v} [Kg / (m^2 \cdot s \cdot Pa)]$$

Onde:

$$\Delta p_v = p_{sat} \times \frac{\phi_1 - \phi_2}{100} [Pa]$$

Com:

$$p_{sat} = 610,5 \times e^{\frac{17,267 \times \theta}{237,3 + \theta}} [Pa]$$

p<sub>sat</sub> - pressão de saturação à temperatura de ensaio

Ø<sub>1</sub> - Ø<sub>2</sub> – Diferença entre humidades relativas no interior e exterior da tina [%]

θ – Temperatura de ensaio [°C], neste caso foi 20°C

nas condições anteriores:

$$p_{sat} = 2337 [Pa]$$

Considerando que a humidade relativa fora da tina é 50% e a humidade relativa no interior é 93, 2%, então pode-se adotar o valor de variação de pressão à temperatura de ensaio, Δp<sub>v</sub>=1009,5 [Pa].

Para o cálculo da permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ), usou-se a seguinte expressão:

$$\delta = W \times d \text{ [Kg / (m.s.Pa)]}$$

d – espessura do provete [m]

O cálculo seguinte é o fator de resistência à difusão do vapor de água,  $\mu$ , que indica quantas vezes a resistência por difusão do material em estudo é maior do que a de uma camada de ar em repouso, com a mesma espessura e mesmas condições ambientais (Tomás, 2012):

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta}$$

$\delta_a$  – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/(m.s.Pa)]

Segundo a norma ISO 12572:2001  $\delta_a$  toma o valor de  $1,95 \times 10^{-10}$  [kg/(m.s.Pa)]

O cálculo seguinte, designado espessura da camada de ar equivalente ( $S_d$ ), que significa a espessura da camada de ar em repouso com a mesma resistência à difusão do vapor de água que o elemento em estudo (argamassa no estado sólido) (Tomás, 2012). Este cálculo é apenas realizado para completar o estudo e através da seguinte expressão:

$$S_d = \mu \times d \text{ [m]}$$

$S_d$  – espessura da camada de ar equivalente

### 3.2.6.7 Ensaio após envelhecimento

Como o módulo de elasticidade dinâmico é um ensaio não destrutivo, os provetes utilizados neste ensaio foram sujeitos ao envelhecimento acelerado. Após este envelhecimento procedeu-se à determinação do módulo de elasticidade, de resistência à tração por flexão e da resistência à compressão, de acordo com os procedimentos já descritos.

## 4 RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

### 4.1 Ensaio de consistência por espalhamento

De acordo com a norma utilizada na realização do ensaio, se os dois valores de diâmetro obtidos se desviarem do valor da média menos que 10% deve-se usar o valor médio como valor de consistência da argamassa. Caso contrário, o ensaio deve ser repetido.

Os resultados deste ensaio são os apresentados na tabela 4.1 tendo em conta cada uma das argamassas:

Tabela 4.1: Resultados do ensaio de consistência por espalhamento

	Identificação dos provetes	Ensaio 1			Ensaio 2			Média provete (mm)	Espalhamento (mm)
		1ª medição	2ª medição	Média (mm)	1ª medição	2ª medição	Média (mm)		
Arg. de referência	1	165,38	166,62	166	165,87	166,52	166	166	
	2	165,46	167,79	167	166,02	167,23	167		
Arg. A	1	125,15	123,49	124	123,58	125,84	125	124	
	2	122,61	124,57	124	124,01	124,67	124		
Arg. B	1	174,2	175,36	175	173,98	174,59	174	174	
	2	173,15	174,91	174	174,56	173,85	174		

Pela análise dos resultados anteriores verificou-se que a argamassa A tinha em valor para o espalhamento muito reduzido, logo esta argamassa tinha muito pouca trabalhabilidade. A argamassa B e a argamassa de referência tinham o valor de espalhamento idêntico. A argamassa de referência foi fácil de manusear ao contrário da argamassa B que apesar do seu valor de espalhamento foi difícil de compactar.

Também se pode afirmar que apesar do valor de espalhamento na argamassa de referência ser inferior ao espalhamento da argamassa B, a de referência foi muito mais fácil para compactar e desse modo ter menor volume de espaços vazios.



## 4.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Depois da obtenção da frequência de ressonância fundamental em vibração longitudinal ( $F_L$ ) através do aparelho utilizado e do software calculou-se a frequência de ressonância fundamental em vibração longitudinal média ( $F_{L\text{ médio}}$ ), através da média entre os três valores correspondentes a cada argamassa.

Os resultados do módulo de elasticidade dinâmico vão ser apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

		Arg. de referência			Arg. A			Arg. B		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>m</b>	<b>(g)</b>	424,110	419,690	394,430	130,700	120,260	132,730	167,130	167,730	162,790
<b>l<sub>m</sub></b>	<b>(mm)</b>	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000
<b>b<sub>m</sub></b>	<b>(mm)</b>	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000
<b>b<sub>m</sub></b>	<b>(mm)</b>	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000
<b>r</b>	<b>(g/mm<sup>3</sup>)</b>	1,66E-03	1,64E-03	1,54E-03	5,11E-04	4,70E-04	5,18E-04	6,53E-04	6,55E-04	6,36E-04
<b>F<sub>L1</sub></b>	<b>(Hz)</b>	7313,000	7341,000	6983,000	3559,000	3314,000	3645,000	2625,000	2256,000	2191,000
<b>F<sub>L2</sub></b>	<b>(Hz)</b>	7300,000	7336,000	6944,000	3548,000	3313,000	3670,000	2608,000	2283,000	2191,000
<b>F<sub>L3</sub></b>	<b>(Hz)</b>	7308,000	7330,000	6953,000	3534,000	3353,000	3648,000	2598,000	2266,000	2188,000
<b>F<sub>Lm</sub></b>	<b>(Hz)</b>	7307,000	7335,667	6960,000	3547,000	3326,667	3654,333	2610,333	2268,333	2190,000
<b>T</b>		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>ρ</b>	<b>(g/mm<sup>3</sup>)</b>	0,166	0,164	0,154	0,051	0,047	0,052	0,065	0,066	0,064
<b>E<sub>dL</sub></b>	<b>(Mpa)</b>	9057,675	9033,744	7642,728	657,746	532,353	708,999	455,519	345,211	312,303
<b>E<sub>dL</sub></b>	<b>(MPa)</b>	8578,049			633,032			371,011		

Na figura 4.1 apresentam-se os valores do módulo de elasticidade obtidos para as três argamassas.

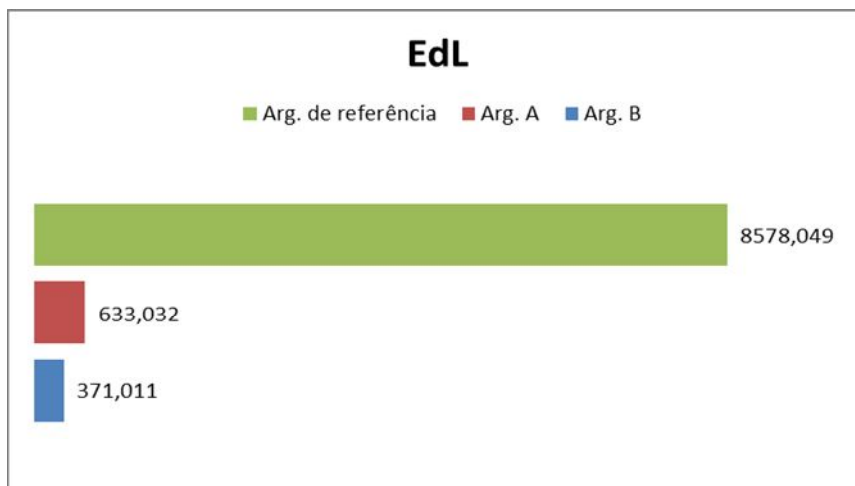


Figura 4.1: Resultado de  $E_{dL}$  para as diferentes argamassas

A partir da análise da tabela 4.2 e figura 4.1 verifica-se que a argamassa B tem o menor módulo de elasticidade com valor na ordem dos 370 (MPa), a argamassa A tem valor intermédio mas também baixo na ordem dos 630 (MPa), já a argamassa de referência tem o valor mais elevado na ordem dos 8570 (MPa). Logo conclui-se que a argamassa de referência é menos flexível e a argamassa B é a mais flexível.

