



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

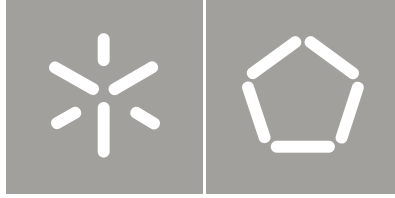
Pedro José Carvalho Betões e Argamassas Modificados com Incorporação de PVA

Pedro José Carvalho

Betões e Argamassas Modificados com  
Incorporação de PVA

UMinho | 2012

Julho de 2012



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Pedro José Carvalho

Betões e Argamassas Modificados com  
Incorporação de PVA

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do  
Professor Doutor Aires Camões

e co-orientação do  
Professor Doutor Fernando Duarte

## **Agradecimentos**

Agradeço a todos aqueles que colaboraram comigo e tornaram possível a execução desta dissertação.

Especialmente ao meu pai, com toda a saudade, e à minha mãe, por tudo aquilo que me ensinaram ao longo da minha vida.

Agradeço também à minha irmã e ao meu cunhado pelo constante apoio, confiança, incentivo e paciência, que demonstraram nos bons e especialmente nos maus momentos ao longo deste tempo.

Ao meu orientador Professor Aires Camões pela disponibilidade, capacidade de incentivo e motivação durante a realização deste trabalho. Também gostaria de agradecer ao meu coorientador Professor Fernando Duarte pela colaboração e disponibilidade.

A todos os funcionários do laboratório, especialmente ao Carlos e ao Pokee, pela colaboração durante a realização do trabalho de laboratório, assim como pela boa disposição sempre presente durante o trabalho.

A todos os colegas e amigos que de uma forma ou de outra ajudaram na realização deste trabalho.

À SECIL por disponibilizar o cimento necessário à realização deste trabalho



## **Resumo**

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da incorporação de acetato de polivinil (PVA) como substituto do cimento em argamassas. Para tal foi efetuada uma campanha experimental em que foram testadas diferentes moléculas de PVA e formas de fabrico da argamassa.

A evolução do processo experimental levou à definição do processo de fabrico da argamassa, a concentração ótima da solução polimérica, assim como uma redução significativa do cimento utilizado. Este processo deu origem à criação de uma argamassa leve, com uma resistência à compressão de cerca de 1 MPa aos 28 dias, tendo sido definidas 4 composições para uma caracterização mais aprofundada, 2 das quais em que foi incorporado o polímero como substituto do cimento, tendo sido também reduzida a quantidade de cimento. Nas 2 argamassas restantes além da substituição do cimento por PVA, também foi substituída a areia por PVA, metade da quantidade numa das amassaduras e a totalidade na outra.

A caracterização das argamassas incluiu ensaios realizados no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco foi avaliada a dosagem de cimento, a massa volúmica e o espalhamento.

No estado endurecido foram avaliadas as características mecânicas, com ensaios de resistência à compressão em 5 idades diferentes e com provetes curados em diferentes condições e a resistência à tração, apenas a uma idade, as características físicas avaliadas foram a absorção por capilaridade e a absorção por imersão, neste último ensaio foi avaliada a degradação do polímero na presença de água.

### **Palavras-chave:**

- Argamassa modificada com polímero;
- Argamassa leve;
- Acetato de polivinilo-PVA;
- Caracterização mecânica;
- Caracterização física.



## **Abstract**

The aim of this study was to evaluate the effect of the incorporation of polyvinyl acetate (PVA) as a substitute for cement in mortars. To do this was done an experimental campaign, where different molecules of PVA were tested such as different ways of producing the mortar.

The evolution of the experimental process led to the definition of the manufacturing process of the mortar, the optimal concentration of polymer solution, as well as a significant reduction of the used cement. This process originated the creation of a light-weight mortar, with approximately 1 MPa of compressive strength at 28 days, 4 compositions have been set for a more detailed characterization, in 2 of them it was incorporated the polymer as a substitute of cement and the quantity of cement as been also reduced. In the 2 remaining mortars in addition of cement replacement for PVA, the sand was also replaced for PVA, half of quantity in one of them and the total in the other.

The characterization included testing the mortars in fresh state and hardened state. In fresh state it was evaluated the cement dosage, the bulk density and the consistence.

In hardened state were evaluated the mechanical characteristics, with tests of compressive strength in 5 different ages with samples cured under different conditions and the tensile strength, tested just in one age, the physical characteristics were evaluated trough absorption by capillarity and absorption by immersion, this last test served to evaluate the degradation of the polymer in presence of water.

## **Keywords:**

- Polymer modified mortar;
- Light weight mortar;
- Polyvinyl acetate-PVA;
- Mechanical characterization;
- Physical characterization.





# ÍNDICE GERAL

1-INTRODUÇÃO .....	1
1.1-Enquadramento e justificação do tema.....	1
1.2-Objectivos.....	2
1.3-Organização do texto .....	3
2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1-Introdução.....	4
2.2-Classificação de argamassas e betões poliméricos .....	5
2.2.1-Introdução .....	5
2.2.2- Argamassas e betões impregnados com polímeros.....	7
2.2.3- Argamassas e betões poliméricos .....	8
2.2.4- Argamassas e betões modificados com polímeros.....	10
2.3.2-Estado fresco .....	13
2.3.3-Estado endurecido .....	14
2.4- Acetato de polivinilo-PVA .....	17
2.5-Estudos efetuados com a incorporação de PVA em materiais cimentícios.....	20
2.6-Argamassa leve.....	24
3-PROCESSO LABORATORIAL .....	25
3.1-Introdução.....	25
3.2-Materiais utilizados .....	26
3.2.1-Cimento.....	26
3.2.2-Água.....	27
3.2.3-Areia.....	27
3.2.4-PVA.....	27
3.3- Descrição dos ensaios efetuados .....	28
3.3.1-Carcterização no estado fresco .....	28
3.3.2-Resistência à compressão.....	29
3.3.3-Resistência à tração.....	30
3.3.3-Absorção de água por capilaridade.....	30
3.3.4-Absorção de água por imersão .....	31
3.4-Campanha Experimental .....	32
3.4.1-Introdução .....	32

3.4.2-Fase 1 .....	33
3.4.3-Fase 2 .....	34
3.4.4-Fase 3 .....	35
3.4.5-Fase 4 .....	36
3.4.6-Fase 5 .....	37
3.4.7-Fase 6 .....	38
4-APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	39
4.1-Introdução.....	39
4.2-Fase 1 .....	39
4.3-Fase 2.....	42
4.4-Fase 3.....	43
4.5-Fase 4.....	44
4.6-Fase 5.....	46
4.7-Fase 6.....	48
4.7.1-Characterização no estado fresco.....	48
4.7.2-Resistência à compressão.....	49
4.7.3-Resistência à tração.....	55
4.7.4-Absorção por capilaridade .....	58
4.7.5-Absorção por imersão .....	60
5-CONCLUSÃO .....	64
5.1-Principais conclusões.....	64
5.2-Propostas para trabalhos futuros.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Sistemas e classificações dos compósitos de betão/argamassa-polímero (adaptado de Ohama, 1998). .....	6
Figura 2- Etapas de hidratação do cimento em argamassas modificadas com polímeros (adaptado de (Geemert, et al., 2005). .....	11
Figura 3- Mecanismo formado na zona de transição entre 2 superfícies ( (Kim & Robertson, 1998). .....	16
Figura 4- Solubilidade da solução de PVA em função da temperatura (adaptado de Tao, 2003). .....	18
Figura 5--Viscosidade do PVA em água em função da temperatura (adaptado de Tao, 2003). .....	19
Figura 6- Viscosidade da solução de PVA em função da concentração (adaptado de Tao, 2003). .....	19
Figura 7- Evolução da resistência à tração para diferentes condições de cura (adaptado de Geist, et al 1953). .....	21
Figura 8- Evolução da resistência à compressão para diferentes condições de cura (adaptado de Geist, et al 1953). .....	22
Figura 9- Curva granulométrica da areia utilizada. ....	27
Figura 10- Resultados obtidos para a resistência à compressão na Fase 1.....	41
Figura 11- Resultados obtidos para a massa dos provetes ensaiados na Fase 1.....	41
Figura 12-Resultados obtidos na Fase 2 para cada forma diferente de realizar a amassadura. ....	42
Figura 13-Curva de concentração ótima.....	45
Figura 14- Evolução da resistência à compressão com a diminuição da quantidade de cimento. ....	47
Figura 15- Evolução da resistência à compressão dos provetes curados na câmara húmida (Fase 6). .....	50
Figura 16- Evolução da resistência à compressão dos provetes curados em condições ambientais (Fase 6). .....	50

Figura 17-Comportamento dos provetes da amassadura N ao longo do ensaio de resistência à compressão. ....	53
Figura 18- Evolução da rigidez aparente dos provetes curados em condições ambientais. ....	54
Figura 19-Evolução da rigidez aparente dos provetes curados na câmara húmida. ....	54
Figura 20 Comportamento dos provetes da amassadura M durante o ensaio de resistência à tração. ....	56
Figura 21- Aspeto dos provetes da amassadura M durante o ensaio de resistência à tração....	56
Figura 22 -Comportamento Força/Deslocamento no ensaio de resistência à tração.....	57
Figura 23- Comportamento Força/Deslocamento no ensaio de resistência à tração limitado aos 5mm.....	58
Figura 24- Curvas de absorção capilar para as diferentes amassaduras. ....	59
Figura 25- Coeficientes de absorção capilar para as diferentes amassaduras .....	60
Figura 26- Coeficientes de absorção por imersão. ....	61
Figura 27- Aspeto dos provetes da composição N no final do ensaio de absorção por imersão. ....	62
Figura 28 Comparação entre os provetes da amassadura M antes e após o ensaio de absorção por imersão. ....	63
Figura 29- Comparação entre os provetes da amassadura N antes e após o ensaio de absorção por imersão. ....	63

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Consumo de polímeros na Europa Ocidental em2003 (adapatado de Geemert, et al., 2005).....	5
Tabela 2- Valores típicos em betões impregnados com polímeros e betão convencional (adapatado de Blaga & Beaudoin, 1985).....	8
Tabela 3- Valores típicos em betões poliméricos e betão convencional (Blaga & Beaudoin, 1985).....	9
Tabela 4- Valores típicos em betão convencional e betão modificado com polímeros (Ribeiro, 2006) .....	12
Tabela 5- Características das moléculas de PVA da Figura 6 .....	20
Tabela 6- Valores obtidos por Ohama para a resistência à flexão com a incorporação de PVA (adapatado de Ohama, 1998).....	23
Tabela 7- Características químicas do cimento (Secil, 2004). .....	26
Tabela 8 -Características mecânicas do cimento (Secil, 2004). .....	26
Tabela 9- Características físicas do cimento (Secil, 2004).....	26
Tabela 10- Composição das amassaduras realizadas na Fase 1. ....	33
Tabela 11- Composição das amassaduras realizadas na Fase 3. ....	36
Tabela 12- Composição das amassaduras realizadas na Fase 4. ....	37
Tabela 13-- Composição das amassaduras realizadas na Fase 5 .....	38
Tabela 14- Resultados obtidos na Fase 1.....	40
Tabela 15- Valores da massa obtidos na Fase 2 .....	43
Tabela 16 Resultados obtidos na Fase 3.....	44
Tabela 17- Resistência à compressão da Fase 4.....	46
Tabela 18- Resultados obtidos Fase 5. ....	48
Tabela 19- Resultados obtidos nos ensaios realizados no estado fresco na Fase 6 .....	48
Tabela 20- Resumo dos resultados obtidos para os provetes ensaiados à compressão na Fase 6.....	52

Tabela 21-Valores da rigidez aparente. ....	55
Tabela 22-Resultados da resistência à tração .....	55
Tabela 23- Força de tração para um deslocamento de 3mm .....	58
Tabela 24- Coeficientes de absorção capilar. ....	60
Tabela 25- Valores para a massa nas diferentes fases do ensaio de absorção por imersão.....	61

# 1-INTRODUÇÃO

## 1.1-Enquadramento e justificação do tema

Os materiais cimentícios, argamassas e betões, são dos materiais mais utilizados na construção, devido a fatores como o baixo custo, a possibilidade de serem utilizados para as mais variadas situações e formas, apresentando boa durabilidade e resistindo às mais diversas ações.

Com o decorrer do tempo e do aparecimento de novas necessidades, tanto ao nível das características físicas e mecânicas como das preocupações ambientais, têm levado “ *à procura de materiais de construção duráveis e sustentáveis e tem inspirado os desenvolvimentos no campo do betão polimérico, bem como no campo dos materiais compósitos de polímero-betão*” (Geemert, et al., 2005). Não se trata de uma necessidade recente, a investigação no campo dos polímeros modificadores de betão teve início nas décadas de 20/30 do século XX.

Ao longo de mais de 80 anos de investigação muito tem mudado. Se, inicialmente, se procurava apenas melhorar as propriedades dos materiais cimentícios no que diz respeito à resistência mecânica e propriedades físicas, hoje em dia o lado ambiental tem grande importância “*devendo o desenvolvimento atual de materiais de construção ser seguro ecologicamente, poupar energia tendo em vista a proteção do ambiente global, além da busca das melhorias tradicionais dos materiais*” (Ohama, 1997).

É com a dupla perspetiva de melhorar as características dos materiais cimentícios e dos cuidados ambientais, que a utilização de acetato de polivinilo (PVA) enquanto modificador das características de betões e argamassas, aparece pois trata-se de um produto totalmente biodegradável, que já mostrou poder trazer benefícios quando utilizado em materiais cimentícios, apesar de algumas limitações (Ohama, 1998; Bayoumi, et al., 2008; Chandra & Rustgi, 1998).

Considerando o lado ambiental, os benefícios que poderá trazer aos materiais cimentícios e o baixo custo que apresenta, o estudo da incorporação de PVA, tendo como objetivo a obtenção

de novas propriedades, que ainda não tenham sido procuradas, torna-se um campo de estudo com potencial de interesse.

## **1.2-Objectivos**

O principal objetivo desta dissertação é o estudo dos efeitos da incorporação de acetato de polivinilo (PVA) em argamassas, enquanto substituto parcial do cimento Portland, usado nas argamassas correntes, sendo que os resultados obtidos têm como objetivo ser extrapolados para futura aplicação no betão.

Para a análise dos efeitos da incorporação de PVA em argamassas, será efetuada uma campanha experimental, que seguirá um processo exploratório em que serão testadas diferentes moléculas de PVA, razões polímero/cimento e água/cimento, diferentes concentrações da solução polimérica e modos de realizar as amassaduras, com a realização de ensaios de resistência à compressão aos 7 dias durante a fase exploratória em que serão definidas as composições das amassaduras a ser caracterizadas.

As argamassas definidas no processo exploratório, serão caracterizadas tanto no estado fresco como no estado endurecido. No estado fresco foi determinada a consistência e a massa volúmica fresca e com este ensaio calculou-se a dosagem de cimento. No estado endurecido, serão avaliadas características mecânicas por intermédio de ensaios à compressão e à tração assim como as características físicas, com a realização dos ensaios de absorção por capilaridade e por imersão.

É de notar que ao longo da campanha experimental são tidas em conta e avaliadas diferentes condições de cura e o efeito da permanência em água na massa aparente dos provetes aquando da realização do ensaio de absorção por imersão, de forma a avaliar a influência da presença de humidade e de água no comportamento das argamassas modificadas com PVA (acetato de polivinilo).



### **1.3-Organização do texto**

A dissertação está organizada em 5 capítulos, sendo constituídos pelos conteúdos apresentados seguidamente.

O capítulo 1 (Introdução) apresenta uma breve apresentação da dissertação e dos objetivos estabelecidos, assim como a organização da dissertação.

No capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) são descritos alguns fundamentos teóricos, como as diferentes classificações dadas a argamassas e betões poliméricos e as alterações nas características das argamassas provocadas pela incorporação de polímeros em argamassas. Neste capítulo, é também feita uma breve descrição das características do acetato de polivinilo (PVA), são apresentados alguns estudos em que o PVA é incorporado em materiais cimentícios e são, também, apresentados alguns estudos em que são utilizados polímeros na produção de argamassas leves.

No capítulo 3 (Processo laboratorial) são descritas as características dos materiais usados durante a campanha experimental, é também descrita a metodologia adotada na realização dos diversos ensaios efetuados, sendo, igualmente, relatadas as várias fases de desenvolvimento do trabalho, apresentando-se as amassaduras realizadas e os motivos da escolha do caminho seguido.

O capítulo 4 (Apresentação e análise dos resultados) apresenta os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados e a análise dos resultados de forma a justificar o caminho seguido. A última fase deste capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados para determinação das várias características das argamassas resultantes do processo experimental realizado.

No capítulo 5 (Conclusão) apresentam-se as principais conclusões obtidas com o estudo e apresentam-se algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

## **2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1-Introdução**

A argamassa e o betão são dois dos materiais mais utilizados na construção devido, principalmente, à facilidade de utilização, ao baixo custo e também às características mecânicas e de durabilidade. Desde o início da sua utilização, tanto os materiais utilizados como as características desejadas, sofreram muitas alterações.

Os primeiros registos da aplicação de argamassa na construção datam de há 11000 anos em Israel, onde foi aplicada uma argamassa de cal e areia na construção de um piso polido (EUROPEAN MORTAR INDUSTRY ORGANIZATION – EMO, s.d.). No caso do betão, o primeiro registo conhecido é de 5600 AC, num pavimento na Sérvia, também recorrendo ao calcário como ligante (Azenha & Cruz, 2011).

A evolução da construção fez com que surgissem, novos materiais na construção, assim como novas e maiores exigências nos materiais desde há muito utilizados, como a argamassa e o betão. Desse modo, na tentativa de melhorar, ou mesmo alterar as características da argamassa e do betão, a aplicação de polímeros com esse fim passou a ser comum.

As primeiras patentes registadas sobre a aplicação de polímeros em materiais cimentícios são da década de 20 do século XX e, desde então, muitas pesquisas têm sido conduzidas no estudo e desenvolvimento de argamassas e betões modificados com polímeros (Ohama, 1998). Já segundo Fowler (1999) o uso de betão modificado com polímeros (PMC) e betão impregnado com polímero teve início na década de 1950 com recurso a betões modificados, tendo-se generalizado, na década de 1970, com o grande desenvolvimento que os betões impregnados com polímeros tiveram.

Hoje em dia o uso de polímeros na construção é de tal forma comum nas mais diversas aplicações, que a indústria da construção se tornou um dos principais consumidores de polímeros (Geemert, et al., 2005), como é apresentado na Tabela 1. Isto demonstra a eficiência, enquanto material de construção, e a necessidade de melhor compreender a sua utilização, assim como novos campos de aplicação tanto para polímeros já usados na construção como novas substâncias que possam vir a ser utilizadas.

Tabela 1- Consumo de polímeros na Europa Ocidental em 2003 (adaptado de Geemert, et al., 2005).

Tipo de Indústria	Consumo de polímeros (%)
Embalagem	37,2
Construção	18,5
Indústria de grande escala	5,8
Electrónica/Eléctrica	8,5
Usos domésticos	20,1
Automovél	8
Agricultura	1,9

## 2.2-Classificação de argamassas e betões poliméricos

### 2.2.1-Introdução

Com o uso de argamassas e betões poliméricos a tornar-se cada vez mais comum, tem-se desenvolvido diversas técnicas para a sua aplicação, podendo o cimento ser substituído total ou parcialmente pela incorporação de materiais poliméricos.

