



Diogo Luís Nobre Miguel

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Influência do tipo e dosagem de hidrófugo na reologia de caldas de injeção

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Luís Gonçalo Correia Baltazar, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co - orientadora: Maria Teresa Varanda Cidade, Professora Auxiliar com Agregação, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida

Arguente: Professora Doutora Catarina Almeida da Rosa Leal

Vogal: Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro de 2017

“Copyright” Diogo Luís Nobre Miguel, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Luís Baltazar gratificar a oportunidade concedida para a realização da presente dissertação e pelos ensinamentos transmitidos não apenas no âmbito deste estudo, mas também durante todo o percurso académico. Agradecer ainda pela partilha de conhecimento, por todo o apoio e acompanhamento dos trabalhos que constituíram a campanha experimental, bem como a sua sempre pronta disponibilidade para esclarecimentos de dúvidas essenciais neste estudo.

Um agradecimento à Professora Maria Teresa Varanda Cidade e ao CENIMAT pelo apoio prestado e pela forma como permitiu a realização e enriquecimento deste trabalho.

Quero agradecer igualmente ao Pedro, ao Alex e ao Luís, bem como a todos os meus amigos e colegas de mestrado pela amizade, pelos momentos de convívio e felicidade durante estes anos académicos dos quais irei sempre recordar.

À anTUNiA, a todos os seus membros e amigos agradecer também, por terem feito parte da minha vida académica, pelas experiências, pelos momentos e pelos ensinamentos que proporcionaram.

Finalmente, e mais importante, agradecer à minha família, aos meus pais São e Joaquim e a minha irmã Ana Luísa, pelo apoio incondicional e por terem sempre acreditado nas minhas capacidades. Uma palavra especial para a minha avó Luísa pelo seu carinho. Para o meu avô Jaime, pelo exemplo de pessoa que sempre foi e que apesar de ter partido durante esta etapa da minha vida, estará sempre presente e nunca deixará a minha memória. A ele dedico esta dissertação.

Resumo

A consolidação de alvenarias danificadas de edifícios históricos e antigos em Portugal tem vindo, nos últimos anos, a ganhar importância. O desenvolvimento de novas técnicas e o aprimoramento das já existentes é fundamental para o sucesso das intervenções de conservação.

A técnica de injeção de *grouts* (caldas), uma das mais utilizadas actualmente, tem como finalidade o incremento da compacidade, a criação de ligações entre os vários elementos da alvenaria de pedra e a melhoria do seu comportamento monolítico. Tem apresentado inúmeros desenvolvimentos e constitui-se como uma das técnicas preferenciais para realizar a consolidação das alvenarias degradadas.

O correcto desempenho desta técnica depende maioritariamente da formulação do *grout*, concebido de modo a potencializar e otimizar o seu desempenho, relativamente à injectabilidade, trabalhabilidade e fluidez. Além deste factor, é importante não menosprezar a temperatura e a pressão que também influenciam as propriedades reológicas e, por conseguinte, o sucesso da intervenção realizada nas alvenarias.

A presente dissertação propõe-se a analisar a capacidade e influência de três hidrófugos de massa (óleo de linhaça, solução de silicone (polidimetilsiloxano) e um hidrófugo comercial) nas propriedades no estado fresco e endurecido de *grouts* à base de cal hidráulica, que na sua constituição já incorporam superplastificante.

Os parâmetros fundamentais que condicionam as propriedades dos *grouts* são analisados durante uma campanha experimental dividida em duas partes. A primeira consiste em ensaios reológicos, no regime estacionário e dinâmico, juntamente com o ensaio de retenção de água e de estabilidade. Desta forma é possível avaliar as propriedades no estado fresco de cada uma das formulações desenvolvidas.

De modo a complementar a avaliação reológica, a segunda parte da campanha experimental consiste em ensaios realizados sobre provetes de amostras correspondentes a cada formulação. Realiza-se assim, uma análise às propriedades no estado endurecido dos *grouts*, através de uma análise termogravimétrica, do ensaio de porosidade aberta e através da obtenção dos valores das resistências mecânicas à compressão e à flexão.

Os resultados alcançados e a análise realizada às amostras das diversas composições desenvolvidas e investigadas, permitiu avaliar o efeito produzido pelos três aditivos hidrofóbicos. Desde logo, existiram dosagens e formulações que se revelaram muito prometedoras por apresentarem resultados satisfatórios e bastantes pertinentes, foi o caso das composições constituídas com a solução de silicone ou com o hidrófugo comercial. Contrariamente, surgiram composições que desapontaram pelos resultados e valores apresentados e devem, desde logo, ser encaradas com prudência e ser alvo de investigações adicionais, mais aprofundadas.

Termos Chave: alvenaria, *grout* de injeção, reologia, regime dinâmico, regime estacionário, formulação, cal hidráulica, superplastificante

Abstract

The rehabilitation of damaged masonry of historic and ancient buildings in Portugal has been gaining importance in the last years. The development of new techniques and the improvement of the existing ones is essential to the success of rehabilitation interventions.

The technique of *grout* injection, one of the most used nowadays, has the purpose of increase the compactness of the masonry, create connections between the various elements of the wall and improve the monolithic behavior of stone masonry. It has presented numerous developments and is one of the preferred techniques for the consolidation of degraded masonry.

The correct performance of this technique depends mainly on the *grout* formulation, designed in order to improve and optimize its performance, in relation to injectability, workability and flowability. Besides this factor, it is important not to neglect the temperature and pressure that also influence the rheological properties and, therefore, the success of the intervention performed in the masonry.

The present dissertation proposes to analyze the capacity and influence of three hydrophobic additives (linseed oil, silicone solution (polydimethylsiloxane) and a commercial water-repellent) in the fresh and hardened state properties of *grouts* based on hydraulic lime, which in their constitution already incorporate superplasticizer.

The fundamental parameters that condition the properties of *grouts* are analyzed during an experimental campaign divided in two parts. The first part consists of rheological tests, in the steady and dynamic regime, together with the water retention and stability test. In this way it is possible to evaluate the fresh state properties of each developed formulation.

In order to complement the rheological evaluation, the second part of the experimental campaign consists in tests carried out on test specimens corresponding to each formulation. An analysis of the properties in the hardened state of the *grouts* is carried out, by means of a thermogravimetric analysis, the open porosity test and by obtaining the values of the mechanical resistance.

The results obtained and the analysis performed on the samples of the various compositions developed and investigated, allowed to evaluate the effect produced by the

three hydrophobic additives. There were, of course, dosages and formulations that were very promising because they presented satisfactory and quite pertinent results, as was the case of the compositions made with silicone solution or commercial water-repellent. In contrast, there were compositions that were disappointing by the results presented and should, from the outset, be viewed with caution and be investigated further.

Keywords: masonry, *grout* injection, rheology, dynamic regime, steady state, formulation, hydraulic lime, superplasticizer

Índice de Matérias

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do Tema.....	1
1.2 Objectivos.....	3
1.3 Estrutura e Organização da Dissertação	3
2. Estado de Arte	5
2.1 Paredes de Alvenaria em Edifícios Antigos	5
2.1.1 Introdução	5
2.1.2 Caracterização e Tipologia	5
2.1.3 Principais Constituintes	8
2.1.4 Principais Causas de Degradação e Anomalias	9
2.2 <i>Grouts</i> para Injecção em Alvenaria.....	11
2.2.1 Técnicas de Injecção	11
2.2.2 Propriedades do <i>Grout</i> no Estado Fresco.....	13
2.2.3 Propriedades do <i>Grout</i> no Estado Endurecido.....	17
2.2.4 Formulação dos <i>Grouts</i> de Injecção	18
2.3 Reologia.....	19
2.3.1 Noções Gerais	19
2.3.2 Reologia de Suspensão	21
2.3.3 Comportamento Reológico do <i>Grout</i> de Injecção	26
2.3.4 Condicionantes que Influenciam a Reologia	28
2.3.5 Reómetro Rotacional	31
2.3.5.1 Regime Estacionário	31
2.3.5.2 Regime Dinâmico	33
2.3.6 Principais Causas de Erros durante a Medição Reológica.....	36
2.4 Adjuvantes.....	38
2.4.1 Superplastificantes	38
2.4.2 Hidrófugos	39
2.4.2.1 Óleo de Linhaça	41
2.4.2.2 Solução de Silicone.....	42
3. Métodos e Procedimentos Experimentais	45
3.1 Introdução.....	45

3.2	Materiais	45
3.2.1	Cal Hidráulica	45
3.2.2	Superplastificante.....	46
3.2.3	Aditivos Hidrofóbicos.....	48
3.3	Composição dos <i>Grouts</i>	51
3.4	Procedimento da Amassadura	53
3.5	Ensaio Realizados no Estado Fresco	56
3.5.1	Caracterização Reológica dos <i>grouts</i>	56
3.5.1.1	Ensaio em Regime Estacionário.....	56
3.5.1.2	Ensaio em Regime Dinâmico.....	57
3.5.2	Ensaio de Estabilidade	58
3.5.3	Ensaio de Retenção de Água.....	59
3.6	Ensaio Realizados no Estado Endurecido.....	61
3.6.1	Ensaio de Resistência Mecânica	61
3.6.2	Ensaio de Porosidade Aberta	65
3.6.3	Análise Termogravimétrica	67
4.	Apresentação e Análise de Resultados	69
4.1	Introdução.....	69
4.2	Resultados dos Ensaio Realizados no Estado Fresco	70
4.2.1	Caracterização Reológica dos <i>Grouts</i>	70
4.2.1.1	Regime Estacionário	70
4.2.1.2	Regime Dinâmico	77
4.2.2	Resultados do Ensaio de Estabilidade.....	79
4.2.3	Resultados do Ensaio de Retenção de Água	80
4.3	Resultados dos Ensaio Realizados no Estado Endurecido.....	82
4.3.1	Resultados dos Ensaio de Resistência Mecânica	82
4.3.2	Resultados dos Ensaio de Porosidade Aberta.....	85
4.3.3	Resultados da Análise Termogravimétrica	86
4.4	Sumário de Resultados	88
5.	Conclusões Finais e Desenvolvimentos Futuros	91
5.1	Introdução.....	91
5.2	Avaliação das Propriedades no Estado Fresco dos <i>Grouts</i>	91
5.3	Avaliação das Propriedades no Estado Endurecido dos <i>Grouts</i>	94

5.4 Sugestões para Desenvolvimentos Futuros	95
6. Bibliografia	97
Anexos.....	105

Índice de Figuras

Figura 2.1 Tipologia de secção transversal de paredes	7
Figura 2.2 Componentes de alvenaria de pedra.....	8
Figura 2.3 Possíveis mecanismos de colapso em alvenarias de panos múltiplos.....	10
Figura 2.4 Técnica de injeção de <i>grout</i> em alvenarias de pedra.....	12
Figura 2.5 Representação esquemática do fenómeno de segregação e exsudação	16
Figura 2.6 Curvas de fluxo para os diferentes comportamentos dos fluídos.....	20
Figura 2.7 Representação gráfica dos principais modelos reológicos.....	24
Figura 2.8 Efeito da injeção de <i>grout</i> com maior e menor viscosidade plástica	27
Figura 2.9 Efeito da temperatura num <i>grout</i> de cal hidráulica.....	28
Figura 2.10 Efeito da temperatura na injectabilidade de um <i>grout</i> de cal hidráulica.....	29
Figura 2.11 Efeito da pressão num <i>grout</i> de cal hidráulica.....	30
Figura 2.12 Esquema do sistema de medição.....	31
Figura 2.13 Representação esquemática da geometria de pratos paralelos.....	34
Figura 2.14 Acção do superplastificante na desfloculação das partículas.....	39
Figura 2.15 Influência do ângulo de contacto na molhabilidade.....	40
Figura 2.16 Acção do silicone	43
Figura 3.1 Nomenclatura utilizada	52
Figura 3.2 Equipamento e material utilizado no processo de amassadura	54
Figura 3.3 Aspecto da amostra antes e após a adição do superplastificante	54
Figura 3.4 Óleo de linhaça e cal antes da junção (esq.); “Pasta” obtida após amassadura manual (dir.)	55
Figura 3.5 Reómetro rotacional Gemini HR ^{nano} da Bohlin Instruments.....	56
Figura 3.6 Geometria de pratos paralelos.....	57
Figura 3.7 Ensaio de estabilidade	59
Figura 3.8 Ensaio de retenção de água	60

Figura 3.9 Amostra de <i>grout</i> no funil de Buchner com sinais de exsudação	60
Figura 3.10 Execução dos provetes	61
Figura 3.11 Determinação da massa volúmica	62
Figura 3.12 Ensaio à flexão	63
Figura 3.13 Fracturas evidenciadas pelos provetes H 0.5_1.6 (hidrófugo comercial) ...	64
Figura 3.14 Ensaio à compressão	64
Figura 3.15 Ensaio de porosidade aberta	66
Figura 3.16 Análise termogravimétrica	67
Figura 3.17 Procedimento da análise termogravimétrica	68
Figura 4.1 Curvas de fluxo obtidas no ensaio do reómetro em regime estacionário.....	71
Figura 4.2 Valores da tensão de cedência (τ_0)	72
Figura 4.3 Valores da viscosidade plástica (η)	73
Figura 4.4 Valores do índice de consistência (K)	73
Figura 4.5 Evolução da curva de fluxo num ensaio no reómetro	75
Figura 4.6 Curvas de fluxo relativas às composições seleccionadas	77
Figura 4.7 Módulo elástico (G') e módulo viscoso (G'') em função da frequência	78
Figura 4.8 Ensaio de estabilidade	79
Figura 4.9 Ensaio de retenção de água realizado a cinco composições	81
Figura 4.10 Resistência à flexão	83
Figura 4.11 Resistência à compressão	84
Figura 4.12 Porosidade aberta das diferentes composições de <i>grout</i>	85
Figura 4.13 Análise termogravimétrica	86

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Resumo dos requisitos para assegurar a qualidade dos <i>grouts</i> de injeção..	13
Tabela 2.2 Relações entre viscosidade e concentração de suspensões.....	22
Tabela 2.3 Relações entre tensão de corte e taxa de corte.....	22
Tabela 2.4 Factores mais influentes na reologia de suspensões	25
Tabela 3.1 Características da cal hidráulica HL5	46
Tabela 3.2 Características do superplastificante CHRYSO Fluid Premia 180.....	47
Tabela 3.3 Características do hidrófugo comercial	48
Tabela 3.4 Características do óleo de linhaça.....	49
Tabela 3.5 Características do silicone líquido SL3000 da Rubson	50
Tabela 3.6 Composição dos <i>grouts</i>	51
Tabela 4.1 Valores do módulo de ajustamento R^2	70
Tabela 4.2 Valores relativos à tixotropia dos grouts analisados	76
Tabela 4.3 Valores de massa volúmica das composições analisadas	82

1. Introdução

1.1 Enquadramento do Tema

Nos centros históricos e urbanos de Portugal, assim como em várias cidades europeias, existe atualmente uma quantidade bastante considerável de edifícios históricos num estado de degradação preocupante, necessitando urgentemente de intervenções de conservação e consolidação eficazes.

Estes edifícios constituem o património cultural e arquitectónico das cidades, por isso existe a necessidade de garantir a sua conservação e preservação, por intermédio de técnicas de reparação distintas das utilizadas na reparação de anomalias em edifícios mais modernos.

Os edifícios históricos são compostos, maioritariamente, por paredes de alvenaria de pedra nas fachadas, podendo apresentar apenas um, dois ou múltiplos panos de alvenaria.

Na existência de uma alvenaria de pedra formada por múltiplos panos, esta é constituída por dois panos exteriores resistentes de textura irregular e um núcleo interno preenchido por pequenas pedras, areia, argamassa ou qualquer outro tipo de material pouco coesivo [1]. A ausência de coesão entre os múltiplos panos da alvenaria, a existência de vazios, fendas, ou uma incorreta ligação entre os panos da alvenaria, pode conduzir a um comportamento não monolítico da parede e conseqüentemente ao colapso da estrutura, devido à vulnerabilidade e fragilidade da alvenaria quando sujeita a esforços de flexão.

O presente estudo irá focar-se numa das técnicas de consolidação e reabilitação mais utilizadas e recomendadas para este tipo de alvenarias: a injeção de *grouts* (caldas) [1, 2, 3].

Esta técnica de consolidação para além de possibilitar o aumento da compacidade da alvenaria, através da criação de coesão/ligação dos seus elementos constituintes, permite ainda melhorar a resistência à compressão, que para este tipo de alvenarias em específico, mesmo num estado muito degradado é bastante boa [4].

Esta melhoria bastante considerável na parede é conseguida através da eficácia do *grout*, por intermédio do preenchimento dos vazios e fendas existentes, aumentando a compacidade da alvenaria e melhorando a sua resistência à flexão, à compressão e ao corte. Os melhoramentos também são alcançados através da criação de ligações entre os vários panos da alvenaria, exterior e interior, o que é fundamental para reabilitar as ligações defeituosas.

A utilização desta técnica implica uma especial atenção e cuidado, no que diz respeito à selecção do *grout* mais adequado para injeção, uma vez que é necessário ter em consideração a compatibilidade entre os materiais originais e existentes na alvenaria a intervir. De realçar que a utilização de um ligante de base cimentícia na conservação de edifícios históricos pode causar sérios problemas, devido principalmente à elevada resistência mecânica, ao elevado módulo de elasticidade e à reduzida permeabilidade que este tipo de ligantes apresenta [5].

Sendo assim, neste estudo o ligante que constitui o *grout* é uma cal hidráulica, uma vez que possui as propriedades físicas, mecânicas e químicas mais próximas dos materiais existentes nas alvenarias dos edifícios a intervir [6]. A fim de melhorar a injectabilidade do *grout*, na sua constituição foi utilizado um adjuvante, um superplastificante, e a incorporação separada de três tipos distintos de hidrófugos de massa, um óleo de linhaça, uma solução de silicone (polidimetilsiloxano) e um hidrófugo comercial, todos adicionados em quantidades que não coloquem em risco a qualidade e eficiência do *grout*, com a finalidade de estudar o efeito que cada um destes constituintes produz, principalmente, nas propriedades reológicas.

Com objectivo de conceber um *grout* que possua um bom desempenho do ponto de vista da injectabilidade, é necessário examinar e controlar a capacidade de retenção de água, a estabilidade e as propriedades reológicas, para assegurar que, fundamentalmente, a injeção preencha todos os vazios e fendas no interior da alvenaria [7]. Além disso, a incorporação de novos materiais como a solução de silicone ou do óleo de linhaça na constituição do *grout* exige um novo estudo das propriedades físicas e reológicas.

Pretende-se estudar a performance destes “novos” *grouts* quando sujeitos a tensões estáticas e dinâmicas, por isso é fundamental adquirir conhecimentos reológicos e relativos aos parâmetros que afectam todas as características que podem influenciar o processo de injeção [8].

1.2 Objectivos

A presente dissertação tem como principal objectivo estudar a influência de três hidrófugos de massa nas propriedades no estado fresco e endurecido de *grouts* à base de cal hidráulica para a consolidação de alvenarias antigas.

Pretende-se estudar o efeito que estas adições provocam, em termos de viscosidade, fluência e consistência durante o processo de injeção na alvenaria, assim como apurar as características mecânicas em estado de serviço, após realizada a injeção.

Para esse fim, de modo a avaliar as propriedades do *grout* no estado fresco, medições reológicas em regime estacionário e dinâmico foram realizadas e relacionadas com resultados obtidos em ensaios de retenção de água e de estabilidade.

As características obtidas no estado fresco são posteriormente correlacionadas com os resultados obtidos em ensaios no estado endurecido, para assim se conseguir obter uma melhor e mais completa caracterização de cada uma das novas composições de *grout* analisadas neste estudo.

1.3 Estrutura e Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, o primeiro somente introdutório constituído pelo enquadramento do tema, os objectivos e a estrutura e organização da dissertação.

No segundo capítulo existe uma abordagem teórica e um estado de arte relativo ao conhecimento já existente, que têm por base estudos anteriores realizados, assim como observações essenciais de trabalhos e investigações prévias, com a finalidade de introduzir noções importantes para a compreensão deste estudo.

No terceiro capítulo é efectuada a apresentação da campanha experimental, através da identificação e selecção dos diversos materiais empregues na formulação das diversas amostras de *grout*. É realizada ainda uma descrição dos ensaios laboratoriais efectuados para caracterização no estado fresco e endurecido das diferentes composições analisadas.

O quarto capítulo apresenta os resultados alcançados após a análise efectuada às amostras no estado fresco e aos provetes no estado endurecido, nas duas fases que constituem a campanha experimental. Os resultados obtidos em ambos os estados

permitem obter uma caracterização completa para cada uma das composições de *grout* analisadas.

No quinto capítulo, são elaboradas as conclusões finais do trabalho e são propostas ideias para desenvolvimentos futuros nesta área de estudo.

2. Estado de Arte

2.1 Paredes de Alvenaria em Edifícios Antigos

2.1.1 Introdução

Na sociedade atual há um crescente interesse em preservar e manter o edificado com valor histórico, que representa o património arquitectónico.

Com o objectivo de preservar e manter o aspecto original destes edifícios por mais gerações, as técnicas aplicadas para a sua conservação, muitas das vezes, não são as mais correctas, especialmente no que respeita a monumentos e edifícios antigos com valor histórico e cultural. Neste caso em particular, os trabalhos de conservação e recuperação de alvenaria de pedra exigem reabilitações complexas, necessitando muitas vezes de técnicos especializados [9]. Para além disso, os materiais empregues para a consolidação das alvenarias destes edifícios exigem uma selecção de forma cuidadosa e criteriosa, de modo a serem o mais compatível com os materiais existentes, quer mecânica, física e quimicamente.

Entre as várias técnicas de consolidação conhecidas e utilizadas actualmente, existem os *grouts* especializados para injeção, que se encontram em contínua evolução e desenvolvimento progressivo, permitindo uma conservação correcta das alvenarias danificadas.

Para além de permitir preservar a aparência original das paredes exteriores dos edifícios com grande valor arquitectónico, esta técnica permite ainda a reparação das alvenarias de pedra com deficiente ligação entre panos exteriores e interiores [10].

Neste subcapítulo é realizada uma descrição dos suportes, são caracterizados os materiais que usualmente constituem este tipo de estruturas e são apresentadas as principais causas e anomalias que este tipo de alvenaria apresenta.

2.1.2 Caracterização e Tipologia

O termo “Alvenaria” define um conjunto de unidades de alvenaria como tijolos, blocos ou pedras, ligados geralmente por argamassa. Esta união de elementos forma uma construção sustentável, com propriedades mecânicas inerentes capazes de constituir elementos estruturais [11].

As paredes que formam os edifícios históricos em alvenaria ordinária de pedra são muito heterogêneas. Na sua constituição podem encontrar-se pedras de diversas naturezas, formas, dimensões e com uma grande diversidade de características físicas, mecânicas e geométricas.

Como elemento de ligação entre os vários materiais podem surgir argamassas de cal, terra ou argila, de fraca qualidade e que raramente envolvem corretamente as pedras, tijolo ou blocos que constituem a alvenaria. Esta situação origina na estrutura da alvenaria, fendas e vazios interiores que danificam e comprometem a sua integridade [12, 13, 16].

Existem dois tipos distintos de construção de paredes utilizando a pedra: a cantaria e a alvenaria. A principal diferença reside na utilização de argamassa como elemento de ligação. Numa cantaria a construção é realizada com junta seca, não se utilizando qualquer argamassa para o assentamento das pedras, enquanto que no caso da alvenaria existe a presença de um ligante como material de assentamento [13].

As paredes de alvenaria podem ainda ser classificadas quanto ao tipo de secção, em particular, quanto ao número de paramentos e ao grau de sobreposição. São definidas três tipologias principais [11] que podem ser observadas na **Fig. 2.1**.

Existem as paredes de pano simples, constituídas por pedra transversal única de grande dimensão e revestida por rebocos espessos, **Fig. 2.1 (a)**.

Existem também paredes de dois panos, com duas subcategorias diferentes: as paredes com paramentos sem ligação e com paramentos ligados. Nas primeiras, as paredes são formadas por dois paramentos completamente separados por uma junta vertical ao longo da interface de contacto que pode ser seca ou preenchida por argamassa e cascalho. Nas paredes com paramentos ligados, pode encontrar-se uma simples sobreposição das pedras que formam o paramento ou pedras transversais alongadas que atravessam toda a secção, **Fig. 2.1 (b)**.

Finalmente existem as paredes de alvenaria de pano múltiplo ou de três panos, formadas por dois paramentos exteriores como secção resistente e separadas por uma camada interior, o núcleo, de inferior qualidade, **Fig. 2.1 (c)**.