### 4.3 Ensaio de resistência à tração por flexão

Os resultados obtidos no ensaio da resistência à tração por flexão, são apresentados na tabela 4.3 e na Figura 4.2

Tabela 4.3: Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão

	Número do provete	Máxima carga compressiva (N)	R <sub>f</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>f</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Arg. de referência</b>	1	1349,000	3,162	3,009
	2	1285,000	3,012	
	3	1151,000	2,698	
	4	1205,000	2,824	
	5	1329,000	3,115	
	6	1283,000	3,007	
<b>Arg. A</b>	1	544,000	1,275	1,004
	2	413,000	0,968	
	3	533,000	1,249	
	4	435,000	1,020	
	5	393,000	0,921	
	6	422,000	0,989	
<b>Arg. B</b>	1	66,000	0,155	0,169
	2	67,000	0,157	
	3	91,000	0,213	
	4	86,000	0,202	
	5	77,000	0,180	
	6	50,000	0,117	

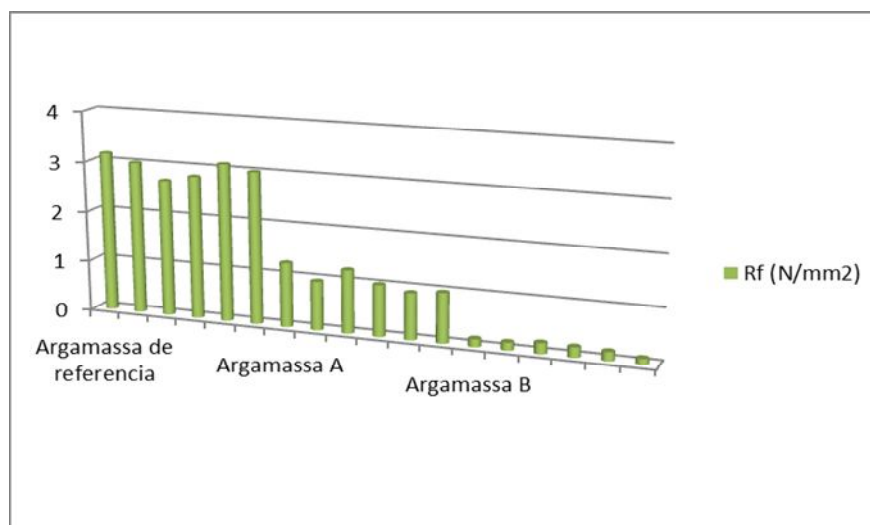


Figura 4.2: Resultado final de R<sub>f</sub> no ensaio de tração por flexão

Através da análise do gráfico anterior podemos verificar que a argamassa de referência é a que tem maior valor da resistência à tração por flexão, na ordem dos  $3\text{N/mm}^2$ , de seguida encontra-se a argamassa A com valores na ordem do  $1\text{ N/mm}^2$  e a argamassa B tem valores menores que as duas anteriores com valores entre  $0,1$  e  $0,2\text{N/mm}^2$ .

#### 4.4 Ensaio de resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão apresentam-se na tabela 4.4 e na Figura 4.3.

Tabela 4.4: Resultados do ensaio de resistência à compressão

	Número do provete	Máxima carga compressiva (N)	Rc (N/mm <sup>2</sup> )	Rc (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Arg. De referência</b>	1	13688,000	8,555	8,316
	2	12930,000	8,081	
	3	13489,000	8,431	
	4	13123,000	8,202	
	5	11975,000	7,484	
	6	13651,000	8,532	
<b>Arg. A</b>	1	3061,000	1,913	2,083
	2	3395,000	2,122	
	3	2927,000	1,829	
	4	3341,000	2,088	
	5	3420,000	2,138	
	6	3323,000	2,077	
<b>Arg. B</b>	1	484,000	0,303	0,443
	2	426,000	0,266	
	3	712,000	0,445	
	4	706,000	0,441	
	5	863,000	0,539	
	6	949,000	0,593	

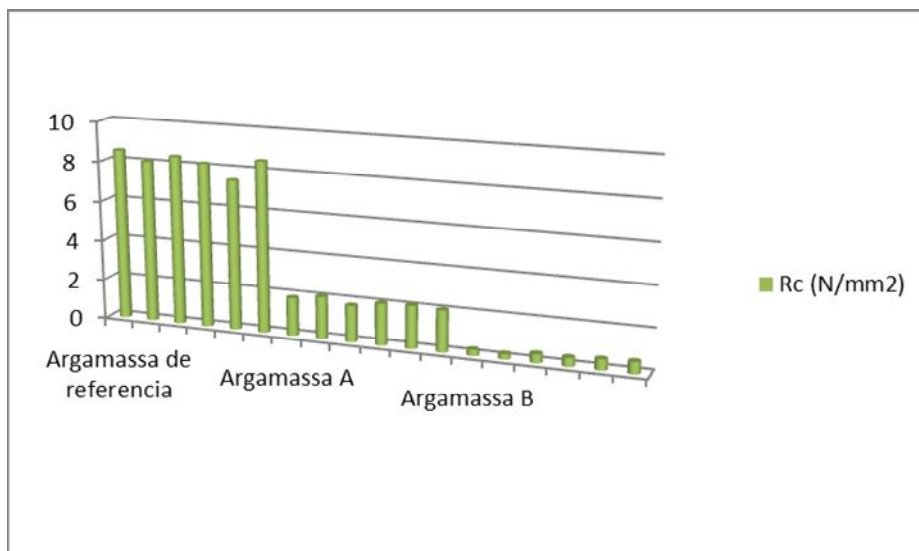


Figura 4.3: Resultado de  $R_c$  para as diferentes argamassas

Através da análise do gráfico anterior verificou-se que a argamassa de referência é a que oferece melhor resistência à compressão na ordem  $8 \text{ N/mm}^2$ , a argamassa A é uma argamassa de caracter intermédio em que o valor da resistência à compressão é proximo de  $2 \text{ N/mm}^2$  e a argamassa B é a que tem menor resistência à compressão com valores na ordem dos  $0,4 \text{ N/mm}^2$ .

#### 4.5 Absorção de água por capilaridade

Na tabela 4.5, apresentam-se os resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade referente aos cálculos para uma argamassa de construção.