A incorporação de polímeros pode ser feita recorrendo ao uso de várias técnicas, de forma a melhor se identificar os materiais compósitos de betão/argamassa-polímero. Estes são classificados em três tipos (Figura 1) de acordo com a forma com são produzidos (Ohama, 1997):

- Argamassas e betões impregnados com polímeros (*polymer-impregnated mortar, PIM e polymer-impregnated concrete, PIC*);
- Argamassas e betões poliméricos (*polymer mortar, PM e polymer concrete, PC*);
- Argamassas e betões modificados com polímero (*polymer-modified mortar PMM e polymer –modified concrete PMC*);

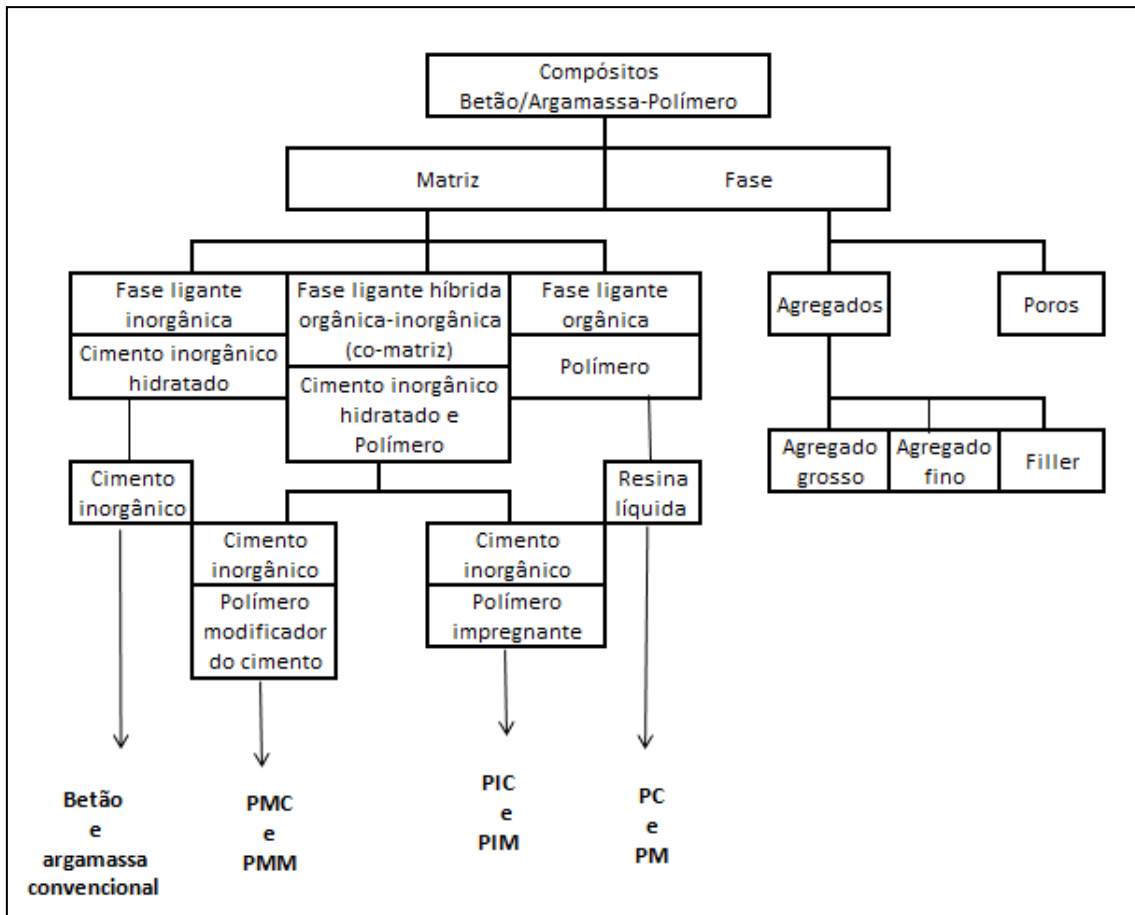


Figura 1- Sistemas e classificações dos compósitos de betão/argamassa-polímero (adaptado de Ohama, 1998).

Outra forma de utilização de polímeros na construção, não sendo através da incorporação nos materiais cimentícios, é na reparação de fendas no betão. Este tipo de técnica consiste em preencher o espaço da fenda existente com polímero e este tipo de intervenção inicialmente recorreu à aplicação de epóxis, que apesar da eficácia, demonstrava ser uma técnica dispendiosa e lenta. O desenvolvimento de novas moléculas de elevado peso molecular, metacrilato (HMWM), e a sua aplicação na reparação de fendas no betão, mostrou-se igualmente eficaz, mas mais rápida e com menores custos, quando comparada com os epóxis, e sendo a fendilhação um dos problemas mais comuns do betão faz com que a aplicação deste tipo de polímero seja extremamente comum (Fowler, 1999).

## 2.2.2- Argamassas e betões impregnados com polímeros

A técnica de impregnação de materiais cimentícios consiste em aplicar monómeros (ou uma mistura de monómeros) de baixa viscosidade (10cP.s), no estado líquido ou gasoso, em materiais produzidos com cimento Portland, normalmente pré-fabricados (Blaga & Beaudoin, 1985).

O processo de impregnação do betão pode ser realizado em laboratório (impregnação total), normalmente limitada a peças com espessuras inferiores a 150mm e *in situ* (impregnação parcial), variando a profundidade de impregnação entre os 10 e os 50mm.

Quando realizado em laboratório este processo implica uma secagem prévia do elemento de betão, retirar o ar existente nos poros, o que pode ser efetuado através de um sistema de vácuo ou através da aplicação de monómeros sob pressão. Os monómeros aplicados são convertidos em polímero, transformação essa que pode decorrer de três formas distintas pelo uso de catalisadores (este processo é demorado e pouco controlável devido a ser realizado com a temperatura ambiente não controlada); pelo uso de radiações gama também com a temperatura ambiente (esta técnica não realidade já não se aplica devido aos riscos associados para a saúde); a terceira técnica de impregnação de materiais cimentícios e a mais usada consiste em utilizar catalisadores juntamente com o monómero sendo depois aquecido com recurso a vapor, água quente ou por infra vermelhos (Mehta & Monteiro, s.d.).

Quando a impregnação é realizada em obra, embora os princípios sejam os mesmos, a forma de aplicação é ligeiramente diferente: a superfície a ser impregnada é limpa e desengordada, é espalhada uma camada de areia e a superfície é seca durante 6 a 8 horas, onde depois é aplicado o monómero (ou sistema monomérico) e após o tempo necessário para a embebição, a superfície é aquecida de forma a realizar a polimerização (Ribeiro, 2006).

As grandes vantagens da aplicação desta técnica são um grande aumento da resistência à tração, compressão, flexão e impacto, melhor comportamento ao gelo-degelo, assim como

Um aumento da durabilidade devido à baixa permeabilidade, à resistência em contacto com ácidos. A melhoria destas propriedades deve-se à criação de uma rede de reforço da estrutura do betão na rede de capilares que é preenchida pelo polímero, criando também um filme polimérico na superfície do betão, apresentando limitações no que diz respeito à sensibilidade

a alta temperatura, a baixa ductilidade e o elevado custo, principalmente no caso da impregnação total, a Tabela 2 apresenta algumas das propriedades melhoradas comparativamente com um betão tradicional.

Tabela 2- Valores típicos em betões impregnados com polímeros e betão convencional (adaptado de Blaga & Beaudoin, 1985).

Tipo de Betão	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (Mpa)	Absorção de água (%)	Módulo de elasticidade (Gpa)
Betão impregnado com polímero	140	10,5	0,6	42
Betão impregnado com polímero *	273	14,7	≤ 0,6	49
Betão convencional	35	2,5	5,5	24,5

\*betão autoclavado e depois impregnado

As principais aplicações dos PIC/PIM são no caso da impregnação total de lajes pré-fabricadas, tubos de esgoto, piscinas, tanques para substâncias corrosivas, depósitos para estações de dessalinização, entre outras. A impregnação parcial é aplicada em lajes de pavilhões industriais (especialmente na indústria alimentar), tabuleiros de pontes e na reparação de elementos estruturais.

### 2.2.3- Argamassas e betões poliméricos

Argamassas e betões poliméricos são materiais compósitos em que o ligante é totalmente constituído por polímero (um ou mais), também conhecido como betão/argamassa de resina sintética, resina plástica ou resina. São obtidos pela mistura de agregado mineral com monómeros ou pré-polímeros, um endurecedor (agente de ligações cruzadas) e um catalisador. Além da não adição de cimento neste tipo de material também não é adicionada água (Blaga & Beaudoin, 1985).

A quantidade de polímero usado geralmente não excede os 5 a 10% do peso total, embora para agregado de pequenas dimensões possa chegar até aos 30%, de forma a se obter os melhores resultados na aplicação dos PC/PM no processo de mistura é comum serem adicionados retardadores ao fogo, plastificantes e silano, este último para melhorar a ligação

entre a matriz do polímero e o agregado. O uso de fibras (vidro, aço, carbono, naturais) ajuda a potenciar as características mecânicas dos PC/PM (Blaga & Beaudoin, 1985; Fowler, 1999).

Os polímeros mais comuns na produção de betões ou argamassas poliméricas são os acrílicos (MMA), poliésteres, epóxis e furânicos, apesar de cada tipo de polímero obter diferentes resultados. No que diz respeito às melhorias conseguidas, genericamente, pode-se dizer que os PC/PM apresentam maior resistência mecânica, à compressão e tração, melhor comportamento quando em contacto com agentes químicos e corrosivos, menor absorção de água, baixa porosidade, bom comportamento gelo-degelo, maior resistência ao choque. No que diz respeito às limitações além do custo, 10 a 100 vezes superior a um material convencional, a sensibilidade à temperatura, devido ao coeficiente de dilatação térmico ser mais elevado e a sensibilidade aos fenómenos de fluência. A Tabela 3 mostra alguns dos valores comuns neste tipo de material (Ribeiro, 2006).

Tabela 3- Valores típicos em betões poliméricos e betão convencional (Blaga & Beaudoin, 1985).

Tipo de ligante	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (Mpa)	Resistência à flexão (Mpa)	Absorção de água (%)
Acrílicos (PMM)	70 a 210	9 a 11	30 a 35	0,05 a 0,6
Poliésteres	50 a 150	8 a 25	15 a 45	0,3 a 1,0
Epóxis	50 a 150	8 a 25	15 a 50	0,02 a 1,0
Furânicos	48 a 64	7 a 8	---	0,2
Cimento Portland	13 a 35	1,5 a 13,5	2 a 8	5 a 8

Apesar de possuir características de elevado desempenho, este tipo de argamassas e betões tem uso limitado devido ao custo associado à sua aplicação. De acordo com Fowler(1999), o resultado da substituição total do cimento Portland implica um material de custo muito elevado o que leva a que a sua aplicação seja apenas efetuada em situações em que as propriedades superiores sejam necessárias, apesar de em termos de mão-de-obra e custos energéticos apresentar baixos custos.

Os campos de aplicação dos PC e PM são os mais diversos dependendo do tipo de polímero utilizado. Para os acrílicos ou polimetil-metacrilato (PMMA) as aplicações mais comuns são em produtos pré-fabricados como escadas, em placas de revestimento de fachadas e pavimento. Para os poliésteres, os de menor custo que são usados nos mais diversos tipos de materiais pré-fabricados, são aplicados mosaicos, tubos e painéis para edifícios públicos e comerciais. Os epóxis que são aplicados em pavimentos industriais, como material de reparação em estruturas deterioradas e os furânicos que são aplicados em pisos sujeitos a ataques químicos, choques e grandes variações de temperatura (Blaga & Beaudoin, 1985; Ribeiro, 2006).

#### **2.2.4- Argamassas e betões modificados com polímeros**

Desde os anos 50 que são usados betões e argamassas modificados, obtidos a partir de uma mistura de cimento, agregados e a adição monómeros/polímeros em substituição de uma percentagem do cimento utilizado no betão/argamassa convencional. Geralmente, a percentagem de cimento substituído situa-se entre os 10% e os 20% (Fowler, 1999).

A incorporação de polímeros nos PMC/PMM pode ser efetuada recorrendo a vários tipos de polímeros tais como látex desidratado, que se apresenta como um pó redispersível. Ao contrário do látex desidratado, o látex já se encontra numa emulsão normalmente aquosa e também podem ser incorporadas resinas, que são polímeros no estado líquido (Ribeiro, 2006). Os polímeros com utilização mais comum são estireno-butadieno (SBR), de ester-poliacrilico (PAE) e polietileno de acetato vinílico (EVA). O processo de fabrico destes materiais cimentícios é em tudo semelhante ao realizado tradicionalmente pois a adição do material polimérico é efetuada durante a realização da amassadura.

A influência da presença do polímero nos PMC/PMM provoca alterações, tanto no estado fresco como no estado endurecido, dependendo de fatores como a razão polímero/cimento (P/C) e o tipo de cura a que é sujeito.

As alterações observadas no estado fresco devem-se à presença de tensioativos na superfície das partículas de polímero, o que faz com que as partículas de cimento se dispersem, tornando a mistura mais uniforme. Este fenómeno é mais notório para razões altas de P/C, durante o



processo de endurecimento, também quando a razão P/C é alta, a matriz polimérica não é interrompida obtendo-se um material menos frágil e com menor probabilidade de sofrer fendilhação, já para o caso da razão P/C ser baixa a hidratação do cimento é preponderante, devido a não ser interrompido pela matriz polimérica.

De acordo com Geemert, et al. (2005) as condições de cura devem contemplar uma fase húmida em que será hidratado o cimento e uma fase seca em que se formará o filme polimérico de forma a maximizar os resultados obtidos pela incorporação de polímeros. Segundo Ohama(1998), quando se tratam de modificações com látex é mesmo preferível uma cura seca, devido à presença do polímero, que forma um filme polimérico que retém água suficiente para a hidratação do cimento. O processo de hidratação do cimento nos PMC/PMM, pode ser dividido em 4 etapas de acordo com um modelo designado de Beeldens-Ohama-Van Gemert, como mostra a Figura 2.

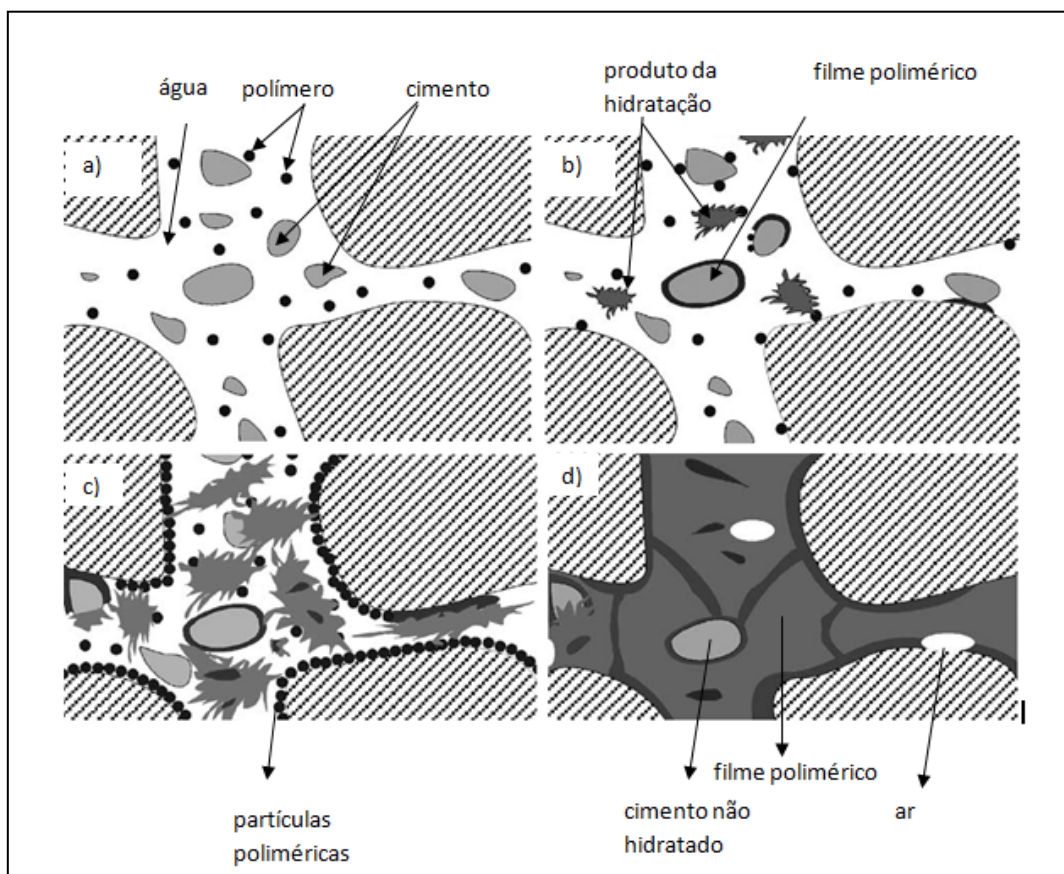


Figura 2- Etapas de hidratação do cimento em argamassas modificadas com polímeros (adaptado de (Geemert, et al., 2005).

- a) Após a realização da mistura, as partículas de cimento e as partículas do polímero encontram-se dispersas na água, iniciando-se o processo de hidratação do cimento, provocando uma solução alcalina nos poros;
- b) As partículas poliméricas interagem com os agregados e o cimento. A razão polímero/cimento determina a quantidade de polímero na solução presente nos poros e na superfície dos agregados. Parte desses polímeros podem coalescer formando um filme contínuo, especialmente os que são depositados sobre as partículas de cimento onde são exercidas forças extras nas partículas do polímero devido à água ser removida para a hidratação do cimento. O filme polimérico pode envolver total ou parcialmente o cimento, resultando no retardar ou numa interrupção da hidratação do cimento;
- c) Dá-se continuidade do processo de hidratação do cimento. As condições de cura condicionam os processos que ocorrem nesta fase. Se não for realizada uma fase de cura seca a formação do filme polimérico é retardada, limitando a sua influência nas propriedades da mistura. Com uma fase de cura seca forma-se o filme polimérico que condiciona a hidratação do cimento e a evolução da resistência mecânica;
- d) Tanto a criação do filme polimérico, como a hidratação são concluídas com a água a ser expulsa pelos capilares. Através da matriz do cimento encontra-se o filme polimérico, sendo o principal contributo para o aumento das propriedades elásticas e de resistência deste tipo de material nas idades iniciais.

Os resultados normalmente obtidos nos PMC/PMM apresentam melhorias para a resistência mecânica, especialmente para a flexão, maior durabilidade, menor retração e apresentando menor retração. A Tabela 4 apresenta alguns valores comparativos entre betão convencional e betão modificado.

Tabela 4- Valores típicos em betão convencional e betão modificado com polímeros (Ribeiro, 2006) .

Tipo de Betão	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (Mpa)	Resistência ao corte (MPa)	Módulo de elasticidade (Gpa)
Betão modificado com polímeros	30 a 60	4,5 a 6,5	2,4 a 4,5	10 a 17
Betão convencional	35	2,5	0,8	24,5

Os campos de aplicação de PMC e PMM dependem muito das características do polímero usado, sendo relativamente comum o uso em revestimento de pavimentos rodoviários, tabuleiros de pontes, tanques, tubos de drenagem ou infra estruturas marítimas, na reparação de estruturas de betão e para aplicação de revestimento em paredes pré-fabricadas devido às propriedades adesivas de argamassas modificadas com látex (Ribeiro, 2006; Blaga & Beaudoin, 1985).

### **2.3.2-Estado fresco**

As características normalmente avaliadas numa argamassa no estado fresco são a consistência, teor de ar incorporado e retenção de água. Aqui serão indicadas as principais alterações provocadas pela incorporação de polímeros na constituição de uma argamassa, sabendo à partida que os comportamentos observados no estado fresco são facilmente alterados variando a proporção dos constituintes (Silva, et al., 2005).

A avaliação de propriedades como a consistência e a trabalhabilidade deve ser feita conjuntamente. De acordo com Yoshida e Barros (1995) (citado por (Senna, 2008)) a trabalhabilidade é a propriedade mais importante e deriva de características como plasticidade, coesão, consistência, viscosidade, adesão e densidade, sendo a avaliação da trabalhabilidade de difícil quantificação, devido a estar dependente de fatores como: facilidade do operário trabalhar a argamassa, obtendo qualidade e produtividade; a facilidade de preenchimento dos moldes, fatores que dependem da avaliação subjetiva do indivíduo; fatores como a ausência de segregação também entram na avaliação da trabalhabilidade, neste já avaliável (Aguiar, 2001).