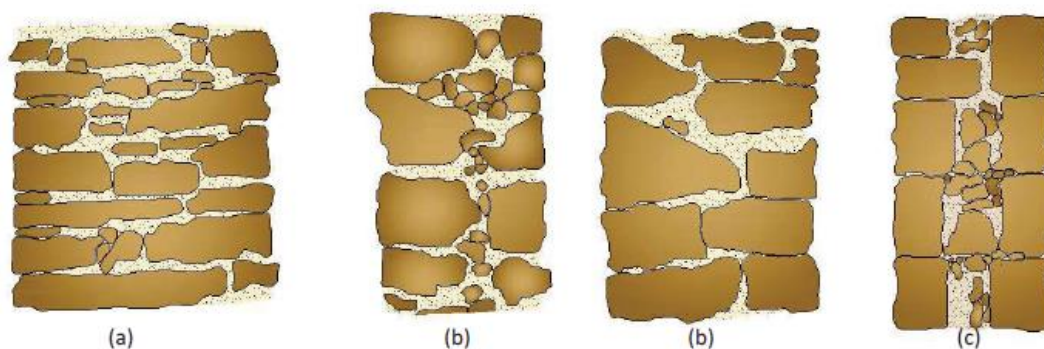


Figura 2.1 Tipologia de secção transversal de paredes: (a) um pano; (b) dois panos; (c) três panos [9]

Na maioria das alvenarias de pedra, como anteriormente foi referido, a argamassa existe na sua constituição e é fundamental para garantir uma boa compacidade da estrutura e preencher os espaços livres entre os vários elementos.

As argamassas que se encontram no núcleo interno, em particular, nas paredes constituídas por três panos de alvenaria, têm como principal função conectar os materiais que formam o núcleo, que podem ser pequenos pedaços de pedra, areias ou outros resíduos. No entanto, o que resulta desta ligação entre os vários constituintes apresenta características mecânicas muito fracas, com bastantes vazios, devido essencialmente à falta de coesão dos elementos internos e conexão com os paramentos exteriores [9].

Estas argamassas tradicionais eram, tipicamente, constituídas por um ligante (como a cal ou o gesso), agregados e em alguns casos materiais que transmitissem propriedades hidráulicas à amostra, como pozolanas ou pó de tijolo.

Pelo facto de muitas destas alvenarias conterem na sua constituição ligantes à base de cal, esta possui um papel de enorme importância na sua consolidação, uma vez que é o elemento principal das argamassas para trabalhos de injeção, reparação e conservação das alvenarias degradadas, principalmente por ser o ligante que apresenta melhor compatibilidade em comparação com o cimento, visto que, por exemplo, permite preservar a permeabilidade ao vapor de água das paredes [12].

2.1.3 Principais Constituintes

A maioria dos edifícios antigos nacionais foram construídos recorrendo a pedra disponível nas proximidades. Em função da região do país é possível encontrar na constituição destas construções: granito, principalmente no Minho, Douro Litoral e Beiras, calcário na zona de Lisboa, Beira Litoral e Alentejo, xisto em Trás-os-Montes e Douro ou em alguns casos marga ou arenito. A principal funcionalidade que se pretende nas pedras que compõem os panos de alvenaria é possuírem uma elevada durabilidade e beleza estética. Um exemplo de construção de alvenaria simples antiga ainda existente pode ser observado na **Fig. 2.2**.

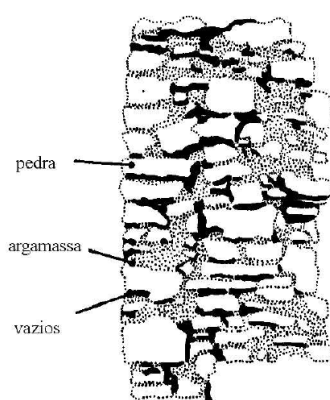


Figura 2.2 Componentes de alvenaria de pedra: pedra e argamassa [14]

A argamassa apresenta-se como o elemento fundamental para garantir a ligação entre todas as componentes da alvenaria. Resulta da união de água e ligante aos agregados e em algumas situações pode conter adições. Conforme a sua localização na estrutura pode ser designada por: argamassa de assentamento, de ligação entre os elementos do núcleo ou ainda como reboco.

As argamassas usadas antigamente e essencialmente até ao início do séc. XIX, eram habitualmente cais puras ou também denominadas cais aéreas, que necessitavam da presença de ar para carbonatar ou endurecer. Também se utilizavam cais hidráulicas naturais ou pozolânicas, que endureciam quando mergulhadas em água [15].

A cal, que representa o ligante na constituição das argamassas, remete para o óxido de cálcio (CaO – cal viva) formado a partir da cozedura de calcários puros ($CaCO_3$ - carbonato de cálcio) ou de carbonato de cálcio e magnésio, que depois de hidratado resulta num composto intitulado por hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$ – Cal apagada).

A decomposição por acção da temperatura designada por calcinação e a imersão em água deste composto resulta no processo de extinção da cal [16].

Existem ainda três tipos distintos de cal aérea: a cálcica gorda, quando o calcário da qual se obtém a cal possui uma percentagem igual ou superior a 99% de carbonatos, a cálcica magra, se a cal possuir 1% a 5% de argila ou outras impurezas e a cálcica magnesiânica, se na constituição da cal aérea existir teor em óxido de magnésio superior a 20% [17].

A cal hidráulica natural que se produz atualmente é obtida através da cozedura dos calcários margosos, que possuem teor de argila entre 5% e 20%, ou através da cozedura de margas calcárias, onde o teor de argila se situa entre os 20% e 40%.

Para temperaturas entre 1200°C e 1500°C existe a formação de óxido de cálcio e a combinação desta componente com a sílica e alumina origina silicatos e aluminatos [17].

As cals hidráulicas são caracterizadas por baixas tensões de rotura, ideais para o assentamento dos blocos de pedra e uma transmissão uniforme de cargas nas juntas. Estas argamassas apresentam também uma elevada permeabilidade ao vapor de água, uma alta absorção capilar e uma baixa resistência aos ciclos gelo/degelo. É preciso ter atenção à elevada capacidade de absorção de água destas argamassas que podem provocar, numa primeira fase, uma acentuada perda de fluidez e numa fase subsequente poderão contribuir para a retracção do *grout* injectado [6].

Finalmente surge a água como elemento líquido que possui a função de meio de dispersão, e no caso particular da cal e cimento contribui para as reacções químicas. É crucial controlar o rácio água/ligante, uma vez que um alto teor em água pode melhorar a injectabilidade e fluidez do *grout*, no entanto, a amostra pode tornar-se mais instável, provocando fenómenos de segregação, exsudação e a diminuição da resistência mecânica da estrutura.

2.1.4 Principais Causas de Degradação e Anomalias

As paredes de alvenaria em pedra de pano múltiplo são especialmente vulneráveis a tensões de corte no seu plano, pois possuem uma baixa resistência a este tipo de solicitações. Além disso, caso o pano interior apresente uma baixa qualidade e não existir

uma correcta ligação entre os panos exterior e interior, podem ocorrer deslocamentos e colapsos fora do plano da alvenaria, situação ilustrada na **Fig. 2.3** [18].

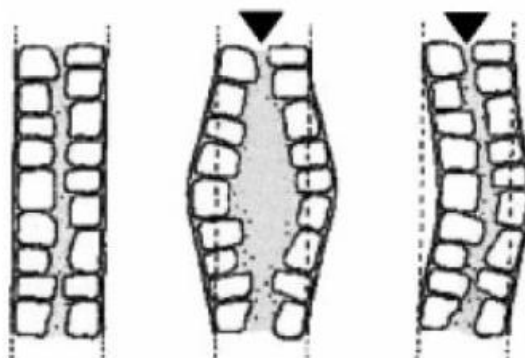


Figura 2.3 Possíveis mecanismos de colapso em alvenarias de panos múltiplos (adaptado de [19])

Para além destas vulnerabilidades, este tipo de alvenaria está sujeito a outros fenómenos de deterioração que podem ser físicos, devido a variações de temperatura, ventos, ciclos gelo-degelo e presença de água. Pode ainda ser afectado pela deterioração química em consequência da cristalização dos sais solúveis e da corrosão de materiais metálicos, caso existam, ou devido ao fenómeno de deterioração biológica, provocada por micro-organismos e plantas presentes nas imediações da parede [9].

As anomalias que frequentemente surgem nas paredes de alvenaria devidas essencialmente aos fenómenos identificados são a fendilhação, a desagregação e outras anomalias por efeito da acção da água.

A fendilhação é uma das anomalias mais comuns nas alvenarias de panos múltiplos e manifesta-se em consequência da baixa resistência da estrutura face às forças de tracção, em zonas de concentração de tensões como aberturas, cantos ou zonas de ligação a outras paredes ortogonais. O peso próprio da estrutura, o tempo de exposição a cargas cíclicas como o vento ou acções térmicas e a presença de água podem influenciar a gravidade e extensão das fissuras.

Também a presença de pedras brandas, os movimentos de ascensão capilar, a água da chuva, os actos de vandalismo e até a poluição podem agravar o estado de deterioração dos materiais, o que resulta numa progressiva diminuição das capacidades resistentes da estrutura.

As anomalias resultantes da acção da água são facilmente identificáveis devido às marcas características que esta acção provoca. A água entra pelos pontos de maior fraqueza, como fendas, juntas de assentamento, vazios ou por capilaridade e provoca a dissolução dos sais presentes no solo e na alvenaria. A contínua ascensão da água por capilaridade altera a rede de vazios e o surgimento de sais à superfície e na zona interna do reboco. Além disso, as pedras que constituem a estrutura resistente da alvenaria são danificadas pelos ciclos de dissolução/cristalização dos sais e, se as condições de humidade e temperatura forem propícias, estes sais podem cristalizar e provocar graves danos em toda a alvenaria [16].

2.2 Grouts para Injecção em Alvenaria

2.2.1 Técnicas de Injecção

O *grout* pode ser definido como uma suspensão aquosa constituída por ligante, água e adjuvantes e, em algumas situações, adições. As suas principais características devem ser uma reduzida viscosidade e uma alta penetrabilidade; no entanto, estas propriedades podem ser afectadas pelo tipo de ligante, o procedimento de amassadura, o tipo e dosagem das adições ou as condições ambientais.

A injecção do *grout* é uma das técnicas de reforço estrutural mais utilizadas actualmente na consolidação de alvenarias antigas e elementos arquitectónicos danificados. Esta técnica consiste na injecção de um *grout* fluído à base de cal hidráulica, cimentícia ou de ligante orgânico, por furos previamente efectuados nos panos exteriores de alvenaria e com a finalidade de preencher os vazios interiores que existam na estrutura da parede, como demonstra o exemplo da **Fig. 2.4** [20].

Esta técnica é uma solução de reforço passiva e irreversível, pois não possibilita a remoção ou substituição do material injectado; no entanto, permite a manutenção do aspecto original das paredes. A injecção deve ser realizada a baixa pressão (± 1 bar) ou então apenas por gravidade. Quando bem executada, esta técnica permite preencher muito eficazmente todas as fendas existentes e criar uma boa ligação entre todos os constituintes. As resistências mecânicas, após endurecimento do *grout*, também registam melhorias muito significativas.

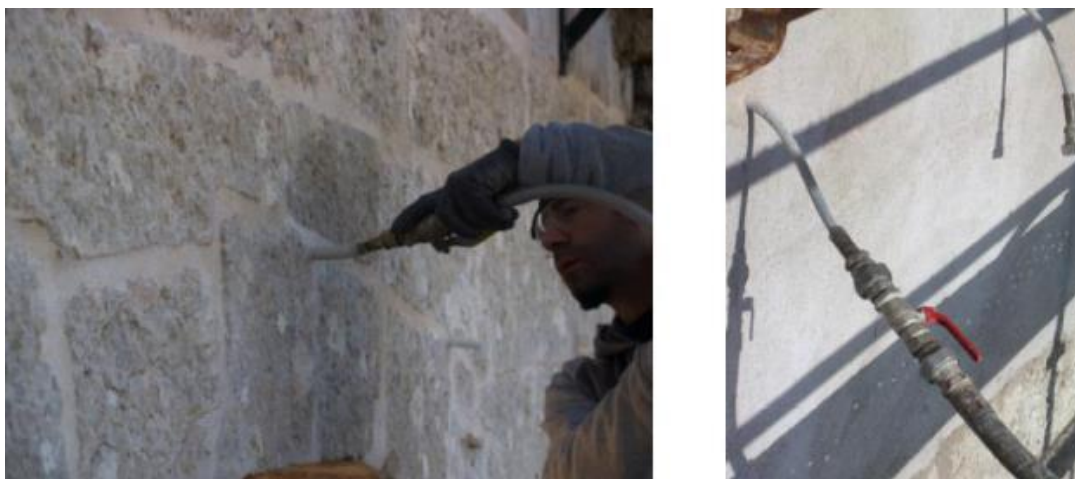


Figura 2.4 Técnica de injeção de *grout* em alvenarias de pedra [26]

Além de se tratar de uma técnica irreversível, existem outros problemas associados, nomeadamente a falta de informação quanto à distribuição de vazios no interior da alvenaria, a dificuldade de penetração do *grout* por aberturas muito reduzidas e a segregação e retracção deste em consequência da rápida absorção de água por parte dos materiais existentes. [21]

Segundo vários autores [1, 6, 24], os *grouts* com base em ligantes naturais de cal hidráulica são mais compatíveis comparativamente àqueles com base cimentícia ou resinas orgânicas.

O estudo das propriedades de um *grout* relativamente à sua compatibilidade física e química com os materiais existentes numa alvenaria degradada é importante, assim como ter um conhecimento quanto ao seu escoamento dentro do núcleo da alvenaria [23], ou seja, é importante ter atenção a diversos factores de carácter intrínseco, como a granulometria da componente sólida da suspensão, e de carácter extrínseco, como a morfologia do suporte, a absorção/adsorção e ainda as características dos materiais que constituem a alvenaria, nomeadamente a sua granulometria e superfície específica [8].

Para formular um *grout* para injeção apropriado e com boa performance, existem uma série de propriedades que devem ser respeitadas de modo a garantir a eficácia desta técnica e que são apresentadas seguidamente na Tabela 2.1. [6]

Tabela 2.1 Resumo dos requisitos para assegurar a qualidade dos *grouts* de injeção (adaptado de [6])

<p>Requisitos Reológicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pretende-se fluidez durante o processo de injeção e capacidade de penetração uniforme de modo a que haja um completo preenchimento dos vazios de igual forma (injectabilidade – propriedades caracterizadas pela homogeneidade, ausência de grumos, com granulometria inferior à dimensão dos vazios a preencher, baixa viscosidade, baixo ângulo de contacto, etc.);
<p>Requisitos Químicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Deve ter características químicas estáveis no tempo, isto é, ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reacções irreversíveis; • Deve ter resistência aos sais de sulfato, de modo a evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências.
<p>Requisitos Físicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • O tempo de início de presa deve ser adequado ao tempo necessário à execução da injeção; • As propriedades higroscópicas devem ser caracterizadas por insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de humidade; • Deve possuir baixa retracção.
<p>Requisitos Mecânicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Deve ter características mecânicas e de rigidez similares aos materiais originais ou apenas ligeiramente superiores; • Deve ter adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto.

2.2.2 Propriedades do *Grout* no Estado Fresco

Na formulação de um *grout* de injeção para trabalhos de consolidação de alvenaria de pedra pretende-se que este tenha a capacidade de fluir no interior do meio poroso sem perder água da constituição durante o processo e possua capacidade de transmitir à alvenaria as condições necessárias para a reabilitação da estrutura. Procura-se, portanto, um bom comportamento a nível da injectabilidade, resistência e durabilidade das alvenarias quando sujeitas à técnica de injeção de *grout*.

A principal componente que influencia o estado fresco de um *grout* é a quantidade de água utilizada na amassadura. A água deve permitir que este seja injectado; no entanto, não se deve exceder a relação água/ligante na composição, pois caso isto aconteça o bom comportamento e eficácia da injeção é posto em causa.

Segundo Toumbakari [24], quando existe uma relação de água/ligante elevada, os *grouts* comportam-se como fluídos praticamente newtonianos, uma vez que a viscosidade é constante para qualquer tensão submetida. A diminuição desta relação provoca no comportamento do *grout* uma alteração gradual, originando um fluído reofluidificante, ou seja, a viscosidade passa a variar em função da tensão aplicada.

A avaliação e estudo das propriedades no estado fresco de um determinado *grout*, particularmente, a fluidez, a estabilidade e a capacidade de retenção de água permitem obter a sua caracterização e ponderar se é o mais adequado e vantajoso para o processo de injeção numa alvenaria danificada.

- **Fluidez**

A fluidez de um *grout* está rigorosamente relacionada com a injectabilidade, ou seja, a facilidade de fluir através das fissuras e vazios da alvenaria e com mínimas perdas de pressão durante todo o processo de injeção. Esta característica depende essencialmente da quantidade de água na amassadura, da distribuição granulométrica e da natureza, forma e superfície específica das partículas [25].

A reologia, ciência que estuda o escoamento e deformação dos materiais, surge associada à fluidez, uma vez que é de grande relevância estudar o comportamento reológico dos *grouts*.

O estudo do comportamento reológico pressupõe, geralmente, a determinação de duas grandezas essenciais. Uma delas é a tensão de cedência ou tensão limite de escoamento, que consiste na tensão mínima que é necessário aplicar a uma suspensão para que esta comece a fluir. É uma característica de verdadeira importância, que influencia o comportamento do *grout* e a sua capacidade de penetrar no meio poroso. Permite ainda compreender a facilidade com que o *grout* se começa a deformar, uma vez que representa o valor crítico imprescindível para que tal aconteça [14].

A viscosidade plástica é a outra grandeza essencial na percepção reológica de um *grout*. Representa a resistência ao fluxo quando este é iniciado, ou seja, caracteriza a velocidade que um determinado *grout* possui após iniciar o escoamento. Para viscosidades plásticas baixas, a suspensão flui mais facilmente, contrariamente a viscosidades plásticas elevadas em que o fluxo é mais difícil, pois as interações coloidais excessivas entre as partículas em suspensão dificultam o processo [26]. Esta característica

em particular permite diferenciar os *grouts* facilmente trabalháveis daqueles que apresentam grande resistência ao escoamento, logo mais difíceis de bombear e de injetar.

Na reologia, a correcta observação das modificações ocorridas nas propriedades reológicas dos *grouts* em função do tempo é uma clara evidência da existência de tixotropia no fluído que se pretende analisar. Nesta situação a viscosidade vai depender não só da tensão de corte aplicada, mas também do intervalo de tempo compreendido entre submeter a suspensão a uma determinada tensão e o início do processo de injeção. Este tipo de comportamento pode ser associado aos *grouts* com base em cal hidráulica, mas sempre num curto intervalo de tempo [27].

Pode afirmar-se que para este comportamento tixotrópico as alterações a que o *grout* está sujeito são reversíveis. Tal significa que as ligações entre partículas de ligante não são afectadas significativamente. Com o decorrer do tempo constata-se um aumento da viscosidade e da tensão de cedência do *grout*. Este comportamento, para além de evidenciar um comportamento tixotrópico, tem associado outro processo que decorre simultaneamente da hidratação do ligante que também provoca a perda de trabalhabilidade.

- **Estabilidade**

A estabilidade é outra propriedade fundamental utilizada para o estudo das propriedades frescas de um *grout*. Esta propriedade traduz a capacidade de uma amostra em manter uma distribuição uniforme de partículas durante o processo de injeção, bem como quando terminam todas as operações de posicionamento e de injeção dentro do meio poroso. Contudo, existe a possibilidade de ocorrência de instabilidades como a exsudação e a segregação devida aos vários constituintes do *grout*.

A segregação consiste na organização das partículas e/ou aglomerados de partículas do ligante. Estas têm tendência para se posicionarem de forma estratificada na suspensão de *grout*, originando uma alteração da massa volúmica da suspensão em função da altura, dificultando assim o processo de injeção [28]. Este fenómeno de instabilidade está directamente relacionado com a quantidade de água utilizada e com a forma, dimensão e massa volúmica das partículas do *grout* [29].

No fenómeno da exsudação, ocorre a migração das partículas de água para a superfície do *grout* que forma uma película de água superficial. Inicialmente, as forças de ligação entre as partículas sólidas são resistentes o suficiente para manter a

microestrutura. Porém, se ocorrer uma exsudação excessiva, devida por exemplo à relação água/ligante utilizada e/ou à distribuição granulométrica do ligante, este fenómeno pode resultar numa suspensão de *grout* heterogénea, impossibilitando uma introdução eficaz no meio poroso e uma aderência imperfeita entre os vários materiais [28]. Após o processo de cura do *grout*, a evaporação da quantidade excessiva de água que se encontra à superfície pode dar origem ao aparecimento de vazios e fendas, prejudiciais para a resistência mecânica da alvenaria.

Estes fenómenos de instabilidade necessitam ser evitados, uma vez que comprometem a injectabilidade, originam um deficiente preenchimento dos vazios, uma adesão heterogénea e propiciam características de fraca resistência com uma baixa durabilidade do material injectado na alvenaria. [28].

Na **Fig. 2.5** são apresentados os dois fenómenos de instabilidade do *grout* previamente descritos.

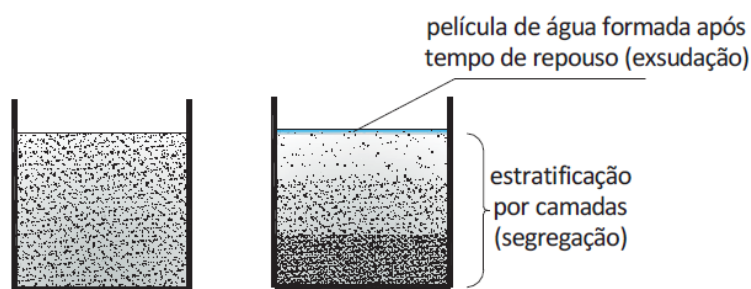


Figura 2.5 Representação esquemática do fenómeno de segregação e exsudação [9]

- **Retenção de água**

Para além da estabilidade e da fluidez, é importante ter em conta a capacidade de retenção de água. Esta propriedade é de grande importância uma vez que representa a capacidade de um *grout* em reter a água da sua constituição, quer seja durante o processo de injeção, quer seja no interior de alvenarias secas e de elevada absorção. Quanto maior for o tempo de retenção da água no interior da suspensão do *grout*, mais eficaz será a injeção assim como o seu comportamento reológico ou a sua estabilidade [30]. A molhagem da superfície antes da injeção do *grout* garante que a migração de água do *grout* para o meio poroso seja menor.

A perda de água da constituição, durante a injeção, pode provocar um efeito de tamponamento por efeito do aumento do atrito interno e colisão entre as partículas sólidas, ao originar uma diminuição do grau de dispersão e, por conseguinte, uma menor capacidade de injeção [24, 26, 35].

O aumento do teor em água pode ser uma forma de solucionar este tipo de problemas de injectabilidade e fluidez [31]. Contudo, este aumento não pode ser excessivo, correndo o risco de se obter um *grout* pouco estável, com hipóteses de ocorrência de fenómenos de segregação e exsudação, diminuição das resistências mecânicas e aumento da porosidade e vazios no estado endurecido [32].

2.2.3 Propriedades do *Grout* no Estado Endurecido

As propriedades no estado fresco de um *grout* possuem um papel preponderante no sucesso da injeção; no entanto, o comportamento mecânico dos *grouts* após presa é um factor de grande importância no desempenho de intervenções de consolidação e reabilitação.

Os *grouts* destinados a estabilização de alvenarias de panos múltiplos são sujeitos a diferentes tipos de acções (compressão, tracção e corte). Assim, o estudo das propriedades no estado endurecido é de fundamental interesse, particularmente as resistências mecânicas.

Na presente dissertação são determinadas as resistências à flexão e à compressão de provetes de *grout*, de forma a se perceber qual a capacidade de resistência de cada formulação isolada, ou seja, independentemente do meio poroso. Estas características mecânicas são fundamentais e devem contribuir para uma melhor coesão e resistência mecânica do suporte que não deve ser desproporcional ao existente na alvenaria antes da intervenção [33].

Se existir a necessidade de aumentar a resistência mecânica do conjunto, não se deve ampliar de forma desmesurada a rigidez, devendo ser garantido um módulo de elasticidade não muito elevado, de modo a garantir a compatibilização mecânica e física de toda a estrutura.

2.2.4 Formulação dos *Grouts* de Injecção

Os *grouts* utilizados na técnica de injecção para consolidação de alvenarias podem ser formulados *in situ* ou obtidos com um pré-doseamento. A selecção entre estas duas opções incide no grau de controlo que se tenciona obter durante o processo de injecção, da disponibilidade de recursos, do conhecimento da alvenaria a intervir e da compatibilidade entre os materiais existentes e novos a introduzir [16].