Tabela 4.5: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade

		M1-10min (g)	M2-90min (g)	$C_c$ (kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ))	$C_c$ kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )
<b>Arg. de referência</b>	1 - 1	212,040	213,790	0,175	0,346
	1 - 2	209,950	213,630	0,368	
	2 - 1	210,790	214,110	0,332	
	2 - 2	213,610	217,010	0,340	
	3 - 1	212,450	215,970	0,352	
	3 - 2	211,310	215,350	0,404	
<b>Arg. A</b>	1 - 1	67,990	68,440	0,045	0,140
	1 - 2	66,810	68,170	0,136	
	2 - 1	65,150	66,900	0,175	
	2 - 2	60,380	61,810	0,143	
	3 - 1	62,870	64,600	0,173	
	3 - 2	64,970	66,220	0,125	
<b>Arg. B</b>	1 - 1	90,890	110,560	1,967	1,815
	1 - 2	96,100	117,350	2,125	
	2 - 1	88,770	106,740	1,797	
	2 - 2	84,340	102,670	1,833	
	3 - 1	82,950	99,680	1,673	
	3 - 2	88,120	105,840	1,772	

Fizeram-se os cálculos como sendo uma argamassa de construção e verificou-se que a argamassa de referência o valor do coeficiente de capilaridade é aproximadamente 0,3 kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>), a argamassa A o valor é aproximadamente 0,14 kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>) e a argamassa B o coeficiente de capilaridade é aproximadamente de 1,8 kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>).

Pode afirmar-se que a argamassa B é que tem coeficiente de capilaridade superior, logo é a argamassa que absorve maior quantidade de água ou seja a que adquire piores propriedades neste âmbito. Ao contrário tem-se a argamassa A que é a que oferece coeficiente de capilaridade inferior, ou seja melhores propriedades em termos de absorção de água por capilaridade.

#### 4.6 Retração

Na tabela 4.6, apresentam-se as leituras e os cálculos da retração da argamassa de referência e da argamassa B.

Tabela 4.6: Resultados do ensaio da retração

	Provetes:	Leitura inicial (mm)	Leitura final (27 dias $\pm$ 12 horas após a leitura inicial) (mm)	Retração individual dos provetes (mm/m)	Retração (mm/m)
Arg. de referência	1	0,407	0,482	0,468	0,439
	2	0,636	0,710	0,462	
	3	0,473	0,535	0,387	
Arg. B	1	0,064	0,178	0,712	0,545
	2	0,031	0,072	0,256	
	3	0,556	0,663	0,668	

A retração final é a média entre as retrações individuais de cada provete. A retração dos provetes da argamassa A não foi realizada devido aos provetes serem demasiado frágeis e aquando da desmoldagem estes não ficaram intactos.

Em relação à argamassa B e de referência, verifica-se que a argamassa de referência tem uma retração individual média com valores na ordem de 0,44 mm/m em relação à barra de referência, já a argamassa B tem uma retração individual média de 0,55 mm/m em relação à barra de referência.

#### 4.7 Permeabilidade ao vapor de água

Os resultados finais obtidos no ensaio de permeabilidade ao vapor de água são apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água

	W (kg/(m <sup>2</sup> .s.Pa))	$\delta$ (kg/(m.s.Pa))	$\mu$	S <sub>d</sub> (m)
Arg. de referência	1,341E-09	2,346E-11	8,310	0,145
Arg. A	2,163E-09	3,726E-11	5,234	0,090
Arg. B	2,773E-09	4,769E-11	4,089	0,070

Podemos observar que a argamassa que possui maior permeabilidade ao vapor de água ( $\delta$ ) é B ( $\approx 4,77 \times 10^{-11}$  kg/(m.s.Pa)), a que apresenta menor é a argamassa de referência ( $2,35 \times 10^{-11}$  kg/(m.s.Pa)) e para a argamassa A temos um valor intermédio ( $3,73 \times 10^{-11}$  kg/(m.s.Pa)). Quanto ao fator de resistência à difusão do vapor de água ( $\mu$ ), varia de forma inversa, ou seja,

a argamassa B é a que apresenta um fator de resistência à difusão do vapor de água menor ( $\approx 4$ ), a argamassa A apresenta valores intermédios ( $\approx 5$ ) e a argamassa de referência tem um valor mais elevado ( $\approx 8$ ). Por último, quanto à espessura da camada de ar equivalente ( $S_d$ ) observa-se que na argamassa B tem um menor valor ( $\approx 0,07$  m), a argamassa A tem os valores intermédios (0,09 m) e para finalizar a argamassa de referência é a que oferece maior valor para a espessura da camada de ar equivalente (0,15m).

## 4.8 Resultados dos ensaios após envelhecimento

### 4.8.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Esta análise foi feita como descrito no capítulo 4.2, mas após o envelhecimento dos provetes.

Os resultados são os apresentados na tabela 4.8 e no gráfico da Figura 4.4

Tabela 4.8: Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmica após envelhecimento dos provetes.

		Arg. de referência			Arg. A			Arg. B		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>m</b>	<b>(g)</b>	425,340	420,970	395,610	132,370	121,940	134,450	168,710	169,250	164,120
<b>lm</b>	<b>(mm)</b>	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000	160,000
<b>bm</b>	<b>(mm)</b>	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000
<b>bm</b>	<b>(mm)</b>	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000
<b>r</b>	<b>(g/mm<sup>3</sup>)</b>	1,66E-03	1,64E-03	1,55E-03	5,17E-04	4,76E-04	5,25E-04	6,59E-04	6,61E-04	6,41E-04
<b>FL1</b>	<b>(Hz)</b>	7472,000	7778,000	7009,000	3513,000	3292,000	3286,000	2873,000	2463,000	2448,000
<b>FL2</b>	<b>(Hz)</b>	7475,000	7756,000	7044,000	3541,000	3327,000	3292,000	2878,000	2455,000	2439,000
<b>FL3</b>	<b>(Hz)</b>	7420,000	7767,000	7022,000	3547,000	3305,000	3270,000	2852,000	2466,000	2447,000
<b>FLm</b>	<b>(Hz)</b>	7455,667	7767,000	7025,000	3533,667	3308,000	3282,667	2867,667	2461,333	2444,667
<b>T</b>		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b><math>\rho</math></b>		0,166	0,164	0,155	0,052	0,048	0,053	0,066	0,066	0,064
<b>Ed<sub>L</sub></b>	<b>(MPa)</b>	9457,344	10158,223	7809,440	661,151	533,749	579,528	554,955	410,138	392,338
<b>Ed<sub>L</sub></b>	<b>(MPa)</b>	9141,669			591,476			452,477		



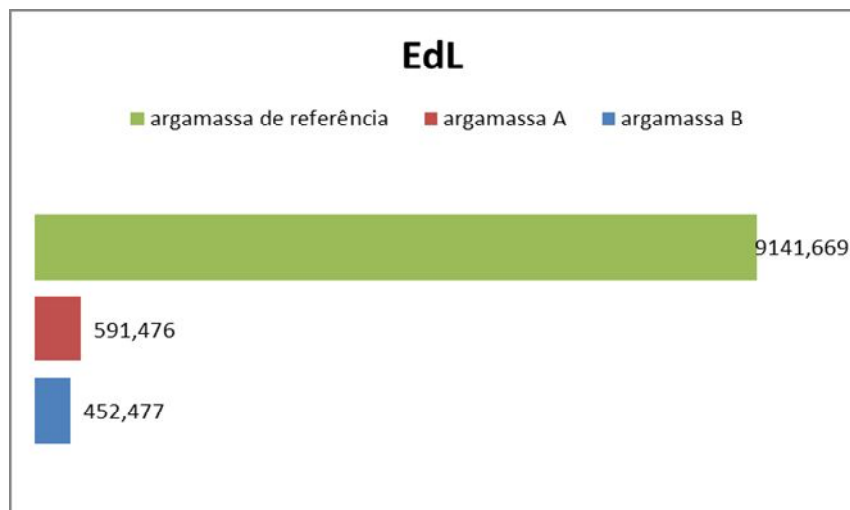


Figura 4.4: Resultados compilados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico após envelhecimento

Pode-se verificar que também após envelhecimento a argamassa de referência obteve um valor para o módulo de elasticidade muito mais elevado que as restantes argamassas, ou seja toma o valor de 9142 (MPa), enquanto que na argamassa A toma o valor de 591 (MPa) e na argamassa B o valor é ainda inferior tomando o valor de 452 (MPa).