Fazendo a avaliação conjunta destes fatores pode-se dizer que, de forma geral, as argamassas com polímeros incorporados apresentam maior fluidez, quando comparadas com uma argamassa convencional para a mesma razão água/cimento. Um aumento da razão polímero/cimento, através de um aumento da quantidade de polímero também demonstrou um aumento da fluidez (Ke-Ru Wu, 2002; Bureau, et al., 2001; Geist, et al., 1953). A menor consistência apresentada pelas argamassas com polímeros incorporados é normalmente acompanhada por uma melhoria na trabalhabilidade e este fator está normalmente associado à forma do polímero e da sua relação com a água (Ohama, 1998).

A retenção de água é a capacidade da argamassa fresca manter a consistência e/ou trabalhabilidade quando sujeita a situações como a evaporação, a sucção ou absorção (Cincotto, 1995). Estudos mostram que a retenção de água nos PMC e PMM é bastante mais significativa que nos betões e argamassas tradicionais, sendo este fenómeno visível tanto em polímeros em pó como em solução aquosa, embora dependa de fatores como tipo de polímero e a razão polímero/cimento. O aumento desta provoca uma maior retenção de água devido à sua maior viscosidade, o que torna mais difícil o movimento da água de forma a sair da mistura, o aumento das propriedades coloidais do(s) polímero(s) usados para modificar o cimento e a formação do filme polimérico em volta (Afridi, et al., 2003; Ohama, 1998).

O facto de a água ficar retida favorece a hidratação do cimento, considerando que os PMC/PMM devem ter, pelo menos em parte, a cura seca, este fenómeno de manutenção da água no interior da mistura cimentícia vem ajudar a uma melhor hidratação do cimento (Geemert, et al., 2005).

O teor de ar incorporado, isto é os vazios presentes na argamassa é um fenómeno que ocorre nas argamassas com polímeros incorporados, principalmente devido ao processo de mistura, que introduz ar na argamassa, apesar de fazer com que as bolhas presentes na argamassa, de pequena dimensão se unam formando bolhas de maior dimensão que são mais facilmente retiradas da argamassa, tanto de forma natural como pela vibração (Kim & Robertson, 1998; Ohama, 1998; Bayoumi, et al., 2008).

### **2.3.3-Estado endurecido**

No estado endurecido, as características em que a incorporação de polímeros normalmente tem maior influência são a resistência à compressão, a resistência à tração e a resistência de aderência. Estes fatores são influenciados pelo tipo de polímero, pela concentração em que se encontra, pelas características dos agregados, cimento, condições de cura e pelas razões água/cimento e polímero/cimento (Ohama, 1995; Ohama, 1998).

O comportamento das argamassas modificadas com polímeros no que diz respeito à resistência à compressão e flexão normalmente apresenta melhorias quando comparado com as argamassas convencionais, partindo do princípio que se considera que a razão água/cimento se mantém constante(Ohama, 1997; Ohama, 1998).

O aumento da resistência à compressão pode não se verificar pois podem prevalecer fatores como o polímero apresentar menor resistência que a argamassa, ser macio e a sua incorporação normalmente implicar um aumento do ar incorporado na argamassa, o que reduz a densidade da argamassa, a comparação entre argamassas tradicionais e poliméricas deve ser feita com argamassas que tenham densidades semelhantes (Bureau, et al., 2001; Schulze, 1999; Schulze & Killermann, 2001).

O comportamento à flexão é normalmente melhorado para razões de polímero/cimento (p/c) superiores a 5% apresentando os melhores resultados para valores da ordem dos 15 a 20% da razão p/c. Isto deve-se ao facto, de para baixas razões p/c, o teor de ar incorporado limitar a formação do filme polimérico. Com maior quantidade de polímero incorporado, o filme polimérico ajuda a reforçar a matriz cimentícia e mais uma vez, as condições de cura a que a argamassa é sujeita são fundamentais para ser observada ou não uma possível melhoria na resistência à flexão (Ohama, 1998; Schulze & Killermann, 2001; Blaga & Beaudoin, 1985; Afridi, et al., 2003).

A resistência de aderência pode ser definida como resistir a esforços de tração perpendiculares (tração simples) ou paralelos ao substrato (cisalhamento ou tensão cortante) (Senna, 2008). Esta trata-se de uma característica que nas PMM mais facilmente se pode dizer que apresenta melhores resultados comparativamente com as argamassas convencionais, especialmente quando é utilizado látex (Bureau, et al., 2001; Kim & Robertson, 1998; Mansur, 2007; Ohama, 1998).

Este fenómeno é explicado por Kim & Robertson (1998) para a utilização de polivinil álcool e deve-se à melhor distribuição da ligante (cimento e polímero) nas zonas de fronteira entre as diferentes superfícies tal como mostra a Figura 3.

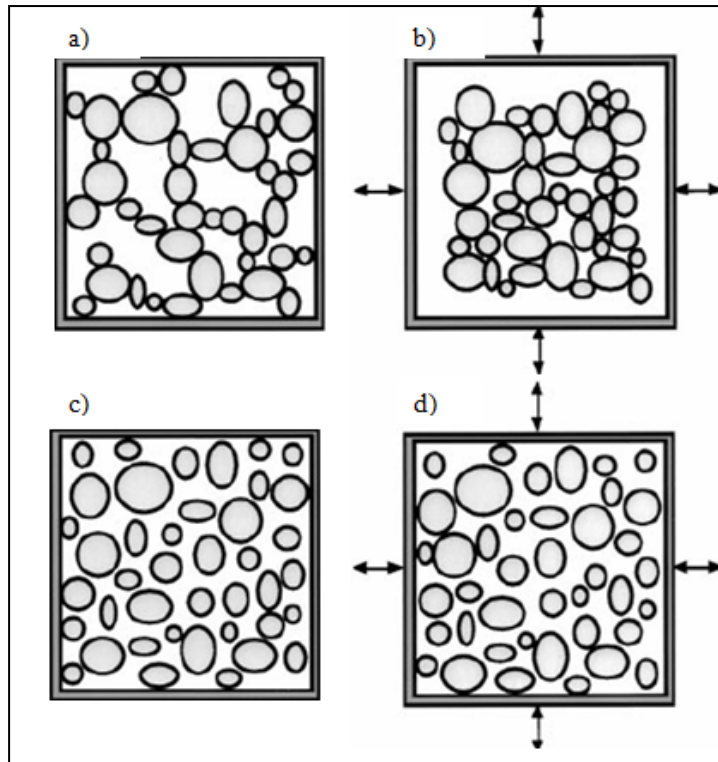


Figura 3- Mecanismo formado na zona de transição entre 2 superfícies ( (Kim & Robertson, 1998).

- a) Efeito barreira criado pelas partículas de cimento flocculadas, sem a incorporação de polivinil álcool;
- b) Formação de uma camada de água em volta da superfície do molde, após vibração e cimento flocculante, sem a incorporação de polivinil álcool;
- c) Partículas de cimento dispersas uniformemente, com polivinil álcool incorporado;
- d) Partículas de cimento dispersas uniformemente após vibração, com polivinil álcool incorporado.

A Figura 3 mostra qual o motivo do melhor comportamento das argamassas após a incorporação de polímeros. Devido a um conjunto de reações existe uma melhor dispersão do ligante nas zonas superficiais de forma a se realizar uma melhor junção entre os dois materiais diferentes.

## 2.4- Acetato de polivinilo-PVA

Sendo o objeto deste estudo a incorporação de PVA em argamassas e betões, importa referir que vários autores costumam referir-se ao acetato de polivinilo como PVAc de forma a não se criar confusão com o álcool polivinil. Devido a este trabalho se tratar de um estudo sobre a incorporação de acetato de polivinilo em materiais cimentícios sempre que se utilizar o termo PVA será relativo ao acetato de polivinilo e quando existirem referências ao álcool polivinil não será utilizada nenhuma abreviatura.

O acetato de polivinilo trata-se de um látex termoplástico com as mais variadas aplicações a nível comercial, devido à excelente resistência química, propriedades físicas e a ser biodegradável. Os campos de aplicação do PVA vão desde a indústria têxtil, produtos farmacêuticos, materiais adesivos (colas), à indústria da construção, etc. Esta grande variedade de aplicações faz com que seja a resina sintética (polímero) mais produzida no mundo (Briscoe, et al., 2000; Voitovich, 2009).

As características que fazem do PVA um polímero utilizado em materiais cimentícios, são os valores altos do módulo de elasticidade e de deformação (Kanamoto, et al., 1990), embora estas dependam de fatores como o peso molecular, viscosidade, o grau de polimerização e a capacidade de realizar hidrólise, que variam de acordo com as características das diferentes moléculas de PVA (Briscoe, et al., 2000; Tao, 2003).

Considerando que o acetato de polivinilo se trata de uma solução aquosa, existem fatores que não dependem exclusivamente das características da molécula usada, já mencionadas, mas das características da solução polimérica que vão influenciar o tipo de modificação criada pela incorporação de PVA. Soluções poliméricas com diferentes propriedades influenciam o comportamento do material cimentício modificado tanto ao nível da homogeneidade da mistura (a execução do processo de misturar os diferentes componentes como o cimento, o agregado e a água com a solução polimérica), influenciando, também as características do filme polimérico que se vai criar, as Figura 4, Figura 5 Figura 6 mostram algumas relações que influenciam as características do acetato de polivinilo (Tao, 2003 citando Marten, 2002)

A Figura 4 apresenta a variação da solubilidade do PVA em função da temperatura para diferentes moléculas que variam no que diz respeito à hidrólise, ou seja na capacidade que possuem de se ligar com a água e do grau de polimerização, isto é o número de unidades

estruturais repetidas (monómeros) numa macromolécula (polímero) é chamado grau de polimerização, na Figura 4 estão representadas respetivamente as seguinte curvas:

- A, hidrólise 78-81mole%, grau de polimerização = 2000-2100;
- B, hidrólise 87-89mole%, grau de polimerização = 500-600;
- C, hidrólise 98-99mole%, grau de polimerização = 500-600;
- D hidrólise 98-99mole%, grau de polimerização = 1700-1800.

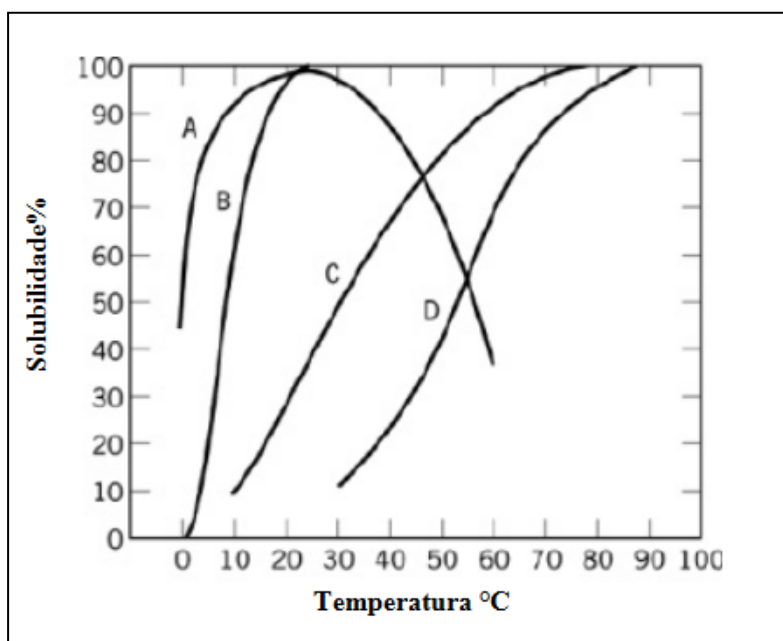


Figura 4- Solubilidade da solução de PVA em função da temperatura (adaptado de Tao, 2003).

A Figura 5 apresenta as curvas da viscosidade em função da temperatura, para uma concentração de 16% (polímero/água), com hidrólise 87%-89% de 4 moléculas de PVA diferentes com as seguintes características:

- A-grau de polimerização = 2200;
- B-grau de polimerização = 1500;
- C-grau de polimerização = 550;
- D- grau de polimerização = 220.



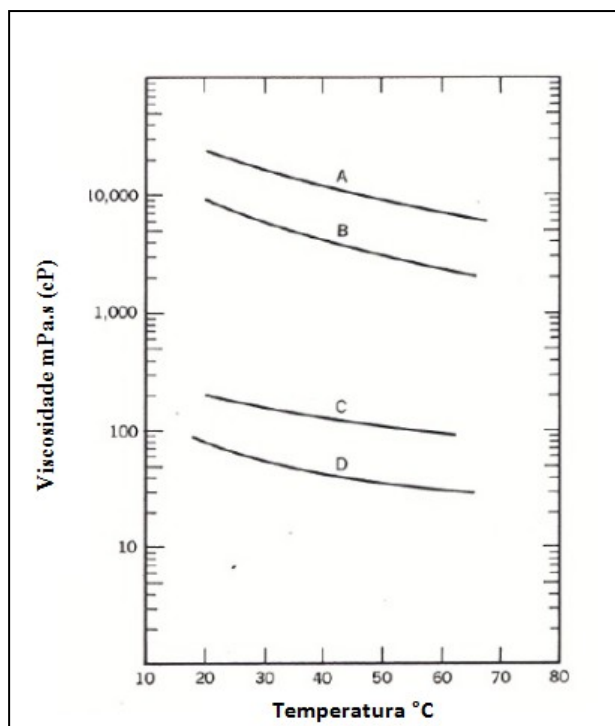


Figura 5--Viscosidade do PVA em água em função da temperatura (adaptado de Tao, 2003).

A Figura 6 apresenta o comportamento da viscosidade de diferentes moléculas de PVA em função da concentração, as características das moléculas estão na Tabela 5.

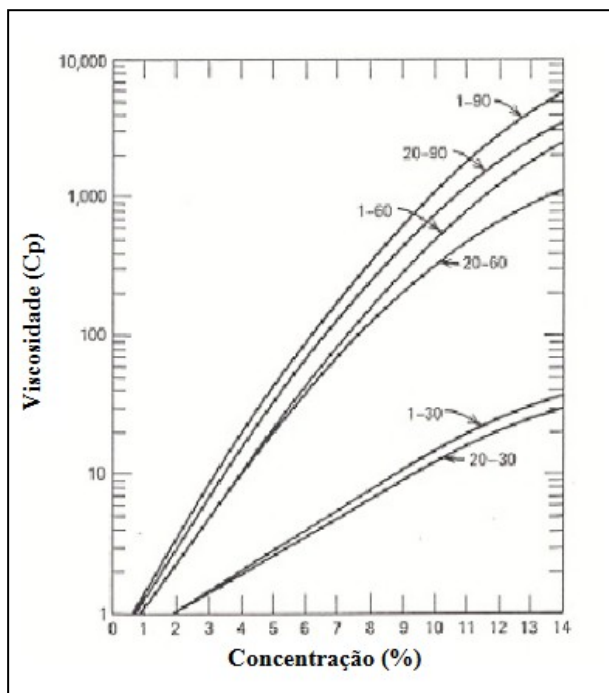


Figura 6- Viscosidade da solução de PVA em função da concentração (adaptado de Tao, 2003).

Tabela 5- Características das moléculas de PVA da Figura 6

Dimensão do PVA	Grau de polimerização	Hidrólise (%)
1-90	2400-2500	99%
20-91		87%-89%
1-60	1700-1800	99%
20-60		87%-89%
1-30	500-600	99%
20-30		87%-89%

Da análise conjunta das Figura 4Figura 5Figura 6 é possível inferir que a o grau de polimerização e a concentração têm um maior efeito na viscosidade da solução que a hidrólise e a temperatura, considerando o que foi dito em 2.3.2-Estado fresco sobre a importância da viscosidade dos polímeros em solução nas propriedades das argamassas no estado fresco, este torna-se um fator importante na escolha do tipo de molécula de PVA a utilizar para modificar materiais cimentícios.

## **2.5-Estudos efetuados com a incorporação de PVA em materiais cimentícios.**

Como já foi dito anteriormente, existem diversos estudos relacionados com a utilização de PVA em argamassas e betões, na tentativa de melhorar as características obtidas quando é utilizado cimento Portland como ligante.

Devido ao PVA ser um polímero solúvel em água, a influência da humidade nas condições de cura apresenta grande importância nos resultados obtidos tanto para a resistência à compressão, como para a resistência à tração. Os resultados apresentados por Geist et al.(1953) mostram que a substituição de 20% da quantidade de cimento apresenta os melhores resultados, embora estes resultados mostrem variações de acordo com as condições de cura.

Em condições de temperatura e humidade próximas das normalmente presentes no terreno, isto é temperatura de 21°C e humidade relativa de 50%, os valores da resistência à tração foram cerca de 3 vezes superiores aos da argamassa tradicional, curada com 100% de humidade relativa, os resultados obtidos por Geist et al.(1953), para a resistência à tração são apresentados na Figura 7.

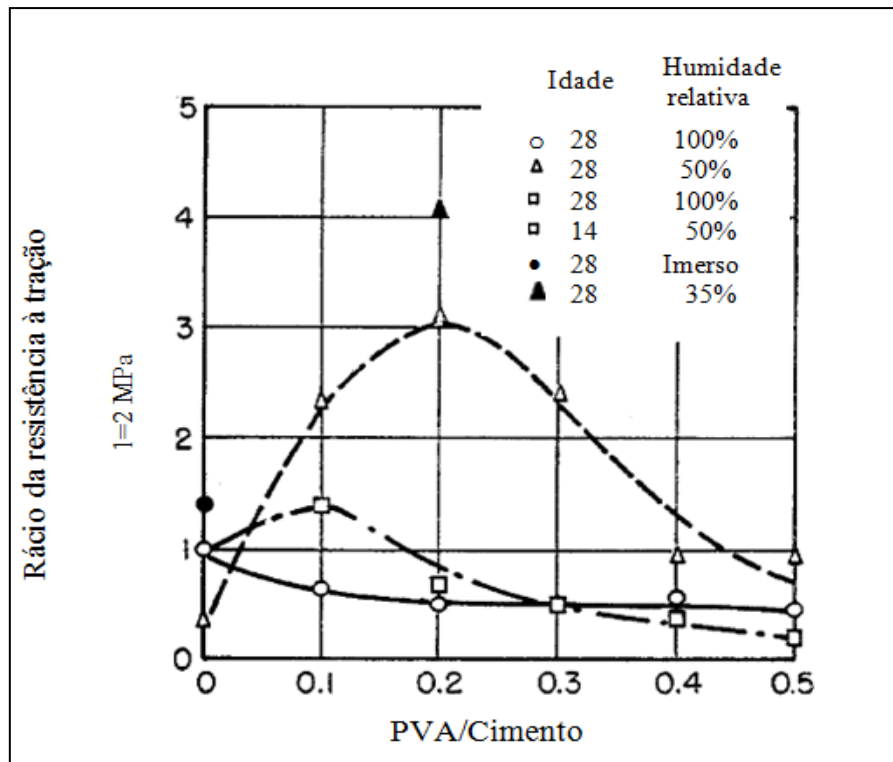


Figura 7- Evolução da resistência à tração para diferentes condições de cura (adaptado de Geist, et al 1953).

Já no que diz respeito à resistência à compressão, comparando as mesmas condições de humidade (50% para a argamassa modificada e 100% para a tradicional), a argamassa modificada apresentaram uma resistência à compressão cerca de 30% inferior. A Figura 8 mostra a evolução da resistência à compressão com as variações da razão PVA/cimento para diferentes condições de cura (Geist, et al., 1953).