Os *grouts* que são preparados em obra podem ser compostos por um ou mais ligantes, usualmente cal hidráulica, água e adições ou adjuvantes, como introdutores de ar, fluidificantes e superplastificantes. Os *grouts* pré-doseados em fábrica apresentam as quantidades de cada um dos constituintes já indicados. O tipo de adjuvantes a utilizar na preparação dos *grouts* possibilita, além da retenção de água, a estabilização do ar introduzido durante o processo de bombagem e injecção. Contudo prejudica a fluidez e retarda o início do processo de hidratação [34].

Existem adições que permitem obter um *grout* com as propriedades pretendidas, em alternativa aos semelhantes pré-doseados: as pozolanas, a sílica de fumo ou as cinzas volantes podem ser adicionadas em quantidades não prejudiciais às propriedades reológicas ou prejudiciais à capacidade de injecção. Os fillers, como o pó de pedra calcária, podem também ser utilizados como adição, embora de forma a não afectar a capacidade de penetração nos vazios e aumentar drasticamente a tensão de cedência para ambos tipos de adições, segundo estudos anteriores, não devem ser adicionadas quantidades superiores a 6 % relativamente à massa do ligante [20, 40].

O rácio de água/ligante (water/binder - w/b) é outro parâmetro fundamental para se obter um *grout* apropriado para injecção. Na bibliografia, rácios de caldas cimentícias para reparação de alvenarias de pedra variam entre 0,5 a 1,0 [20, 36] e a importância de definir um limite para a relação de água/ligante, ajuda a prever o início de ocorrência de exsudação, fenómeno que ocorre quando a quantidade de água é elevada [35].

2.3 Reologia

2.3.1 Noções Gerais

A definição actual de Reologia, foi introduzida pelo Professor Eugene Cook Bingham em 1929, e designa a ciência que estuda o escoamento e deformação dos materiais. Surge devido às leis de Hooke e de Newton serem insuficientes para descrever o comportamento de vários materiais que apresentavam um comportamento que não era possível ser retratado por estas leis clássicas [36, 37].

Relativamente à lei de Hooke, esta estabelece uma relação de proporcionalidade directa entre tensões e deformações e pode ser observada na equação 2.1:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

Em que σ , representa uma tensão normal (Pa), E o módulo de elasticidade ou de Young (Pa) e ε a deformação linear longitudinal. A tensão normal σ , é dada pelo quociente F/A , em que F é uma força normal (N) e A a área de secção (m^2) em que a força F actua. A equação 2.1 constitui a premissa básica da teoria da elasticidade dos sólidos e é utilizada para caracterizar sólidos com comportamentos considerados sólido linear elástico ou sólido hookeneano [36, 37, 38].

O reconhecimento da Reologia como ciência e a lei clássica de Newton permitiu a introdução de uma formulação mais simples para descrever o comportamento reológico dos fluídos e que tem por base a equação 2.2:

$$\frac{F}{A} = \tau = \eta \times \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Em que F é a força de corte (kN), A a área do plano paralelo à força F (m^2), τ a tensão de corte (Pa), η a viscosidade (Pa.s) e $\dot{\gamma}$ a taxa de corte (s^{-1}).

A viscosidade dos materiais é fortemente afectada por parâmetros como a temperatura, a pressão ou a taxa de corte.

Nesta perspectiva é relevante compreender e diferenciar os tipos de fluídos que surgem quando afectados pelos parâmetros enunciados, os fluídos Newtonianos e não Newtonianos.

Num fluido Newtoniano a viscosidade pode variar com a temperatura e com a pressão; todavia, não varia com a aplicação de uma taxa de corte. Nos fluidos não Newtonianos existe a distinção de três tipos: os reofluídificantes, os reoespessantes e os de Bingham.

Nos fluidos reofluídificantes a viscosidade decresce com o aumento da taxa de corte. Contrariamente aos reoespessantes onde a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de corte. Um *grout* de Bingham é um fluido que apenas se deforma a partir de um determinado valor crítico denominado tensão de cedência (“yield stress”), comportando-se seguidamente como um fluido Newtoniano [39].

Os fluidos Newtonianos possuem, portanto, uma viscosidade constante que não varia com a aplicação de uma taxa de corte nem apresentam propriedades elásticas [36]. Porém os fluidos não Newtonianos nas mesmas condições apresentam uma viscosidade que não é constante e que pode variar com a taxa de corte ou outros factores[36, 43, 44].

Os comportamentos dos fluidos descritos encontram-se representados na **Fig. 2.6**.

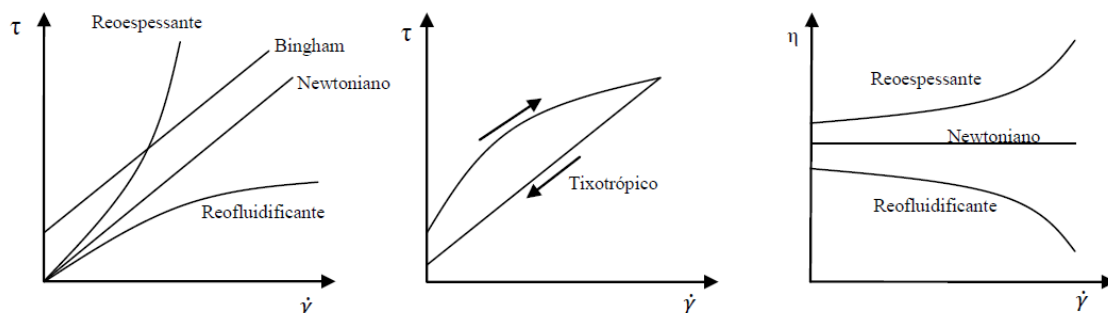


Figura 2.6 Curvas de fluxo para os diferentes comportamentos dos fluidos [40]

Existem ainda materiais em que, para uma determinada taxa de corte, a viscosidade e a tensão de corte podem aumentar ou diminuir com o tempo. Estas alterações podem ser reversíveis ou irreversíveis [41].

A tixotropia, ver na **Fig. 2.6**, é um desses comportamentos. Representa uma diminuição contínua da viscosidade quando é aplicada uma tensão a um fluido que se encontrava em repouso. Quando existe uma parte de recuperação dessa viscosidade logo após o líquido deixar de fluir, estamos perante um fluido tixotrópico.

O comportamento inverso também se verifica, isto é, um aumento gradual da viscosidade quando um líquido se encontra sujeito a uma determinada tensão, seguido de

uma recuperação quando finalizada a tensão. Este comportamento específico denomina-se por tixotropia negativa ou anti-tixotropia [42].

2.3.2 Reologia de Suspensão

A reologia é o conhecimento das propriedades reológicas dos *grouts*, argamassas ou betões produzidos a partir de cimento ou cal hidráulica e possui actualmente grande importância na indústria da construção. A utilização da reologia como uma ciência fundamental no estudo destes materiais deve ser tida em conta, ao invés de ser considerada um ramo especializado e incómodo da ciência [43].

Os *grouts* com base em ligantes hidráulicos são caracterizadas por possuírem um comportamento reológico muito complexo, pois sofrem variações com o decorrer do tempo ao nível da hidratação e de alteração da viscosidade até ao instante em que adquirem resistências mecânicas necessárias que impossibilitam o escoamento, convertendo-se num corpo rígido.

Existem dois grupos principais de equações utilizadas para caracterizar uma suspensão de partículas sólidas num líquido viscoso, que são apresentados na Tabela 2.2 e na Tabela 2.3 [48, 49].

Na primeira tabela pode observar-se a relação entre a concentração da suspensão e a viscosidade, na segunda encontra-se a relação entre a tensão de corte e a taxa de corte. De salientar que as equações presentes na Tabela 2.2 são pouco usuais para a caracterização de suspensões cimentícias ou de cal, em consequência da complexidade das mesmas; no entanto, as equações presentes na Tabela 2.3 são mais utilizadas no estudo do escoamento de *grouts* [48, 50].

Tabela 2.2 Relações entre a viscosidade e volume de suspensões [28, 48]

Nome da Equação	Equação	Hipóteses
Einstein	$\eta = \eta_0(1 + [\eta]\phi)$	<ul style="list-style-type: none"> Inexistência de interacção entre partículas Suspensão diluída
Roscoe	$\eta = \eta_0(1 - 1.35\phi)^{-K}$	<ul style="list-style-type: none"> Consideração da interacção entre partículas
Krieger-Dougherty	$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(1 + \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right) - [\eta]\phi_{\max}$	<ul style="list-style-type: none"> Relação entre viscosidade e compacidade Consideração da compacidade máxima
Mooney	$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{[\eta]\phi}{1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> Consideração da compacidade máxima

η_0 – Viscosidade do meio líquido; η – Viscosidade da suspensão; $[\eta]$ – Viscosidade intrínseca;
 ϕ – Fração volúmica das partículas em suspensão; ϕ_{\max} – Factor de compactação máxima;

Tabela 2.3 Relações entre tensão de corte e taxa de corte (adaptado de [28, 48])

Nome da Equação	Equação
Atzeni <i>et al.</i>	$\dot{\gamma} = \alpha\tau^2 + \beta\tau + \delta$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$
Bingham modificado	$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} + B\dot{\gamma}^2$
Casson	$\tau = \tau_0 + \eta_\infty\dot{\gamma} + 2(\tau_0\eta_\infty)^{1/2}\dot{\gamma}^{1/2}$
Casson generalizado	$\tau^n = \tau_0^n + [\eta_\infty\dot{\gamma}]^n$
De Kee	$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \cdot e^{-\alpha\dot{\gamma}}$

Tabela 2.3 Relações entre tensão de corte e taxa de corte (adaptado de [28, 48])
(continuação)

Nome da Equação	Equação
Eyring	$\tau = \alpha \dot{\gamma} + B \sinh^{-1} \frac{\dot{\gamma}}{C}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$
Lei da Potência	$\tau = A \dot{\gamma}^n$ $n = 1$, fluido newtoniano $n > 1$, fluido reoespessante $n < 1$, fluido reofluidificante
Newtoniana	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Papo-Piani	$\tau = \tau_0 + \eta_{\infty} \dot{\gamma} + K \dot{\gamma}^n$
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + C)^b$
Sisko	$\tau = a\dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^c$
Von Berg e Ostwald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1} \frac{\dot{\gamma}}{C}$

O modelo matemático de Herschel-Bulkley é semelhante ao modelo de Newton, para valores de $\tau = 0$ e $n = 1$, idêntico ao modelo de Bingham sempre que $n = 1$ e igual à lei da Potência quando $\tau_0 = 0$.

Também a partir do modelo de Robertson-Stiff é possível chegar ao modelo de Bingham e de Newton. Se $n=1$, “a” é igual à viscosidade plástica do material e com um valor de “C” igual a τ_0 obtém-se o modelo de Bingham. Caso $C = 0$ e $n=1$, o resultado é o modelo de Newton.

Assim, é possível concluir que os modelos apresentados nas Tabelas 2.3 recorrem a pelo menos dois parâmetros para caracterizar o escoamento. É importante realçar que

segundo vários autores [47, 48, 51], para uma suspensão concentrada existe sempre uma tensão de cedência (τ_0), ou seja, uma tensão necessária transpor para dar início ao escoamento. Este parâmetro encontra-se ainda associado às equações de Bingham, Herschel e Bulkley, Von Berg e Ostwald-de-Waele, De Kee, Casson e Papo-Piani.

Quando se realiza uma análise gráfica de um fluido, o valor de tensão de cedência equivale à intersecção do eixo das tensões de corte (τ) no diagrama tensão de corte-taxa de corte. A viscosidade de um fluido coincide com o declive do mesmo diagrama estas grandezas podem ser observadas na **Fig. 2.7**:

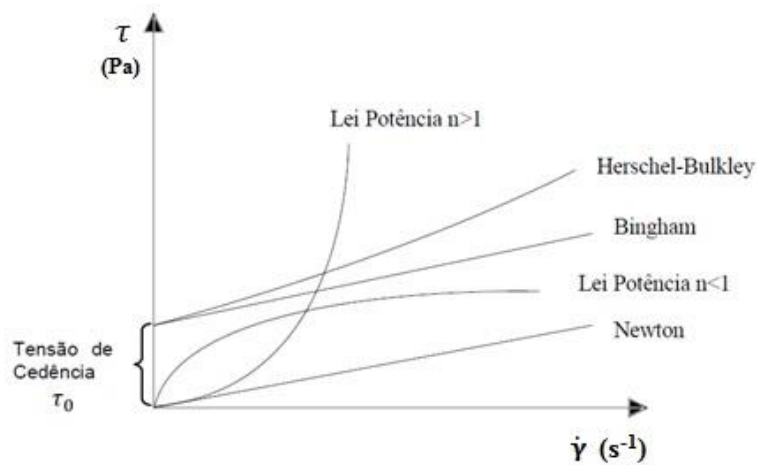


Figura 2.7 Representação gráfica dos principais modelos reológicos (adoptado [40])

É importante salientar que os modelos apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3 são apenas informativos, servindo para demonstrar a quantidade de fórmulas existentes que podem ser utilizadas para caracterizar o comportamento de escoamento de vários fluidos.

O modelo de Bingham, actualmente é muito utilizado para descrever o comportamento das fluídos à base de cal, cimento ou betão. Este é um modelo simples, pois é possível calcular os parâmetros de forma simplificada, uma vez que podem ser medidos de forma independente. Neste modelo está presente uma viscosidade infinita e, assim que se ultrapassa a tensão de cedência, a suspensão passa a comportar-se como um fluido Newtoniano. Contudo, este modelo é incompleto, pois não permite calcular o comportamento reofluidificante próprio de vários fluídos não-Newtonianos [48, 52, 53].

O modelo de Bingham, como pode ser observado na Tabela 2.3, é dado pela equação 2.3:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Em que τ representa a tensão de corte (Pa), τ_0 a tensão de cedência (Pa), η o coeficiente de viscosidade plástica (Pa.s) e finalmente $\dot{\gamma}$ a taxa de corte (s^{-1}).

Quanto ao modelo de Herschel-Bulkley, contrariamente ao modelo de Bingham, para além de permitir descrever o comportamento de fluídos reofluidificantes para $n < 1$, permite ainda descrever o comportamento dos fluídos reoespessantes quando $n > 1$. Caso os valores dos parâmetros n e τ_0 , sejam 1 e 0, respectivamente, este remete para o modelo Newtoniano [48, 52]. Assim, a fórmula empírica do modelo de Herschel-Bulkley é dada pela equação 2.4:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (2.4)$$

Onde n representa o índice de potência, τ a tensão de corte (Pa), τ_0 a tensão de cedência (Pa), K o índice de consistência e $\dot{\gamma}$ a taxa de corte (s^{-1}).

Seguidamente, na Tabela 2.4, é apresentada de forma sumária e organizada os aspectos mais significativos e influentes para a reologia de suspensões que influenciam os parâmetros reológicos dos *grouts* de injeção [28, 52, 54, 55, 56, 57, 58].

Tabela 2.4 Factores mais influentes na reologia de suspensões

Factores físicos	<ul style="list-style-type: none"> • Razão água/ligante; • Distribuição granulométrica dos constituintes; • Densidade, superfície específica e textura da superfície do ligante;
Factores químicos e mineralógicos	<ul style="list-style-type: none"> • Reactividade química dos componentes; • Tempo e processo de hidratação; • Propriedades químicas dos adjuvantes; • Propriedades dos aditivos minerais;

Tabela 2.5 Factores mais influentes na reologia de suspensões (continuação)

<p>Condições de amassadura</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento; • Velocidade; • Duração do processo de amassadura; • Capacidade da misturadora; • Temperatura e humidade no local de preparação;
<p>Condições de medição</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Duração; • Espaçamento ("Gap"); • Dimensão das geometrias; • Rugosidade das geometrias; • Taxa de corte aplicadas; • Temperatura e humidade no local de análise;
<p>Presença de aditivos e/ou adjuvantes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aditivos minerais (por exemplo sílica de fumo, cinzas volantes ou metacaulino); • Agentes redutores de água (por exemplo plastificante); • Agentes tensoactivos (como introdutores de ar); • Hidrófugos.

2.3.3 Comportamento Reológico do *Grout* de Injecção

Os fenómenos de segregação, de exsudação e a capacidade de retenção de água devem ser devidamente analisados num *grout* de injecção, uma vez que condicionam todo o escoamento no meio poroso e a performance deste ao longo do tempo. Pretende-se evitar uma perda excessiva da água da constituição em consequência da absorção por capilaridade.

É importante garantir a capacidade de fluidez e de preenchimento do meio poroso durante o processo de injecção. Avaliar a capacidade de um *grout* que apresenta boas propriedades, de um ponto de vista reológico, implica determinar duas grandezas fundamentais, a tensão de cedência e a viscosidade plástica.

Os valores associados à tensão de cedência permitem a percepção da facilidade com que se inicia o escoamento, representando o valor crítico necessário para que tal se verifique.

A viscosidade plástica possibilita distinguir os *grouts* de difícil bombagem dos facilmente trabalháveis. Tal quer dizer que um valor baixo de viscosidade plástica traduz uma suspensão que flui facilmente. Isto resulta essencialmente das interações entre as partículas coloidais excessivas de suspensão que dificultam o fluxo [26]. Na **Fig. 2.8** está representado o efeito de injeções com maior e menor viscosidade plástica.

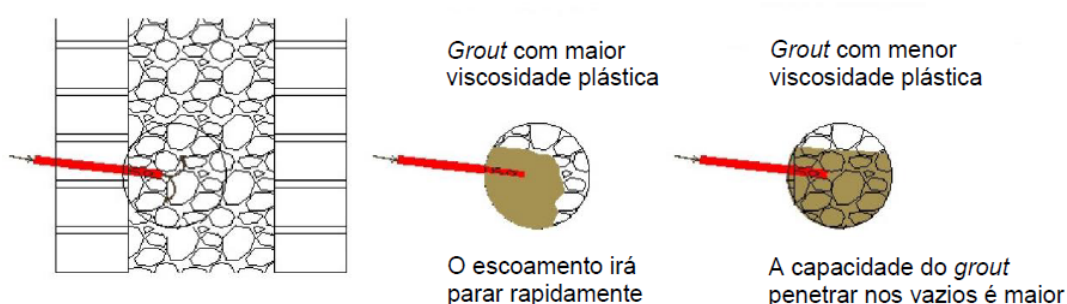


Figura 2.8 Efeito da injeção de *grout* com maior e menor viscosidade plástica (adaptado [54])

O comportamento apresentado durante o escoamento de *grouts* de injeção com base em ligantes hidráulicos pode ser relacionado com o escoamento de um fluido com comportamento tixotrópico. Tal significa que existe um decréscimo da viscosidade durante uma taxa de corte imposta e a recuperação da estrutura inicial quando a tensão acaba. O *grout* apresenta um comportamento reversível, de floculação-desfloculação, devido às reacções químicas do ligante não serem significativas no intervalo de tempo que caracteriza este tipo de comportamento.

Assim sendo, um *grout* constituído apenas por ligante e água apresenta usualmente um comportamento insatisfatório e um inadequado desempenho reológico. Para tal não acontecer, é relevante introduzir adjuvantes na sua composição, como superplastificantes, e assim não recorrer à utilização de uma dosagem de água/ligante muito elevada para garantir uma boa fluidez e injectabilidade[55].

2.3.4 Condicionantes que Influenciam a Reologia

- **Temperatura**

A técnica de injeção de *grout* em alvenarias de edifícios antigos e degradados, pode suceder sob diversas condições ambientais que provocam alterações no seu desempenho e performance. É essencial compreender a influência destes factores no local de injeção, em particular da temperatura, para compreender as consequências causadas e, caso seja possível, determinar qual a melhor estação do ano para a realização da injeção.

A análise do comportamento de um *grout* à base de cal hidráulica a diferentes temperaturas e com inclusão de cinzas volantes na sua composição, realizada por Bras et al. [56], determinou que a temperatura possui pouca importância no comportamento reológico do *grout*. Constatou-se, muito sinteticamente, que a tensão de cedência decresce quando se atingem os 20°C, e para temperaturas superiores a tensão de cedência mantém-se constante.

Não obstante, a partir da observação do gráfico apresentado na **Fig. 2.9** [8], onde se encontra representada a influência da temperatura nas propriedades reológicas de um *grout*, é de notar que o aumento da temperatura, o campo de tensões e a viscosidade plástica diminuem como resultado da agitação térmica. Apesar disso, para temperaturas superiores a 20°C, esta agitação é nula, devido a uma reacção cinética mais rápida na hidratação da cal e também devido ao aumento de forças electrostáticas das partículas da cal com a temperatura [57].

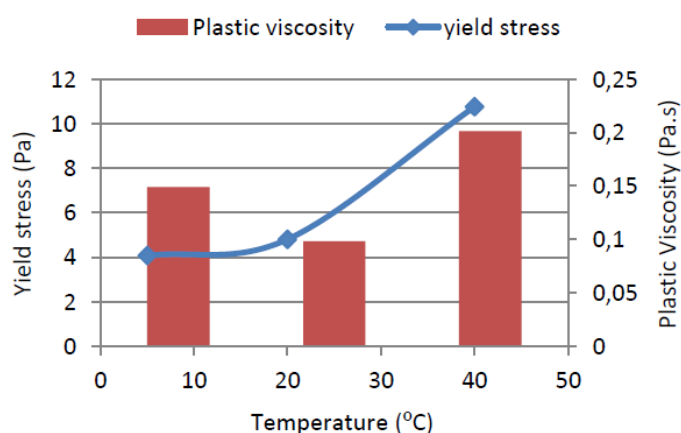


Figura 2.9 Efeito da temperatura na tensão de cedência (“yield stress”) e viscosidade plástica (“plastic viscosity”) de um *grout* de cal hidráulica com sílica de fumo e superplastificante [8]

Lei e Struble [45] descrevem que as interações entre os aglomerados de ligantes são regidas pelos hidratos que emergem nas suas superfícies e são tanto maiores quanto maior for a temperatura. Logo, o incremento da temperatura acima dos 20°C provoca um aumento das forças de interação entre as partículas, superiores às acções de repulsão estabilizantes garantidas pelo superplastificante, causando desta forma uma floculação da microestrutura e uma conseqüente perda de trabalhabilidade [46].

Os resultados apresentados na **Fig. 2.9** servem de fundamento para afirmar que a temperatura ideal para garantir o melhor desempenho reológico do *grout* é 20°C. Estes resultados são ainda confirmados pelo gráfico da **Fig. 2.10** [27], onde, mais uma vez, para uma temperatura de 20°C consegue assegurar-se uma boa fluidez e injectabilidade do *grout* no meio poroso. As mesmas deduções foram alcançadas por Brás et al [56] para temperaturas de 20°C, onde um bom desempenho reológico do *grout* no estado fresco foi obtido.

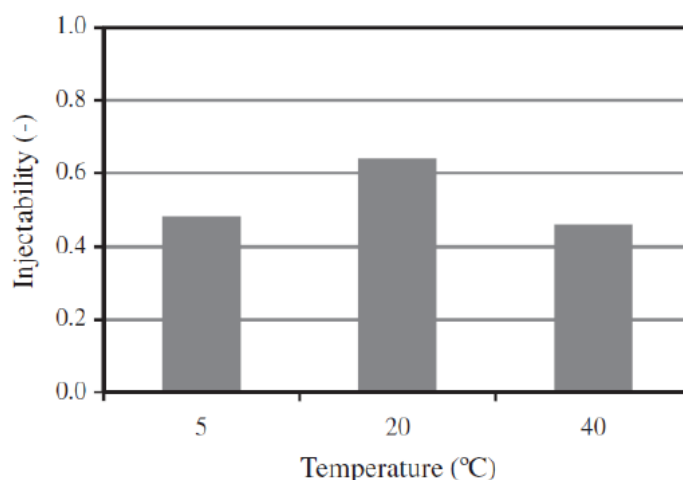


Figura 2.10 Efeito da temperatura na injectabilidade (“injectability”) de um *grout* de cal hidráulica com superplastificante e sílica de fumo [27]

Vários autores [61, 62] indicam a existência de dois factores que podem influenciar o comportamento tixotrópico. Primeiro, um aumento de temperatura que provoca reacções de hidratação mais aceleradas e um maior estado de floculação. O segundo factor ocorre durante temperaturas mais baixas, como 5°C, onde existe uma aproximação do ponto de congelamento da água e dá origem à formação de intensas ligações de hidrogénio. Para estas temperaturas baixas, a agitação molecular é menor,

existe um menor estado de liberdade, em consequência das partículas do *grout* se encontrarem mais próximas entre si, provocando uma maior floculação da microestrutura.