#### 4.8.2 Ensaio de resistência à tração por flexão

Os procedimentos para o ensaio de resistência à tração por flexão foram realizados segundo o descrito no capítulo 4.3.

A tabela 4.9 e a Figura 4.5, mostram os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por flexão.

Tabela 4.9: Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão

	Número do provete	máxima carga compressiva (N)	R <sub>f</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>f</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Arg. de referência</b>	1	1266,000	2,967	2,728
	2	1164,000	2,728	
	3	1092,000	2,559	
<b>Arg. A</b>	1	454,000	1,064	0,954
	2	375,000	0,879	
	3	407,000	0,954	
<b>Arg. B</b>	1	127,000	0,298	0,206
	2	79,000	0,185	
	3	88,000	0,206	

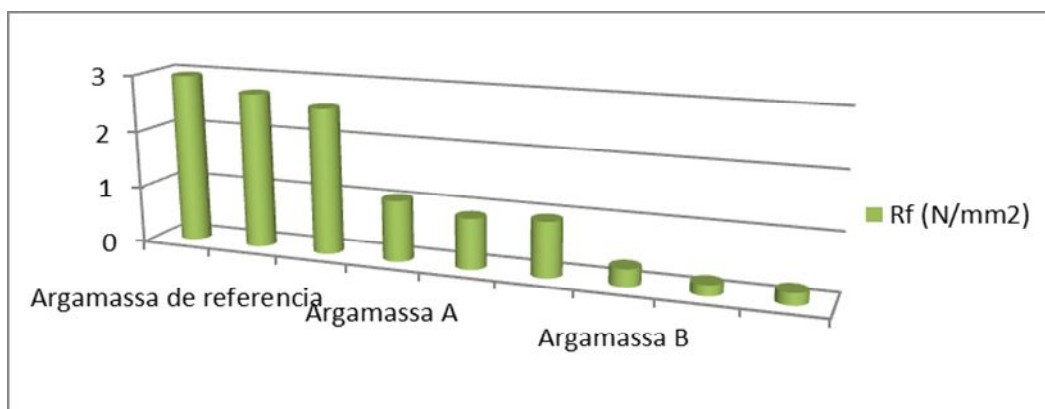


Figura 4.5: Resultados finais da resistência á tração por flexão após envelhecimento

Pode-se concluir que mesmo após o envelhecimento a argamassa de referencia continua a ter uma resistência à tração superior às restantes, esse valor ronda os 2 (N/mm<sup>2</sup>), a argamassa A tem valores intermédios, na ordem de 1 (N/mm<sup>2</sup>) e a argamassa B toma valores muito inferiores na ordem de 0,2 (N/mm<sup>2</sup>).

### 4.8.3 Ensaio de resistência à compressão

Os cálculos seguintes para o ensaio de resistência à tração por flexão foram realizados conforme o descrito no capítulo 4.4.

Na tabela 4.10 e na Figura 4.6, mostram-se os resultados do ensaio de compressão após envelhecimento dos provetes.

Tabela 4.10: Resultados do ensaio de resistência à compressão

	Número do provete	máxima carga compressiva (N)	$R_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Arg. de referência</b>	1 - 1	15435,000	9,647	9,422
	1 - 2	15750,000	9,844	
	2 - 1	15455,000	9,659	
	2 - 2	14716,000	9,198	
	3 - 1	12915,000	8,072	
	3 - 2	12096,000	7,560	
<b>Arg. A</b>	1 - 1	3479,000	2,174	2,239
	1 - 2	3686,000	2,304	
	2 - 1	2881,000	1,801	
	2 - 2	3291,000	2,057	
	3 - 1	3761,000	2,351	
	3 - 2	4173,000	2,608	
<b>Arg. B</b>	1 - 1	1710,000	1,069	0,800
	1 - 2	1558,000	0,974	
	2 - 1	1289,000	0,806	
	2 - 2	1271,000	0,794	
	3 - 1	1184,000	0,740	
	3 - 2	1136,000	0,710	

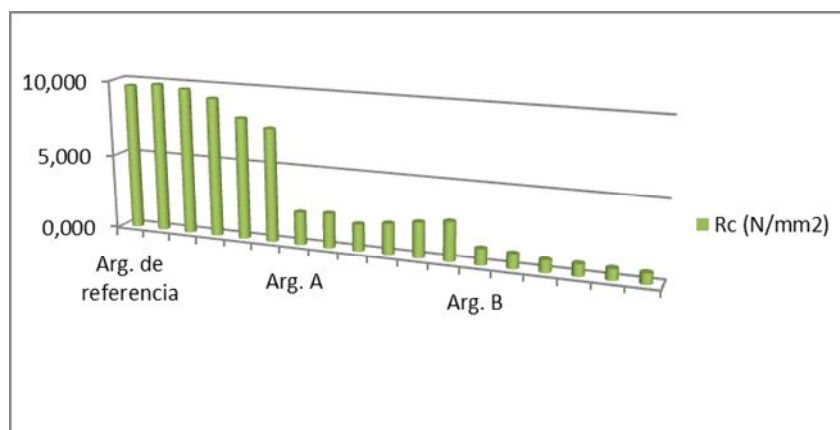


Figura 4.6: Resultados do ensaio de resistência à compressão

Através da análise do gráfico verifica-se que a argamassa B é a que oferece menor resistência à compressão com valores que rondam  $1 \text{ N/mm}^2$  a argamassa A tem a resistência à compressão intermédia com valores que rondam os  $2 \text{ N/mm}^2$  para finalizar a argamassa de referência tem valores bastante mais elevados na ordem dos  $9 \text{ N/mm}^2$ .

#### 4.9 Discussão dos resultados

Neste subcapítulo pretende-se realizar uma análise global dos resultados obtidos em todos os ensaios e tentando interligar as diferentes propriedades.

Deve ser referido que os ensaios de argamassas endurecidas, exceto os ensaios após envelhecimento, foram realizados ao fim de um período de cura de 28 dias. No entanto como se trata de uma argamassa à base de cal ideal seria ensaiada ao fim de 60 dias ou 120 dias, isso não aconteceu devido ao tempo disponível para a realização de trabalho.

A argamassa A e B formaram provetes frágeis o que tornou difícil o seu manuseamento. E em alguns casos estes provetes ficaram mesmo com as superfícies irregulares o que não era suposto acontecer. E os provetes do ensaio de retração da argamassa A partiram-se na desmoldagem.

A resistência à fendilhação de um reboco é tanto maior quanto maior for a resistência à tração, mas por outro lado quanto maior for o módulo de elasticidade menor é a deformabilidade da mesma e mais dificuldade tem de resistir a pequenos movimentos do

suporte. Ou seja a resistência à fendilhação será tanto maior quanto menor for a retração e quanto menor for a relação módulo de elasticidade/resistência à tração.

Afim de se proceder a uma análise mais detalhada dos resultados obtidos apresentam-se na tabela e na Figura 4.7 os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico para a resistência à tração por flexão e da relação módulo de elasticidade/resistência à tração.