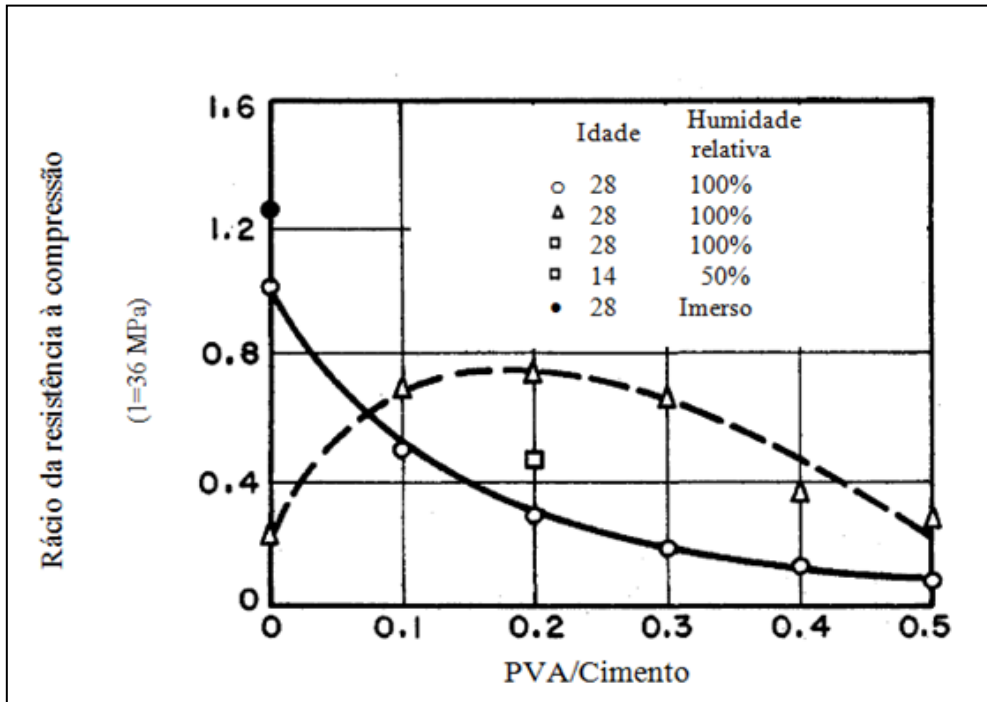


Figura 8- Evolução da resistência à compressão para diferentes condições de cura (adaptado de Geist, et al 1953).

De acordo com Bayoumi, et al (2008) a incorporação de PVA em betão provocou um aumento cerca de 80% no teor de ar no estado fresco quando comparado com uma betão convencional. Este facto, juntamente com a menor absorção por capilaridade verificada (a amostra com a incorporação de PVA teve um valor 33% inferior ao do betão de referência), permite concluir que apesar, do aumento da porosidade, esta se trata de porosidade fechada. Tal como no estudo apresentado anteriormente, a resistência à compressão apresentou melhorias especialmente para idades mais altas, 90 e 360 dias, e com cura em condições ambientais, para as quais apresentou melhorias na ordem dos 50% comparativamente com o betão padrão. No que diz respeito à resistência à flexão as melhorias situaram-se nos 20%. Os efeitos das condições de cura, no que diz respeito à humidade, quando se utiliza PVA em materiais cimentícios, são também notados por Ohama (1998) que, para a resistência à flexão, aos 28 dias com uma substituição de 10% do cimento por PVA obteve um aumento de cerca de 5% quando curados na presença de humidade durante todo o período de cura (cura húmida), 50% quando a cura foi na presença de humidade nos primeiros 7 dias com o restante período de cura seca (cura ambiental) e uma redução de 25% quando a cura foi feita com os provetese em presença de humidade nos dois dias iniciais sendo que no tempo restante estiveram imersos (cura em água). Para uma substituição de 20% do cimento a tendência foi semelhante com os valores a apresentarem uma maior diferença relativamente aos valores de

referência tal como mostra a Tabela 6 (os valores apresentados são uma aproximação dos valores obtidos por Ohama,(1998)).

Tabela 6- Valores obtidos por Ohama para a resistência à flexão com a incorporação de PVA (adapatado de Ohama, 1998).

Percentagem de cimento substituída	Tipo de cura		
	Água	Húmida	Ambiental
Substituição 10%cimento	-25%	5%	50%
Substituição 20%cimento	-40%	10%	60%

No que diz respeito à resistência à compressão os valores obtidos por Ohama( 1998), também são claramente influenciados pelas diferentes condições de cura tendo, para uma substituição de 15% do cimento por PVA, obtido uma redução da resistência à compressão de 30% com cura em condições de humidade, semelhantes às mencionadas anteriormente para a resitencia à flexão. Com condições de humidade ambientais a redução foi de 5% e quando curados em água a redução foi de 55%.

É possível verificar, pela análise destes estudos, a influência da presença de água nas argamassas modificadas com a incorporação de PVA, nas condições de cura mas também por se tratar de um polímero que reage com a água. Ohama (1998) diz mesmo que a sua utilização em argamassas e betões de elevado desempenho deixou de ser usada devido à pouca resistência na presença de água.

Existem estudos sobre a utilização de PVA em materiais cimentícios em casos mais específicos como na eficácia quando na presença de ácido sulfúrico, embora funcionando conjuntamente com silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), a resistência à compressão desceu cerca de 30% enquanto a argamassa padrão desceu cerca de 50% (Li, et al., 2009).

Um outro estudo refere-se à utilização de águas residuais provenientes da produção de acetato de polivinilo (PVAW), em substituição da água usada habitualmente. Obteve-se um betão com menor trabalhabilidade que o de referência e uma densidade seca mais alta. As resistências à compressão e flexão não apresentaram grandes alterações em relação às do

betão de referência, tendo sido notado um ligeiro aumento para uma razão água/cimento de 0,4 (Ismail & Al-Hashmi, 2011).

## **2.6-Argamassa leve**

O uso de argamassas leves não se trata de uma nova necessidade. Já na construção da Basílica de Santa Sofia, em Istambul foi usado diatomito (rocha sedimentar que apresenta elevada porosidade, leve, com densidade inferior à da água (Serviço Geológico do Brasil, 2009) ) como agregado de forma a baixar a carga a que a estrutura estava sujeita. Desde aí, até aos nossos dias, este tipo de técnica tem sido amplamente divulgada, em particular a partir de meados do séc. XX, com a realização de vários estudos tanto com a utilização de agregados leves como de aditivos poliméricos (Nóvoa, et al., 2004).

Argamassas leves podem-se definir como: um tipo de argamassa em que é adicionado um aditivo expansivo que faz aumentar o volume da mistura, um substituto para o cimento (ligante) como cinzas volantes, ou em alternativa, a utilização de um agregado leve, melhorando características como o isolamento térmico, devido à presença de vazios, controlo da humidade e diminuição do peso (carga) desnecessária sobre a estrutura (Ismail, et al., s.d.; Gündüz, et al., 2007).

As características que se pretendem numa argamassa leve no estado fresco são uma consistência cremosa, boa posição de trabalho quando na espátula, retenção de água elevada e boa capacidade de bombagem. Estas características são muito afetadas pela adição de adjuvantes que são usados normalmente para melhorar a trabalhabilidade, retardar o tempo de presa, entre outras. Caso não se conheçam totalmente os efeitos destas adições em todas as características das argamassas o seu uso deve ser limitado (Brick Industry Association, 2003).

As argamassas leves são normalmente utilizadas como material de regularização de lajes, de isolamento entre pisos, como forma de aligeirar lajes, sendo uma boa forma de se obter bom isolamento térmico e acústico, devido à elevada porosidade que apresenta. Normalmente este, tipo de argamassas apresenta valores para a resistência à compressão entre 1 e 4 MPa e baixa massa volúmica aparente inferior a  $1100\text{kg/m}^3$ .

Estas características podem ser alcançadas, tanto pela incorporação de polímeros, como pela utilização de agregado leve, como cortiça ou rochas vulcânicas, ou pela introdução de ar ou gás no processo de mistura de forma a criar vazios (Ismail, et al., s.d.).

Apesar de existirem várias argamassas comerciais com este tipo de características, não são conhecidos muitos estudos sobre argamassas leves com a incorporação de polímeros. De seguida serão indicadas algumas características de algumas argamassas comerciais, tanto modificadas com polímeros como pelo uso de agregado leve:

- Betcel-utiliza poliestireno, apresentando uma massa volúmica aparente de 750kg/m<sup>3</sup>, com resistência à compressão de 1,19 MPa aos 28 dias;
- Betcel-utiliza poliestireno, apresentando uma massa volúmica aparente de 785kg/m<sup>3</sup>, com resistência à compressão de 1,05 MPa aos 28 dias;
- Leca Mix-utiliza argila expandida, apresentando uma massa volúmica aparente de 480kg/m<sup>3</sup>, com resistência à compressão de 0,7 MPa aos 28 dias;
- Vermiculita-utiliza vermiculita expandida, apresentando uma massa volúmica aparente de 450kg/m<sup>3</sup>, com resistência à compressão de 3,5 MPa aos 28 dias.

## **3-PROCESSO LABORATORIAL**

### **3.1-Introdução**

Neste estudo pretende-se avaliar os efeitos e a viabilidade da incorporação de acetato de polivinilo em argamassas. Neste capítulo, são apresentados os materiais utilizados, a metodologia adotada na realização dos diferentes ensaios efetuados, assim como a evolução da metodologia experimental e as diferentes fases em que esse processo se dividiu de acordo com os resultados que se foram registando.

## 3.2-Materiais utilizados

### 3.2.1-Cimento

Na realização das amassaduras o cimento usado foi do tipo CEM I 42,5R, gentilmente cedido pela Secil. De acordo com as especificações presentes na ficha técnica (Secil, 2004) este cimento apresenta um rápido desenvolvimento da resistência, com uma resistência inicial elevada, o que faz com que tenha uma elevada resistência a todas as idades. As principais características são apresentadas nas Tabela 7Tabela 8Tabela 9 de acordo com os dados fornecidos na ficha

Tabela 7-Características químicas do cimento (Secil, 2004).

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado <sup>(1)</sup>
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,1%
1) As percentagens são referidas à massa de cimento		

Tabela 8 -Características mecânicas do cimento (Secil, 2004).

Resistência à Compressão (Mpa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
≥ 20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

Tabela 9-Características físicas do cimento (Secil, 2004).

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm



### 3.2.2-Água

No respeitante à água, foi utilizada a disponível no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, proveniente da rede de abastecimento público de Guimarães.

### 3.2.3-Areia

Foi utilizada uma areia britada fornecida pela Britaminho e extraída na pedreira “Sorte do Mato das Lagedas”.

A areia, de acordo com os dados da ficha técnica, é proveniente de rocha granítica, apresentando-se sã a pouco alterada (W1 a w2), com forma angulosa, baixa porosidade e superfície áspera. Constituída por quartzo (45%), feldspatos (45%), micas (9%) e outros minerais (1%), apresentando dimensões entre os 0 e os 4mm, conforme documenta a curva granulométrica na Figura 9.

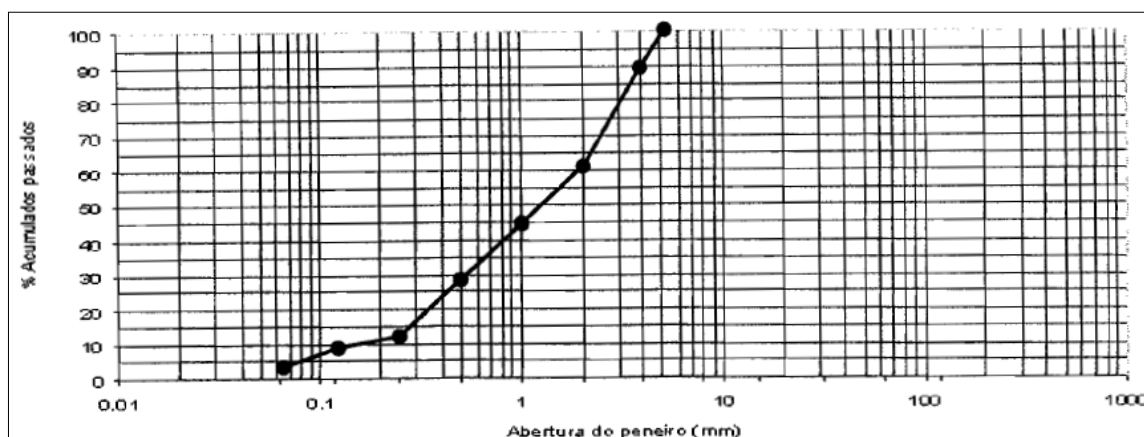


Figura 9- Curva granulométrica da areia utilizada.

### 3.2.4-PVA

O PVA (acetato de polivinilo) utilizado foi preparado com recurso a polivinil álcool da marca Sundry-PVA, disponibilizado pelo Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho (DEP). Para a utilização do PVA nas argamassas, primeiramente foi preparada uma solução aquosa, tendo o polivinil álcool sido misturado com água. O processo consiste em

misturar lentamente o PVA e a água com uma colher aquecendo a mistura até se obter uma mistura homogênea, em que todo o polivinil álcool se encontra dissolvido. Este processo foi executado com diferentes concentrações e diferentes moléculas de PVA e deu origem a soluções distintas, posteriormente incorporadas em argamassas. No seguimento deste relatório a solução obtida será mencionada como SPol (solução polimérica).

As moléculas de PVA usadas apresentam diferentes tamanhos e viscosidade. Este estudo baseou-se em 2 moléculas com características bastante diferentes, o PVA-05-88 (PVA5), de menor dimensão, em que 05 identifica o tamanho da molécula, 88 é o valor da hidrólise em mole%, isto é a capacidade da molécula se “*dissolver*” na água, apresentando uma viscosidade de 4,5-6 mPa.s. A outra molécula usada foi a PVA-24-99, de maior dimensão, com maior capacidade de realizar hidrólise 99 mol% e apresenta uma viscosidade entre os 55-65 mPa.s.

### **3.3- Descrição dos ensaios efetuados**

#### **3.3.1-Caracterização no estado fresco**

Para a caracterização da argamassa no estado fresco foi avaliada a consistência e a massa volúmica da argamassa.

Para a avaliação da consistência foi realizado o ensaio de espalhamento segundo a norma EN 1015-3. Para a realização do ensaio limpou-se a mesa de espalhamento e lubrificou-se com óleo, colocou-se argamassa de forma a preencher metade do molde e com o pilão compactou-se a argamassa com 10 pancadas. Este processo foi repetido para uma segunda camada. No final, retirou-se a argamassa em excesso, retirou-se o molde e dando 15 pancadas, aproximadamente em 15 segundos, obteve-se o espalhamento medindo o diâmetro em duas direções perpendiculares.

Para a avaliação da massa volúmica da argamassa fresca adaptou-se a norma EN 12350-6 para betões

O procedimento consistiu em encher um recipiente com a argamassa fresca de forma análoga à referida para o ensaio de espalhamento. Conhecido o peso do recipiente vazio e o seu volume, pesa-se o recipiente com a argamassa e através da Equação 1 determina-se a massa volúmica da argamassa.

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

$\gamma$ -massa volúmica em kg/m<sup>3</sup>

$m_1$ -massa do recipiente em kg

$m_2$ -massa do recipiente com a argamassa em kg

$V$ -volume do recipiente em m<sup>3</sup>

### 3.3.2-Resistência à compressão

Para realizar este ensaio foram utilizados provetes cúbicos com 50×50×50mm<sup>3</sup> de dimensão e seguiu-se a norma EN 1015-11. A velocidade do ensaio adotada foi sendo ajustada de acordo com as características de cada amostra. Foram ensaiados 3 provetes para cada amostra numa fase inicial, passando para 2 conjuntos de 3 provetes com diferentes condições de cura para cada amostra aos 7 dias. Para a caracterização final foram realizados ensaios aos 3, 7, 14, 28 e 56 dias e os resultados foram obtidos de acordo com a Equação 2.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

$f_c$ -resistência à compressão em MPa

$F$ -carga máxima na rotura em N

$A_c$ -área da secção do provete em mm

### 3.3.3-Resistência à tração

Para avaliar a resistência à tração foi realizado o ensaio de tração por compressão diametral seguindo a norma EN 12390-6 (adaptada a argamassas). Os provetes testados foram cilindros com 100mm de diâmetro e 200mm de altura, cortados de forma a apresentarem superfícies regulares, foram ensaiados 3 provetes para cada amostra com 28 dias, a cura foi realizada em condições de humidade ambientais, a velocidade de aplicação da carga selecionada foi de 0,05MPa/s. Os resultados foram obtidos de acordo a Equação 3.

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (3)$$

$f_{ct}$ -resistência à tração por compressão em MPa

F-carga máxima em N

L-comprimento da linha de contacto do provete em mm

d-dimensão da secção transversal em mm

### 3.3.3-Absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 772-11, adaptada para argamassas. Para cada composição estudada foram ensaiados 3 provetes, de 50×50×50mm<sup>3</sup>, aos 28 dias e curados em câmara húmida.

Na realização do ensaio, inicialmente, os provetes foram pesados e colocados em estufa de forma a secarem até ao seu peso ter uma variação inferior a 0,1% em dias consecutivos. Atingido este estado, os provetes foram colocados num recipiente com uma grade no fundo, de forma à superfície de contacto dos provetes com a base ser a menor possível, enchendo o recipiente com água até esta atingir uma altura de aresta dos provetes de 5mm. Seguidamente, foram efetuadas pesagens aos 5, 10, 15, 30, 60, 180, 360, 720, 1440, 2160, 2880, 3600 e 4320

minutos que permitiram determinar a cinética de absorção capilar e calcular o coeficiente de absorção usando a Equação 4.

O coeficiente de capilaridade foi calculado com base nos valores obtidos através da Equação 4 na fase inicial do ensaio, quando existe uma maior absorção e maior inclinação da curva da cinética de absorção, tendo sido realizada uma regressão linear no intervalo de tempo que permitiu um melhor valor do coeficiente de correlação linear.

$$c_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s \sqrt{t_{so}}} \times 10^6 [g/(m^2 \times s^{0,5})] \quad (4)$$

$c_{w,s}$ -coeficiente de absorção de água por capilaridade em  $g/(m^2 \times s^{0,5})$

$m_{so,s}$ -massa do provete após imersão durante um tempo t em g

$m_{dry,s}$ -massa do provete seco em g

$A_s$ -área da face do provete imersa em  $mm^2$

$t_{so}$ -tempo de imersão em s.

### 3.3.4-Absorção de água por imersão

Na determinação da absorção de água por imersão foi seguida a especificação do LNEC E 394, adaptada para argamassas. Por cada composição foram testados 3 provetes de  $50 \times 50 \times 50 mm^3$  aos 28 dias de idade e que tiveram a cura em câmara húmida.

Para realizar o ensaio os provetes foram pesados e colocados em estufa de forma a perderem humidade, considerando-se secos quando a variação do seu peso em dias consecutivos foi inferior a 0,1%. Após a secagem, os provetes foram colocados num recipiente com água de forma a ficarem saturados. Também este processo ficou concluído quando a variação do peso foi inferior a 0,1%.

Os resultados foram obtidos através da Equação 5. Para isso os provetes foram pesados imersos em água, massa hidrostática, e saturados com a superfície seca. Neste caso, os provetes foram retirados da água e a sua superfície foi limpa com um pano absorvente, imediatamente antes de serem pesados.

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (5)$$

$A_i$ -absorção de água por imersão

$m_1$ -massa do provete saturado em g

$m_2$ -massa hidrostática do provete em g

$m_3$ -massa do provete seco em g

### **3.4-Campanha Experimental**

#### **3.4.1-Introdução**

A campanha experimental foi feita seguindo um processo sequencial, evoluindo de forma a responder aos resultados obtidos, podendo ser dividida em 6 fases, sendo que as 5 primeiras serviram para definir as composições das amassaduras a serem caracterizadas na última fase da campanha de ensaios.

O processo de escolha das várias composições testadas teve como fatores de decisão a resistência à compressão aos 7 dias em cubos  $50 \times 50 \times 50 \text{mm}^3$ , a massa volúmica e a consistência.

### 3.4.2-Fase 1

Na primeira fase, que pode ser descrita como de despistagem inicial, a substituição do cimento por PVA teve como objetivo analisar o comportamento das argamassas tanto ao nível da trabalhabilidade como, fundamentalmente, da resistência à compressão que seria possível obter com a adição do PVA. Para isso, foram realizados ensaios à compressão e analisada a trabalhabilidade através do ensaio de espalhamento.