Em suma, a temperatura e o efeito que esta causa na performance do *grout*, quer para o estado fresco quer para o estado endurecido deve ser considerada. Na realização da técnica de injeção de *grout* deve existir especial cuidado na selecção da estação do ano e da temperatura ambiente, uma vez que este factor contribui para a realização eficaz desta técnica.

- **Pressão**

O sucesso da injeção de um *grout*, além da influência da temperatura, depende da pressão com que este é injectado na alvenaria, particularmente devido ao tamanho e disposição das partículas.

Analisando o gráfico presente na **Fig. 2.11** [27], onde se encontra representado o efeito da pressão no comportamento reológico de um *grout*, é perceptível que a pressão ideal para injeção é a menor possível, dado que apresenta os valores mais reduzidos de tensão de cedência e de viscosidade plástica.

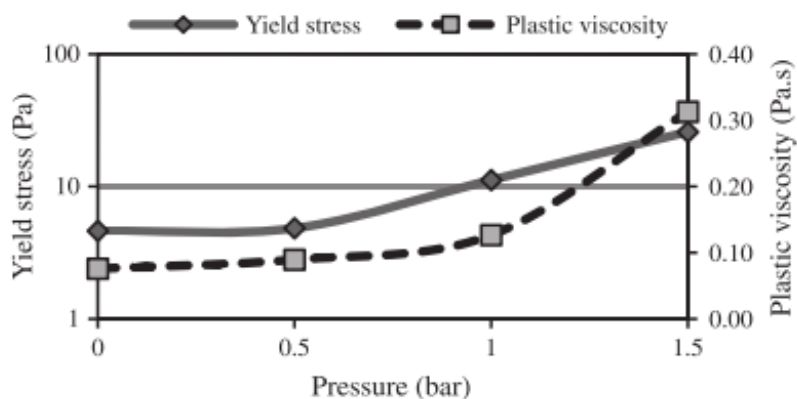


Figura 2.11 Efeito da pressão na tensão de cedência (“yield stress”) e viscosidade plástica (“plastic viscosity”) num *grout* de cal hidráulica com sílica de fumo e superplastificante [27]

Uma injeção com valores de pressão próximos de 0 bar não garante uma penetrabilidade nos vazios do meio poroso eficiente, como pode ser observado na **Fig. 2.11**. Para valores mais elevados, tais como 1,5 ou 2,0 bar, embora se consiga uma redução do tempo de injeção, surgem fenómenos de turbulência e consequentes problemas no núcleo da alvenaria [22].

Deste modo, vários autores recomendam, para uma injeção eficaz de *grout* à base de cal hidráulica, valores de pressão entre 0,5 bar [6, 63] e 1,0 bar [26, 59, 64].

2.3.5 Reómetro Rotacional

2.3.5.1 Regime Estacionário

O grau de precisão, a disponibilidade de recursos e a finalidade da aplicação dos resultados alcançados, são critérios determinantes na selecção do procedimento e equipamento mais adequado para determinação dos parâmetros reológicos dos *grouts*.

Existem inúmeros procedimentos para realizar estas determinações, desde ensaios expeditos, efectuados com equipamentos mais simples, que indirectamente fornecem indicadores de fluidez e estimativas de tensão de cedência, até instrumentação tecnologicamente muito evoluída, como os reómetros rotacionais e viscosímetros. A utilização desta tecnologia mais recente permite obter informações mais complexas a partir do *software* associado ao mecanismo, como a viscosidade em função da taxa de corte, da tensão normal ou da tensão de corte. É possível determinar a viscosidade em função da velocidade angular, do tempo, da temperatura e da tensão de corte aplicada.

O reómetro rotacional Bohlin Gemini *HR^{NANO}* (Malvern Instruments), equipamento utilizado durante toda a campanha experimental desenvolvida para a realização dos ensaios reológicos que constituem este trabalho, possui um princípio de leitura baseado numa disposição com geometrias de pratos paralelos.

Na **Fig. 2.12**, pode observar-se o esquema do modo de funcionamento do reómetro para uma amostra de *grout* durante um ensaio.

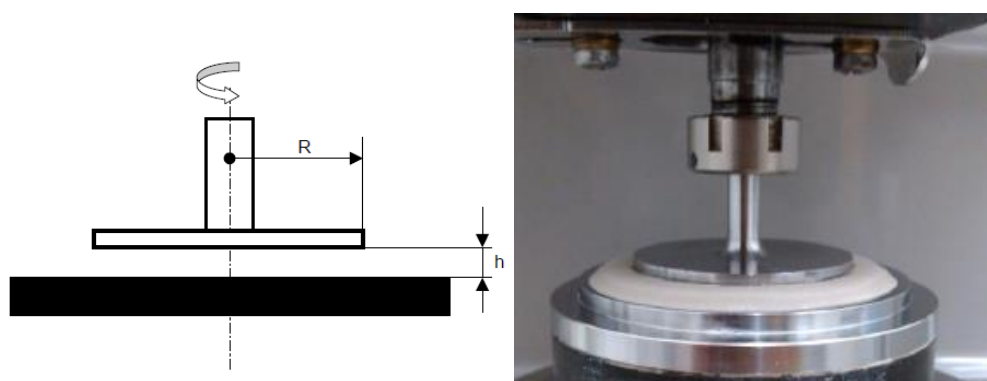


Figura 2.12 Esquema do sistema de medição: *h*, é a distância – “Gap” e *R* o raio da geometria (esq.); Pormenor de uma amostra de *grout* durante um ensaio (dir.)

Para os ensaios reológicos foram selecionadas geometrias de pratos paralelos, ao invés de geometrias cilíndricas coaxiais ou de cone e prato, uma vez que são as geometrias mais apropriadas e usualmente utilizadas para o estudo do comportamento reológico de *grouts* à base de cal hidráulica. Além deste factor, as geometrias de pratos paralelos foram utilizadas em estudos desenvolvidos anteriormente e de carácter reológico idêntico [7, 10, 11].

O "gap", que representa a distância entre os dois pratos, não deve ser inferior a dez vezes o tamanho da maior partícula da suspensão. Caso isso aconteça, podem surgir bloqueios à livre rotação da geometria superior e que resultam em resultados reológicos pouco precisos.

Existem duas programações possíveis para leitura sempre que se utiliza o reómetro na determinação das características reológicas de um *grout* em regime estacionário:

- **Teste de escoamento com taxa de corte controlada (CSR – “*controlled shear rate*”)**

É determinada a taxa de corte, calculada pelo reómetro a partir da velocidade angular no prato (ω) e no “gap” (H). Seguidamente é efectuada a medição do momento resistente (M_d) durante o escoamento/deformação. Salienta-se que, para geometrias planas, a taxa de corte não é constante em toda a superfície, uma vez que o valor é nulo no centro e apresenta valor máximo na borda do prato. Este aspecto é crucial para se obterem resultados coerentes na análise reológica de *grouts*; tal aspecto será detalhado mais pormenorizadamente no Capítulo 3 do presente trabalho. Assim, a força necessária ao movimento rotacional pode ser calculada a partir da equação 2.5:

$$F = M_{\text{deformação}} \times R_{\text{prato}} \quad (2.5)$$

Em que M_d é o torque (mNm). Seguidamente, é possível calcular o parâmetro reológico τ , em função da variação da taxa de corte ao longo do *gap*.

- **Teste de escoamento com tensão de corte controlada (CSS – “*controlled shear stress*”)**

Para além do CSR, é possível realizar teste de escoamento com tensão de corte controlada (CSS), onde é necessário definir, em primeiro lugar, o torque a aplicar no *grout* (M_d). Este, em função da área da geometria ($A = 2 \cdot \pi \cdot R_p$), possibilita submeter a amostra a uma tensão de corte (τ) controlada. Desta forma e a partir da velocidade linear (v) alcançada pelo prato, é possível obter o parâmetro reológico $\dot{\gamma}$, a partir da equação 2.6:

$$\dot{\gamma}(R_p) = \frac{v}{H} = \frac{\omega \times R}{H} \quad (2.6)$$

Onde, ω (rad/s) é obtido a partir de $2\pi \times (n / 60)$ e em que n é expresso em rotações por minuto (min^{-1}).

Assim, a partir da utilização do reómetro e das programações apresentadas anteriormente, é possível calcular a viscosidade aparente para regime estacionários ou rotacionais, com base na equação 2.7:

$$\eta = \frac{\text{Tensão de corte } \tau}{\text{Taxa de corte } \dot{\gamma}} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (2.7)$$

2.3.5.2 Regime Dinâmico

O comportamento viscoelástico dos fluídos é de grande importância. Este comportamento pode ser considerado como o desenvolvimento lento de tensões e deformações no tempo [38]. As propriedades mecânicas inerentes a este tipo de materiais dependem do tempo de carregamento e podem ser observadas mediante a realização de ensaios em regime estacionário ou de ensaios em regime dinâmico.

Simplificadamente, nos ensaios em regime estacionário, um determinado material é submetido a uma tensão ou deformação constante durante um determinado intervalo de tempo. Os ensaios em regime dinâmico mais comuns são os ensaios harmónicos; nestes, o material é submetido a uma deformação periódica e conjuntamente é registada a tensão submetida.

As medições em regime dinâmico (“*Dynamic Shear Rheometry*”) facilitam a caracterização do comportamento reológico de vários materiais viscoelásticos. O

reómetro rotacional, para além de possibilitar medições em regime dinâmico, também permite medições em regime estacionário, sob várias condições de temperatura, frequência, tensão ou deformação.

Portanto, quando se realizam medições reológicas em regime dinâmico, a geometria superior oscila em torno do seu próprio eixo, de modo a solicitar a amostra que está contida entre os dois pratos paralelos. Este movimento efectuado pelas geometrias e pelo reómetro pode ser observado na **Fig. 2.13**. O ponto A realiza um deslocamento até ao ponto B, passando pela posição inicial até atingir o ponto C e retorna seguidamente à posição inicial. Esta movimentação sequencial representa um ciclo e é repetida de forma contínua ao longo da duração estipulada para o ensaio. A velocidade com que se processa este movimento oscilatório é a frequência [65, 66].

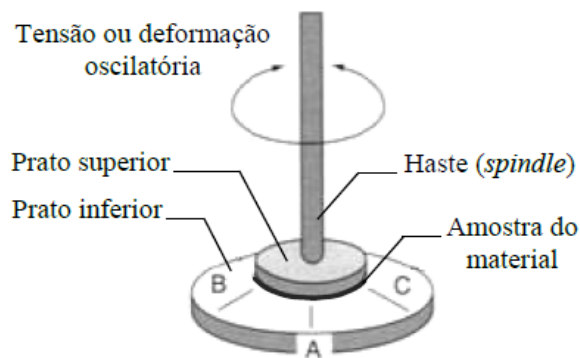


Figura 2.13 Representação esquemática da geometria de pratos paralelos num ensaio realizado pelo reómetro de corte dinâmico [64]

Neste tipo de ensaios, o reómetro pode actuar no modo de tensão controlada ou deformação controlada. Relativamente à primeira situação, o binário a aplicar na geometria superior é fixo e realiza-se a medição da rotação angular (ângulo de deflexão) associada, a partir da qual se obtém a deformação. No que concerne ao modo de deformação controlada, a geometria superior movimenta-se entre os pontos de amplitude extrema, a uma frequência estipulada e é medido o binário transmitido à amostra a partir do qual se determina a tensão necessária para manter a oscilação.

É de salientar que no modo de tensão controlada a deformação pode variar entre ciclos, enquanto que no modo de deformação controlada é a tensão que varia. Estas variações estão associadas à necessidade de manter um determinado valor de frequência previamente ajustado e dependem essencialmente da rigidez da amostra.

O reómetro mede o binário (M) e a rotação angular (θ), assim como o tempo de defasamento entre a aplicação da deformação e a resposta em termos de tensão, ou vice-versa. As outras propriedades são obtidas automaticamente a partir do *software* integrado no reómetro. A definição do tipo e condições de ensaio, o tipo de geometria e o afastamento entre pratos são estabelecidos.

Assim, para uma geometria de pratos paralelos, as amplitudes da tensão (τ_0) e da deformação (γ_0) podem ser calculadas por intermédio das equações 2.8 e 2.9:

$$\tau_0 = \frac{2M}{\pi r^3} \quad (2.8)$$

$$\gamma_0 = \frac{\theta r}{h} \quad (2.9)$$

Em que M é o binário medido (N.mm), r o raio do prato superior (mm), θ o ângulo de deflexão (rad) e h o afastamento entre os pratos (mm).

Desta forma, é possível calcular o módulo complexo tendo por base o valor máximo do raio, a partir da equação 2.10:

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} = \frac{2Mh}{\pi \theta r^4} \quad (2.10)$$

Este é o parâmetro fundamental para caracterizar os materiais viscoelásticos e aferir o seu comportamento reológico.

O módulo de corte complexo, ou apenas módulo complexo, é uma medida da resistência total de um material à deformação quando sujeito a repetidas solicitações de corte. A parte real do módulo complexo é designada por módulo conservativo ou de armazenamento (G') e corresponde à energia armazenada em cada oscilação. A parte imaginária designada por módulo dissipativo ou de perdas (G'') está associada à energia dissipada pelo fluido.

Estes módulos podem ainda ser denominados, simplificadaamente, por módulo elástico (G') e módulo viscoso (G''); contudo tais designações não são totalmente correctas, uma vez que a componente puramente elástica da resposta apenas é

representada por uma parte do módulo de armazenamento e a componente puramente viscosa apenas evidenciada por uma parte do módulo dissipativo. Para os materiais viscoelásticos, este aspecto é de grande relevância, pois podem apresentar uma quantidade significativa de resposta elástica com atraso, dependente do tempo e totalmente recuperável. Desta forma, o módulo elástico e o módulo viscoso traduzem uma parcela da resposta viscoelástica [60, 65, 67].

A relação entre ambos os módulos, G' e G'' , permite avaliar a importância da dissipação viscosa num material e representa uma grandeza denominada por tangente de perdas, obtida a partir da equação 2.11:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (2.11)$$

Deste modo, no âmbito deste trabalho optou-se por caracterizar os diferentes *grouts* não apenas mediante a realização de ensaios em regime estacionário, mas também em regime dinâmico, por se considerar relevante aferir o grau de desempenho destas novas formulações. Apesar de existir pouca informação e procedimento experimental referente a ensaios em regime dinâmico realizados sobre *grouts* de injeção com base em ligantes de cal, foi possível caracterizar as amostras de uma forma bastante satisfatória, o que possibilitou avaliar e obter um grau de caracterização mais completo para cada uma das formulações analisadas.

2.3.6 Principais Causas de Erros durante a Medição Reológica

O efeito de parede é um dos principais fenómenos que surgem durante os ensaios reológicos, podendo influenciar e alterar os resultados alcançados. Caracteriza-se pela migração da parcela líquida da amostra para próximo de uma superfície e é facilmente observável, visto que ocorre geralmente na interface geometria/amostra através da formação de uma lâmina lubrificante onde se deposita a água livre da amostra.

O fenómeno de escorregamento (“*Wall Slip*”) ocorre entre o prato e a amostra, devido à ausência de atrito entre ambos. Manifesta-se, geralmente, com o efeito de parede que contribui para o aumento do escorregamento, através da formação de uma lâmina de água lubrificante. Quando o prato inicia o movimento giratório, ao rodar sobre esta lâmina irá impedir numa fase inicial do ensaio a transmissão eficaz das tensões de corte às

camadas de *grout*. O escorregamento está muito dependente do tamanho das partículas em suspensão, que no caso específico dos *grouts* corresponde a uma suspensão floculada do tamanho dos flocos que a constituem e que por sua vez está dependente da taxa de corte. Portanto, para *grouts*, o escorregamento é um fenómeno que ocorre para taxas de corte baixas [36, 59]

De maneira a minimizar os efeitos de escorregamento pode optar-se por, no caso de reómetros rotacionais de geometrias de pratos paralelos, utilizar geometrias cerradas ou rugosas, ou no caso de viscosímetros, utilizar pás giratórias contrariamente a hastes cilíndricas, que propiciam o efeito de parede.

Para evitar a ocorrência de evaporação, principalmente, em geometrias de cone e placa ou de pratos paralelos, onde a secagem da amostra nas extremidades pode originar erros de medição, podem criar-se atmosferas saturadas no ambiente em que a amostra é ensaiada ou então utilizar uma ratoeira de solventes, circundando a amostra.

A sedimentação é outro fenómeno que pode surgir, principalmente em ensaios com tempos de espera e duração prolongada. A fim de evitar esta ocorrência, mesmo para soluções que possam ter sido melhoradas, é importante adequar as taxas de corte e se possível agitar a amostra de forma metódica entre os ensaios, promovendo assim a circulação das partículas.

A escolha adequada do *gap* é também fulcral, uma vez que se este for superior entre dez a vinte vezes às partículas da amostra em análise, a distribuição espacial das partículas não irá sofrer interferências por parte da “parede” e a viscosidade pode ser medida correctamente. Desta forma, o valor correspondente ao “*gap*” não pode ser nem demasiado baixo, para evitar um espalhamento significativo da amostra, nem demasiado alto, para não sujeitar a amostra a efeitos de escorregamento. Outro aspecto condicionante é a quantidade da amostra colocada para ensaio: em excesso pode originar fenómenos de escorregamento ou efeito de parede; em caso de insuficiência podem obter-se resultados muito pouco conclusivos e incoerentes.

2.4 Adjuvantes

2.4.1 Superplastificantes

Os superplastificantes são constituídos por moléculas poliméricas com vários segmentos aniónicos. Na sua constituição podem ser utilizados diferentes tipos de monómeros (pequenas moléculas) para formular polímeros que actuam como dispersores em argamassas, betões ou *grouts*.

Os superplastificantes podem ser à base de melamina ou naftaleno e são fabricados a partir de uma reacção chamada policondensação, por intermédio da criação de ligações poliméricas através da separação de água.

Para se perceber como funcionam os superplastificantes, é importante compreender os fenómenos que surgem quando se combina água com cimento ou cal.

As partículas que constituem, por exemplo, o cimento são pequenos grãos com formas irregulares e com cargas positivas e negativas dentro da estrutura de cristal das partículas. Quando são combinadas com água, as partículas começam a flocular devido à atracção entre as cargas positivas e negativas. Entre a amostra floculada e a água surgem vazios que retêm parte desta água misturada.

Quando é introduzido um superplastificante na amostra, as cargas negativas do polímero são absorvidas pelas cargas negativas presentes na superfície das partículas de cimento ou cal, aumentando assim a carga negativa de cada partícula. Isto leva a uma repulsão entre elas que quebra a floculação e liberta a água aprisionada nos vazios.

A dispersão do cimento ou cal e a libertação da água retida resulta numa redução da viscosidade plástica. A trabalhabilidade é também melhorada e a relação água/ligante pode, deste modo, ser reduzida. A **Fig. 2.14** exemplifica o fenómeno descrito.

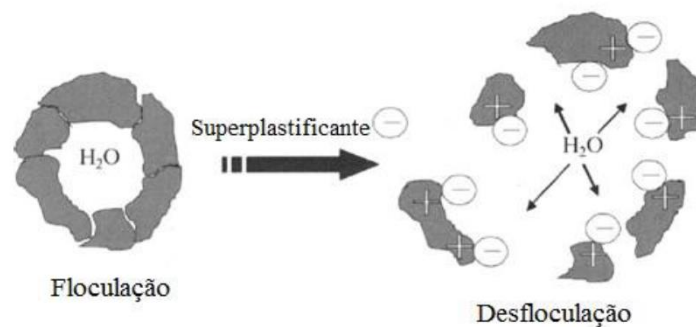


Figura 2.14 Acção do superplastificante na desfloculação das partículas de um *grout* ou argamassa [10]

A estrutura molecular do superplastificante é de grande importância no seu modo de acção e desempenho. A densidade da carga dos polímeros deve ser controlada, pois deve permitir a ligação correcta entre as partículas de cimento ou cal com carga positiva e impedir o retorno a um estado de floculação durante tempo suficiente e de forma a garantir uma boa fluidez e viscosidade. Este controlo e afinação das cargas do polímero permite assim um aumento da eficácia do efeito de dispersão do superplastificante e uma consequente melhoria nas propriedades reológicas dos *grouts*.

2.4.2 Hidrófugos

A acção da água é uma das principais causas para a origem dos problemas e anomalias em edifícios antigos, uma vez que a água danifica as argamassas, pedras e tijolos, causando deterioração interior e exterior, por intermédio da dissolução química e transporte dos compostos solúveis.

A introdução de produtos hidrófobicos tem como objectivo minimizar a acção da água, através da redução da absorção de água por capilaridade e penetração na estrutura porosa da alvenaria.

Desta forma é importante diferenciar dois grupos de hidrófugos: os hidrófugos de massa e os hidrófugos de superfície. Os primeiros combinam-se com os produtos de hidratação, formando amostras hidrofóbicas que actuam sobre os poros da argamassa já endurecida, repelindo a água, e são introduzidos durante o processo de amassadura da argamassa.

Os hidrófugos de superfície, criam uma camada hidrofóbica apenas na superfície do material endurecido e são aplicados posteriormente sobre o suporte a intervir.

A forma como estes agentes hidrofóbicos actuam é bastante simples. Como exemplo, considera-se a aplicação de um hidrófugo como o silicone, constituído por uma parte orgânica (com polaridade) e outra parte mineral (sem polaridade) num material de construção, como um reboco de argamassa tradicional constituída por hidróxidos, silicatos e aluminatos ricos em átomos de oxigénio que possuem carga eléctrica negativa (superfície hidrofílica). A parte do agente hidrofóbico que contém a parte não polar fica orientada para o exterior, repelindo a água, enquanto que a parte com polaridade fica conectada à superfície do material.

Deste modo, as propriedades da superfície do material são alteradas por intermédio do hidrófugo, através da criação de uma barreira sem polaridade que altera o seu comportamento na presença de água. No entanto, apesar da água no estado líquido não conseguir penetrar existem pequenos espaços que permitem a passagem de moléculas isoladas de água, tornando esta camada permeável ao vapor de água.

O uso de aditivos hidrofóbicos, como silicone ou óleo de linhaça, nos *grouts* de injeção é uma das tendências actuais no seu desenvolvimento e permite o melhoramento da injectabilidade mediante a redução da molhabilidade.

Uma molhabilidade reduzida pode diminuir drasticamente a perda de água da constituição, alterar significativamente as propriedades reológicas e condicionar a fluidez. Este parâmetro pode ser constatado pelo ângulo formado entre a superfície sólida e o *grout*, indicado na **Fig. 2.15**.



Figura 2.15 Influência do ângulo de contacto na molhabilidade: $\theta > 90^\circ$, Molhabilidade reduzida (esp.); $\theta < 90^\circ$, Molhabilidade Elevada (dir.)

Um ângulo de contacto superior a 90° é indicativo de uma molhabilidade reduzida e, segundo estudos anteriores [4, 69], pode reduzir a perda de água por parte do *grout*, o que permite obter injeções mais bem sucedidas.

Tal significa que para *grouts* de injeção se pretende um ângulo de contacto elevado, de forma a realizar esta técnica com sucesso. Além deste factor, estes materiais

hidrofóbicos podem ser ainda incorporados directamente na composição de *grouts*, com o objectivo de reduzir a sua molhabilidade [67].

2.4.2.1 Óleo de Linhaça

Atualmente o desenvolvimento dos *grouts* para injeção em alvenarias antigas tem por base a incorporação de novos agentes que permitam melhorar parâmetros fundamentais e tornar esta técnica cada vez mais eficaz. A incorporação do óleo de linhaça na formulação dos *grouts* é uma dessas inovações que tem vindo a ser analisada e pesquisada afincadamente.

O óleo de linhaça é empregue em diversos propósitos, para além da sua utilização na indústria agroalimentar, sendo utilizado como veículo fixo em tintas ou como acabamento em madeiras [68]. Na engenharia civil, é utilizado como hidrófugo de superfície para tratamento de superfícies de betão em edifícios ou pontes e com resultados bastante satisfatórios relativamente à protecção destas estruturas face a ataques de sais marinhos ou contra a carbonatação [69].

A adição deste hidrófugo na composição de argamassas de cal, comparativamente a outros produtos comerciais, possibilita várias vantagens: maior permeabilidade ao vapor de água, baixa absorção de água por capilaridade, melhor comportamento face a água e melhor resistência ao desenvolvimento de fungos [70].

O óleo de linhaça é considerado um hidrófugo de massa constituído por moléculas não polares. No entanto, na sua constituição existe glicerol que é quimicamente instável quando se encontra em ambientes altamente alcalinos como as argamassas de cimento ou cal. Na presença de hidróxido de cálcio, o óleo de linhaça sofre hidrólise libertando glicerol e três ácidos carboxílicos, retidos no interior do *grout*.