Tabela 4.11: Resultados da resistência à tração por flexão do módulo de elasticidade dinâmico e relação módulo de elasticidade/resistência à tração após envelhecimentos

	$R_f$ (N/mm <sup>2</sup> )	$Ed_L$ (MPa)	$Ed_L/R_f$
<b>Arg.de referência</b>	3,009	8578,049	2850,442
<b>Arg. A</b>	1,004	633,032	630,324
<b>Arg. B</b>	0,169	371,011	2198,583

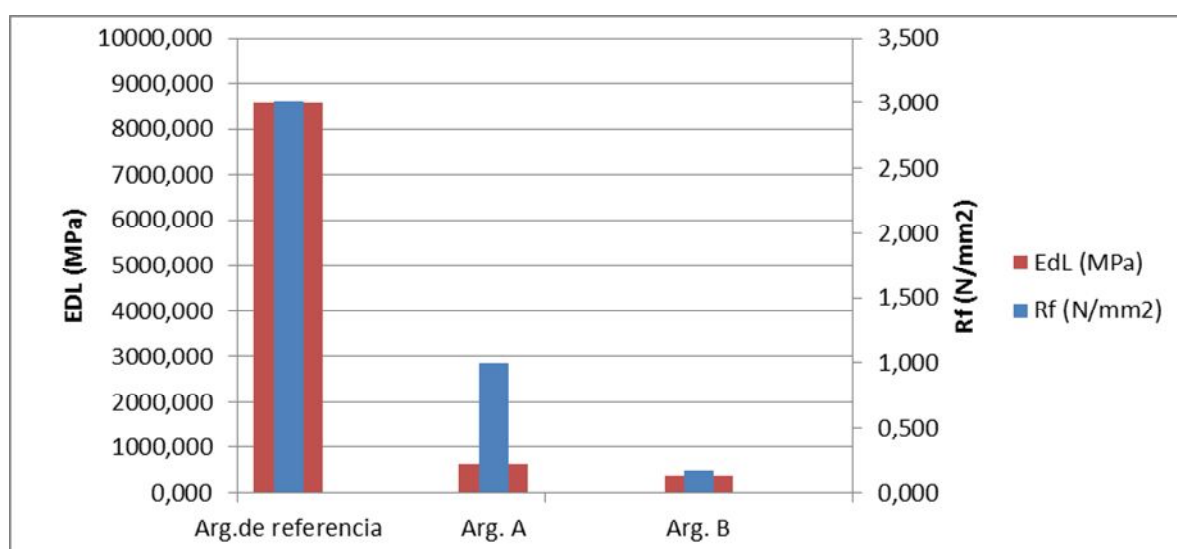


Figura 4.7: Resistência à tração por flexão e módulo de elasticidade dinâmico

Verifica-se que a argamassa de referência tem o maior módulo de elasticidade e também o maior valor de resistência à tração por flexão. A argamassa A, tem valores intermédios tanto para o módulo de elasticidade dinâmica como para resistência à tração por flexão. A argamassa B é a que apresenta menores valores para a resistência à tração por flexão e para o módulo de elasticidade dinâmico.

Após as conclusões anteriores verifica-se que o módulo de elasticidade dinâmico mais elevado é na argamassa de referência ou seja, é nesta argamassa que existe um maior risco de fendilhação (como se mostra na tabela anterior), no entanto a argamassa de referência é a que apresenta maior resistência à tração.

Como se observa na tabela 4.11 verifica-se que o argamassa com menor risco de fendilhação é a argamassa A onde o quociente entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração por flexão é o menor valor.

A figura 4.8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração por flexão no ensaio de compressão.

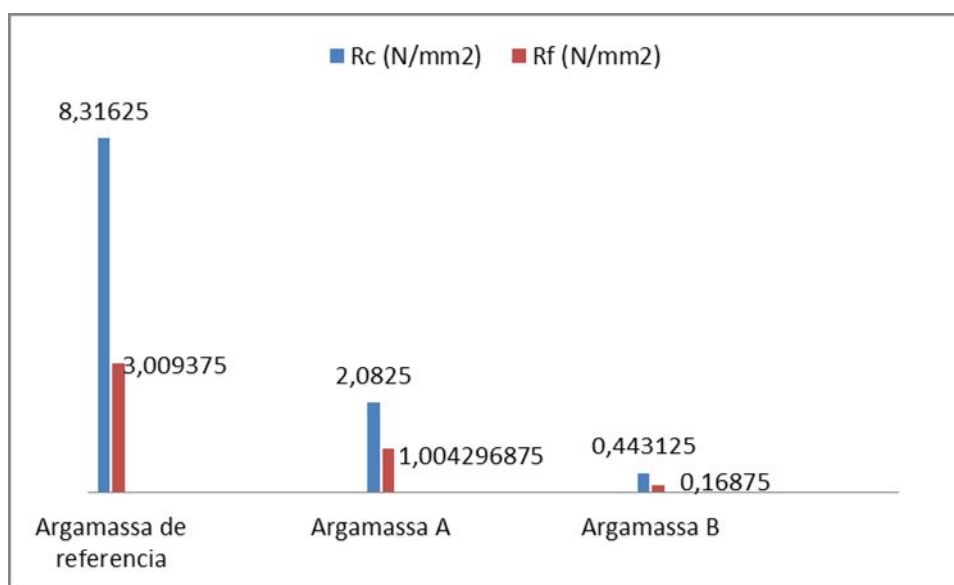


Figura 4.8: Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

Ao comparar os resultados obtidos nos ensaios de tração por flexão e compressão, verifica-se que a argamassa de referência tem um valor de referência à tração ( $\approx 3 \text{ N/mm}^2$ ) e a compressão ( $\approx 8 \text{ N/mm}^2$ ) superior aos restantes argamassas. A argamassa A oferece valores intermédios para as duas resistências, tração por flexão ( $\approx 1 \text{ N/mm}^2$ ) e compressão ( $\approx 2$

N/mm<sup>2</sup>). Já a argamassa B é a que tem resultados mais baixos quer à tração ( $\approx 0,2$  N/mm<sup>2</sup>) quer à compressão ( $\approx 0,4$  N/mm<sup>2</sup>). Logo pode-se dizer que a argamassa com melhores propriedades em relação a resistências mecânicas é a argamassa de referência e a pior é a argamassa B.

Após as conclusões anteriores verifica-se que a argamassa de referência era a que oferecia maiores valores para as resistências mecânicas, isto acontece porque esta argamassa é bastarda (de cal e cimento), ou seja, mais resistente que uma argamassa (A e B) que tem apenas a cal hidratada.

Na figura 4.9, apresentam-se os resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água e os resultados da absorção de água por capilaridade.

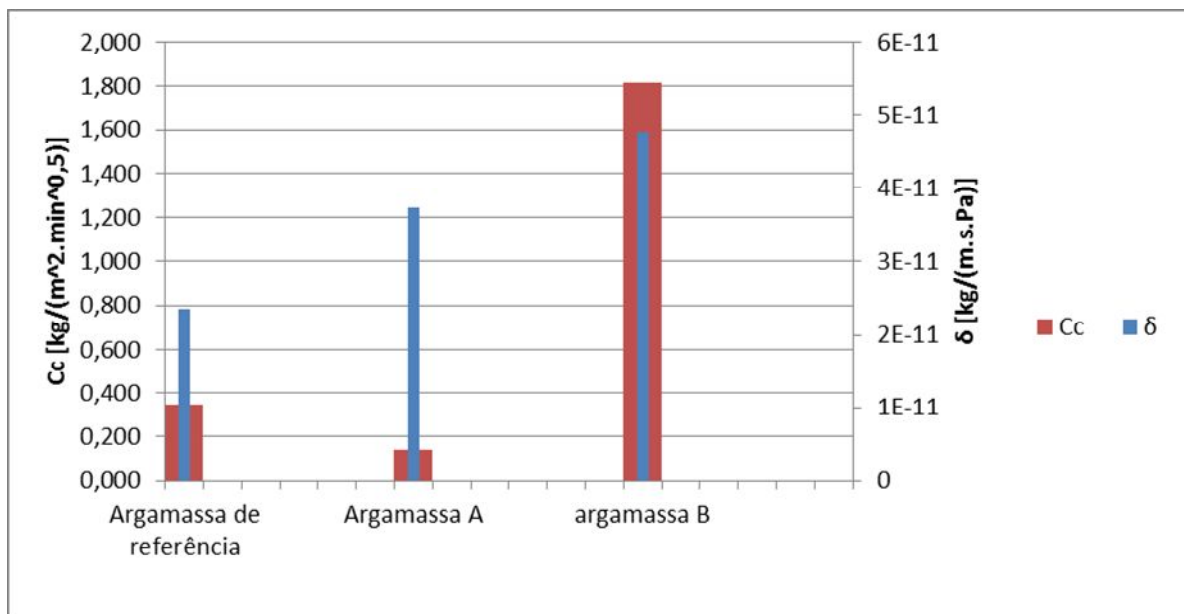


Figura 4.9: Resultado do ensaio de permeabilidade ao vapor de água e de absorção de água por capilaridade