Nesta fase foram utilizadas as 2 moléculas de PVA, PVA 5 E PVA 24, com o objetivo de analisar o comportamento das argamassas obtidas com a adição de soluções poliméricas com diferentes viscosidades e concentrações.

Foram realizadas 3 amassaduras, com diferentes percentagens de substituição de cimento, para cada um dos tipos de PVA: 5%, 7,5% e 10% para o PVA 24 e 10%, 20% e 30% para o PVA 5, a percentagem indicada diz respeito à quantidade de cimento substituída da composição padrão utilizada, a constituição das argamassas está na Tabela 10, onde se podem ver os constituintes assim como as dosagens.

As amassaduras foram realizadas de acordo com a norma EN 196-1 e os provetes vibrados durante aproximadamente 10 segundos na mesa vibratória após a colocação da argamassa nos moldes.

Tabela 10- Composição das amassaduras realizadas na Fase 1.

Amassadura	Quantidades (g)			
	Areia	Água	Cimento	Polímero
Padrão	1350	275	450	-
PVA-5 10%	1350	275	405	45
PVA-5 20%	1350	275	360	90
PVA-5 30%	1350	275	316	135
PVA-24 5%	1350	275	425	22,5
PVA-24 7,5%	1350	275	417	33,75
PVA-24 10%	1350	275	405	45

### 3.4.3-Fase 2

Como as composições da Fase 1 apresentarem uma resistência à compressão reduzida, aparentemente devido a deficiente compactação, foram tentadas, posteriormente na fase 2, várias formas de aumentar a compacidade dos provetes, assim como diferentes métodos para realizar as amassaduras. Para isso, foram usadas as composições em que foram obtidas as resistências à compressão e as massas volúmicas secas mais distantes da composição padrão, PVA-5 30% e PVA-24 10%.

Nas tentativas de aumentar a compacidade dos provetes partindo do método de realizar as amassaduras usado na Fase 1 foram realizadas as seguintes tentativas:

- *3/4+1/4* – a amassadura foi realizada de acordo com a norma EN 196-1, sendo a argamassa colocada nos moldes em 2 fases, na primeira preencheu-se aproximadamente 3/4 do molde e vibrou-se durante 10seg na mesa vibratória, partiu-se a película que se criou na superfície da argamassa sendo depois preenchido o espaço restante no molde vibrando novamente 10seg;
- *Vibração exterior* (vib) – realizou-se a amassadura de acordo com a norma EN 196-, sendo vibrado recorrendo a uma agulha vibratória no exterior do molde;
- *Velocidade rápida* (vel1) – manteve-se o tempo de realizar a amassadura da norma EN 196-1, 4 minutos, usando a apenas a velocidade mais rápida ( $285\pm 10$  rotações/minuto e  $125\pm 10$  movimentos planetários /minuto), com a argamassa a ser vibrada durante 10seg na mesa vibratória;
- *Velocidade lenta* (vel2) – semelhante à velocidade rápida mas com o uso da velocidade mais lenta ( $140\pm 5$  rotações/minuto e  $62\pm 5$  movimentos planetários /minuto);
- *2 tipos de areia* (2 areia) – com a amassadura realizada de acordo com a norma EN 196-1, foi usada areia britada de rocha granítica e areia de rio em quantidade iguais, com os restantes constituintes da argamassa a manterem-se iguais, assim como a forma de vibrar a argamassa nos moldes, 10 segundos na mesa vibratória;
- *Com compactação* (c/comp) – usou-se uma carga durante o período em que os provetes estiveram nos moldes (24h), a amassadura e a vibração da argamassa nos moldes foi de acordo a norma EN 196-1;



- *Sem substituição (s/sub)* – não foi substituído o cimento, apenas se acrescentou o polímero em solução;
- *Amassadura em 2 etapas (2 am)* – foram realizadas duas etapas distintas na amassadura, na primeira em que se misturou água, cimento e areia com uma parte da água e uma segunda amassadura em que à mistura obtida inicialmente se juntou a SPol, com as amassaduras a serem realizadas de acordo com a norma EN 196-1 e a argamassa a ser vibrada durante 10seg na mesa vibratória;

Contudo, apesar do esforço despendido, os resultados continuaram a não ser satisfatórios ao nível da resistência à compressão. Uma das diferentes formas de realizar a amassadura experimentadas, *amassadura em 2 etapas*, apresentou uma massa volúmica particularmente baixa, tendo em conta este fator e a baixa resistência à compressão decidiu-se avaliar a possibilidade de criar uma argamassa leve.

Desta forma ficou definida a forma de realizar a amassadura assim como a forma de compactar a argamassa, *amassadura em duas etapas* com a argamassa a ser vibrada durante 10 segundos na mesa vibratória.

### **3.4.4-Fase 3**

Seguindo o processo sequencial e recorrendo ao processo de fabrico da argamassa definido na Fase 2, *amassadura em 2 fases*, passou-se à definição da composição da argamassa.

As alterações produzidas na composição das argamassas foram a variação da quantidade de água, tanto na *primeira etapa da amassadura*, em que se misturam a areia, o cimento e a água, como na *segunda etapa da amassadura* em que é acrescentada a SPol à argamassa resultante da *primeira etapa da amassadura*, apesar de também se ter alterado a concentração da SPol, pela variação da quantidade de água, este facto não teve reflexo imediato no desenvolvimento do trabalho, visto em 3.4.5 se ter estudado a concentração da SPol.

O objetivo desta Fase de amassaduras foi o de encontrar uma argamassa com boa trabalhabilidade e de execução simples, isto é, na mistura da argamassa resultante da *primeira etapa da amassadura* com a SPol, introduzida na *segunda etapa da amassadura*.

Devido ao facto de o PVA reagir com a água e de forma a ter um leque de resultados que tivesse esse fator em conta, passaram a ser realizados ensaios em provetes curados na câmara húmida e provetes que foram curados em condições de humidade ambientais. As composições das amassaduras realizadas nesta fase estão na Tabela 11.

Tabela 11- Composição das amassaduras realizadas na Fase 3.

Amassadura	Areia	Água	Cimento	SPol (PVA+H2O)
M1_PVA5	1350	125	315	(135+150)
M2_PVA5	1350	175	315	(135+185)
M3_PVA5	1350	150	315	(135+175)
M4_PVA24	1350	125	405	(45+150)
M5_PVA24	1350	125	405	(45+175)

### 3.4.5-Fase 4

Otimizada a forma de realizar a amassadura (*segunda etapa*), e a quantidade de água utilizada na primeira fase da amassadura e na solução polimérica, definida na Fase 3, passou-se, nesta quarta fase, à determinação da concentração ótima da solução polimérica.

Para a obtenção da concentração ótima da solução polimérica, foi mantida a composição da primeira parte da amassadura, quantidades de areia, água e cimento mantiveram-se as definidas na Fase 3, efetuando-se alterações na concentração da SPol adicionada na segunda parte da amassadura, de forma a criar um gráfico (curva) que represente a evolução da resistência à compressão em função da concentração da solução polimérica, isto é a curva de concentração ótima, que defina a concentração ideal (resistência máxima), para dar seguimento ao trabalho.

A curva de concentração ótima foi criada com uma solução onde a quantidade de polímero se manteve constante, alterando apenas a quantidade de água (composições A a F da Tabela 12).

Como forma de verificar a importância do polímero para a resistência à compressão foram testadas argamassas em que a concentração da SPol foi alterada mantendo a quantidade de água e variando a quantidade de polímero composições D, G e H da Tabela 12).

Tabela 12- Composição das amassaduras realizadas na Fase 4.

Amassadura	Quantidades (g)			
	Areia	Água	Cimento	SPol (PVA+H2O)
A	1350	175	315	(135+145)
B	1350	175	315	(135+160)
C	1350	175	315	(135+185)
D	1350	175	315	(135+200)
E	1350	175	315	(135+250)
F	1350	175	315	(135+300)
G	1350	175	315	(75+200)
H	1350	175	315	(150+200)

### 3.4.6-Fase 5

Após a definição da forma de realizar a amassadura e determinada a concentração da solução polimérica, o objetivo passou a ser encontrar a resistência à compressão pretendida, para uma argamassa leve, objetivo definido na Fase 2. Para isso, nesta fase a quantidade de cimento (que se mantinha a mesma desde a fase inicial) foi sendo reduzida tendo em vista obter resistências à compressão aos 28 dias próximas de 1MPa. Este valor foi estimado para os provetes curados na câmara húmida.

Simultaneamente foram realizadas amassaduras em que se substituiu areia por PVA. Partindo da amassadura em que se previa uma resistência à compressão aos 28 dias de 1MPa, a amassadura K, a substituição foi feita usando um volume equivalente de PVA usado em solução com a concentração definida na Fase 4, onde foi acrescentada SPol à já existente na

composição da amassadura K, a substituição foi feita para metade da areia, 675g, e para a totalidade 1350g, na Tabela 13 são apresentadas as composições das amassaduras realizadas nesta fase.

Tabela 13-- Composição das amassaduras realizadas na Fase 5

Amassadura	Quantidades (g)			
	Areia	Água	Cimento	Spol (PVA+H2O)
B	1350	175	315	(135+160)
I	1350	175	250	(135+160)
J	1350	175	200	(135+160)
K	1350	175	150	(135+160)
L	1350	175	120	(135+160)
M	675	175	150	(350+416)
N	----	175	150	(700+832)

### 3.4.7-Fase 6

Nesta fase do trabalho pretendeu-se caracterizar as argamassas K e L seleccionadas na Fase 5 e, também, duas novas composições, M e N, identificadas na Tabela 13, tanto no estado fresco como endurecido.

No estado fresco foi analisada a massa volúmica aparente e avaliada a consistência e a trabalhabilidade usando o ensaio de espalhamento.

No estado endurecido, foram avaliadas as características mecânicas através da realização de ensaios de resistência à compressão (efetuados em 5 idades diferentes e para condições de cura ambientais e em câmara húmida) e à tração por compressão diametral (realizados aos 28 dias de idade, com cura em condições ambientais). Foram, também, avaliadas características

físicas, designadamente a absorção de água por imersão e a absorção de água por capilaridade, ambas aos 28 dias de idade.

Na caracterização da amassadura N, devido às condicionantes que são apresentadas ao longo do trabalho, não foram realizados ensaios de resistência à tração e à absorção por capilaridade, no que diz respeito à resistência à compressão apenas foram ensaiados provetes curados em condições ambientais (também condicionados como será descrito ao longo trabalho) devido ao comportamento apresentado na presença de humidade.

## **4-APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **4.1-Introdução**

No desenvolvimento do trabalho, como já foi explicado anteriormente, estabeleceram-se diferentes fases de desenvolvimento do trabalho experimental. Neste capítulo serão apresentados os resultados mais significativos, obtidos nessas fases, de forma a explicar as decisões tomadas até serem obtidas as composições objeto de uma caracterização mais pormenorizada.

### **4.2-Fase 1**

Na Tabela 14 são apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão aos 7 dias, o espalhamento e o peso dos provetes depois da cura. Os resultados apresentados referem-se à média de 3 provetes, ensaiados para cada amassadura diferente.

Tabela 14- Resultados obtidos na Fase 1.

Amassadura	Massa (g)	Espalhamento (mm)	Resistência à compressão (MPa)
Padrão	278	158	25,83
PVA-5 10%	223	165	4,74
PVA-5 20%	216	158	4,15
PVA-5 30%	210	146	3,61
PVA-24 5%	265	156	16,76
PVA-24 7,5%	218	129	7,34
PVA-24 10%	222	108	7,57

Como é possível observar por intermédio da análise dos resultados apresentados na Tabela 14, a resistência à compressão apresentou uma redução muito significativa, quando comparadas as amassaduras em que foi adicionando PVA com a composição padrão. De modo análogo, verificou-se uma diminuição do peso dos provetes curados, como se pode verificar pela análise das Figura 10 e, onde são apresentadas a variação da resistência à compressão e do peso dos provetes em função da percentagem de polímero usado em substituição do cimento. Associando estes dois fatores admitiu-se que a baixa resistência apresentada pelas composições em que foi adicionado o PVA se devia à compacidade da argamassa ser baixa, provavelmente devido à incorporação do polímero provocar a um aumento do teor de ar conforme referido em 2.3.2-Estado fresco, que não foi possível retirar durante o processo de vibração.

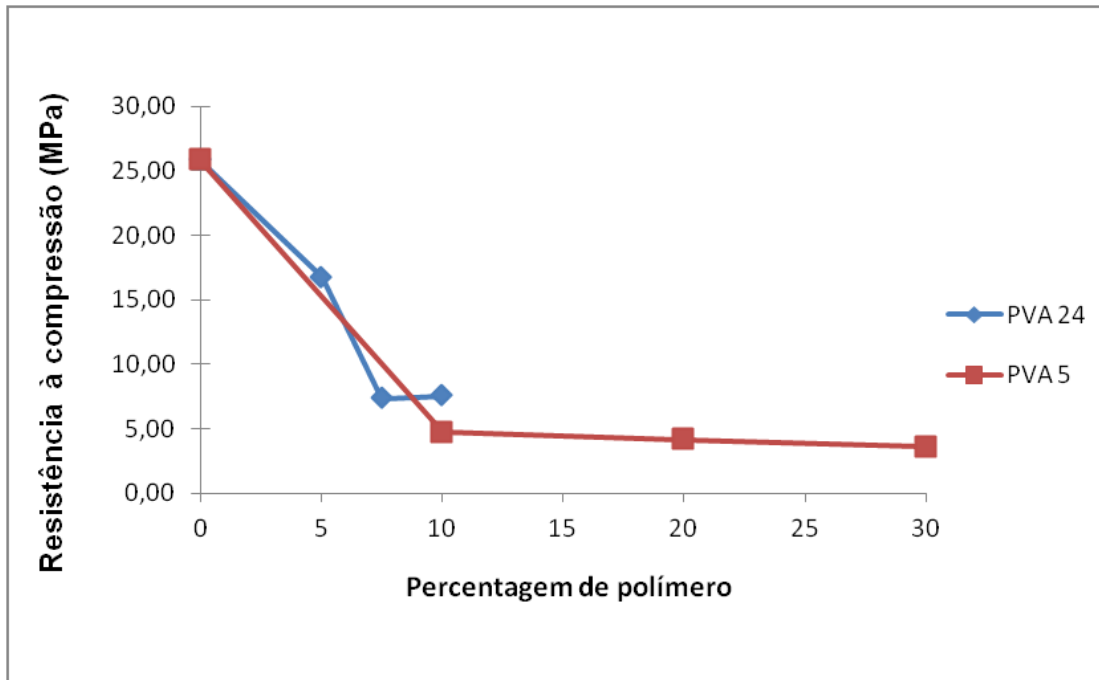


Figura 10- Resultados obtidos para a resistência à compressão na Fase 1.

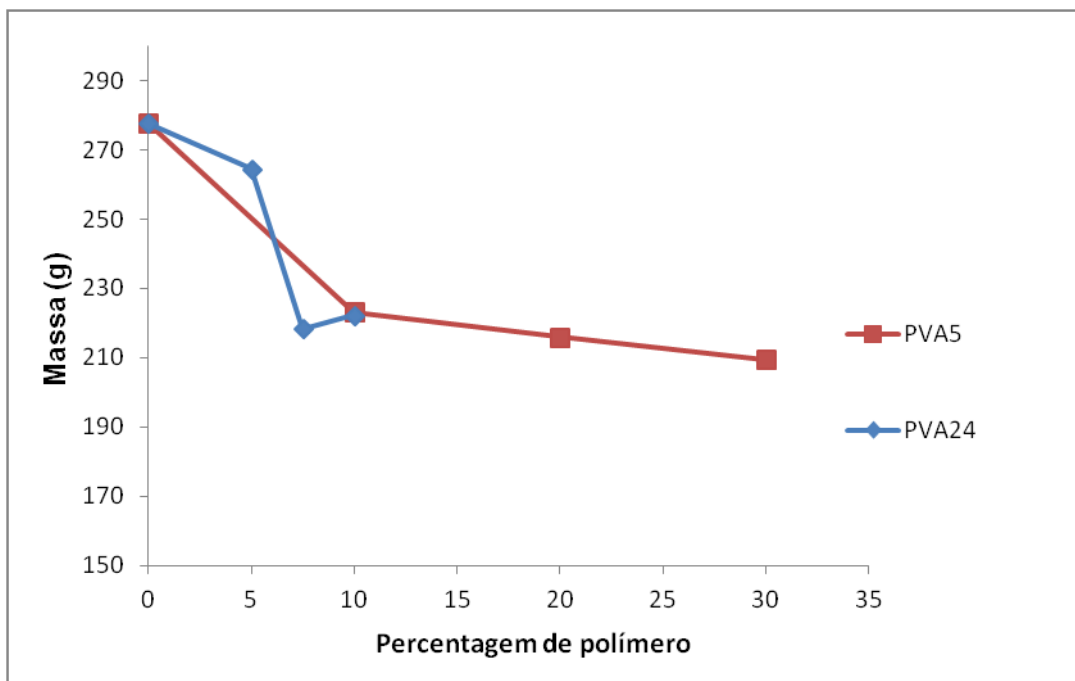


Figura 11- Resultados obtidos para a massa dos provetes ensaiados na Fase 1.

### 4.3-Fase 2

Nesta fase, em que se tentou aumentar a compacidade da argamassa de forma a aumentar a sua resistência à compressão, os resultados obtidos nas diversas tentativas efetuadas não evidenciaram melhorias significativas relativamente à composição padrão, como é possível verificar na Figura 12.

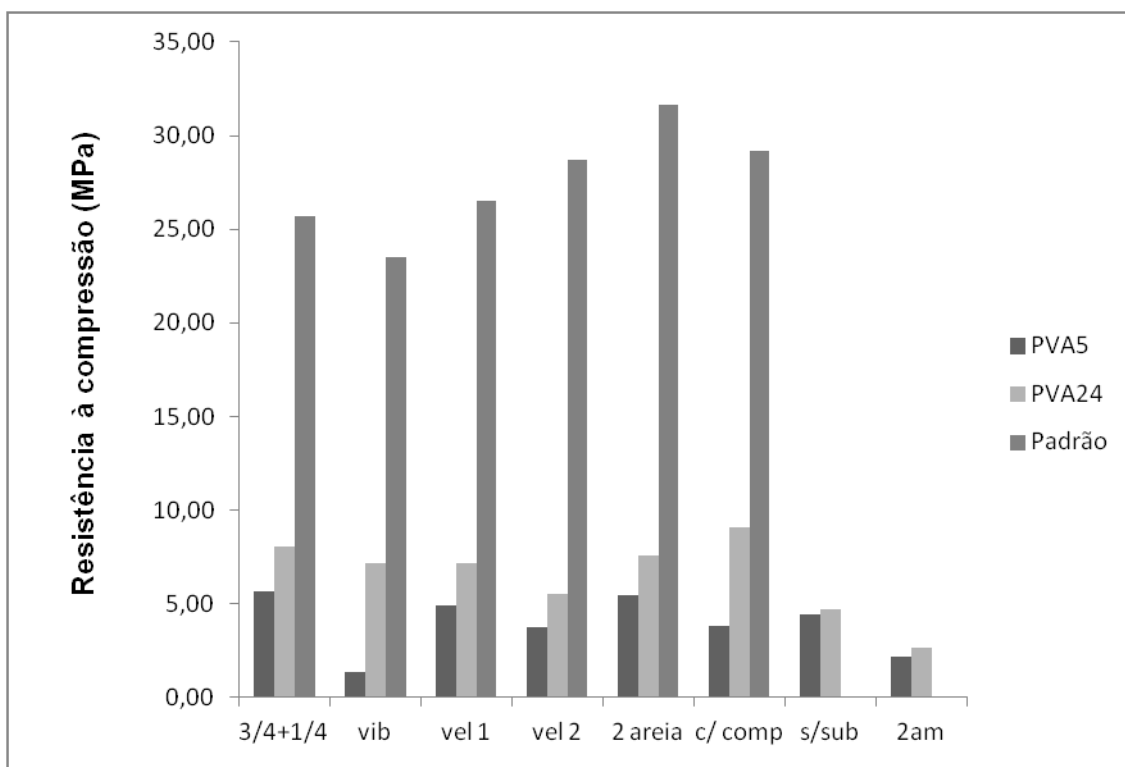


Figura 12-Resultados obtidos na Fase 2 para cada forma diferente de realizar a amassadura.