A existência de poucos estudos relativamente à contribuição do óleo de linhaça na conservação de edifícios é evidente. Por isso, o estudo detalhado e aprofundado da contribuição deste aditivo na composição de *grouts* para injeção e consolidação de alvenarias degradadas é essencial.

2.4.2.2 Solução de Silicone

O silicone é outro agente hidrofóbico que pode ser incorporado na constituição do *grout* de forma a potencializar parâmetros como trabalhabilidade, molhabilidade e fluidez.

A adição deste componente tem como principal finalidade alterar o ângulo de contacto pois, como referido anteriormente, um elevado ângulo de contacto significa uma reduzida molhabilidade da superfície do meio poroso, implicando uma menor perda de água livre da constituição [27].

O sucesso de uma consolidação recorrendo à técnica de injeção depende do facto de o *grout* que é introduzido no meio poroso possuir uma reduzida perda de água para o interior do meio poroso, permitindo assim conservar a sua trabalhabilidade.

Todavia, o incremento do ângulo de contacto pode promover uma degradação na ligação entre o *grout* e o meio poroso, uma vez que existe uma menor redução da molhabilidade da superfície. Em consequência desta fraca ligação entre as partículas do ligante e as partículas do meio poroso, as resistências mecânicas e o comportamento da solução no estado endurecido são afectados negativamente.

Em estudos anteriores, conduzidos por Telha [4], foi analisada a alteração do ângulo de contacto e registadas as consequências produzidas. Foi realizado um tratamento superficial à base de uma dissolução de silicone do tipo polidimetilsiloxano (PDMS), de forma a modificar as características da superfície do meio poroso, com o intuito de minimizar a absorção de água. Os silicones do tipo PDMS são bastante eficientes por serem estáveis, solúveis em água e apresentarem boa compatibilidade relativamente aos materiais correntes de construção civil.

O silicone utilizado, do tipo polidimetilsiloxano, pertence à família dos radical metil, é composto por uma parte polar (parte mineral Si-O) e uma parte não-polar (parte orgânica CH₃) e converte as moléculas de silicone anfipáticas, ou seja, moléculas que possuem uma região hidrofílica e outra hidrofóbica. Quando aplicado em superfícies correntes de construção civil que na sua constituição possuem hidróxido de cálcio, promove a atracção da parte polar do hidrófugo, orientando a parte apolar para o exterior.

As superfícies do meio poroso convertem-se assim em superfícies com propriedades não-polares e assumem um comportamento hidrófobo, que pode ser tanto

mais elevado quanto as propriedades não-polares do silicone. Na **Fig 2.16**, é possível observar o efeito provocada pela aplicação do silicone num meio poroso.

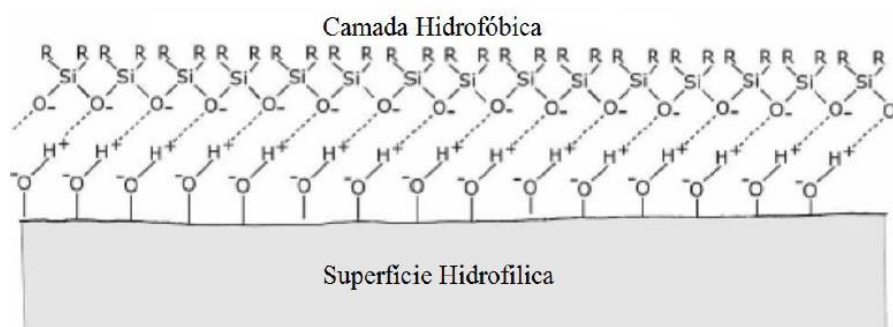


Figura 2.16 Acção do silicone: alteração química numa superfície polar de um meio poroso [71]

No momento em que a água da solução de silicone do tipo PDMS (polidimetilsiloxano) se evapora, sobre a superfície do meio poroso permanecem as moléculas orgânicas de CH₃ da parte não-polar. Não obstante, esta camada apresenta uma durabilidade relativa, uma vez que os átomos de hidrogénio e carbono que a constituem, com o decorrer do tempo começam a desassociar-se e a superfície retorna ao seu estado original unicamente polar.

Nas pesquisas realizadas por Telha [4], foram efectuadas pré-injecções de dissoluções de silicone e água com diferentes dosagens (1:6, 1:4 e 1:2) sobre vários meios porosos, com o objectivo de avaliar as alterações ao nível da injectabilidade e das resistências mecânicas. De acordo com este estudo, a realização de um tratamento hidrófugo antes de realizar a injeção do *grout* no meio poroso é uma mais valia, pois permite obter uma melhor injectabilidade que resulta da alteração do ângulo de contacto ($\theta > 90^\circ$) e uma menor molhabilidade do meio poroso. O *grout* injectado passa a comportar-se como um fluído não molhante, ocorre uma menor sucção capilar por parte dos poros do meio e uma menor perda de água da constituição. A longo prazo este tratamento prévio produz também significativas melhorias, uma melhor compacidade e uma continuidade na zona de interface entre o *grout* e o meio poroso.

É de salientar que, com base no mesmo estudo, foi também possível denotar uma redução progressiva da absorção de água pelo meio poroso, à medida que se foi incrementando a dosagem de silicone na dissolução. Ou seja, um aumento da quantidade da proporção de silicone na superfície do meio provoca um acréscimo das propriedades

de hidro-repelência do meio, das propriedades não-polares, permitindo um maior volume de *grout* injectado [4].

Contudo, as propriedades mecânicas devido à fraca ligação entre o *grout* e o meio poroso foram o principal elemento afectado. Por isso, a obtenção da dosagem ideal entre silicone e água é crucial, a fim de se obterem parâmetros resistentes adequados e alcançar uma durabilidade e qualidade adequadas.

3. Métodos e Procedimentos Experimentais

3.1 Introdução

O presente capítulo descreve o procedimento experimental adoptado ao longo do estudo que constitui esta dissertação. É realizada uma descrição da metodologia experimental, uma caracterização detalhada dos materiais e equipamentos utilizados, assim como dos critérios aplicados.

Os procedimentos experimentais foram divididos em duas partes distintas. A primeira incide na caracterização das amostras no estado fresco através de ensaios reológicos em dois regimes distintos, estacionário e dinâmico, do ensaio de retenção de água e do ensaio de estabilidade. A segunda parte recai nos ensaios realizados aos provetes das amostras no estado endurecido, nomeadamente os ensaios de resistência mecânica à compressão e à flexão, o ensaio de porosidade aberta e o ensaio de termogravimetria.

Toda a campanha experimental foi realizada nos laboratórios de construção do DEC (Departamento de Engenharia Civil) e no laboratório de reologia do CENIMAT (Centro de investigação de materiais do Departamento de Ciências dos Materiais), ambos na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

3.2 Materiais

3.2.1 Cal Hidráulica

O ligante hidráulico utilizado para formulação dos diferentes *grouts* foi a cal hidráulica (HL5) da Secil Argamassas [72]. Este ligante é, principalmente, constituído por silicatos e aluminatos de cálcio, contém um baixo teor em hidróxido de cálcio e é obtido através da cozedura de calcário margoso. O produto encontra-se classificado como HL5, respeita a norma NP EN 459-1:2010 e as suas características podem ser observadas na Tabela 3.1. Para além das características deste ligante serem um factor determinante para a sua selecção, este produto apresenta ainda uma melhor compatibilidade comparativamente aos materiais existentes em alvenarias antigas, o que justifica a opção da cal hidráulica HL5 para produção de todas as amostras que constituem os ensaios experimentais.

Tabela 3.1 Características da cal hidráulica HL5 [72]

Características Químicas	Valor	Norma
Cal disponível Ca(OH) ₂	≥ 4,0 %	EN 459-1
Sulfato	≤ 3,0 %	EN 459-1
Características Físicas	Valor	Norma
Água livre	≤ 1,0 %	EN 459-1
Finura	90 μm ≤ 15,0 % 200 μm ≤ 5,0 %	EN 459-1
Expansibilidade	≤ 2,0 mm	EN 459-1
Penetração	> 10 mm e < 50 mm	EN 459-1
Teor de ar	≤ 25,0 %	EN 459-1
Início de presa	> 1 h	EN 459-1
Fim de presa	≤ 15 h	EN 459-1
Características Mecânicas	Valor	Norma
Resistência à compressão (28 dias)	≥ 5,0 MPa	EN 459-1

3.2.2 Superplastificante

O adjuvante principal empregue na realização da campanha experimental foi CHRYSO Fluid Premia 180, um superplastificante de nova geração, fabricado pela BASF e de acordo com a norma EN 934-2 [73]. É um produto à base de policarboxilatos modificados que garantem a repulsão das partículas sólidas essencialmente devido à dispersão iónica e combinação de efeitos estéricos e electrostáticos [2, 3].

Segundo alguns autores [2, 4, 5], esta repulsão electroestérica produzida pela adição do superplastificante na amassadura do *grout* produz um aumento da distância

entre as partículas sólidas bastante significativo, de modo a que sua reaproximação não seja possível, originando assim uma diminuição dos fenômenos de instabilidade e permitindo desta forma conseguir uma injeção mais eficiente.

Este superplastificante tem ainda como uma das principais vantagens permitir uma relação água/cimento muito baixa, para além de conseguir uma consistência mais fluída na concepção de *grouts*. Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais características deste produto.

Tabela 3.2 Características do Superplastificante CHRYSO Fluid Premia 180 (BASF) [73]

Nome Comercial	CHRYSO Fluid Premia 180
Função	Reduzir dosagem de água Promover fluidez Evitar floculação
Estrutura do Material	Policarboxilato
Cor	Verde escuro opalescente
Massa Volúmica	1,05 g/ml \pm 0,02
PH	7,0 \pm 1,5
Carga	Aniónica
Teor de Iões Cloreto (%)	\leq 0,1 %

No presente estudo, para além da incorporação dos três aditivos hidrofóbicos, decidiu-se introduzir simultaneamente o superplastificante na composição dos *grouts*. Deste modo foram elaboradas diversas amostras, todas com uma relação água/ligante constante e uma variação da dosagem de superplastificante nas composições, que surgem no seguimento de estudos anteriores [7, 8, 9, 10]. Para a formulação das amostras definiram-se como dosagens de superplastificante 1.2 %, 1.6 % e 2.0 %.

O excessivo aumento da quantidade de superplastificante, para além de provocar a instabilidade da amostra, provoca a ocorrência de fenómenos de segregação, exsudação e sedimentação, o que compromete todo o processo de injeção e performance do *grout*.

3.2.3 Aditivos Hidrofóbicos

- **Hidrófugo comercial**

As amostras formuladas para a campanha experimental foram sujeitas à avaliação das suas propriedades nos estados fresco e endurecido. Na composição das amostras para além estar presente um adjuvante (superplastificante) foram introduzidos três aditivos hidrofóbicos distintos. Um desses aditivos é um hidrófugo comercial concentrado para betão e *grouts* denominado Plastocrete 05 da SIKA [78]. O produto encontra-se de acordo com a norma NP EN 934-2:T9 e segundo o fabricante actua em três pontos fundamentais:

- Possibilita uma pequena introdução de ar que diminui a absorção capilar;
- A relação de água/ligante pode ser reduzida, no mínimo em 10 %, o que permite a diminuição da capilaridade e o aumento das resistências mecânicas;
- Facilita também a dispersão da argamassa e dos agregados mais finos, provocando um aumento da homogeneidade e a diminuição da existência de zonas fracas (fendas ou fracturas) para infiltração de água.

A informação fornecida pelo fabricante sugere como dosagem para utilização deste produto até 0.5 % sobre o peso do cimento/cal, ou seja, cerca de 455 *ml* por 100 *kg* de cimento. Recomenda ainda a diluição deste aditivo na água da amassadura e ainda adverte sobre a sobredosagem que pode originar retardamento da presa. Deste modo, foram seleccionadas como dosagens experimentais 0.5 % e 1.0% para realização das amostras de *grouts*.

Na Tabela 3.3 encontram-se as características deste produto. A ficha técnica deste produto, do superplastificante CHRYSO Fluid Premia 180 e da cal hidráulica Secil HL5 podem ser consultadas em *ANEXO*.

Tabela 3.3 Características do hidrófugo comercial [78]

Nome Comercial	Plastocrete ^R 05
Aspecto/Cor	Líquido castanho

Tabela 3.3 Características do hidrófugo comercial [78] (continuação)

Base Química	Mistura de sais alcalinos com compostos complexos
Massa Volúmica	$1,10 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$ (a $23 \pm 2^\circ\text{C}$)
pH	$11,0 \pm 1,0$ (a $23 \pm 2^\circ\text{C}$)
Teor de Sólidos	$18,5 \pm 1,5 \%$
Teor de Cloretos	$\leq 0,1 \%$

- **Óleo de Linhaça**

O segundo aditivo hidrofóbico a ser analisado foi um hidrófugo de origem vegetal, o óleo de linhaça. O produto elegido é um óleo não alimentar, apropriado para aplicação e restauro de madeira naturais e que, segundo o fabricante, pode ser utilizado como constituinte de diversos tipos de massa de enchimento, como a massa de vidraceiro, utilizada para aplicar vidros em calhas de janelas.

As dosagens que foram analisadas surgem de investigações e dissertações anteriores [79, 80]. No entanto, neste estudo pretende-se analisar a influência das diversas dosagens de óleo de linhaça em *grouts* que já incorporam superplastificante. Deste modo, o óleo de linhaça na composição é analisado em dosagens de 0.5 % e 1.5 %.

Na Tabela 3.4 é possível observar as características deste produto.

Tabela 3.4 Características do óleo de linhaça [79]

Aspecto/Cor	Castanho Claro
Massa Volúmica	0,93 g/ml
Ponto de Congelação	-24°C

- **Silicone**

O último hidrófugo para formulação de *grouts* de injeção foi o silicone, mais concretamente uma solução de silicone inserida directamente no processo de amassadura do *grout*. O processo de introdução do silicone na constituição do *grout* foi o mesmo aplicado em trabalhos anteriores [9, 14], ou seja, a incorporação directa durante o processo de amassadura das amostras. Como foi clarificado no capítulo anterior, esta abordagem procura alterar o ângulo de contacto entre o *grout* e o meio poroso, de forma a obter uma menor redução da perda de água da sua constituição. Esta introdução pode produzir consolidações mais eficazes, tanto a curto como a longo prazo, mediante uma melhor capacidade de preenchimento de espaços vazios entre as partículas do meio poroso.

O silicone utilizado para obter a solução é um silicone líquido denominado SL3000 da Rubson e encontra-se certificado como produto para impermeabilização de acordo com a “Aprovação Técnica Europeia” ETAG 005 [82].

O silicone, além de ser um produto muito dispendioso, é comercializado em pasta e por esta razão a melhor forma de o introduzir na amassadura é sob a forma duma solução. Assim é necessário, antes de iniciar o procedimento experimental, a fabricação de uma solução de silicone com um traço 1:6 (em volume, silicone/água) a introduzir durante o processo de amassadura do *grout*. Esta proporção foi otimizada no estudo realizado por Silva [67]. Segundo este autor, valores superiores a este traço podem levar a instabilidade do *grout* e prejudicar os resultados, afectando negativamente o desempenho durante e após o processo de injeção no meio poroso. As características deste produto podem ser consultadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Características do silicone líquido SL3000 da Rubson [82]

Nome Comercial	Silicone Líquido SL3000
Aspecto/Cor	Líquido Pastoso/ Branco
Massa Volúmica	± 1,3 g/ml (a 20°C)
Temperatura de Aplicação	10°C e 30°C
Tempo de Secagem	2 mm a cada 24 horas

Tabela 3.5 Características do silicone líquido SL3000 da Rubson [82] (continuação)

Resistência à chuva	Após 3 -7 horas
Coefficiente de difusão de água (humidade), μ	± 1200
Valor S_a (2 mm de espessura)	$\pm 2,4$ m
Propriedades adicionais	<p>Até 400 % de elasticidade;</p> <p>Grande resistência aos raios UV;</p> <p>Grande capacidade de enchimento;</p> <p>Mantem a flexibilidade a baixas temperaturas;</p> <p>Impermeável à água líquida;</p> <p>Permeável ao vapor de água;</p> <p>Resiste a temperaturas extremas (-20°C a 80°C);</p> <p>Resiste a ataques pontuais de ácidos e bases diluídas.</p>

3.3 Composição dos *Grouts*

Na Tabela 3.6 são apresentadas as treze composições distintas analisadas nesta dissertação:

Tabela 3.6 Composição dos *grouts*

	Óleo de Linhaça		Solução de silicone	Hidrófugo líquido		Superplastificante		Relação água/ligante	
	(wt %)	g	(-)	(wt %)	g	(wt %)	g	(-)	ml
ref_1.2						1.2	3.6	0.5	130 ml +20 ml
ref_1.6						1.6	4.8		
O 0.5_1.2	0.5	1.5				1.2	3.6		
O 0.5_1.6	0.5	1.5				1.6	4.8		

Tabela 3.6 Composição dos *grouts* (continuação)

	Óleo de Linhaça		Solução de silicone	Hidrófugo líquido		Superplastificante		Relação água/ligante	
	(wt %)	g	(-)	(wt %)	g	(wt %)	g	(-)	ml
O 1.5_1.2	1.5	4.5				1.2	3.6	0.5	130 ml +20 ml
O 1.5_1.6	1.5	4.5				1.6	4.8		
S 1:6_1.2			1:6			1.2	3.6		
S 1:6_1.6			1:6			1.6	4.8		
S 1:6_2.0			1:6			2.0	6.0		
H 0.5_1.2				0.5	1.5	1.2	3.6		
H 0.5_1.6				0.5	1.5	1.6	4.8		
H 1_1.2				1	3	1.2	3.6		
H 1_1.2				1	3	1.6	4.8		

As composições de *grouts* analisadas, exibidas na Tabela 3.6, apresentam uma nomenclatura (coluna à esquerda) em que a primeira letra corresponde ao aditivo adicionado à amostra, *O*, *S* ou *H* correspondem ao óleo de linhaça, à solução de silicone e ao hidrófugo comercial, respectivamente. A seguir à letra inicial encontra-se a dosagem correspondente desse aditivo em relação à massa de ligante (cal hidráulica). Por exemplo para *O* 0.5 ou *H* 1 a percentagem de óleo de linhaça é 0.5 % e de hidrófugo é 1.0 %. Finalmente encontra-se a dosagem do superplastificante, que varia entre 1.2 %, 1.6 % e 2.0 %. A explicação desta terminologia é ilustrada mais detalhadamente na **Fig. 3.1**.

H 0.5_1.2
(1) (2) (3)

Figura 3.1 Nomenclatura utilizada: (1) Aditivo hidrofóbico – *O*, *S* ou *H*; (2) Dosagem do aditivo; (3) Dosagem de superplastificante

Assim, na tabela é possível observar, para além dos *grouts* de referência *ref_1.2* e *ref_1.6*, apenas com superplastificante e sem qualquer aditivo, outras composições como *O 0.5_1.2*, *O 0.5_1.6*, *O 1.5_1.2* e *O 1.5_1.6* (azul) que representam os *grouts* que na sua constituição contêm óleo de linhaça. Existem *S 1:6_1.2*, *S 1:6_1.6* e *S 1:6_2.0* (verde) que têm como elemento a solução de silicone e finalmente *H 0.5_1.2*, *H 0.5_1.6*, *H 1_1.2* e *H 1_1.6* (laranja) que incluem o hidrófugo comercial.

Todas as treze composições foram caracterizadas no estado fresco, mediante ensaios no reómetro em regime estacionário e que será descrito mais pormenorizadamente neste capítulo.

É importante referir que o rácio água/ligante (*w/b*) de todas as amostras é 0.5 e é fixo, assim como a quantidade de ligante, 300 g. Na Tabela 3.6 é ainda possível observar a dosagem exacta de cada aditivo, a sua percentagem correspondente em relação à massa do ligante (wt %) e a correspondente quantidade em massa (*g*).

Posteriormente foram seleccionadas seis composições nomeadamente: *ref_1.6*, *S 1:6_1.6*, *O 0.5_1.6*, *O 1.5_1.6*, *H 0.5_1.6* e *H 1_1.6*, para serem caracterizadas no reómetro em regime dinâmico, através dos restantes ensaios no estado fresco e dos ensaios no estado endurecido.

3.4 Procedimento da Amassadura

Todas as amostras para os ensaios foram elaboradas no laboratório de materias do DEC (Departamento de Engenharia Civil), num período compreendido entre Janeiro e Abril de 2017. Os ensaios descritos ao longo deste capítulo foram efectuados nas mesmas instalações, à excepção dos ensaios reológicos, realizados no Centro de Investigação de Materiais (CENIMAT).

As amassaduras das diversas composições, apresentadas na Tabela 3.6, foram executadas no laboratório a uma temperatura ambiente de aproximadamente $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa de $55 \pm 5\%$. Foi utilizada para preparação dos *grouts* água corrente a uma temperatura de $18 \pm 2^\circ\text{C}$. Todas as amostras foram preparadas numa cuba previamente humedecida com 177 mm de diâmetro, 244 mm de altura, capacidade de 5 L, com uma lâmina de forma helicoidal, a qual pode ser observada na **Fig. 3.2**:



Figura 3.2 Equipamento e material utilizado no processo de amassadura: Misturadora mecânica (esq.); Cuba metálica (dir.)

O procedimento de amassadura foi similar ao adoptado em trabalhos anteriores [16, 17] e inicia-se com a totalidade da cal hidráulica a ser adicionada a 70 % da totalidade da água necessária para a mistura, tudo amassado mecanicamente durante aproximadamente 10 minutos a uma velocidade de 2400 rpm. A água restante é diluída juntamente com o superplastificante e adicionada ao fim de 10 minutos da amassadura, sendo tudo novamente misturado durante 3 minutos adicionais.

O atraso de 10 minutos na incorporação do superplastificante na amassadura promove eficazmente a dispersão das partículas [16, 18, 19, 20, 21]. Segundo os estudos acima, nas fases iniciais de hidratação uma grande quantidade de fase anidro (“*anhydrous phase*”) é produzida muito rapidamente na presença do superplastificante. Este acção provoca que parte do superplastificante fique parcialmente intercalado entre camadas de hidratos, impedindo assim a dispersão das partículas de ligante [22, 23]. Na **Fig. 3.3** é possível observar as diferenças na amostra antes e após incorporação do superplastificante.



Figura 3.3 Aspecto da amostra antes (esq.) e após (dir.) a adição do superplastificante

Os três aditivos hidrofóbicos analisados são adicionados na amassadura de forma distinta. A adição do óleo de linhaça na amassadura foi idêntica à realizada por Gomes [79]; primeiramente é realizada uma mistura do óleo com a cal no traço $\frac{3}{4}$ (em massa, óleo/ligante), amassada manualmente e formando uma “pasta” com cor e odor característicos. A adição desta mistura na cuba é realizada cerca de 5 minutos após início da amassadura do ligante com a água e antes da adição do superplastificante, de forma a evitar a formação de flocos na amostra final. Na **Fig. 3.4** pode observar-se a “pasta” resultante da amassadura manual entre o óleo de linhaça e a cal.



Figura 3.4 Óleo de linhaça e cal antes da junção (esq.); “Pasta” obtida após amassadura manual (dir.) [79]

Relativamente ao hidrófugo, este é dissolvido em 10 *ml* de água, que correspondem a metade de 30 % da totalidade de água reservada inicialmente. É adicionado após 10 minutos iniciais de amassadura e após a adição do superplastificante. O hidrófugo é adicionado ao fim de 13 minutos e misturado mecanicamente durante mais 2 minutos de forma a incorporar correctamente todos os constituintes.

Finalmente a solução de silicone, dissolvida no traço 1:6 (em volume, silicone/água) foi utilizada como elemento líquido, em substituição da água corrente durante todo o processo de amassadura dos *grouts*.

Este procedimento de amassadura foi adoptado para todas as composições apresentadas e a sua correcta execução tem como objectivo garantir um processo de preparação idêntico para todas as amostras.

3.5 Ensaios Realizados no Estado Fresco

3.5.1 Caracterização Reológica dos *Grouts*

3.5.1.1 Ensaios em Regime Estacionário

As medições reológicas foram efectuadas recorrendo ao reómetro rotacional Gemini HR^{nano} da Bohlin Instruments (Malvern, UK), que pode ser observado na **Fig. 3.5**, e ao *software* reológico Bohlin Rotational associado a este equipamento. A amassadura descrita em 3.4 é realizada previamente e o ensaio no reómetro inicia-se 7 minutos após o início do processo de hidratação do *grout*, com uma duração de aproximadamente 20 minutos. Devido ao facto de não existir nenhum procedimento de ensaio normalizado para a realização de ensaios reométricos de *grouts* à base de cal hidráulica, foi necessário a adaptação de procedimentos desenvolvidos anteriormente em estudos relativos a *grouts* de injeção à base de cal hidráulica natural (NHL5) [17, 24].