Através da observação da figura anterior verifica-se que a argamassa B é a mais permeável ao vapor (com o valor de permeabilidade ao vapor de água próximo de  $5 \times 10^{-11}$  kg/(m.s.Pa)), já quando se refere a absorção de água por capilaridade a argamassa B é a que toma valores mais elevados ( $\approx 1,8$  kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>)). A argamassa A tem um valor para a permeabilidade ao vapor de água intermédio ( $\approx 4 \times 10^{-11}$  kg/(m.s.Pa)) e o valor para absorção por capilaridade é o menor ( $\approx 0,2$  kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>)) das três argamassas em estudo. A argamassa de referência tem um valor

de permeabilidade ao vapor de água de  $\approx 2,5 \times 10^{-11}$  kg/(m.s.Pa) que é o valor menor em relação às outras (argamassa A e B), já em relação à absorção de água por capilaridade o valor é aproximadamente 0,35 kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0,5</sup>), ou seja, esta argamassa tem um valor intermédio em relação às restantes.

Pode-se dizer que a argamassa A é a que tem menor coeficiente de absorção de água por capilaridade mas em relação à permeabilidade de vapor de água a argamassa de referência é a que apresenta valores mais baixos.

Na tabela 4.12 e na figura 4.10, compara-se os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmica e a resistência à tração por flexão após o envelhecimento.

Tabela 4.12: Resultados para ensaio de resistência à tração por flexão, módulo de elasticidade dinâmico

	$R_f$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{dL}$ (MPa)	$E_{dL}/R_f$
<b>Arg.de referência</b>	2,728	9141,669	3350,898
<b>Arg. A</b>	0,954	591,476	620,057
<b>Arg. B</b>	0,206	452,477	2193,829



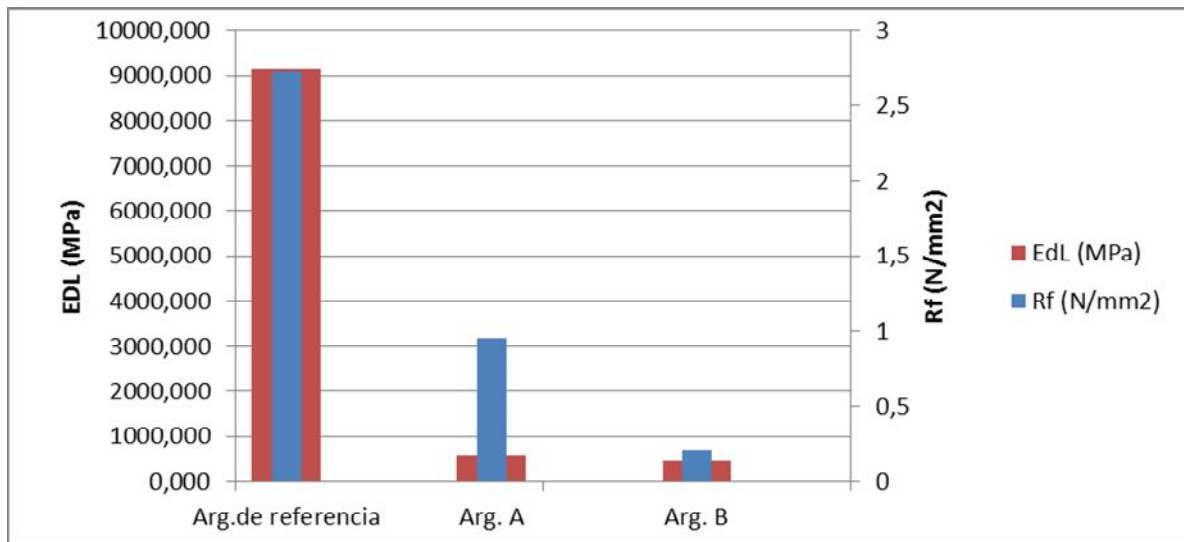


Figura 4.10: Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão e do módulo de elasticidade dinâmico.

Na análise da figura anterior verifica-se que o argamassa de referência tem um valor mais elevado para a resistência à tração por flexão ( $\approx 2,78 \text{ N/mm}^2$ ) e para o módulo de elasticidade ( $\approx 9141,7 \text{ MPa}$ ), enquanto que o valor para a resistência à tração por flexão ( $\approx 0,2 \text{ N/mm}^2$ ) e o módulo de elasticidade dinâmico ( $452 \text{ MPa}$ ) é menor na argamassa B.

Pela análise da tabela 4.12 verifica-se que a argamassa com maior fendilhação é a argamassa de referência, no entanto já a argamassa que oferece um valor menor é a argamassa A.

Na figura 4.10, compara-se o módulo de elasticidade dinâmico antes e após o envelhecimento dos provetes.

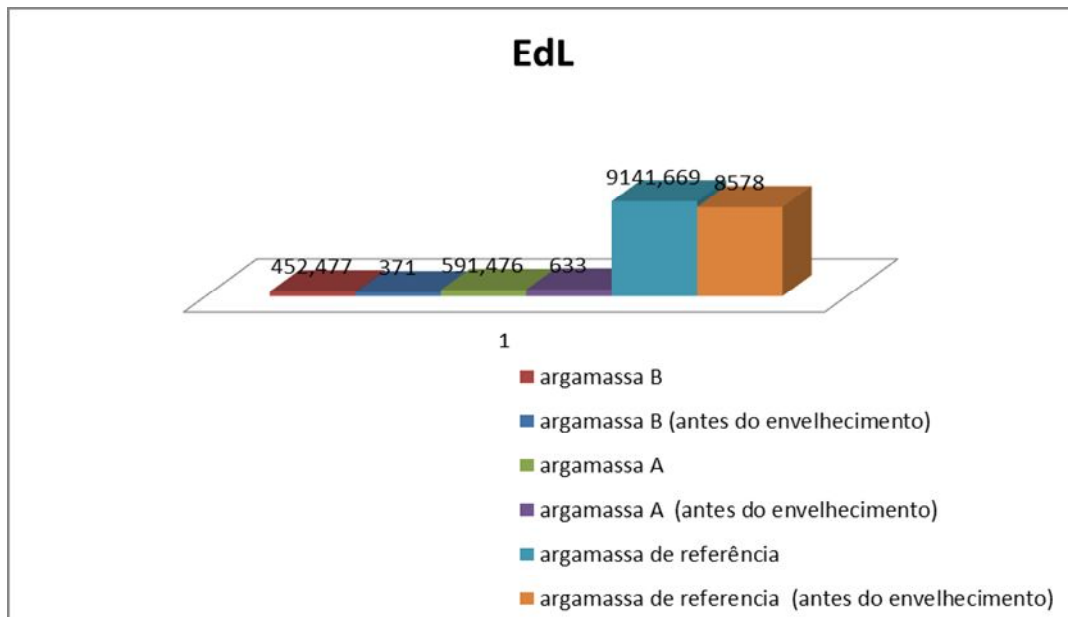


Figura 4.11: Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico antes e após envelhecimento dos provetes

Podemos ver que quer a argamassa B quer a argamassa de referência apresentam valores de módulo de elasticidade dinâmico mais elevados após o envelhecimento do provete. Já a argamassa A antes do provete ser exposto ao envelhecimento apresentava um valor mais elevado que após o envelhecimento.