Conforme atrás referido (3.4.3), a resistência à compressão não apresentou melhorias com a variação nas condições de fabrico testadas. Analisando o peso dos provetes verificou-se que a forma de realizar a *amassadura em 2 etapas* (2am) conduziu a uma redução significativa do peso, quando comparado com as amassaduras realizadas na Fase 1, conforme se poder verificar na Tabela 15.

Devido aos resultados, a resistência à compressão, baixou significativamente quando comparada com a amassadura padrão, e a diminuição da massa volúmica, decidiu-se seguir o caminho de criar uma argamassa leve adotando o método da *amassadura em 2 etapas* para produzir a argamassa.



Tabela 15-Valores da massa obtidos na Fase 2

Amassadura	Massa (g)		
	PVA5	PVA24	Padrão
3/4+1/4	229	232	282
vib	221	233	279
vel 1	232	228	275
vel 2	205	226	276
2 areia	218	231	277
c/ comp	204	236	275
s/sub	195	219	---
2am	189	204	---

#### 4.4-Fase 3

Nesta fase do trabalho foram testadas várias amassaduras com as alterações já mencionadas em 3.3.4 de forma a encontrar uma composição que permitisse criar uma argamassa com as características desejadas, tanto a nível de resistência à compressão, como fundamentalmente, ao nível da trabalhabilidade e da facilidade da execução da amassadura em ambas as *etapas* em que se realiza a amassadura.

As alterações à quantidade de água na primeira fase da amassadura tiveram como objetivo facilitar a execução da amassadura, isto é, uma maior quantidade de água na *primeira etapa da amassadura*, permitiu realizar de forma mais simples a *segunda etapa da amassadura*, ou seja, a mistura entre a argamassa da *primeira etapa da amassadura* com a SPol e obter uma melhor trabalhabilidade por reduzir a viscosidade da argamassa final.

A escolha pelo PVA5 deveu-se à maior facilidade em controlar os efeitos provocados pelas alterações da concentração da SPol, devido a apresentar menor viscosidade as alterações feitas mostraram-se mais controláveis e menos propensas aos erros na produção da SPol, a opção pela concentração da SPol apesar de ter sido tido em conta nesta fase, é trabalhada de forma mais detalhada mais à frente no trabalho. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 16,

que ao contrário das outras Fases do trabalho não foram fatores de decisão do caminho a seguir

Tabela 16 Resultados obtidos na Fase 3.

PVA5	Massa (g)	Resistência à compressão (MPa)	Espalhamento (mm)
M1 Câmara húmida	191	2,16	151
M1 Ambiental	178	5,64	
M2 Câmara húmida	176	1,29	139
M2 Exterior	167	3,67	
M3 Câmara húmida	208	2,69	134
M3 Ambiental	200	8,63	
PVA24	Massa (g)	Resistência à compressão (MPa)	Espalhamento (mm)
M4 Câmara húmida	216	6,42	134
M4 Ambiental	207	10,75	
M5 Câmara húmida	225	7,96	150
M5 Ambiental	213	10,74	

#### 4.5-Fase 4

A Figura 13 apresenta o gráfico obtido para a curva de concentração ótima da SPol, em função da resistência à compressão (aos 7 dias) com os resultados a serem apresentados na Tabela 17. Partindo da composição M2 da Fase 3, construiu-se a curva de concentração ótima, que tal como foi dito em 3.4.5, avalia a influência da concentração da SPol na resistência à compressão.

De forma a verificar a influência da água presente na SPol na resistência à compressão alterou-se a concentração da SPol de duas formas, na primeira, *Polímero constante*, a concentração foi alterada através da variação da quantidade de água da SPol e *Água constante*, neste caso a variação da concentração da SPol foi feita pela variação da quantidade de polímero, neste caso apenas foram testadas as concentrações mais baixas, verificando-se que as curvas apresentam um comportamento semelhante.

A concentração ótima da SPol situou-se nos 84% (135 g de polímero/165 g de água), em que as resistências à compressão foram de 2,58MPa e 4,92MPa para os provetes curados na câmara húmida e em condições ambientais respetivamente Apesar da grande diferença dos resultados da resistência à compressão para as diferentes condições de cura continuaram a ser testadas as duas formas de cura de forma a se obter um leque mais alargado de resultados, para melhor compreensão dos efeitos da incorporação do PVA.

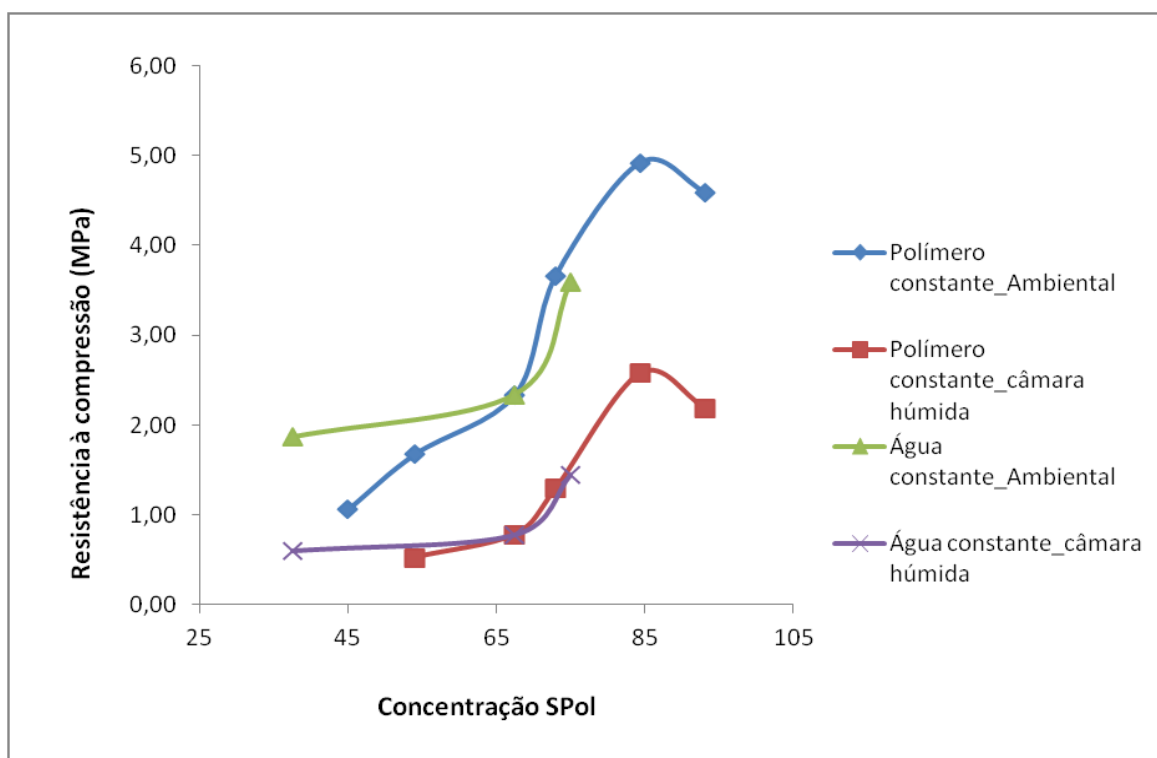


Figura 13-Curva de concentração ótima.

Tabela 17- Resistência à compressão da Fase 4.

Amassadura	Concentração da SPol (%)	Tipo de cura	
		Câmara húmida	Ambiental
		Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
A	93	2,19	4,59
B	84	2,58	4,92
C	73	1,29	3,67
D	68	0,78	2,34
E	54	0,52	1,68
F	45	0,50	1,06
G	38	0,60	1,87
H	75	1,45	3,60

#### 4.6-Fase 5

A Figura 14 apresenta o gráfico da evolução da resistência à compressão aos 7 dias à medida que se reduz a quantidade de cimento. Na Tabela 18 são apresentados os resultados da resistência à compressão e o peso dos provetes, das amassaduras K e L (com 150g e 120g de cimento respetivamente) as que mais provavelmente atingiriam o objetivo pretendido (apresentarem 1MPa de resistência à compressão aos 28 dias) e, assim, serão alvo de um estudo mais pormenorizado numa fase mais adiantada.

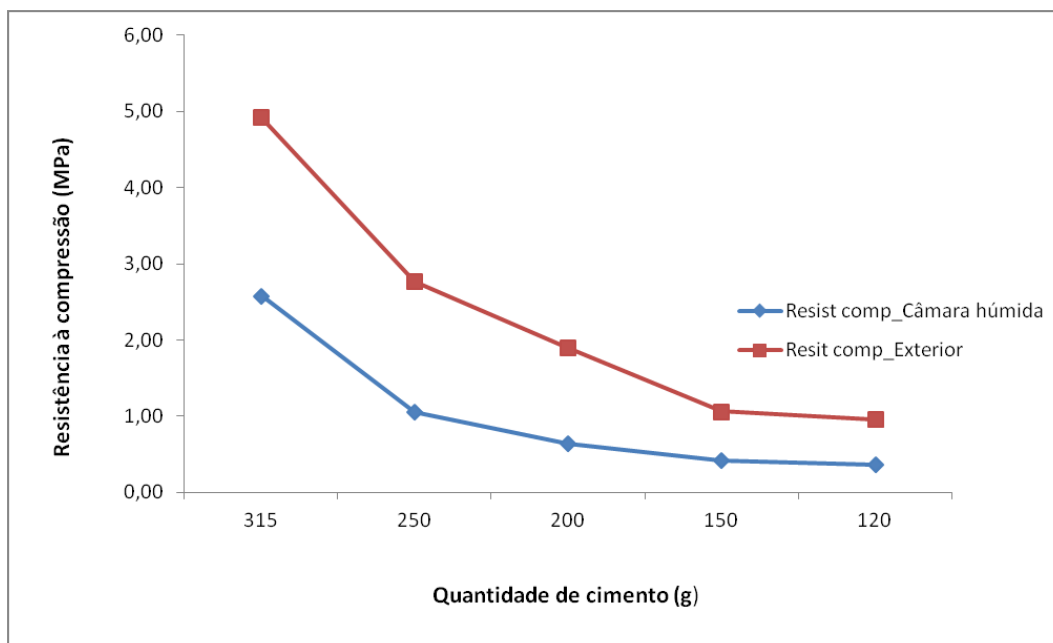


Figura 14- Evolução da resistência à compressão com a diminuição da quantidade de cimento.

As amassaduras M e N onde foi substituída a areia, tiveram como base a amassadura K, 150g de cimento e os respetivos resultados são apresentados na Tabela 18, foi possível observar que os provetes estas duas amassaduras sofreram retração, apresentando as seguintes dimensões  $48 \times 48 \times 46 \text{ mm}^3$  para a amassadura M e  $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  no caso da amassadura N, devido a ser a primeira vez que foi observada a existência de retração, é possível dizer que se deveu à substituição da areia por PVA.

No caso da amassadura N devido a não ser possível curar os provetes, nem na câmara húmida nem em condições de humidade ambientais, de forma a serem ensaiados aos 7 dias foram curados numa estufa com condições de temperatura e humidade controladas, sendo usada uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  e a humidade relativa de 50%. Após os 7 dias de idade, os provetes foram mantidos em condições de humidade ambientais. De salientar, também, que na realização dos ensaios à compressão os provetes não entraram em rotura. No próximo capítulo será apresentada a forma utilizada para comparar as características das diferentes composições no que diz respeito à resistência à compressão.

Tabela 18- Resultados obtidos Fase 5.

Amassadura	Resistência à compressão (MPa)	Massa (g)
K_Câmara húmida	0,42	164
K_Ambiental	1,06	161
L_Câmara húmida	0,37	161
L_Ambiental	1,02	151
M_Câmara Húmida	0,34	107
M_Ambiental	0,36	100
N*	----	69

## 4.7-Fase 6

### 4.7.1-Characterização no estado fresco

Na Tabela 19 são apresentados os resultados dos ensaios realizados no estado fresco, espalhamento e a massa volúmica, bem como a dosagem de cimento necessária para produzir 1m<sup>3</sup> de argamassa.

Tabela 19- Resultados obtidos nos ensaios realizados no estado fresco na Fase 6

Amassadura	Espalhamento (mm)	Argamassa Fresca (kg/m <sup>3</sup> )	Dosagem cimento (kg/m <sup>3</sup> )
K	125	1321	104
L	138	1308	84
M	152	1104	91
N	105	760	76

Os valores obtidos para o espalhamento encontram-se dentro dos habitualmente observados para argamassas, com exceção da amassadura N em que o valor é bastante baixo, tendo sido notório durante a colocação da argamassa nos moldes a excessiva viscosidade que não se verificou nas restantes amassaduras. A massa volúmica da argamassa fresca apresenta valores bastante baixos. No caso das amassaduras K e L os valores são bastante próximos. Nas amassaduras em que foi substituída a areia os valores da massa volúmica fresca são ainda mais baixos com destaque para a amassadura N que apresenta um valor inferior ao da massa volúmica da água. A dosagem de cimento destas argamassas apresenta valores bastante baixos quando comparado com outras argamassas leves que de que apresentam valores da ordem dos  $150\text{Kg/m}^3$  (Martins & Assunção, 2010) ou com argamassas leves existentes no mercado como as argamassas “betcel” e “betespuma” que apresentam  $167\text{ Kg/m}^3$  e  $250\text{ Kg/m}^3$  respetivamente, as argamassas da Vermiculita apresentam dosagens de cimento em os 200 e os  $500\text{ Kg/m}^3$ .

#### **4.7.2-Resistência à compressão**

As Figura 15 e Figura 16 apresentam a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo para os provetes curados na câmara húmida (Figura 15) e em condições de humidade ambientais (Figura 16), para as amassaduras K, L e M, sendo que as amassaduras K e L apresentam diferenças na dosagem de cimento utilizadas, 150g na amassadura K e 120g na L. A amassadura M tem a mesma dosagem de cimento da K, 150g e metade da quantidade de areia foi substituída por PVA conforme descrito em 3.4.6.

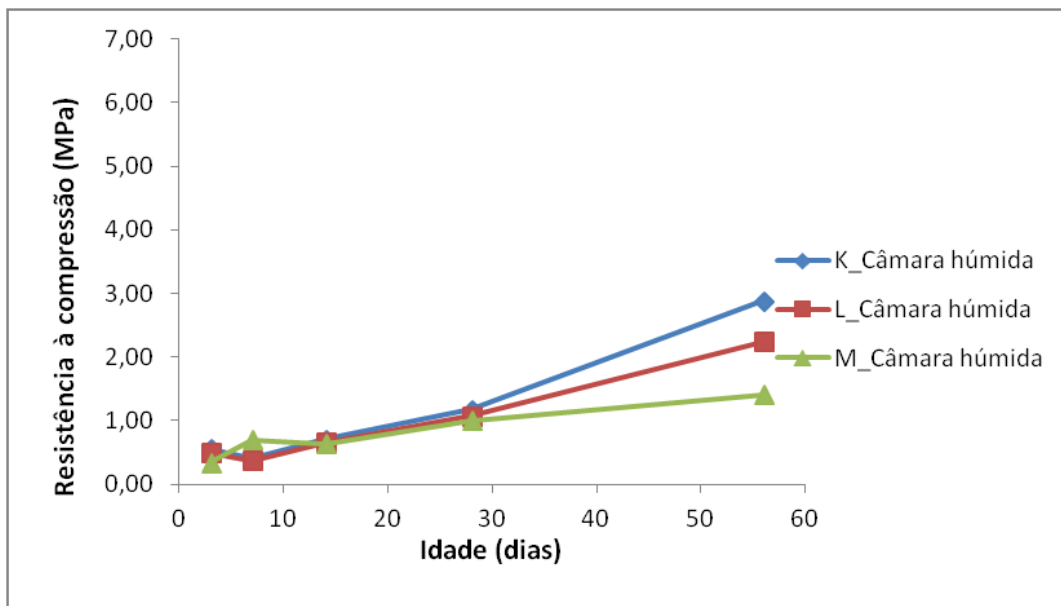


Figura 15- Evolução da resistência à compressão dos provetes curados na câmara húmida (Fase 6).

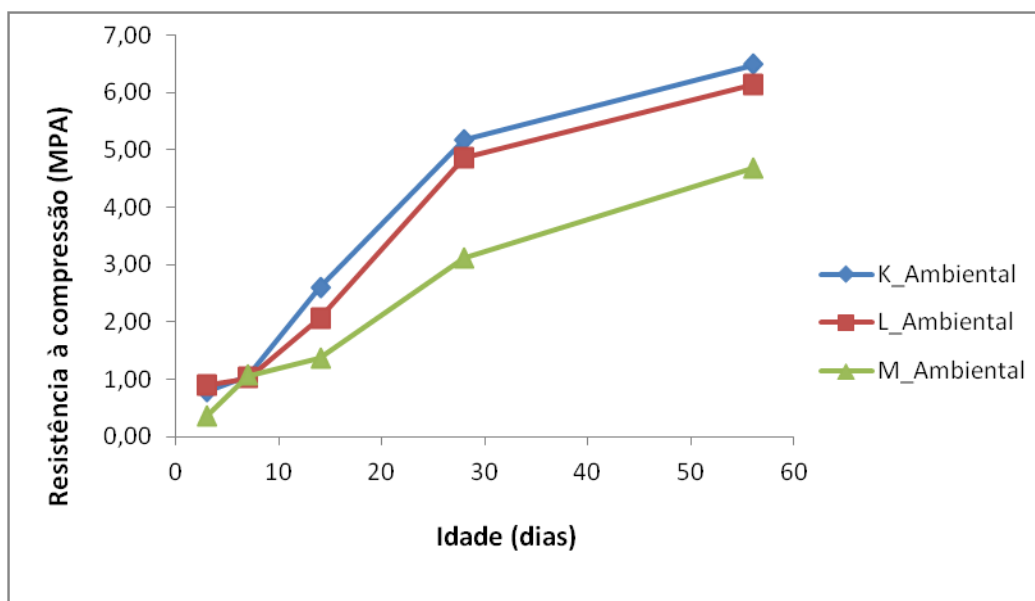


Figura 16- Evolução da resistência à compressão dos provetes curados em condições ambientais (Fase 6).

Como é possível ver, os provetes curados na câmara húmida apresentam valores inferiores aos curados em condições ambientais devido à humidade influenciar o comportamento do PVA. Para os provetes curados em condições ambientais (menor humidade) a resistência à compressão aumentou significativamente, sendo notório, também que para as amassaduras em que não é substituída a areia (K e L), a cura em condições ambientais proporciona uma maior



rapidez no desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo do que os curados na câmara húmida.

Este facto é particularmente notório entre os 14 e os 28 dias em que os provetes curados em condições ambientais apresentam uma grande subida da resistência, no caso da amassadura K a subida foi de 99% e da amassadura L 134% para o intervalo dos 14 aos 28 dias, tendo aumentado 25% e 26%, K e L respetivamente para o intervalo de tempo entre os 28 e 56 dias, enquanto os provetes curados na câmara humidade apresentam um aumento de resistência à compressão de 66% na amassadura K e 65% na L entre os 14 e os 28 dias, enquanto para o intervalo de tempo entre os 28 e os 56 dias registou-se um aumento da resistência de 144% para a amassadura K e de 109% para a L.

O comportamento da resistência à compressão da amassadura M é semelhante ao das amassaduras K e L para as condições ambientais, 127% entre os 14 e os 28 dias e 50% entre os 28 e os 56 dias, para a cura na câmara húmida o aumento da resistência foi semelhante para os dois intervalos de tempo 58% e 42% respetivamente.