Figura 3.5 Reómetro rotacional Gemini HR^{nano} da Bohlin Instruments (esq.); Pormenor da geometria inferior onde é depositada a amostra de *grout* (dir.)

Os ensaios foram realizados utilizando geometrias de pratos paralelos com 40 mm de diâmetro, um afastamento (“*gap*”) entre pratos de 2 mm e uma temperatura constante de 20°C. A rugosidade da superfície do prato superior foi alterada mediante a aplicação de uma lixa (GR 120) de forma a minimizar os fenómenos de escorregamento da amostra durante as medições, como ilustrado na **Fig. 3.6**.



Figura 3.6 Geometria de pratos paralelos: Geometria superior lisa (esq.); Após a colocação da lixa (dir.)

O ensaio que permitiu alcançar os parâmetros reológicos necessários para caracterização dos *grouts* é obtido mediante a variação crescente da taxa de corte entre $0.5 - 300 \text{ s}^{-1}$. A curva descendente ($300 - 0.5 \text{ s}^{-1}$) é também calculada por ser necessária para averiguar a existência de tixotropia no fluido. O desenvolvimento das curvas durante o ensaio dá origem às curvas de fluxo que caracterizam as amostras. A fim de evitar a influência indesejada de fenômenos que propiciem erros e de forma a garantir condições iniciais semelhantes para todas as amostras, antes de serem sujeitas à variação da taxa de corte, todas foram submetidas a uma taxa de corte prévia de 1 s^{-1} durante 1 minuto e, finalizado o ensaio, foram submetidas à mesma pré taxa de corte pelo mesmo período de tempo.

É de salientar que para cada composição foram efectuadas duas repetições sobre novas amostras em dias diferentes. Além disto, como medida de precaução e rigor na realização destas medições, antes da introdução de uma nova amostra no reómetro era efectuada uma limpeza com água corrente das geometrias. A lixa aplicada na geometria superior era unicamente utilizada durante três ensaios. Após a terceira leitura procedia-se à substituição da lixa por uma nova. O prato superior antes da introdução de uma nova amostra era sempre colocado na posição zero. Previamente a cada ensaio, a amostra era sempre mexida com o mesmo número de voltas e da mesma forma, de modo a promover o movimento e o refluxo das partículas do fundo até à superfície. Além disso, a quantidade de *grout* colocada no prato para as medições foi sempre a mesma.

3.5.1.2 Ensaios em Regime Dinâmico

De forma a enriquecer esta dissertação e com o propósito de investigar e garantir uma caracterização ainda mais completa das composições em estudo, optou-se por

realizar ensaios reológicos em regime dinâmico, que normalmente são realizados em betumes e caldas cimentícias. Desta forma procurou-se avaliar as propriedades dinâmicas e viscoelásticas das composições.

Foram realizados vários ensaios oscilatórios, que se subdividem em dois grupos: o varrimento de deformação para determinação da região linear viscoelástica, LVR (“*linear viscoelastic region*”) e o varrimento de frequência para obtenção dos parâmetros reológicos pretendidos. Os varrimentos de deformação foram realizados antes dos varrimentos de frequência, pelo facto de ser necessário descobrir previamente a LVR dos *grouts*. O conhecimento desta região é de extrema importância uma vez que permite obter informação relativa à microestrutura dos *grouts* em condições de repouso. Assim, as amostras foram sujeitas a um varrimento de deformação com três frequências distintas, 1, 1.5 e 2 *Hz*.

Realizado o varrimento de deformação, crucial para descobrir a LVR, as amostras foram submetidas a uma variação de frequência entre os 1.6 e 16 *Hz*, com temperatura constante de 20°C e deformação constante de 5.7×10^{-3} %. Assim, foi possível determinar a evolução do módulo elástico (G') e do módulo viscoso (G'') necessários para a caracterização dinâmica.

Todos os procedimentos de amassadura e metodologias foram idênticos aos apresentados nas secções anteriores (3.4 e 3.5.1.1). Apenas a programação do *software* reológico Bohlin Rotational foi alterada de forma a obter as componentes pretendidas.

3.5.2 Ensaio de Estabilidade

No ensaio de estabilidade é possível medir a quantidade de água que reflui à superfície de um *grout* quando este se encontra em repouso e impedido de sofrer qualquer tipo de evaporação. Desta forma, o ensaio de estabilidade que obedece à norma NP EN 445 [84] consiste em verter cerca de 95 a 100 *ml* de *grout* numa proveta cilíndrica graduada com diâmetro de 25 *mm* e 250 *mm* de altura. De modo a evitar qualquer tipo de evaporação de água, a proveta é tapada utilizando, por exemplo, uma rolha de borracha ou qualquer material que impeça a evaporação. Na **Fig. 3.7** é possível observar o decorrer de um ensaio de estabilidade.



Figura 3.7 Ensaio de estabilidade: provete cilíndrico com *grout* no interior (esq.); Escala graduada para medição da água que reflui à superfície (dir.)

Após a colocação da quantidade necessária de amostra na proveta (**Fig. 3.7**) é realizado o registo do volume inicial de *grout* no interior (v_0) e ao fim de 3 horas é realizada a medição da quantidade de água na superfície do *grout* (v_1). A quantidade de água exsudada que constitui o resultado final do ensaio é expressa em percentagem e calculada a partir da equação 3.1:

$$\text{Exsudação} = \frac{v_1}{v_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

Segundo a norma NP EN 445 [84], o valor de exsudação deve ser suficientemente baixo para impedir a sedimentação e segregação do *grout*; por isso é imposto um limite superior de 2 %.

3.5.3 Ensaio de Retenção de Água

O ensaio de retenção de água foi realizado respeitando a norma ASTM C941-02 (American Society for Testing and Materials, 2002b) [85] e permite calcular o tempo necessário para retirar uma determinada quantidade de água de uma amostra de *grout* em vácuo.

Neste ensaio o *grout* é depositado num funil de Buckner, com capacidade de 500 *ml*, sobre um papel de filtro absorvente ligeiramente humedecido para evitar a absorção da água da constituição. O sistema desenvolvido para realização deste ensaio foi conectado a uma bomba de vácuo que aplica uma depressão de 5.0 ± 0.2 *kPa*, controlada mediante um manómetro digital.

A quantidade *standard* de água é recolhida numa proveta graduada, o tempo (em segundos) é registado e o ensaio é finalizado. O esquema de montagem do ensaio e o sistema elaborado são apresentados na **Fig. 3.8**.



Figura 3.8 Ensaio de retenção de água: Esquema apresentado na norma ASTM C941-02 (esq.); Esquema preconizado para realização do ensaio de retenção de água (dir.)

Apesar de a norma recomendar um limite de 60 *ml* para finalização do ensaio, tal não foi possível efectuar com as amostras em estudo; por isso foram considerados 15 *ml* de água. O valor seleccionado resultou da dificuldade de extracção de 60 *ml* e em muitos casos de 30 *ml* da água constituinte do *grout*. Tal deve-se principalmente a fenómenos de instabilidade, como a segregação e exsudação, que à medida que o tempo avançava se tornavam mais gravosos e levaram a que as partículas do *grout* se depositassem no fundo do funil dificultando a remoção da água. Um destes fenómenos que dificultou o ensaio é evidenciado na **Fig. 3.9**.



Figura 3.9 Amostra de *grout* no funil de Buchner com sinais de exsudação, no decorrer do ensaio

3.6 Ensaios Realizados no Estado Endurecido

3.6.1 Ensaio de Resistência Mecânica

- **Cálculo da Massa Volúmica**

Neste estudo pretendeu-se obter uma caracterização completa das diversas composições analisadas. Deste modo foram realizados vários ensaios no estado endurecido de forma a simular e avaliar o comportamento dos diferentes *grouts* após o seu endurecimento.

No decorrer dos ensaios no estado fresco foram produzidas amostras correspondentes às composições dos *grouts* em análise e colocadas em moldes metálicos com formato prismático de dimensões 40x40x160 mm, apresentados na **Fig. 3.10**. Após a cura de 28 dias, a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5 \%$, sob as condições existentes numa sala condicionada existente no Departamento de Engenharia Civil, os provetes foram sujeitos aos ensaios que seguidamente serão descritos.



Figura 3.10 Execução dos provetes: Colocação das amostras de *grouts* nos moldes metálicos (esq.); Provetes com 7 dias de cura (dir.)

Após concluído o período de cura e realizada a desmoldagem dos provetes, estes foram cuidadosamente pesados numa balança rigorosa e com o auxílio de uma craveira foram obtidas as dimensões da base e o comprimento, como exhibe a **Fig. 3.11**. O valor da

massa volúmica é necessário para a determinação da resistência à flexão e compressão e é calculado a partir da equação 3.2:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.2)$$

Em que ρ é o valor da massa volúmica (kg/dm^3), M é massa seca de cada provete (Kg) e V o volume (dm^3).



Figura 3.11 Determinação da massa volúmica: balança para obtenção da massa seca (esq.); craveira para medição (centro); fractura registada em alguns provetes após desmoldagem (dir.)

- **Ensaio de Resistência à Flexão**

Os ensaios realizados no estado endurecido aos provetes visaram determinar a resistência à flexão de 15 provetes prismáticos fabricados (3 para cada composição). Este ensaio foi executado com base na norma EN 1015-11:1999^a [86], utilizando a máquina universal de tracção “ZWICK Z050”, equipada com uma célula de carga de 2 *kN*. O ensaio baseia-se na aplicação de uma carga num ponto superior localizado a meio vão do provete, onde a face superior é comprimida e a inferior traccionada. A colocação do provete é de crucial importância, uma vez que é necessário garantir uma aplicação da carga equidistante dos locais de apoio.

O ensaio inicia-se com a colocação horizontal do provete nos dois apoios inferiores da célula de carga, com espaçamento entre eles de 10 *cm*. O carregamento começa com a aplicação de uma carga gradualmente crescente, à taxa de 0.7 *mm/min* até se atingir a rotura. O ensaio termina quando o provete atinge a carga última na zona tracionada, daí resultando duas metades para ensaios posteriores.

O *software* de leitura regista os valores de força aplicada e deformação, o valor máximo de força aplicado, ou seja, a carga última de rotura é registada e a resistência à flexão (R_f) é calculada com base na equação 3.3:

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times L}{a \times b^2} \quad (3.3)$$

Onde R_f representa a resistência à flexão (MPa), F_f a carga de rotura à flexão (N), L a distância fixa entre os apoios na face inferior dos provetes (mm), a é a largura do provete em relação à posição de aplicação da carga (mm) e b a altura do provete relativamente à posição de aplicação da carga, ou seja, a e b são as dimensões médias das bases dos provetes ensaiados. A **Fig. 3.12** ilustra o ensaio descrito, o equipamento e os provetes durante e após o ensaio.



Figura 3.12 Ensaio à flexão: Provetes com 28 dias de cura após desmoldagem (esq.); Colocação na célula de carga (centro); Metades resultantes do ensaio (dir.)

É de realçar que alguns provetes após a desmoldagem apresentavam fracturas bastante patentes e que impossibilitaram a realização do ensaio em questão (**Fig. 3.13**). Nem após a fabricação de novos provetes foi possível a realização deste ensaio, uma vez que as fracturas nos provetes subsistiam. Assim algumas composições não puderam ser testadas e por isso foi-lhes atribuído um valor nulo de resistência à flexão.

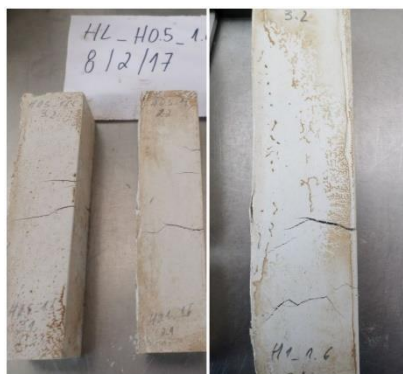


Figura 3.13 Fracturas evidenciadas pelos provetes H 0.5_1.6 (hidrófugo comercial)

- **Ensaio de Resistência à Compressão**

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 1015-11:1999a [86] e utiliza o mesmo equipamento do ensaio anterior, a máquina universal de tracção “ZWICK Z050”.

As metades resultantes do ensaio de resistência à flexão foram utilizadas no ensaio de resistência à compressão. Estas foram colocadas num molde metálico que garante uma área de contacto de $40 \times 40 \text{ mm}^2$, assegurando deste modo uma maior uniformidade na aplicação da carga e uma melhor aderência entre o provete e a prensa. Seguidamente o molde é colocado entre os dois pratos do equipamento para assim dar início ao ensaio. O carregamento foi aplicado com um incremento à taxa de 1.2 mm/min de forma constante até ocorrer a rotura. Durante o ensaio os valores de deformação e força aplicada foram registados num *software* próprio e o valor máximo de força aplicado foi registado logo após a rotura do provete. A **Fig. 3.14** apresenta o ensaio descrito.



Figura 3.14 Ensaio à compressão: Introdução da metade do provete no molde metálico de ensaio (esq.); Colocação na máquina universal de tracção “ZWICK Z050” (centro); Um dos provetes após sofrer rotura (dir.)

A resistência à compressão é então calculada a partir da equação 3.4:

$$R_c = \frac{F_c}{\text{Área da Secção}} \quad (3.4)$$

Em que, R_c é o valor médio de resistência à compressão (MPa) e F_c a força máxima que provoca rotura por compressão (kN). A área da secção em que se aplica a carga (mm^2) corresponde ao molde metálico em que o provete é inserido.

3.6.2 Ensaio de Porosidade Aberta

A porosidade aberta foi calculada após a total saturação, com água e em vácuo, das amostras restante dos provetes, fragmentos que resultaram do ensaio de resistência à compressão, através da pesagem hidrostática, seca e saturada destes e segundo a norma EN 1936:2006 (CEN 2008) [87].

As amostras foram secas numa estufa a $60 \pm 5^\circ C$ e seguidamente depositadas num exsiccador equipado com uma bomba de vácuo. Cada um destes processos teve a duração de 24 horas. Seguidamente, ainda no exsiccador, estas amostras foram imersas em água, sob as mesmas condições de vácuo, durante 24 horas adicionais. Por fim foi mantida uma pressão ambiente pelo mesmo período de tempo, ainda no exsiccador com água e sem a bomba de vácuo a funcionar.

Após estes procedimentos foram efectuadas, para cada uma das amostras, uma pesagem hidrostática e uma pesagem saturada necessárias para a aferição da porosidade das amostras. Note-se que previamente à saturação das amostras havia sido registada a massa seca. O ensaio encontra-se de seguida ilustrado na **Fig. 3.15**:

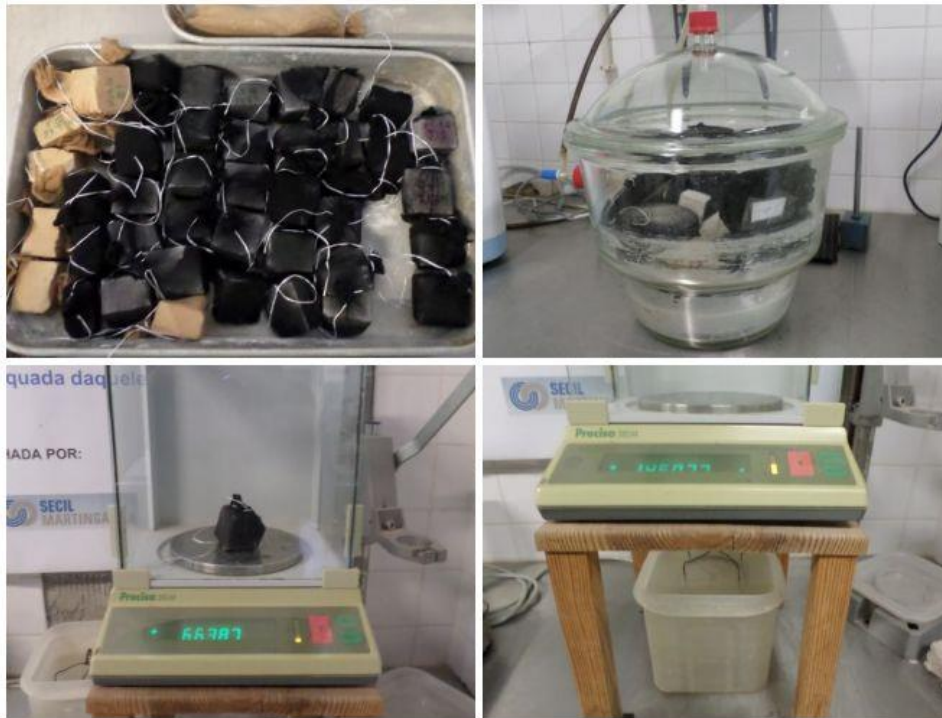


Figura 3.15 Ensaio de porosidade aberta: preparação das amostras (cima esq.); colocação das amostras no exsiccador (cima dir.); pesagem saturada (baixo esq.); pesagem hidrostática (baixo dir.)

Os resultados obtidos neste ensaio permitem averiguar, em percentagem, o volume de poros abertos ao exterior. Desta forma é possível quantificar a compacidade e a capacidade de absorção de água de um determinado *grout*, dado que um baixo valor de porosidade aberta equivale a um provete mais compacto. O cálculo da percentagem relativa à porosidade aberta é feito a partir da equação 3.5, que relaciona o volume dos poros abertos e o volume aparente das amostras, através da massa saturada, da massa hidrostática e da massa seca.

$$P_a = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (3.5)$$

Onde P_a é o valor médio de porosidade aberta de todas as amostras analisadas (%), m_s a massa saturada do provete (g), m_h a massa hidrostática (g) e m_d a massa seca (g).

3.6.3 Análise Termogravimétrica

A Análise Termogravimétrica (TGA - “*Thermogravimetric Analysis*”) é uma técnica que consiste em submeter uma substância a uma variação de temperatura, através da qual é realizada a medição da alteração e registo das perdas de massa [88]. Basicamente a termogravimetria (TG) consiste numa microbalança rodeada por uma mufla, monitorizada por um programa de computador que realiza o registo da temperatura e a variação de massa. A perda de massa surge sempre que se perde um componente volátil da constituição da amostra [10, 26].

Nesta análise, pequenas amostras das composições em estudo, resultantes da fragmentação dos provetes dos ensaios de resistência mecânica, foram secas numa sala condicionada com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$. Foram moídas com o auxílio de um almofariz e apenas 1 g destas amostras foi utilizada, uma vez que esta era a quantidade necessária para realização do ensaio. O procedimento deste ensaio pode ser observado na **Fig. 3.16**.



Figura 3.16 Análise termogravimétrica: preparação das amostras após secagem (esq.); moagem utilizando o almofariz (centro); colocação de 1 g da amostra na haste portadora em alumina

A análise é efectuada com recurso ao equipamento de análise termogravimétrica TG-DTA/DSC STA 449 F3 Jupiter da Netzsch-Gerätebau GmbH existente no Departamento de Engenharia Civil.

Este ensaio é executado com base em condições experimentais imposta pelo *software* associado ao equipamento de análise. Desta forma, o equipamento produz uma atmosfera dinâmica com o gás N_2 (40 ml/min) com uma taxa de aquecimento de 10°C/min desde 20°C até 1000°C e com uma paragem de segurança a 1010°C . A utilização de uma

haste portadora em alumina para trabalhar com esta atmosfera é essencial para proteger a amostra e suportar a variação de temperatura. Na **Fig. 3.17** é possível visualizar pormenores da análise termogravimétrica, tais como a colocação da amostra para ensaio e o equipamento utilizado.



Figura 3.17 Procedimento da análise termogravimétrica: Colocação da haste portadora de alumina contendo a amostra no equipamento (esq.); Equipamento de análise termogravimétrica TG-DTA/DSC STA 449 F3 Jupiter (dir.)

4. Apresentação e Análise de Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos após a introdução de três hidrófugos de massa (óleo de linhaça - *O*, silicone - *S* e hidrófugo comercial - *H*) durante o processo de amassadura de *grouts* para consolidação de alvenarias, por meio da técnica de injeção com base nestes resultados avalia-se a influência dos hidrófugos nas propriedades no estado fresco e endurecido.

A apresentação dos resultados encontra-se dividida em duas partes distintas, tal como na campanha experimental, de forma a efectuar uma avaliação às características, antes e após o processo de injeção dos *grouts*.

A primeira parte corresponde a uma verificação das propriedades no estado fresco, essencialmente através da obtenção e análise de parâmetros reológicos fundamentais como a tensão de cedência, a viscosidade plástica, o índice de consistência e a área de tixotropia. Desde logo, as propriedades reológicas dos *grouts* são influenciadas por diversos factores, nomeadamente: o tempo da amassadura, o tempo e a sequência de adição dos vários constituintes, o tipo de ligante, o rácio água/ligante, o tipo e dosagem de superplastificante ou ainda outros aditivos na composição [61].

De modo a complementar a análise desta propriedade é efectuada a apresentação e análise dos resultados do ensaio de retenção de água e de estabilidade das composições em estudo.

A segunda parte de apresentação e avaliação dos resultados é realizada sobre os valores alcançados nos ensaios no estado endurecido, nomeadamente, os valores de resistência mecânica à compressão e flexão, de porosidade aberta e da termogravimetria.

4.2 Resultados dos Ensaio Realizados no Estado Fresco

4.2.1 Caracterização Reológica dos *Grouts*

4.2.1.1 Regime Estacionário

Todos os *grouts* analisados apresentaram um comportamento reofluidificante, ou seja, uma diminuição da viscosidade do fluido quando existe um aumento da taxa de corte. De forma a obter os parâmetros essenciais para realizar a caracterização das diferentes composições e para verificar qual o impacto da adição dos três hidrófugos de massa na sua formulação, foram adoptados os modelos matemáticos de Herschel-Bulkley e Power-Law, exibidos na equação 4.1 e na equação 4.2, respectivamente, por apresentarem um bom ajustamento em virtude das curvas de fluxo alcançadas durante os ensaios reológicos.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (4.1)$$

$$\eta = K \times \dot{\gamma}^n \quad (4.2)$$

Nas equações 4.1 (Herschel-Bulkley) e 4.2 (Power-Law) são identificados os seguintes parâmetros: τ , tensão de corte (Pa); τ_0 , tensão de cedência (Pa); $\dot{\gamma}$, taxa de corte (s^{-1}); K , índice de consistência; η , coeficiente de viscosidade plástica ($Pa.s$). Na Tabela 4.1 é possível observar os valores do módulo de ajustamento (R^2) que levaram à selecção destes dois modelos.