Isto significa que quanto maior é o módulo de elasticidade dinâmico menor vai ser a sua flexibilidade, conseqüentemente, maior vai ser o risco de ocorrer fendilhação. Logo, à medida que o módulo de elasticidade aumenta pior vai ser o seu desempenho em termos de durabilidade da argamassa para revestimentos.

Na figura 4.11, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à tração por flexão antes e após envelhecimento.

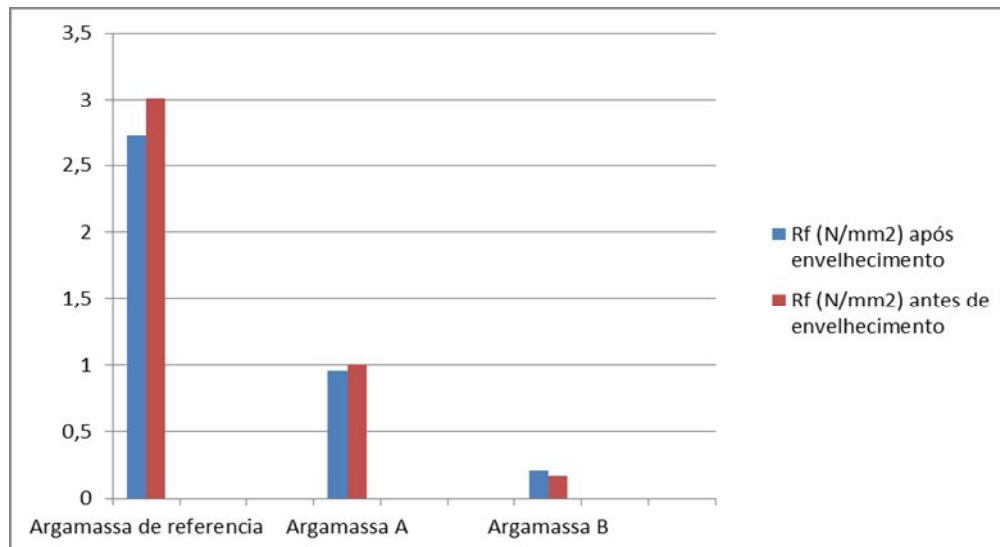


Figura 4.12: Resultados do ensaio de resistência à tração por flexão antes e após envelhecimento

A argamassa de referência apresenta uma resistência à tração superior às restantes tanto antes do envelhecimento ( $\approx 3 \text{ N/mm}^2$ ) como após o mesmo ( $\approx 2,7 \text{ N/mm}^2$ ). Na argamassa A a resistência à tração por flexão é aproximadamente igual a 1 tanto antes como após ao envelhecimento, mas antes do envelhecimento é ligeiramente superior. Na argamassa B a resistência à tração por flexão é menor antes ( $\approx 0,17 \text{ N/mm}^2$ ) do que depois ( $\approx 0,2 \text{ N/mm}^2$ ) do envelhecimento apesar dos valores muito próximos. Refira-se, no entanto, que nestes ensaios destrutivos os provetes não são os mesmos antes e depois do envelhecimento, pelo que a diferença de resultados terá também a ver com o número de provetes usados e o desvio padrão obtido em cada fase.

Na figura 4.12, faz-se a comparação da resistência à compressão antes e após o envelhecimento dos respetivos provetes.

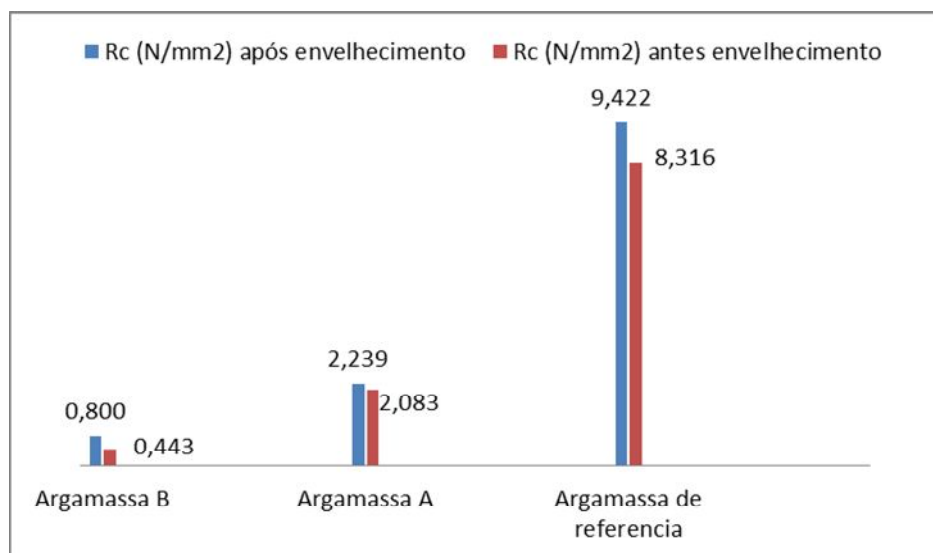


Figura 4.13; Resultados do ensaio de compressão antes e após o envelhecimento

Analisando a figura anterior verifica-se que a argamassa de referência tem valores superiores às restantes, quer antes ( $\approx 8,3 \text{ N/mm}^2$ ) quer após ( $\approx 9,4 \text{ N/mm}^2$ ) o envelhecimento. A argamassa A, que tem valores intermédios em relação à resistência à compressão, toma o valor de  $2,2 \text{ N/mm}^2$  após envelhecimento e  $2,1 \text{ N/mm}^2$  antes do envelhecimento. A argamassa B tem os valores inferiores às restantes com  $0,8 \text{ N/mm}^2$  após envelhecimento e  $0,4 \text{ N/mm}^2$  antes do envelhecimento.

De uma forma global verifica-se que nas três argamassas os valores das resistências à compressão são superiores após o envelhecimento dos provetes. Isto não é comparativo, devido à diferença não ser muito significativa e os provetes utilizados antes do envelhecimento não são os mesmos que depois do envelhecimento porque o ensaio de resistência à compressão é destrutivo.

Também nesta análise consegue-se perceber que na argamassa A, a diferença entre os valores da resistência à compressão antes e após o envelhecimento não é significativa, ou seja, esta argamassa não perde resistência à compressão quando exposta aos ciclos num determinado período de tempo.

A argamassa de referência tem uma diferença pouco significativa ( $1 \text{ N/mm}^2$ ) entre o valor obtido para antes e para após o envelhecimento, no entanto a argamassa B tem uma diferença significativa após envelhecimento, esta aumenta a sua resistência para o dobro, embora continue com valores baixos.