A Tabela 20 apresenta os valores da resistência à compressão ( $f_c$ ), da massa e da massa volúmica aparente ( $\gamma$ ) e os respetivos coeficientes de variação ( $C_v\%$ ) para as diferentes idades e amassaduras, a massa volúmica das amassaduras M e N foi calculada tendo em conta o volume apresentado pelos provetes tendo em conta a retração verificada, o volume apresentado em 4.6 para os 7 dias,  $48 \times 48 \times 46 \text{ mm}^3$  para a amassadura M e  $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  para a amassadura N, manteve-se semelhante em todas as idades ensaiadas. No que diz respeito à massa volúmica, por observação dos valores obtidos, podem-se classificar as misturas, de acordo com a norma EN 998-1, como argamassas leves.

Tabela 20- Resumo dos resultados obtidos para os provetes ensaiados à compressão na Fase 6.

Amassadura	Idade (dias)	Ambiental					Câmara húmida				
		Massa (g)	C <sub>v</sub> % (massa)	γ (kg/m <sup>3</sup> )	f <sub>c</sub> (Mpa)	C <sub>v</sub> % (f <sub>c</sub> )	Massa (g)	C <sub>v</sub> % (massa)	γ (kg/m <sup>3</sup> )	f <sub>c</sub> (Mpa)	C <sub>v</sub> % (f <sub>c</sub> )
K	3	170	1,3	1358	0,79	3,7	180	1	1437	0,55	2,9
	7	161	1,5	1287	1,06	9,0	164	0	1311	0,42	5,0
	14	153	1,0	1222	2,60	13,3	167	1	1334	0,71	6,1
	28	143	0,9	1148	5,17	3,7	162	4	1299	1,18	5,8
	56	139	1,2	1113	6,48	3,0	157	1	1257	2,88	3,0
L	3	161	1,8	1290	0,90	3,9	174	2	1390	0,50	10,9
	7	151	2,1	1209	1,02	1,1	161	1	1287	0,37	3,1
	14	142	0,8	1137	2,07	4,4	159	0	1271	0,65	6,7
	28	142	0,7	1133	4,85	3,2	159	1	1268	1,08	9,7
	56	140	1,9	1117	6,13	5,7	155	2	1240	2,25	5,7
M	3	119	0,4	1080	0,36	2,6	131	3	1181	0,34	5,6
	7	100	5,1	902	1,07	4,5	107	3	968	0,70	10,5
	14	94	3,7	853	1,37	9,9	119	3	1074	0,63	10,9
	28	91	3,1	827	3,11	7,9	111	7	1007	0,99	2,4
	56	91	6,7	818	4,68	10,5	104	4	939	1,41	4,1
N	7	69	5,1	932	---						
	14	62	4,9	843	---						
	28	59	8,9	801	---						
	56	54	6,7	732	---						

Não se apresenta a resistência à compressão da argamassa N, uma vez que esta não chegou a entrar em rotura, como é visível na Figura 17, onde é mostrado o provete antes, durante e no final do ensaio, sendo também possível verificar que além de sofrer uma grande deformação recupera grande parte da mesma quando se retira a carga.

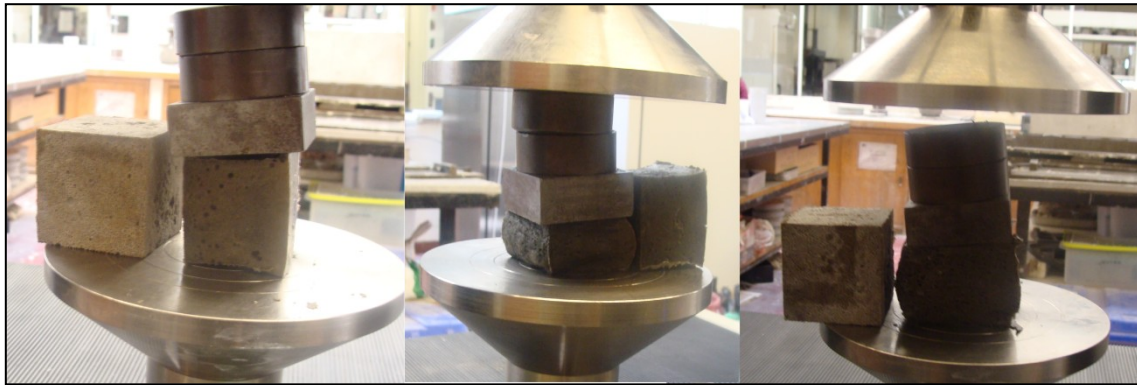


Figura 17-Comportamento dos provetes da amassadura N ao longo do ensaio de resistência à compressão.

De forma a efetuar uma comparação entre a amassadura N e as restantes foi comparada a rigidez aparente, tendo em conta os gráficos tensão-extensão obtidos para as diferentes composições ensaiadas. Partindo da Equação 6, usada para calcular o módulo de elasticidade, embora neste caso devido a se considerar o valor de  $l_0$ , a altura total do provete, não considerando o efeito de cintagem que as superfícies dos provetes sofrem em contato com os pratos da prensa, os resultados apresentados não podem ser chamados de módulo de elasticidade, mas representa uma rigidez aparente.

$$E = \frac{F}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (6)$$

E-Módulo de elasticidade

F-Carga máxima em N

A-Área do provete em  $m^2$

$l_0$ -Altura do provete em m

$\Delta l$ -Variação da altura do provete

A evolução dos resultados da rigidez aparente é apresentada nas Figuras 18 e 19, para os provetes curados em condições ambientais e na câmara húmida respetivamente, e os valores obtidos estão na Tabela 21.

A evolução do comportamento observado é semelhante ao observado para a resistência à compressão nas Figuras 15 e 16. Ou seja, existe um aumento da rigidez aparente ao longo do tempo, com as amassaduras K e L a terem valores muito próximos e as amassaduras M e N com valores significativamente inferiores. Comparando apenas as amassaduras M e N constata-se que para idades superiores aos 7 dias a amassadura M apresenta uma rigidez aparente que é aproximadamente o dobro da amassadura N.

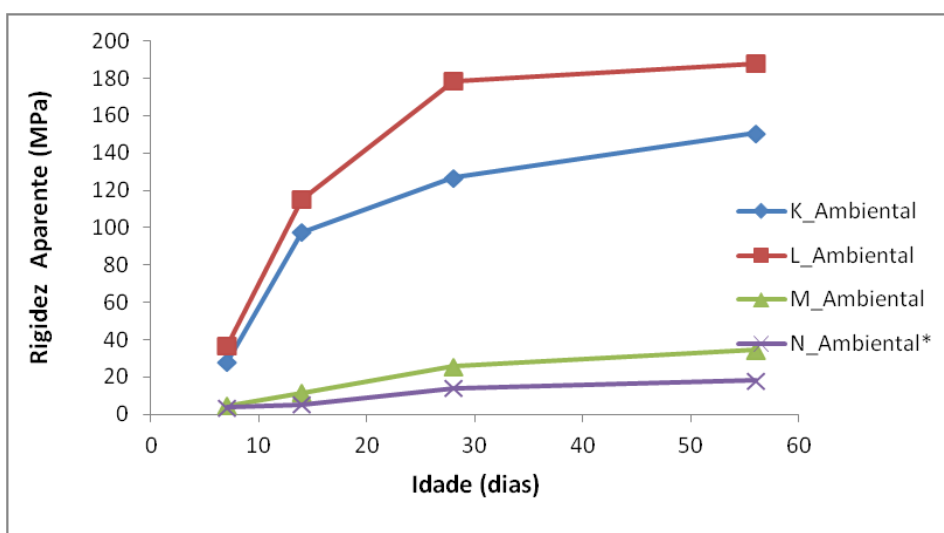


Figura 18- Evolução da rigidez aparente dos provetes curados em condições ambientais.

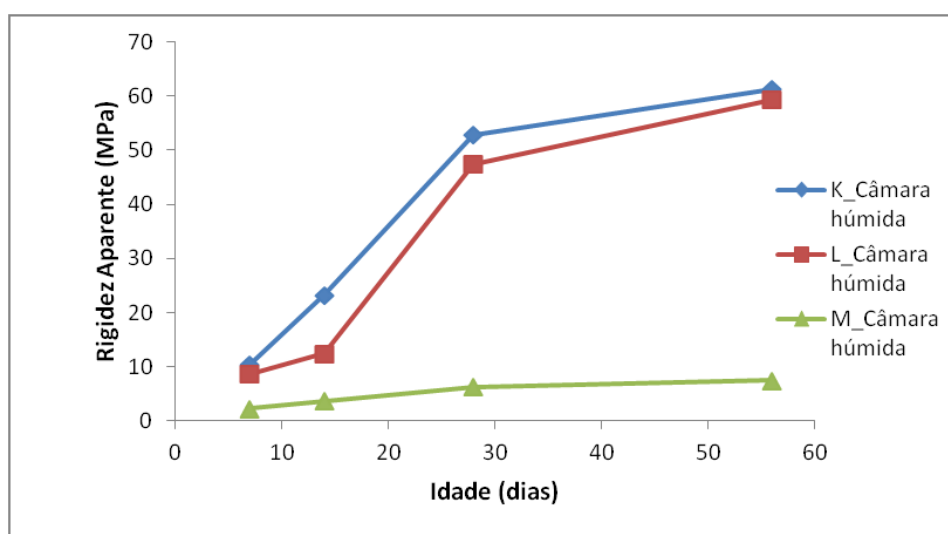


Figura 19-Evolução da rigidez aparente dos provetes curados na câmara húmida.

Tabela 21-Valores da rigidez aparente.

		Rigidez Aparente (Mpa)			
Amassadura	Idade (dias)	7	14	28	56
K	Câmara húmida	10	23	53	61
	Ambiental	28	97	127	151
L	Câmara húmida	9	12	47	59
	Ambiental	37	115	179	188
M	Câmara húmida	2	4	6	7
	Ambiental	5	12	26	34
N	Ambiental*	4	5	14	18

#### 4.7.3-Resistência à tração

Na Tabela 22 são apresentados os resultados para a resistência à tração por compressão diametral. Os valores apresentados referem-se às amassaduras K, L e M, este ensaio não foi realizado para a amassadura N pois, tendo em conta a retração sofrida nos provetes usados nos ensaios de resistência à compressão e o facto de não terem entrado em rotura, não foi possível efetuar o ensaio. Os provetes da amassadura M, também não entrarem em rotura neste ensaio, conforme é visível nas Figuras 20 e 21.

Tabela 22-Resultados da resistência à tração

Amassadura	fct (Mpa)	$\Delta L$ Máximo (mm)
K	0,49	3,5
L	0,43	3,9
M	-----	-----

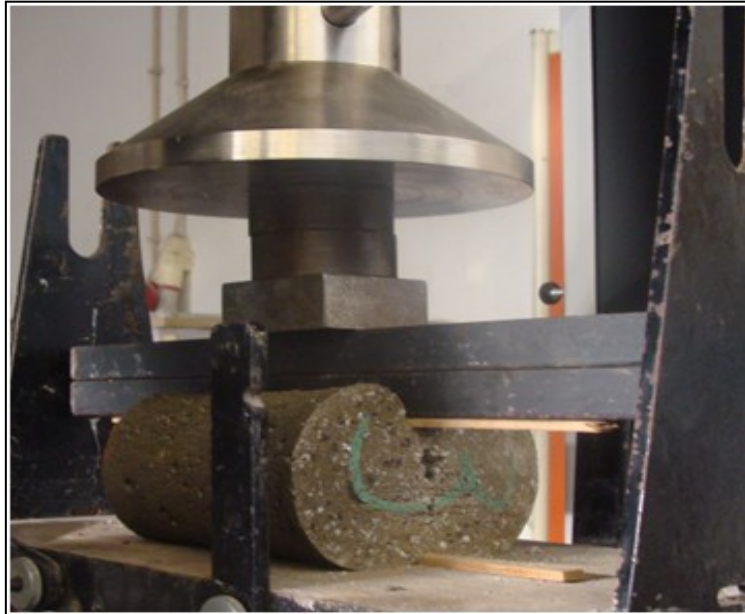


Figura 20 Comportamento dos provetes da amassadura M durante o ensaio de resistência à tração.



Figura 21- Aspeto dos provetes da amassadura M durante o ensaio de resistência à tração.

Os resultados obtidos para as composições K e L apresentam valores baixos mas dentro do esperado, a ligeira redução entre a amassadura K e a L deve-se à redução da quantidade de cimento na composição L.

A análise comparativa entre as amassaduras K e L com a M foi feita tendo por base a força de tração necessária para se obter um deslocamento de 3mm. Essa comparação foi feita de acordo com as Figuras 22 e 23, onde se pode ver o comportamento durante todo o ensaio para as diferentes amassaduras e o comportamento para um deslocamento limitado aos 5mm.

O deslocamento definido para realizar a comparação, 3mm, e a força exercida para esse deslocamento foram usadas para calcular a força de tração exercida para atingir o deslocamento de 3mm.

A comparação efetuada permite verificar uma grande diferença entre os valores obtidos para as amassaduras K e L e a amassadura M, que tem um valor quase residual, como é visível na Tabela 23 Nas pode-se ver a grande diferença de comportamento entre as amassaduras K, L e a amassadura M.

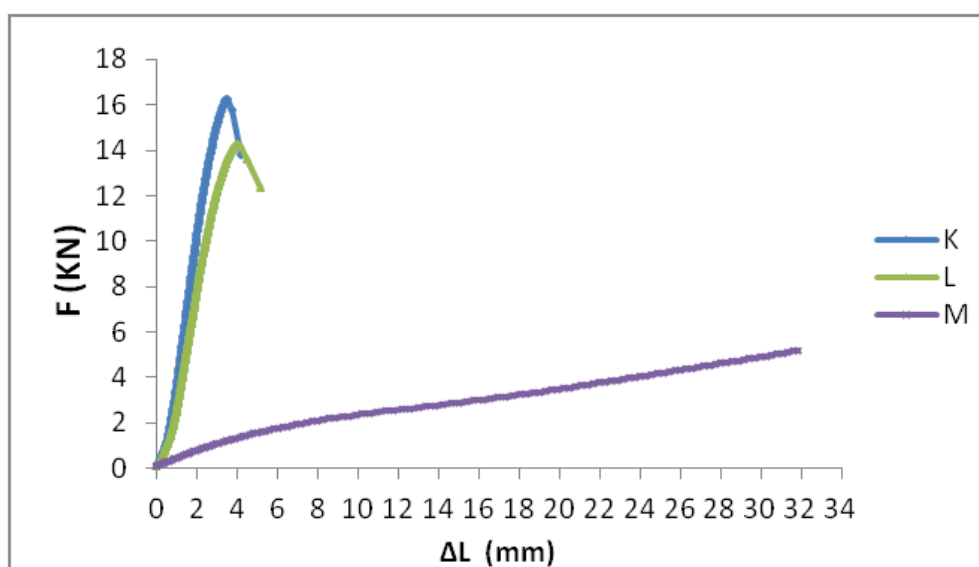


Figura 22 -Comportamento Força/Deslocamento no ensaio de resistência à tração

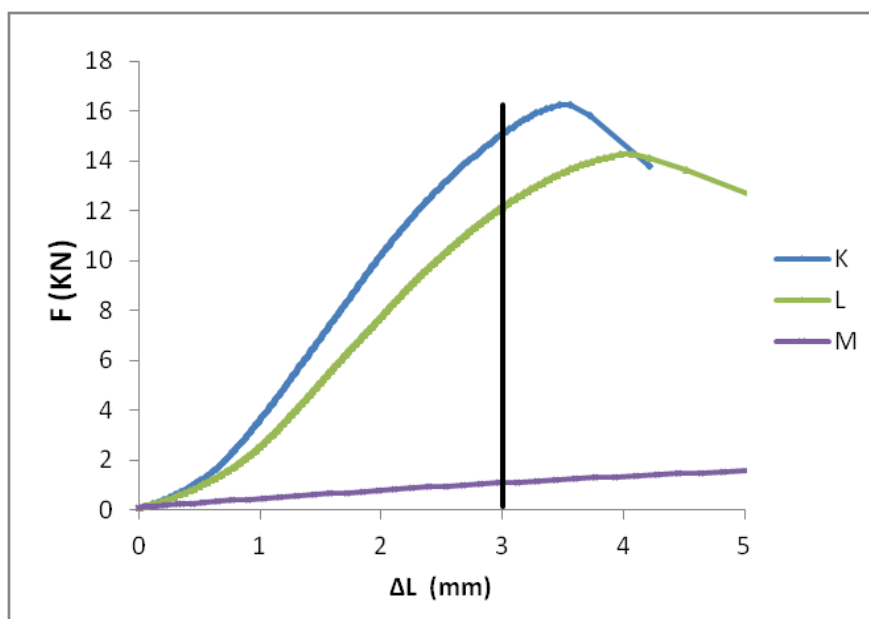


Figura 23- Comportamento Força/Deslocamento no ensaio de resistência à tração limitado aos 5mm

Tabela 23- Força de tração para um deslocamento de 3mm

Amassadura	fct para $\Delta=3\text{mm}$ (MPa)
K	0,46
L	0,38
M	0,07

#### 4.7.4-Absorção por capilaridade

A Figura 24 apresenta as curvas de absorção capilar de água para as diferentes composições testadas. Este ensaio não foi realizado para a composição N devido à dificuldade de manter os provetes na posição correta durante a realização do ensaio.

Os resultados normalmente obtidos no ensaio de absorção por capilaridade apresentam 3 fases, inicialmente, quando os capilares de maior dimensão são preenchidos, apresentam maior inclinação sendo nessa fase que se calcula o coeficiente de capilaridade, na segunda



fase em que os capilares de menor dimensão e na terceira fase em que a absorção estabiliza. Neste caso o ensaio foi interrompido antes de se atingir esse estado.

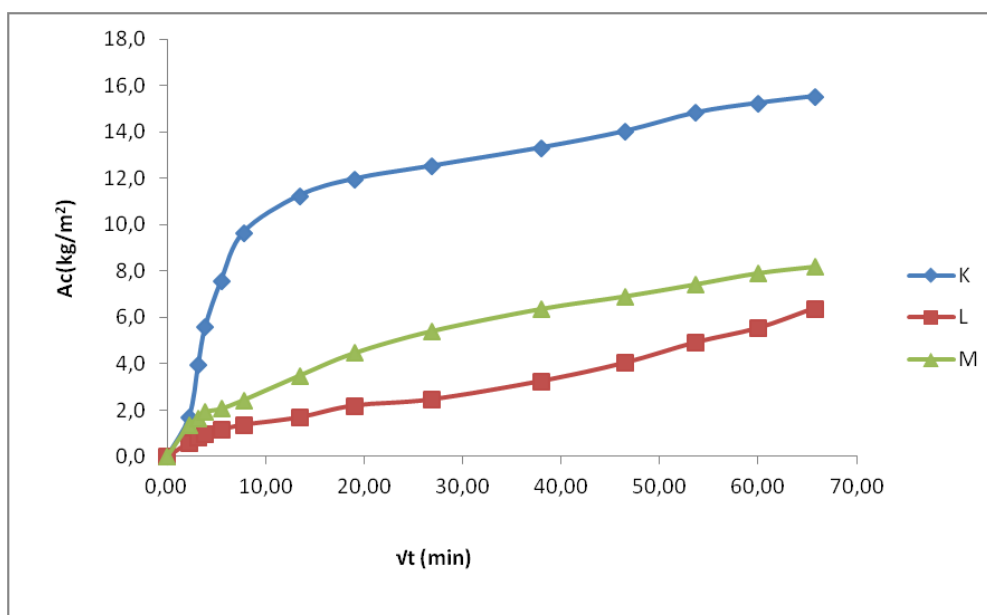


Figura 24- Curvas de absorção capilar para as diferentes amassaduras.

Os valores apresentados na Figura 25 mostram que a absorção capilar é bastante elevada, provavelmente devido à porosidade que os provetes apresentam, o que pode fazer com que não seja possível determinar corretamente este parâmetro.