Tabela 4.1 Valores do módulo de ajustamento R^2

	R^2 (-) Herschel-Bulkley	R^2 (-) Power-Law
ref_1.2	0.999	0.959
ref_1.6	0.999	0.968
O 0.5_1.2	0.973	0.913
O 0.5_1.6	0.999	0.933
O 1.5_1.2	0.972	0.936
O 1.5_1.6	0.987	0.947
S 1:6_1.2	0.998	0.982
S 1:6_1.6	0.993	0.974

Tabela 4.1 Valores do módulo de ajustamento R^2 (continuação)

	R^2 (-) Herschel-Bulkley	R^2 (-) Power-Law
S 1:6_2.0	0.999	0.985
H 0.5_1.2	0.999	0.967
H 0.5_1.6	0.997	0.952
H 1.0_1.2	0.999	0.948
H 1.0_1.6	0.998	0.947

Seguidamente na **Fig. 4.1** são apresentadas as curvas de fluxo correspondentes às treze composições de *grout* analisadas:

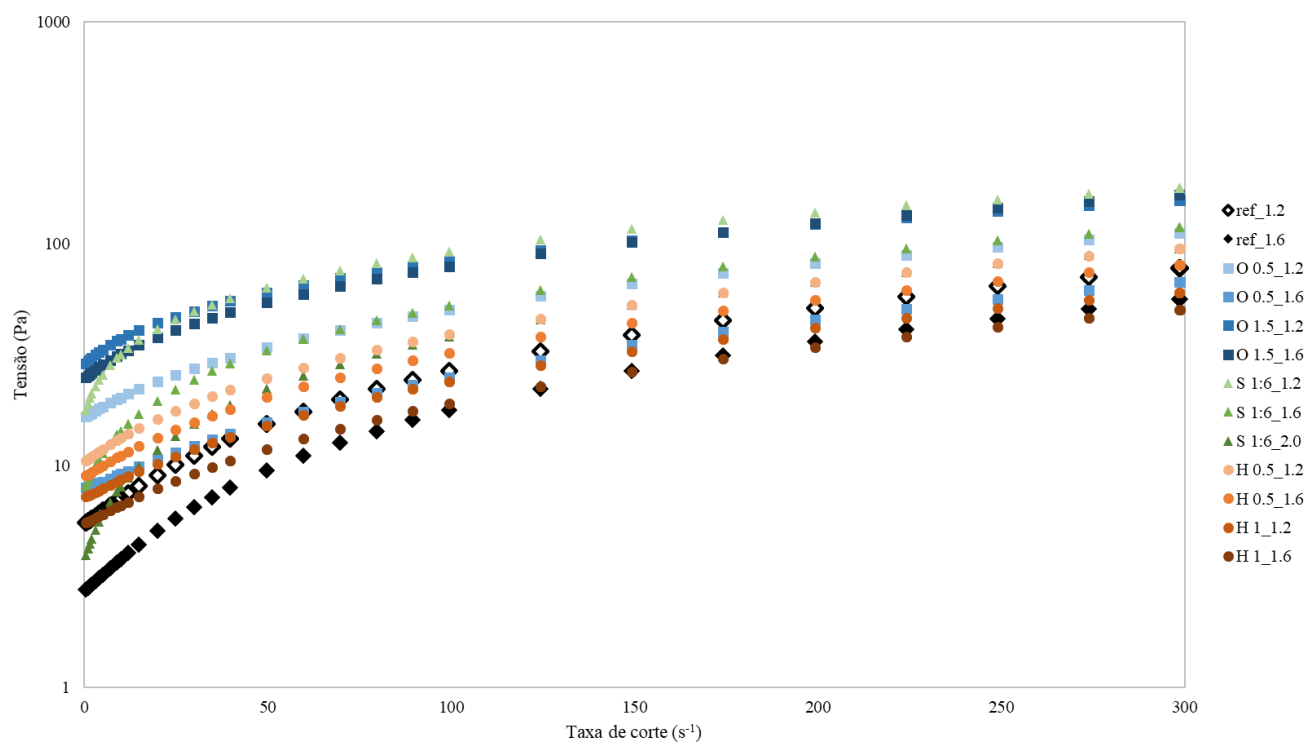


Figura 4.1 Curvas de fluxo obtidas no ensaio do reómetro em regime estacionário

Os modelos matemáticos de Herschel-Bulkley e Power-Law aplicados às curvas de fluxo permitem obter os parâmetros necessários para realizar uma comparação entre as diversas composições de *grouts*. De uma forma sucinta, os parâmetros fundamentais obtidos podem ser definidos da seguinte forma:

- A tensão de cedência (τ_o) é a tensão necessária a aplicar num *grout* para que este comece a fluir, os valores obtidos são apresentados na **Fig. 4.2**;
- A viscosidade plástica (η) caracteriza a velocidade de escoamento, os valores obtidos podem ser observados na **Fig. 4.3**;
- O índice de consistência (K) associado à viscosidade da amostra. Os valores respectivos encontram-se indicados na **Fig. 4.4**.

Desde logo são esperados valores baixos de tensão de cedência e de viscosidade plástica, uma vez que valores elevados destes parâmetros representam *grouts* de difícil escoamento e, por isso, um obstáculo durante o processo de injeção [29, 30]. No que refere ao índice de consistência, um aumento do seu valor implica um aumento da viscosidade, enquanto que um índice baixo significa um fluído que flui facilmente, logo ideal para operações de injeção.

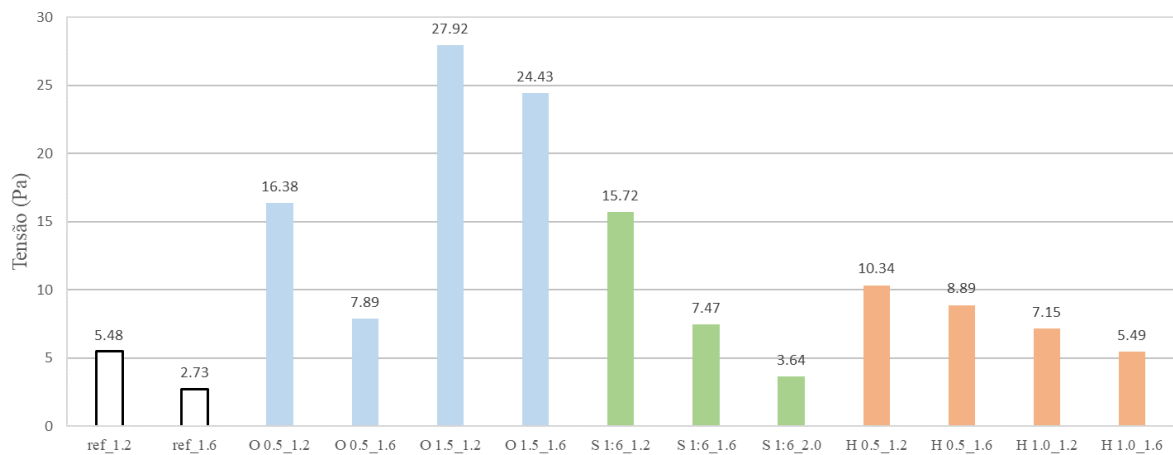


Figura 4.2 Valores da tensão de cedência (τ_o)

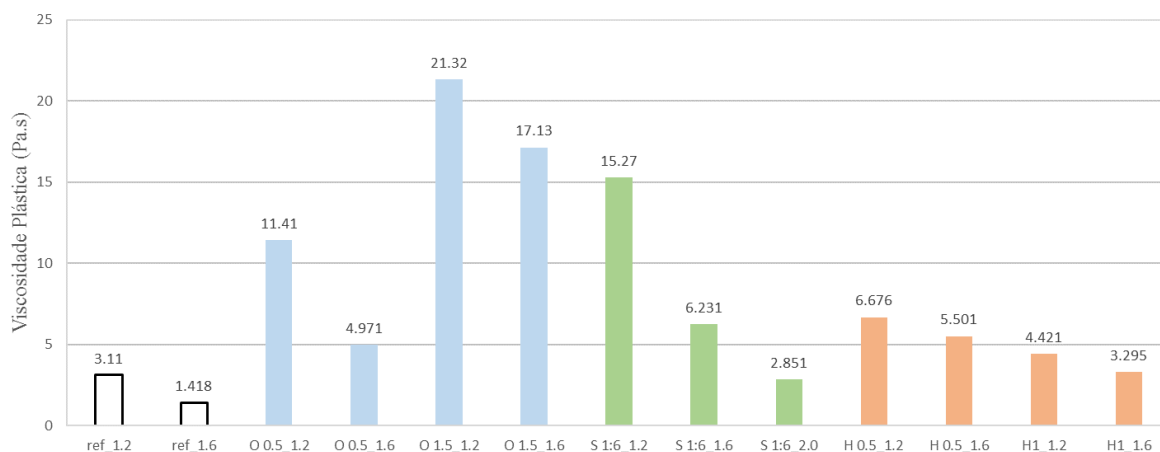


Figura 4.3 Valores da viscosidade plástica (η)

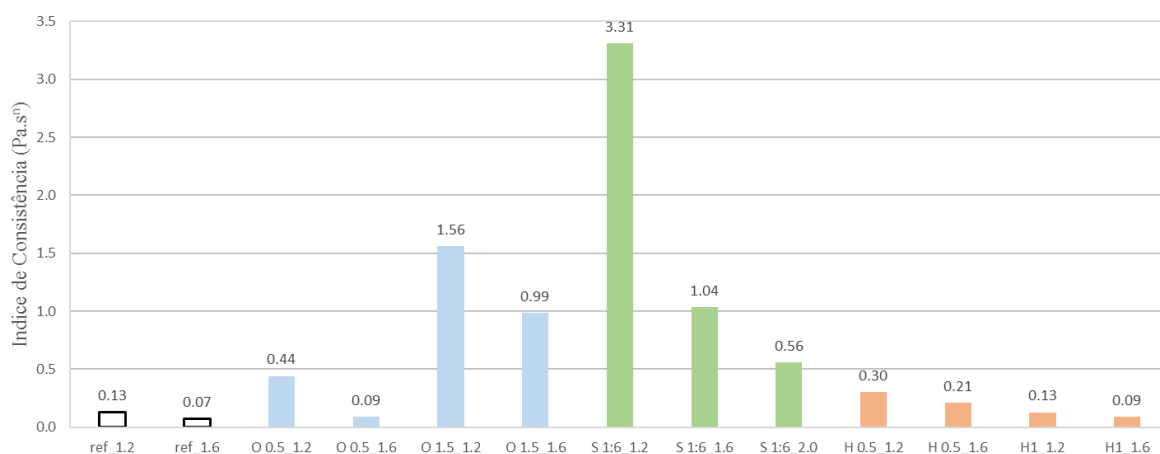


Figura 4.4 Valores do índice de consistência (K)

Uma observação cuidadosa dos gráficos permite verificar que, nos três parâmetros reológicos apresentados, todos os valores apresentados pelas amostras formuladas com hidrófugos de massa são superiores aos registados pelas amostras de referência (*ref_1.2* e *ref_1.6*).

Os valores mais aproximados, relativamente aos valores de referência e por consequência os pretendidos para um *grout* de injeção, são os das amostras que na sua composição incorporam o hidrófugo comercial (*H 0.5* e *H 1.0*).

Os valores de tensão de cedência (τ_0), na **Fig. 4.2**, aumentam com a introdução de qualquer um dos agentes hidrofóbicos na composição dos *grouts* e estes aumentos são mais evidentes para as amostras com óleo de linhaça (*O 0.5_1.2*, *O 0.5_1.6*, *O 1.5_1.2* e *O 1.5_1.6*) onde se regista um aumento de 80.4 % entre *ref_1.2* e *O 1.5_1.2* e um

incremento de 88.8 % entre *ref_1.6* e *O 1.5_1.6*, ambas amostras com a maior dosagem de óleo de linhaça na sua constituição.

O contrário é verificado nos *grouts* com hidrófugo, onde existe pouca variação entre os valores apresentados e os valores de referência. Como exemplo é possível observar que *ref_1.2* e *H 1_1.2* apresentam uma diferença relativa de 23.4 %, sendo esta última composição aquela que manifesta o menor valor entre as composições que contêm 1.2 % de superplastificante na sua constituição. Nesta situação o aumento da percentagem de hidrófugo, juntamente com o superplastificante, possibilita a obtenção de bons resultados não muito distantes dos pretendidos e alcançados pelas amostras de referência, *ref_1.2* e *ref_1.6*.

A mesma tendência de resultados é observada nos valores de viscosidade plástica (**Fig. 4.3**), uma vez que os valores das 11 composições com aditivos hidrofóbicos são superiores aos valores de referência. Os valores para as amostras com óleo de linhaça (*O 0.5_1.2*, *O 0.5_1.6*, *O 1.5_1.2* e *O 1.5_1.6*) são novamente os mais elevados. Relativamente às de referências, estas amostras apresentam aumentos de 85.4 % entre *ref_1.2* e *O 1.5_1.2* e 91.7 % entre *ref_1.6* e *O 1.5_1.6*. Adicionalmente é importante referir que as amostras com silicone (*S 1:6_1.2* e *S 1:6_1.6*) apresentam valores bastante maus, registando-se um incremento de 79.7 % entre *ref_1.2* e *S 1:6_1.2* e 77.2 % entre *ref_1.6* e *S 1:6_1.6*.

A viscosidade plástica é um parâmetro crucial. Assim, os resultados obtidos nas amostras com silicone e óleo de linhaça influenciam negativamente a fluidez dos *grouts*. A única maneira de evitar esta contrariedade seria aumentar a pressão para se conseguir obter uma injeção bem sucedida. No entanto, tal poderia originar outros problemas no decorrer deste processo. É ainda de salientar que os *grouts* com hidrófugo comercial na sua constituição (*H 0.5_1.2*, *H 0.5_1.6*, *H 1.0_1.2* e *H 1.0_1.6*) exibem dos melhores resultados, uma vez que os valores apresentam uma correlação muito próxima, mesmo após a alteração da dosagem de superplastificante e hidrófugo.

Estes resultados são comprovados pelo índice de consistência (**Fig. 4.4**), onde é possível verificar que a introdução dos aditivos prejudica a trabalhabilidade dos *grouts*. Neste parâmetro os valores mais elevados são registados pelas amostras com silicone (*S 1:6_1.2*, *S 1:6_1.6* e *S 1:6_2.0*) contrariamente aos valores de tensão de cedência e viscosidade plástica que correspondiam às amostras com óleo de linhaça. Neste aspecto

é possível observar um aumento do índice de consistência de 96.1 % entre as amostras *ref_1.2* e *S 1:6_1.2* e de 93.3 % entre *ref_1.6* e *S 1:6_1.6*.

As amostras com hidrófugo comercial (*H 0.5* e *H 1.0*) registam resultados favoráveis comparativamente às amostras de referência e similares entre as diferentes dosagens. Inclusive o aumento da percentagem deste aditivo, de 0.5 % para 1.0 %, promove a diminuição do índice de consistência e uma conseqüente melhoria na consistência, fluidez e trabalhabilidade.

De acordo com os resultados de tensão de cedência (**Fig. 4.2**) e do índice de consistência (**Fig. 4.4**) é possível afirmar que os *grouts* se tornam menos trabalháveis quando os aditivos são adicionados. Isto pode prejudicar e pôr em causa a injeção dos *grouts*, dado que a diminuição da velocidade de injeção durante o processo pode levar ao incremento da viscosidade e assim comprometer a aplicação e eficácia desta técnica.

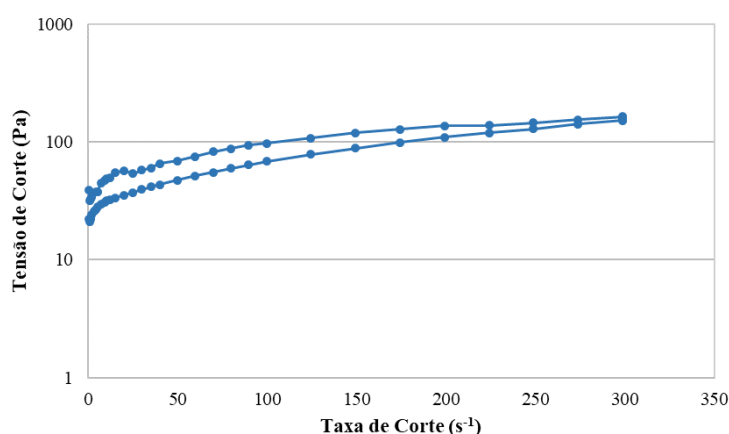


Figura 4.5 Evolução da curva de fluxo num ensaio no reômetro em regime estacionário

Adicionalmente aos parâmetros reológicos apresentados, foi possível determinar o grau da tixotropia a partir da área calculada durante a evolução das curvas de fluxo, apresentada na **Fig. 4.5**, obtidas em função da tensão de cedência e da taxa de corte, e desta forma apresentar um novo parâmetro de caracterização das amostras em estudo.

Os valores das áreas de tixotropia são apresentados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 Valores relativos à tixotropia dos *grouts* analisados

	Área de Tixotropia (Pa.s ⁻¹)
ref_1.2	720
ref_1.6	298
O 0.5_1.2	2580
O 0.5_1.6	346
O 1.5_1.2	6868
O 1.5_1.6	4928
S 1:6_1.2	2073
S 1:6_1.6	1618
S 1:6_2.0	560
H 0.5_1.2	135
H 0.5_1.6	134
H 1.0_1.2	121
H 1.0_1.6	222

Os resultados da área de tixotropia permitem constatar que todas as amostras apresentam de facto tixotropia. Relativamente aos aditivos hidrofóbicos, o óleo de linhaça e a solução de silicone apresentam os valores mais elevados, logo existe uma maior alteração de microestrutura do sistema durante o fluxo. Além disso o aumento da concentração do superplastificante na composição dos *grouts* promove a diminuição destes valores. Os *grouts* que na sua constituição incorporam óleo de linhaça e silicone (*S 1:6*, *O 0.5* e *O 1.5*) possivelmente possuem forças de interacção muito fortes entre as partículas que impedem que o estado de dispersão seja facilmente atingido. Contudo estas amostras conseguem recuperar o seu estado inicial de uma forma mais lenta, o que é benéfico pois permite uma melhor estabilização e interacção com o meio poroso em que o *grout* é injectado.

Contrariamente, as amostras com o hidrófugo (*H 0.5* e *H 1.0*) possuem as áreas de tixotropia mais baixas, inclusivamente que a de referência, que pode significar um fenómeno de floculação mais rápido e que constitui um risco para a estabilidade do *grout*.

De uma forma geral conclui-se, com base nos ensaios reológicos apresentados, que os *grouts* com solução de silicone e óleo de linhaça na sua constituição e para estas dosagens específicas não se afiguram, até ao momento como boas opções para injeção em alvenarias alvo de intervenção.

4.2.1.2 Regime Dinâmico

Os ensaios realizados posteriormente foram efectuados numa selecção de seis composições: *ref_1.6*, *O 0.5_1.6*, *O 1.5_1.6*, *S 1:6_1.6*, *H 0.5_1.6* e *H 1.0_1.6* e permitem aferir as qualidades destas composições quanto à sua viscoelasticidade, retenção de água e estabilidade. Na **Fig. 4.5** é possível observar mais pormenorizadamente as curvas de fluxo associadas a esta selecção de *grouts*.

De forma a simplificar as referências destas amostras no decorrer destes ensaios, as amostras serão designadas apenas por *ref*, *O 0.5*, *O 1.5*, *S 1:6*, *H 0.5* e *H 1*, uma vez que todas apresentam na sua composição a mesma dosagem de superplastificante, 1.6 %.

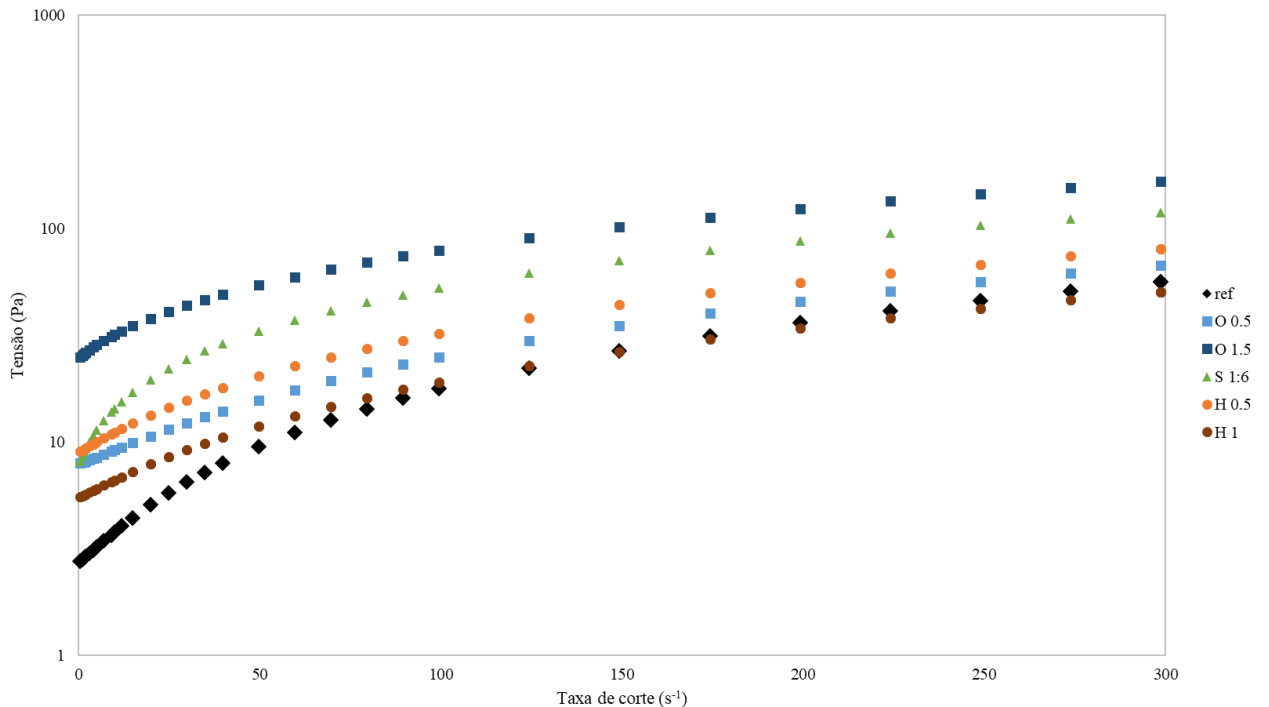


Figura 4.6 Curvas de fluxo relativas às composições seleccionadas

O ensaio realizado no reómetro, em regime dinâmico, permite obter as curvas relativas ao módulo elástico (G') e ao módulo viscoso (G'') para cada uma das composições, as quais são seguidamente apresentadas na **Fig. 4.6**:

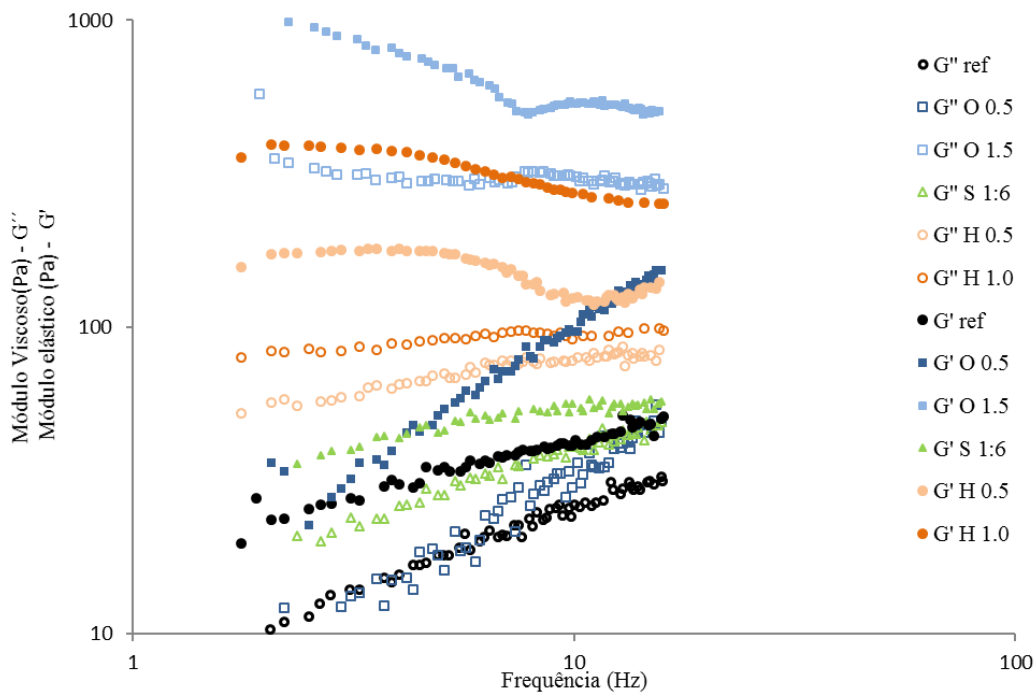


Figura 4.7 Módulo elástico (G') e módulo viscoso (G'') em função da frequência

A análise permite, desde logo, constatar que para qualquer frequência angular os valores de G' são superiores aos valores de G'' , em todas as amostras. Além disso, todos os valores obtidos para os *grouts* com aditivos hidrofóbicos são superiores àquele apresentado pela referência (*ref*). As amostras com óleo de linhaça (*O 1.5*) e com hidrófugo (*H 0.5* e *H 1*) surgem como os *grouts* mais viscoelásticos, atendendo aos resultados mais elevados apresentados. No caso específico das composições com hidrófugo, o aumento da dosagem deste aditivo, de 0.5 % para 1.0 %, tem como consequência o aumento dos valores de ambos os módulos, observado na **Fig. 4.6**.

O principal factor que influencia o comportamento elástico destas amostras é a associação entre partículas provocada pelos aditivos ainda na fase de hidratação, no estado fresco do *grout*. A interacção entre partículas forma uma rede polimérica na suspensão, que actua como uma rede que preenche os espaços vazios e origina, desta forma, uma microestrutura elástica.

É de realçar que a amostra *H 1*, apesar de apresentar bons parâmetros no ensaio anterior (4.2.1.1), regista um dos valores mais elevados neste ensaio, o que é interessante.

No final do processo de injeção um *grout* deve ser suficientemente estável até à secagem, de forma a proporcionar uma correcta homogeneização e evitar a exsudação de água da sua constituição, a qual frequentemente é acompanhada por sedimentação.

Assim, as amostras com aditivos hidrofóbicos, para além de contribuírem para uma elevada retenção de água, também minimizam a ocorrência de fenómenos de instabilidade, o que é essencial durante a realização da técnica de injeção enunciada.