## 5 CONCLUSÕES

Todos os objetivos propostos no início do trabalho foram atingidos, tendo-se conseguido analisar e caracterizar as argamassas propostas. Também foi de extrema importância perceber o papel preponderante dos agregados leves (perlite expandida, vermiculite expandida e grânulos de vidro expandido) quando incorporados na argamassa, porque estes quando incorporados na argamassa aumentam a permeabilidade ao vapor de água, diminui a resistência e diminui o módulo de elasticidade dinâmico (mais flexível, menor risco de fendilhação).

Apesar dos objetivos iniciais terem sido cumpridos o estudo deste tipo de argamassas está ainda incompleto faltando ainda realizar ensaios aos 60 dias e 120 dias e ainda ensaios que abrangem outras características das argamassas.

Um aspeto importante e que se deve salientar, é o facto desta nova solução incorporar grânulos de vidro expandido, que é resultado da reciclagem doméstica ou industrial e isso é preponderante para existir um desenvolvimento sustentável.

De uma maneira geral pode-se verificar a partir dos resultados obtidos nos ensaios que a argamassa de referência oferece valores maiores para os diferentes ensaios. Isto não significa que esta argamassa seja de melhor qualidade, porque no caso do módulo de elasticidade dinâmico quanto menor for o módulo de elasticidade dinâmico mais flexível vai ser a argamassa ou seja, melhor é o seu desempenho, já quando se trata de resistências mecânicas quanto maior for essas resistências melhor vai ser o seu desempenho, porque vão oferecer maior resistência às ações externas. No entanto deve-se salientar que, em particular para argamassas de reabilitação, resistências mecânicas muito elevadas podem ser deformáveis pois podem introduzir tensões elevadas no suporte.

Outro aspeto importante tem em conta a fragilidade dos provetes. Quando se procedeu à desmoldagem dos mesmos, estes não ficaram intactos devido à falta de resistência e ao elevado volume de espaços vazios. A compactação destes provetes foi realizada segundo as respetivas normas mas não se conseguiu eliminar os espaços vazios.

Com a mesma importância afirma-se que os ensaios (todos os ensaios com argamassa endurecida exceto os de após envelhecimento) foram realizados ao fim de 28 dias (devido à falta de tempo), mas para argamassas à base de cal estes ensaios deveriam ser realizados ao fim de 60 e 120 dias.

Para trabalhos futuros preveem-se para estas argamassas testa-las ao fim do tempo referido nas normas para as argamassas à base de cal (60 dias e 120 dias, após envelhecimento 180 dias e 365 dias) e testar estas mesmas argamassas quer termicamente quer acusticamente. E como a perlite oferece resistência ao fogo, também se deveria realizar o ensaio de resistência ao fogo para as três argamassas.

Seria também interessante alterar aditivos e agregados leves por outros, para perceber de que forma é que estes alteram as propriedades das argamassas.

Quando se analisa a viabilidade deste estudo percebe-se que cada vez mais se investe no conhecimento de argamassas de reabilitação com a incorporação de resíduos (quer vidro reciclado quer de restos cerâmicos). O mercado já se encontra com boas informações quando se fale de argamassas à base de cimento (para construção nova) e desta forma está a investir em argamassas à base de cal (para reabilitação).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, A (2010) “Durabilidade de argamassas poliméricas de agregados leves”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Alves, J (2009) “Argamassas leves para execução de camadas de regularização e de enchimento de pavimento”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- ARGILAEXPANDIDA@ (2013). <http://argilaexpandida.com.br/vermiculita.html> (julho 2013)
- CEN (1999 a) ). “Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)”. EN 1015-3:1999, CEN, Brussels.
- CEN (1999 b) ). “Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”. EN 1015-11:1999, CEN, Brussels.
- CEN (2002 a)). “Methods of test for mortar for masonry – part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar”. EN 1015-18:2002, CEN, Brussels.
- CEN (2002 b)). “Methods of test for mortar for masonry – part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates”. EN 1015-21:2002, CEN, Brussels.
- Cavaco, L. (2005). ”Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Coimbra, M.A., Morelli M.R. (1999) Desenvolvimento de argamassas microporosas para a construção civil. Cerâmica, 08/06/1999, SciELO Brasil.

- Coimbra, C., (2008) “Desenvolvimento de Argamassas Expansivas”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Coutinho, A., (1988), “Fabrico e Propriedades do Betão”, Volume I, 2ª Edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa
- Frade, D., Tadeu, A., Torres, I., Mendes, P., Simões, N., Matias, G., Neves, A. (2012), Argamassas industriais com incorporação de granulado de cortiça. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, APFAC, Coimbra, 2012
- Frattonillo, A., Giovinco, G., Mascolo M.C., Vitale A. (2004) “Effects of hydrophobic treatment on thermophysical properties of lightweight mortars”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30/08/2004, pp. 27 – 35, Elsevier Ltd.
- Ferreira, T., (2011) “Análise do Comportamento Higrotermico de Argamassas de Cal Aérea com Resíduos Cerâmicos”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- FUNGIFUN@ (2013). <http://www.fungifun.org/English/Pftek> (julho 2013)
- Fröschl, S. (1998). “Lime within and on top of the outside wall structure”. COST C5/EUROCARE Workshop. Viena.
- Gonçalves, B. (2011) “Formulação de argamassas controladoras de humidade relativa. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- IPQ (2006). “Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)”. NP EN 14146:2006, IPQ, Caparica.
- IPQ (2007). “Argamassas de juntas. Parte 4: Determinação da retração”. NP EN 12808-4:2007, IPQ, Caparica.
- IPQ (2008). “Métodos de ensaio de argamassas para alvenarias. Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas”. NP EN 1015-19:2008, IPQ, Caparica.



- ISO (2001). “Hygrothermal performance of building materials and products – determination of water vapour transmission properties”. ISO 12572, Genebra.
- Leal, M. (2012) “Desenvolvimento de argamassas de um revestimento com comportamento térmico melhorado” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal.
- Martins, J., Assunção, J., (2010) “Argamassas e Rebocos”, Série Materiais, Universidade Fernando Pessoa, 3º Edição/2010.
- Miranda, L (2009) “Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição de cal hidráulica e de cal hidratada” Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Oliveira, L., Santos, P. (2007) “A reciclagem de resíduos como componentes de argamassas”, 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, 2007.
- Penacho, P. (2012) “Desempenho de argamassas com incorporação de resíduos finos de vidro”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- PERLITE@ (2013). <http://www.perlite.net/> (julho 2013)
- Petrucci, E. (1976). “Materiais de Construção”. Editora Globo/MEC. 8ª edição. Rio de Janeiro.
- PORAVER@ (2012). <http://poraver.com/?q=en/product/product> (julho 2013)
- Ribeiro, R.A., Silva L.M., Ferreira, V.M., Labrincha, J.A. “Estudo da Influência de Cargas Leves nas Propriedades de uma Argamassa Bastarda”, 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, 2005
- Rodrigues, M. (2004) “Argamassas de Revestimentos para Alvenarias Antigas” Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Sari, A ; Sahinoglu, G ; Tuzen, M (2012) “Antimony(III) Adsorption from Aqueous Solution Using Raw Perlite and Mn-Modified Perlite: Equilibrium, Thermodynamic, and

Kinetic Studies”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, Vol.51 (19), pp.6877-6886

Sousa, A. (2010) “Aplicação de argamassas leves de reboco e assentamento de alvenarias”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Stancato, A. (2000) “Determinação da condutibilidade térmica e da resistência mecânica em argamassas leves”, Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, São Paulo.

Tomás, A., (2012) “Análise do Comportamento de Argamassas de Cal Aérea com Resíduos Cerâmicos em Substituição da Parte do Agregado”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Torres, M.L., García-Ruiz, P.A. (2008) “Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption”. *Cement & Concrete Composites*, 03/12/2008, pp. 114 – 119, Elsevier Ltd.