O cálculo do coeficiente de capilaridade apresentou valores elevados para as composições K e M, conforme se pode ver na Figura 25, enquanto a composição L apresenta um valor mais reduzido. A variação de valores apresentada não corresponde aos valores expectáveis pois as amassaduras K e L são muito semelhantes (variação na quantidade de cimento 150g para a K e 120g para a L), e os valores do coeficiente de absorção capilar apresentam uma grande diferença que, quando comparados com a composição M (em que são usadas 150g de cimento e parte da areia foi substituída por SPol (3.3.6)), não é possível identificar um efeito claro tanto da variação do cimento como da alteração da quantidade de areia. Os resultados do coeficiente de absorção capilar ( $c_{w,s}$ ) e da correlação linear ( $R^2$ ) são apresentados na Tabela 24

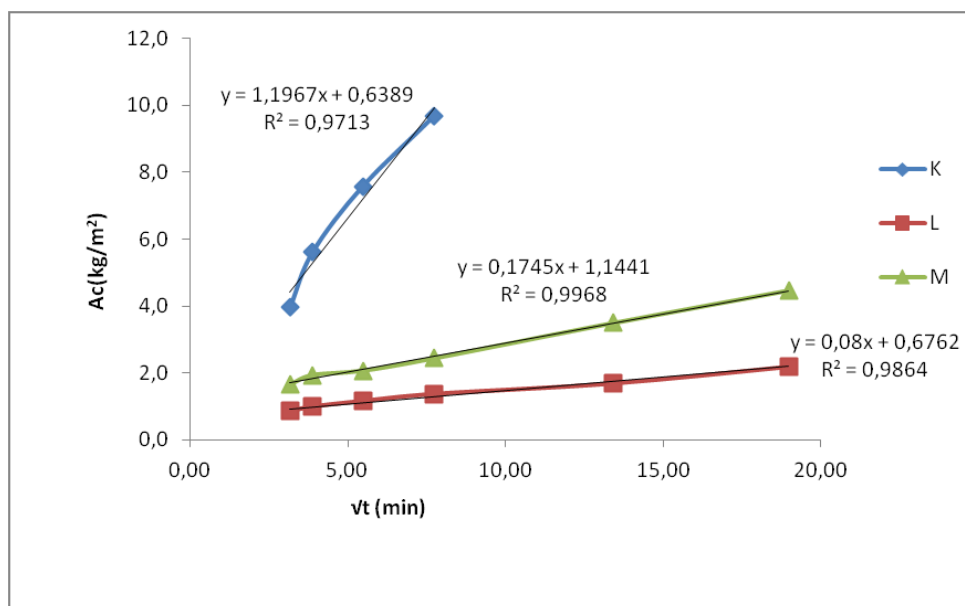


Figura 25- Coeficientes de absorção capilar para as diferentes amassaduras

Tabela 24- Coeficientes de absorção capilar.

Amassadura	$C_{w,s}$ ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ )	$R^2$ (%)
K	1,197	0,971
L	0,080	0,986
M	0,175	0,997

#### 4.7.5-Absorção por imersão

A Figura 26 apresenta os resultados da absorção de água por imersão das diferentes composições, os valores obtidos mostram uma elevada absorção de água por imersão semelhante em todas as amassaduras. Esta característica deve-se à elevada porosidade aberta apresentada pelos provetes não sendo por isso possível fazer uma análise comparativa dos resultados das diferentes amassaduras nem efetuar uma correlação entre os resultados deste ensaio com o de absorção por capilaridade.

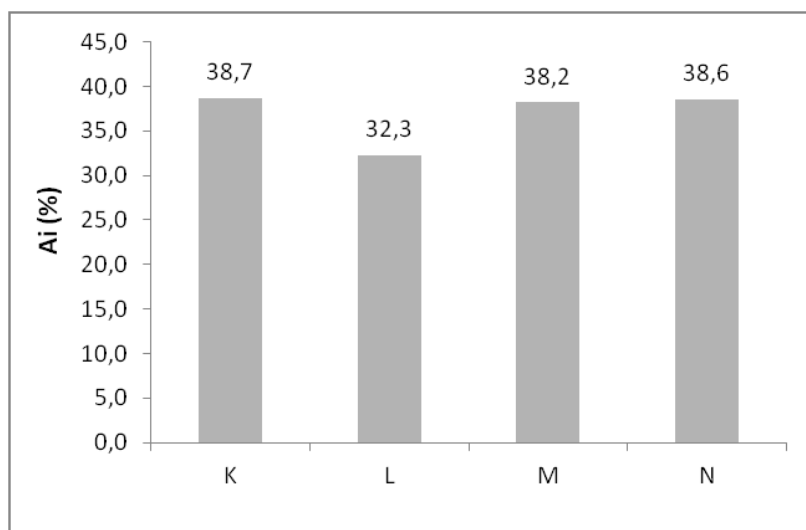


Figura 26- Coeficientes de absorção por imersão.

Durante a realização deste ensaio foi avaliada a possível degradação do polímero devido à presença de água. Para essa avaliação, após a realização do ensaio de absorção por imersão, os provetes foram novamente secos, tendo o peso obtido sido comparado com o inicial. Os resultados apresentam-se na Tabela 25 e mostram que, para as composições K, L e M, a variação do peso dos provetes foi residual, cerca de 1%. No entanto, para a composição N, a redução foi de 25% o que demonstra que existiu perda de massa. Na Figura 27 é visível a degradação da superfície dos provetes da composição N provocada pela sua permanência em água.

Tabela 25- Valores para a massa nas diferentes fases do ensaio de absorção por imersão.

Amassadura	Massa (g)				
	Inicial (seca)	Imersa	Saturada	Final (seca)	$\Delta$ massa (%)
K	144,3	70,4	190,9	143,6	-0,5
L	148,3	69,2	185,9	147,5	-0,5
M	82,3	17,2	122,5	81,3	-1,3
N	57,0	1,4	92,0	42,3	-25,9



Figura 27- Aspeto dos provetes da composição N no final do ensaio de absorção por imersão.

Neste ensaio, também foi possível verificar que os provetes das composições M e N após estarem imersos aumentaram de volume. No caso da composição M, que como já foi referido após a cura apresentavam uma dimensão média de  $48 \times 48 \times 46 \text{mm}^3$  passaram a apresentar  $50 \times 50 \times 48 \text{mm}^3$ , o que representou um aumento de 13% do volume dos provetes. Para os provetes da composição N, que inicialmente tinham  $40 \times 40 \times 40 \text{mm}^3$ , após imersão em água, aumentaram de volume para  $46 \times 46 \times 44 \text{mm}^3$ , o que representou um aumento de 45%. Nas Figura 28 Figura 29 podemos ver a comparação entre um provete após o ensaio de imersão em água e um provete não ensaiado para as amassaduras M e N, em que facilmente se comprova o aumento de volume descrito anteriormente.



Figura 28 Comparação entre os provetes da amassadura M antes e após o ensaio de absorção por imersão.



Figura 29- Comparação entre os provetes da amassadura N antes e após o ensaio de absorção por imersão.

## 5-CONCLUSÃO

### 5.1-Principais conclusões

No desenvolvimento desta dissertação procurou-se realizar os objetivos propostos no capítulo introdutório, a avaliação da introdução de PVA em argamassas. Para tal, fase foi realizada uma campanha experimental de modo a analisar o comportamento de argamassas modificadas pela incorporação de PVA enquanto substituto parcial do cimento.

A campanha experimental foi realizada através de um processo exploratório, em que a análise dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, aos 7 dias de idade, serviu como base para o caminho a seguir até à definição das composições das argamassas a caracterizar.

Numa fase inicial, tal como descrito em 4.2-Fase 1, com a substituição do cimento por PVA os resultados obtidos não estavam de acordo com a bibliografia recolhida, apresentando reduções da resistência à compressão de aproximadamente 35% a 85%, mesmo com métodos diferentes de fabrico das argamassas.

A baixa resistência à compressão obtida pode dever-se às moléculas de PVA utilizadas apresentarem características diferentes, dimensão das moléculas, grau de polimerização e da hidrólise, daquelas que os estudos apresentados na revisão bibliográfica utilizaram, outro motivo poderá ser a forma como foi preparada a solução de PVA.

Com os resultados da resistência à compressão a apresentarem valores muito inferiores aos da argamassa de referência, na evolução do trabalho experimental optou-se pela produção de uma argamassa leve.

No processo experimental definiram-se quatro argamassas para serem alvo de uma caracterização mais aprofundada. Em duas dessas argamassas além da redução da incorporação de PVA em substituição do cimento também foi efetuada a substituição de areia por PVA.

A caracterização dessas argamassas no estado fresco denotou uma baixa dosagem de cimento, apresentando valores de  $104\text{kg/m}^3$  e  $84\text{kg/m}^3$  nas argamassas em que se manteve a totalidade da areia e  $91\text{kg/m}^3$  e  $76\text{kg/m}^3$  nas argamassas em que foi substituída a areia, metade do total

e a totalidade da areia, os valores apresentados são inferiores aos de argamassas leves atualmente no mercado. A massa volúmica no estado fresco apresentou valores próximos de  $1300 \text{ kg/m}^3$  para as argamassas em que se utilizou a totalidade da areia, que as classificam como argamassas leves. No caso em que não foi utilizada areia o valor desceu para os  $760 \text{ kg/m}^3$ , sendo a única argamassa que apresentou má trabalhabilidade tendo apresentado um espalhamento de 105 mm e elevada aderência à espátula.

No que respeita à resistência à compressão a evolução mostrada ao longo do tempo é a normalmente observada em argamassas leves, aproximadamente 1MPa aos 28 dias quando a cura foi realizada na presença de humidade. A diferença entre os resultados obtidos para as diferentes condições de cura, quase 5 vezes mais alta para a cura em condições ambientais, deveu-se, provavelmente à elevada quantidade de polímero, quando comparada com a quantidade de cimento e à viscosidade da solução polimérica, que provocou a formação de um filme polimérico que, aparentemente, se sobrepôs à matriz obtida pelos produtos da hidratação do cimento.

A resistência à tração por compressão diametral, apresentou resultados baixos embora dentro do esperado por se tratar de uma argamassa leve. Neste caso, devido à elevada ductilidade da argamassa em que foi substituída metade da quantidade de areia esta não entrou em rutura.

No que diz respeito ao comportamento na presença de água, tanto nos ensaios de absorção por capilaridade e por imersão, como para a cura na câmara húmida foram visíveis os problemas normalmente associados à utilização de PVA quando na presença de água. No ensaio de absorção por capilaridade foram obtidos valores bastante diferentes para as amassaduras K e L, sendo estas 2 amassaduras semelhantes este facto ficou-se a dever provavelmente a apresentarem capilares de diferente dimensão, pequena dimensão na amassadura K e de grande dimensão na amassadura L, a amassadura M apresentou valores semelhantes à amassadura L. No ensaio de absorção por imersão em que também foram obtidos valores altos, neste caso com valores semelhantes e na ordem dos 35%. Cruzando os valores dos ensaios de absorção por capilaridade e por imersão pode-se inferir que apesar de apresentarem porosidade semelhante os poros da amassadura K são de pequena dimensão enquanto os da amassadura L são de grande dimensão. Os resultados confirmam que argamassas modificadas com PVA apresentam limitações no que diz respeito ao comportamento quando na presença de água.

No que diz respeito aos custos associados à produção destas argamassas, comparativamente à argamassa tradicional, considerando os custos aproximados dos materiais apresentados (areia 3,5€/ton, cimento 100€/ton e o PVA 1500€/ton), a argamassa tradicional, com um traço 1:5 com uma dosagem de cimento de 250 Kg/m<sup>3</sup> apresenta um custo aproximado de 30€/m<sup>3</sup>. No caso das argamassas em que foi incorporado PVA os custos são de aproximadamente 155€/m<sup>3</sup>, já em produtos comerciais são apresentados valores próximos dos 100€/m<sup>3</sup>. O elevado custo pode ser atenuado caso se utilize uma molécula diferente de PVA conforme sugerido em 5.2.

## **5.2-Propostas para trabalhos futuros**

Algumas das questões que se levantaram e não foram respondidas com este trabalho que se poderão desenvolver no futuro de forma a um melhor esclarecimento sobre este tema, podem-se referir:

- O comportamento quando na presença de água;
- A avaliação da durabilidade;
- A avaliação do módulo de elasticidade;
- A avaliação da resistência à flexão;
- A avaliação da aderência a diversos materiais;
- A avaliação enquanto isolamento térmico;
- A avaliação enquanto isolamento acústico;
- Um estudo sobre a possibilidade da redução da quantidade de PVA usado, pela avaliação de diferentes moléculas tendo em vista obter uma solução polimérica com uma viscosidade semelhante, mas com menor quantidade de polímero.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afridi, M., Ohama, Y., Demura, K. & Iqbal, M., 2003. Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, Volume 33, p. 1715–1721.
- Afridi, M. U. K., Ohama, Y., Iqbal, M. Z. & Demura, K., 1995. Water Retention and Adhesion of Powdered and Aqueous Polymer-Modified Mortars. *Cement & Concrete Composites*, Volume 17, pp. 113-118.
- Aguiar, J. L. B. d., 2001. *Materiais de Construção II-Apontamentos*. Guimarães : s.n.
- Azenha, M. & Cruz, J. S., 2011. *Bases de Projecto. Materiais. Durabilidade*. s.l.:s.n.
- Bayoumi, M., GHALY, A. & Ibrahim, I. M., 2008. The Effect of Modified Bitumen and Polymeric Emulsions Inclusion on the Microstructure, Physical, and Mechanical Properties of Concrete. *Journal of Applied Sciences Research*, Volume 4, pp. 1305-1314.
- Brick Industry Association, 2003. *Technical Notes 8 - Mortars for Brick Masonry*, s.l.: s.n.
- Briscoe, B., Luckham, P. & Zhu, S., 2000. The effects of hydrogen bonding upon the viscosity of aqueous poly(vinyl alcohol) solutions. *Polymer* 41, pp. 3851-3860.
- Bureau, L., Alliche, A., Pilvi, P. & Pascal, S., 2001. Mechanical characterization of a styrene-butadiene modified. *Materials Science and Engineering*, pp. 233-240.
- Chandra, R. & Rustgi, R., 1998. BIODEGRADABLE POLYMERS. *Progress in Polymer Science*, Volume 23, pp. 1273-1335.
- CINCOTTO, M. A., 1995. *Argamassas de Revestimento: Características, Propriedades e Métodos de Ensaio*. São Paulo: s.n.
- Ferreira, A. J. M., 2001. *Introdução aos betões e argamassas poliméricas*. Porto: s.n.
- Ferreira, R. M. & Jalali, S., 2001. Avaliação dos Ensaio Correntes para a Medição. *Revista Engenharia Civil*, Setembro, pp. 41-54.
- Fowler, D. W., 1999. Polymers in concrete: a vision for the 21st century. *Cement & Concrete Composites* 21 , pp. 449-452.
- Geemert, D. V. et al., 2005. *Cement concrete and concrete-polymer composites: Two merging worlds..* s.l., Cement & Concrete Composites Vol. 27 , pp. 926-933.
- Geist, J. M., Amagna, S. V. & Mellor, B. B., 1953. Improved Portland Cement Mortars with Polyvinyl Acetate Emulsions. *Industrial and Engineering Chemistry*, Abril, pp. 759-767.
- Gündüz, L., Bekar, M. & Sapci, N., 2007. Influence of a new type of additive on the performance of polymer-lightweight mortar composites. *Cement & Concrete Composites* , Volume 29, p. 594–602.

- Ismail, H. K. M., Fathi, M. S. & Manaf, N. b., s.d. *STUDY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE BEHAVIOUR*, s.l.: s.n.
- Ismail, Z. Z. & Al-Hashmi, E. A., 2011. Assessing the recycling potential of industrial wastewater to replace fresh water in concrete mixes: application of polyvinyl acetate resin wastewater. *Journal of Cleaner Production*, Janeiro-Fevereiro, pp. 197-203.
- Ismail, Z. Z. & Al-Hashmi, E. A., 2011. Assessing the recycling potential of industrial wastewater to replace fresh water in concrete mixes: application of polyvinyl acetate resin wastewater. *Journal of Cleaner Production*, Volume 19, pp. 197-203.
- Kanamoto, T., Kiyooka, S. & Tovmasyan, Y., 1990. Effect of molecular weight on drawing poly(vinyl alcohol) from solution-grown crystal mats. *Polymer*, Volume 31, pp. 2039-2046.
- Ke-Ru Wu, D. Z. J.-M. S., 2002. Properties of polymer-modified cement mortar using pre-enveloping method. *Cement and Concrete Research*, Volume 32, pp. 425-429.
- Kim, J.-H. & Robertson, R. E., 1998. Effects of Polyvinyl Alcohol on Aggregate-Paste Bond Strength and the Interfacial Transition Zone. *Advanced Cement Based Materials*, Volume 8, pp. 66-76.
- Li, G., Xiong, G., Iü, Y. & Yin, Y., 2009. The physical and chemical effects of long-term sulphuric acid exposure. *Cement & Concrete Composites*, Maio, pp. 325-330.
- Mansur, A. A. P., 2007. *Mecanismos Físico-Químicos de Aderência na Interface Argamassa Modificada com Polímeros/Cerâmica de Revestimento*, Belo Horizonte: s.n.
- Martins, J. G. & Assunção, J. S., 2010. *Materiais de Construção Argamassas e Rebocos*. s.l.:s.n.
- Mehta, P. & Monteiro, P., s.d. *Concrete Containing Polymers*. s.l.:s.n.
- Nóvoa, P., Ribeiro, M., Ferreira, A. & Marques, A., 2004. Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates. *Composites Science and Technology*, Volume 64, pp. 2197-2205.
- Ohama, Y., 1995. In: *Handbook of polymer-modified concrete and mortars*. s.l.:s.n., p. 236.
- Ohama, Y., 1997. Recent progress in concrete-polymer composites. *Advanced Cement Based Materials*, pp. 31-40.
- Ohama, Y., 1998. Polymer-based Admixtures. *Cement and Concrete Composites* 20, pp. 189-212.
- Payne, C. R., 1953. Cements. *Industrial and Engineering Chemistry*, Outubro, pp. 2185-2188.
- Ribeiro, C., 2006. *Betões e Argamassas com Polímeros*. s.l.:s.n.

- Schulze, J., 1999. Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, Volume 29, p. 909–915.
- Schulze, J. & Killermann, O., 2001. Long-term performance of redispersible powders in mortars. *Cement and Concrete Research*, Volume 31, pp. 357-362.
- Secil, 2004. *CEMI 42,5R*, s.l.: s.n.
- Senna, D. O., 2008. *AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS*. Feira de Santana – Bahia: s.n.
- Silva, R. P., Barros, M. M., Pileggi, R. G. & John, V. M., 2005. *AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO ATRAVÉS DOS MÉTODOS DE MESA DE CONSISTÊNCIA, DROPPING BALL E SQUEEZE FLOW*. Florianópolis, s.n.
- Tao, J., 2003. *Effects off Molecular Weight and Solution Concentration on Electrospinning of PVA*. s.l.:s.n.
- Tao, J., 2003. *Effects off Molecular Weight and Solution Concentration on Electrospinning of PVA*. Worcester: s.n.
- Torgal, F. P. & Jalali, S., 2009. Resistência mecânica e durabilidade de betões modificados com polímeros. *Revista Engenharia Civil*, Setembro, pp. 5-12.
- Voitovich, V. A., 2009. Cement–Polyvinyl-Acetate Adhesives: An Alternative to Dry Mortar. *Polymer Science Series D. Glues and Sealing Materials*, Junho, pp. 88-91.

## SITES CONSULTADOS

- Blaga, A. & Beaudoin, J., 1985. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca>. [Online]  
Available at: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/cbd/building-digest-241.html>  
[Acedido em 27 Abril 2012].
- Blaga, A. & Beaudoin, J. J., 1985. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/>. [Online]  
Available at: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/cbd/building-digest-242.html>  
[Acedido em 27 Abril 2012].
- EUROPEAN MORTAR INDUSTRY ORGANIZATION – EMO, 2012.  
<http://www.euromortar.com/>. [Online]  
Available at: <http://www.euromortar.com/index2.php?page=3>  
[Acedido em 27 Abril 2012].

Serviço Geológico do Brasil, 2009. *CPRM*. [Online]

Available at:

<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?inford=1296&sid=129>

[Acedido em 12 Junho 2012].