4.2.2 Resultados do Ensaio de Estabilidade

O controlo da estabilidade do *grout*, realizado através do ensaio de estabilidade descrito pormenorizadamente em 3.5.2, permite garantir a manutenção de todas as propriedades durante a injeção, desde o estado fresco até ao estado endurecido [89]. Van Rickstal [20] afirma que a estabilidade de uma certa amostra de *grout* é avaliada em função da variação de massa volúmica da zona superior de uma amostra quando colocada em repouso num recipiente durante um certo intervalo de tempo.

Deste modo, na **Fig. 4.7** encontram-se os resultados relativos à influência da adição dos três aditivos hidrofóbicos na estabilidade das amostras de *grout* selecionadas e identificadas anteriormente.

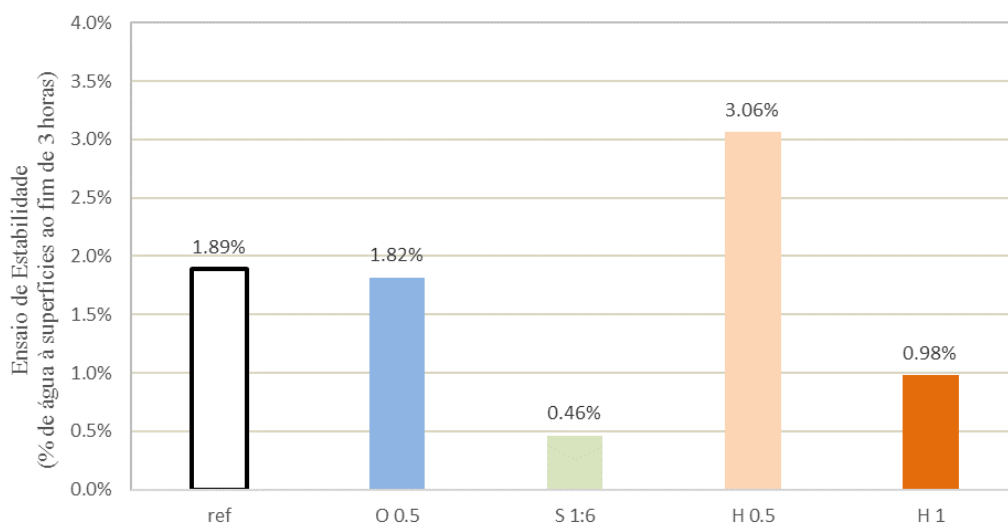


Figura 4.8 Ensaio de estabilidade: valores alcançados ao fim de três horas de ensaio

Dos resultados alcançados é possível observar que a introdução do superplastificante e dos diferentes hidrófugos influencia a estabilidade do *grout*. Segundo Miltiadiou-Fezans e Tassios [28], as propriedades físicas e químicas na fase sólida e a presença de aditivos introduzidos na amostra interferem no equilíbrio das forças inter-partículas e influenciam a estabilidade da suspensão, o que pode ser verificado pelos valores apresentados.

A presença do superplastificante, juntamente com os diversos aditivos hidrofóbicos, diminui a quantidade de água livre disponível que não é absorvida pelas partículas sólidas e contribui desta forma para uma melhor capacidade de retenção de água.

Nas amostras *S 1:6* e *H 1* verificam-se os melhores resultados. Em ambas regista-se uma percentagem de água à superfície do *grout* inferior a 1 %. Tal deve-se à influência do superplastificante, que juntamente com o silicone e o hidrófugo, promove uma acção de dispersão das partículas que se opõe à sedimentação, provocando desta forma uma sedimentação mais lenta e uma repartição das partículas mais homogénea. Além disto, a junção de todos estes agentes promove uma desfloculação das partículas do *grout*, permitindo um alto grau de molhabilidade e uma conseqüente redução da quantidade de água livre na amostra [74, 75, 76].

Relativamente à composição *H 0.5*, pode deduzir-se que esta amostra, de um ponto de vista da estabilidade pretendida para um *grout*, não é satisfatória, dado que o limite superior de 2 % imposto pela norma de ensaio é ultrapassado. Isto resulta numa amostra que tem tendência a possuir zonas com maior e menor concentração de ligante (heterogeneidades), o que poderá provocar a redução da resistência mecânica.

É ainda possível realçar que a adição de superplastificante juntamente com a solução de silicone (*S 1:6*) promove a estabilidade de uma forma muito significativa, visto existir uma diminuição de 24 % em relação à amostra de referência (*ref*). O óleo de linhaça (*O 0.5*) produz pouca alteração neste parâmetro. No que concerne ao hidrófugo comercial, a adição deste aditivo só produz benefícios para dosagens superiores a 0.5 %, constatando-se que os resultados alcançados quando a presença de hidrófugo na composição é de 1.0 % são bastante pertinentes.

4.2.3 Resultados do Ensaio de Retenção Água

O ensaio de retenção de água permite determinar o tempo necessário para retirar uma certa quantidade de água de uma amostra. Pretende-se um *grout* de injeção com uma adequada retenção de água, de forma a minimizar o efeito de extração de água livre da amostra, que influencia significativamente as propriedades no estado fresco e endurecido [90]. Este é um ensaio essencial uma vez que permite reproduzir o efeito da sucção exercida no interior de uma alvenaria muito seca ou constituída por materiais porosos com elevada capacidade de sucção capilar [91].

A capacidade de retenção de um determinado *grout* deve estar directamente relacionada com a quantidade de superplastificante e aditivos introduzidos. Tal significa que a acção repulsiva promovida por estes novos agentes determina a capacidade de retenção de água, na medida que possibilita um maior número de partículas de ligante entrarem em contacto com as partículas de água, potenciando assim uma maior absorção de água por parte do ligante e uma conseqüente menor quantidade de água livre na suspensão [32]. Assim, devido ao facto de existir menos água livre a circular pela suspensão, a sua remoção torna-se como um processo mais moroso e complicado, propiciando a manutenção das propriedades fundamentais de um *grout* num período de tempo mais extenso, uma vez que a água removida é menor.

Desta forma na **Fig. 4.8** encontram-se os resultados das cinco composições de *grouts* analisadas. É importante mencionar que neste ensaio foi realizada uma análise desta propriedade em função do tempo (em segundos) e para a quantidade de água possível de ser retirada de cada amostra, 15 ml.

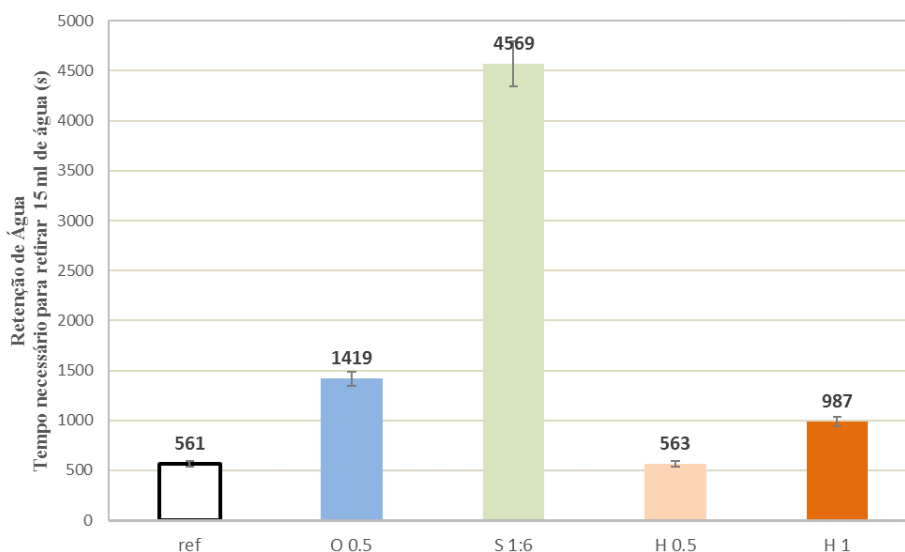


Figura 4.9 Ensaio de retenção de água realizado a cinco composições

Em conformidade com os resultados anteriores do ensaio de estabilidade, é possível observar a boa capacidade de retenção de água da amostra *S 1:6*; a presença do superplastificante juntamente com o silicone provocou uma retenção de água surpreendente, uma vez que demorou cerca de 4569 segundos, aproximadamente 1 hora e 30 minutos, a extracção de 15 ml de água da sua constituição. Comparativamente à

amostra de referência, verificou-se um aumento de tempo superior a 1 hora para retirar a mesma fração de água da amostra.

Relativamente ao hidrófugo, a amostra *H 0.5* apresenta um efeito quase nulo, com um valor muito próximo em relação à amostra de referência e devido ao efeito de instabilidade adquirido pela suspensão.

As amostras com óleo de linhaça e com o hidrófugo (*H 1.0*) manifestam-se como favoráveis, em particular nos resultados alcançados neste ensaio, uma vez que apresentam valores superiores em relação ao de referência sem, no entanto, serem excessivamente elevados.

Os fenómenos que ocorrem neste ensaio e que se traduzem nos valores apresentados surgem em virtude da existência de uma melhor ligação entre as moléculas de água e as partículas do ligante, que promovem uma melhor conexão a nível da microestrutura do *grout*. A obtenção de uma melhor fluidez devido a uma menor perda de água é a razão fundamental para a correcta performance das novas formulações em estudo.

4.3 Resultados dos Ensaio Realizados no Estado Endurecido

4.3.1 Resultados dos Ensaio de Resistência Mecânica

- **Valores de Massa Volúmica**

Nesta secção são apresentados e analisados os resultados da campanha experimental apresentada em 3.6., onde os provetes das composições seleccionadas anteriormente são ensaiados à flexão, à compressão e adicionalmente é determinada a massa volúmica. A Tabela 4.3 exhibe as massas volúmicas dos provetes analisados.

Tabela 4.3 Valores de Massa Volúmica das composições analisadas

	Massa Volúmica (kg/dm ³)
ref	1.303
O 0.5	1.251
S 1:6	1.152
H 0.5	1.280
H 1	1.320

Como se pode observar na Tabela 4.3, existe uma variação expectável nos valores de massa volúmica. Comparativamente ao valor de referência, todas as amostras apresentam resultados inferiores, excepto o provete com 1 % de hidrófugo comercial na sua constituição (*H 1*), possuindo este um valor ligeiramente superior.

De uma forma geral, a introdução dos aditivos hidrofóbicos diminui os valores de massa volúmica, sendo a amostra *S 1:6* a que apresenta uma diminuição mais significativa, aproximadamente 11 % relativamente à de referência, o que resulta em *grouts* mais leves com uma estrutura interna mais frágil. Para além da leveza exibida pelos provetes com silicone, registou-se após a desmoldagem um aumento do comprimento destes provetes de aproximadamente 5 *mm* comparativamente aos restantes, devido, essencialmente, à formação de produtos de hidratação em maior quantidade.

Nos restantes provetes, a variação da massa volúmica é aproximadamente 3 %, o que não é prejudicial nesta fase de análise inicial.

- **Resultados da Resistência à Flexão e Compressão**

Os resultados apresentados de seguida permitem aferir a qualidade e determinar a mais valia e influência da introdução dos aditivos a longo prazo nos *grouts* de injeção. Na **Fig. 4.9** e **4.10** encontram-se os valores de resistência à flexão e à compressão, respectivamente. Estes valores foram calculados a partir das equações apresentadas em 3.6.1 e dizem respeito à média dos valores atingidos em 15 provetes ensaiados, 3 para cada composição.

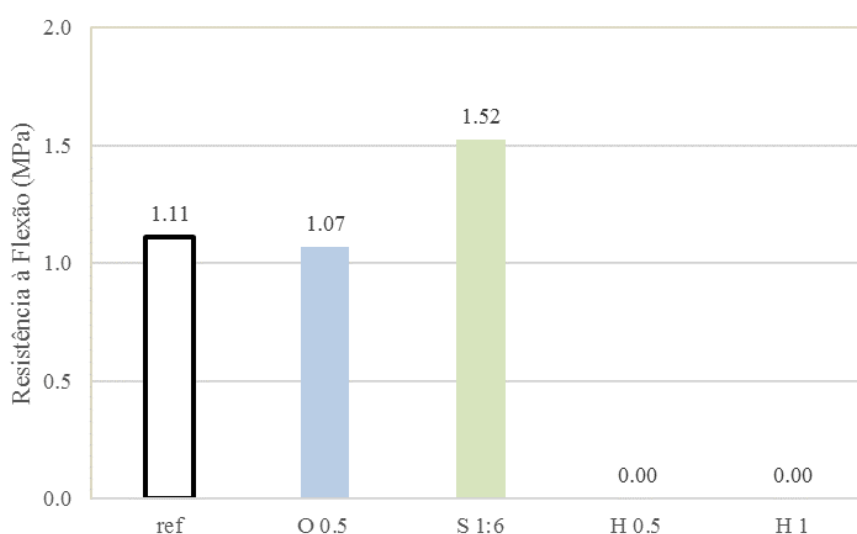


Figura 4.10 Resistência à flexão

A análise dos valores permite concluir desde logo a expectável fraca resistência à flexão dos provetes, em particular das amostras *H 0.5* e *H 1*, que registaram um valor nulo por se apresentarem fracturadas antes da realização deste ensaio, impossibilitando o mesmo. A fraca resistência à flexão dos provetes resultou das microfissuras que os provetes apresentavam. No entanto destaca-se a amostra *S 1:6* com o valor de 1.52 MPa superior 27 % em relação à referência.

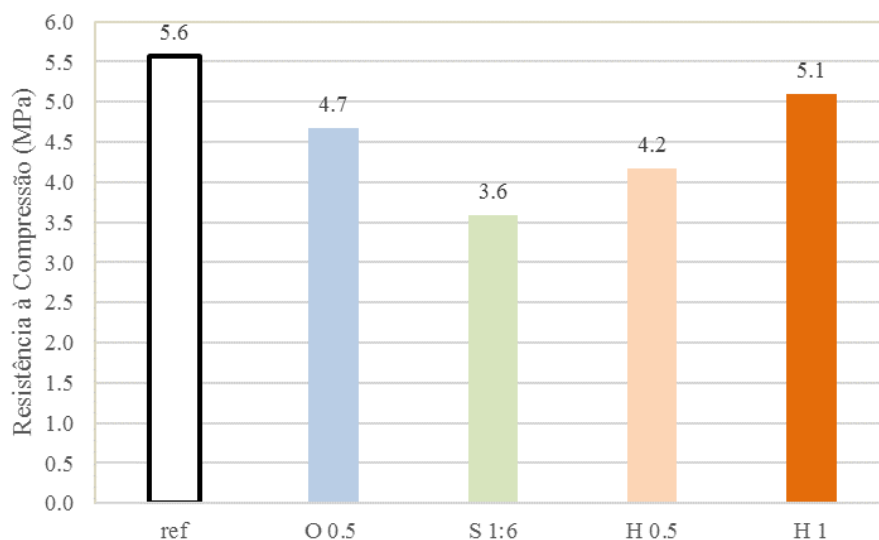


Figura 4.11 Resistência à compressão

Quanto aos valores de resistência à compressão, pode observar-se desde logo que a adição de qualquer um dos agentes hidrofóbicos na composição dos *grouts* equivale a uma diminuição da resistência mecânica. A amostra *S 1:6* apresenta o valor mais baixo (3.6 MPa) uma diminuição de 2 MPa em relação à referência. A amostra *H 1*, que anteriormente apresentava um valor nulo na resistência à flexão, apresenta um valor bastante aceitável e próximo do registado para o *grout* de referência, com uma diferença inferior a 9 %. Relativamente à amostra com menos dosagem de hidrófugo (*H 0.5*), denota-se um decréscimo de 17.6 %, correspondente a uma diminuição da resistência de 5.1 MPa para 4.2 MPa .

Nos resultados apresentados para este ensaio, o hidrófugo constitui-se como um aditivo interessante na formulação de novos *grouts* de injeção, visto que possui os melhores resultados e mais semelhantes aos pretendidos (os de referência), o que desde logo possibilita a longo prazo produzir o efeito desejável para um *grout* quando sujeito às acções mecânicas a que estes elementos possam estar sujeitos.

4.3.2 Resultados dos Ensaio de Porosidade Aberta

Posteriormente à realização dos ensaios destrutivos de resistência à flexão e compressão, foi efectuado o ensaio que permite determinar a porosidade aberta das diferentes composições. Com base neste ensaio é possível quantificar a compacidade dos provetes. Além disso, estes resultados permitem uma melhor compreensão dos resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica. A **Fig. 4.11** exibe os valores médios deste ensaio complementar e de carácter não destrutivo.

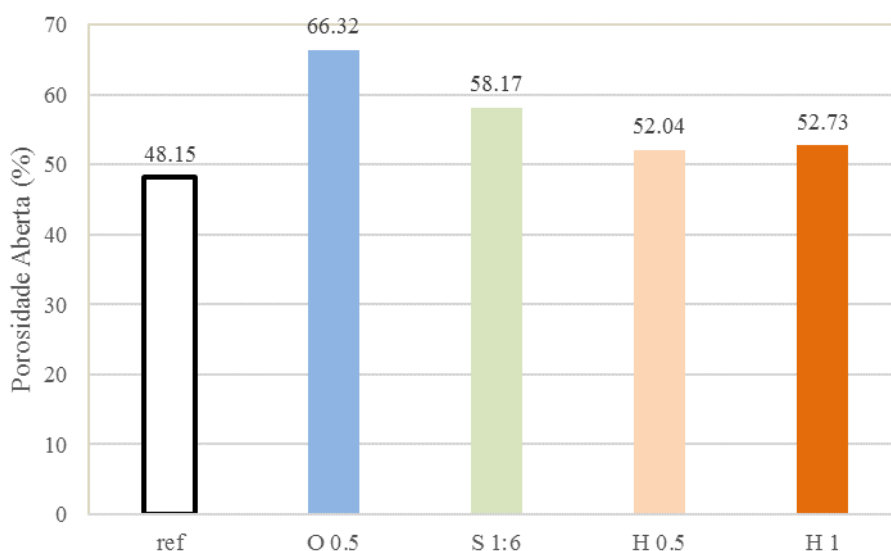


Figura 4.12 Porosidade aberta das diferentes composições de *grout*

Pretende-se averiguar se estes valores completam os alcançados na secção anterior (4.3.1), ou seja, se as amostras de *grout* que apresentam menores resistências mecânicas são as que possuem uma porosidade mais elevada.

Em primeiro lugar denota-se que a presença dos aditivos prejudica os valores de porosidade aberta, visto que todas as porosidades são superiores à de referência (*ref*). Para além disto, a amostra de referência é a única que confere os parâmetros previstos, uma vez que para a resistência à compressão mais elevada, 5.6 MPa, corresponde o valor de porosidade aberta mais baixo, 48.5 %.

A baixa resistência mecânica registada pela amostra com silicone (*S 1:6*) também corresponde a um dos valores mais altos de porosidade aberta, o que era expectável.

A composição *H 1* regista novamente valores bastante pertinentes que, juntamente com os valores de resistência mecânica analisados anteriormente, pode levar a afirmar

que a presença de hidrófugo na composição dos *grouts* promove uma compactidade aceitável (52.73 % de porosidade aberta) além de resistências mecânicas satisfatórias (5.1 MPa).

A amostra *O 0.5*, pelo contrário apresenta o valor mais elevado de porosidade aberta, embora na secção anterior, não exiba valor mais baixo de resistência à compressão. Tal pode significar que o óleo de linhaça, apesar de garantir um valor aceitável de resistência mecânica, promove uma rede de poros no interior do provete que pode afectar negativamente o desempenho do *grout*. Além disso, estudos anteriores [79], comprovaram que o óleo de linhaça torna o *grout* hidrofóbico, pelo que a presença de água não se constitui como um problema.

Portanto, tendo por base as considerações efectuadas no âmbito dos ensaios até agora apresentados e analisados para o estado endurecido, a utilização do hidrófugo comercial e em particular a composição *H 1*, ou seja, 1.0 % de hidrófugo na constituição do *grout*, apresenta-se como uma opção vantajosa.

4.3.3 Resultados da Análise Termogravimétrica

Os gráficos relativos à TGA (análise termogravimétrica), são apresentados na **Fig. 4.12**. Este gráfico apresenta as perdas de massa que ocorrem durante a variação de temperatura nas diferentes composições de *grout*.

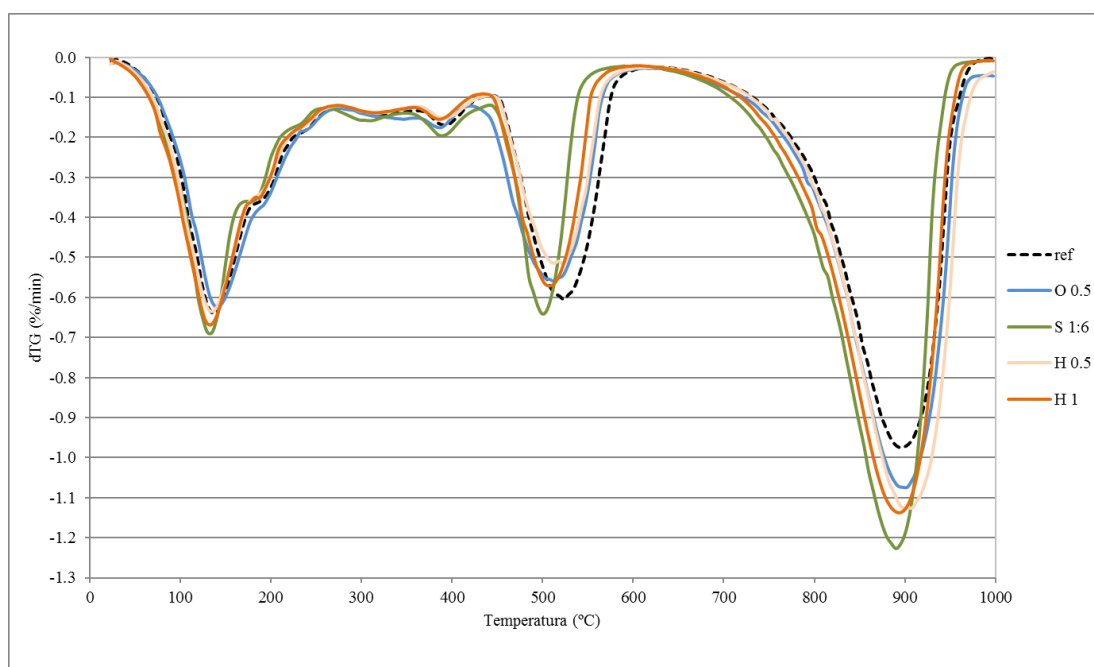


Figura 4.13 Análise termogravimétrica: Comparação entre as composições seleccionadas

A análise do gráfico permite a identificação de três picos cruciais de perda de massa para todas as amostras.

O primeiro pico ocorre sensivelmente entre os 100°C e 150°C e corresponde à evaporação da água combinada com os produtos de hidratação ou em excesso na constituição das amostras. No troço ascendente que sucede a esta perda e até ao pico seguinte existe uma perda de massa constante; neste troço a água quimicamente interligada aos produtos de reacção, como os silicatos e os aluminatos, sofre também evaporação.

Entre os 450°C e 550°C, sucede novamente uma perda de massa substancial, provocada pela reacção de desidroxilação, isto é, ocorre a perda de água associada ao hidróxido de cálcio que origina água e óxido de cálcio.

Finalmente a partir de 800°C e até 950°C existe o último pico de perda de massa, associado à reacção de descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3) e que produz dióxido de carbono e óxido de cálcio.

Após a identificação das fases de perda de massa das amostras manifestadas durante a TGA é possível realizar uma análise comparativa e desta forma avaliar o comportamento dos diferentes aditivos hidrofóbicos. Desde logo a amostra *S 1:6* apresenta a maior perda de massa em todos os picos registados. Assim, pode demonstrar-se que, de facto, os provetes com solução de silicone apresentam maior quantidade de produtos de hidratação (hidróxido de cálcio), logo maior pico entre 450°C e 550°C, o que é confirmado pelo aumento de dimensão registado após a desmoldagem e medição do comprimento dos provetes desta amostra.

Relativamente à fase de descarbonatação de cálcio, a 900°C todas as amostras apresentam valores superiores relativamente ao de referência (*ref*). A quantidade de CaCO_3 presente aumenta, em consequência da adição dos novos constituintes e da porosidade aberta registada pelos provetes no ensaio de porosidade aberta, apresentada em 4.3.2. Uma porosidade mais elevada encontra-se associada a uma maior carbonatação, ou seja, uma maior facilidade de penetração de CO_2 . Na medida em que na fase de descarbonatação de cálcio surgem valores superiores, o contrário acontece na fase em que sucede a reacção de desidroxilação, a 500°C. Para esta temperatura todas as composições apresentam valores inferiores ao de referência, exceptuando, como já referido, a amostra *S 1:6*, que regista valores superiores em todos os picos, relativamente a todas as outras

amostras. Nesta fase, a presença do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) é reduzida devido à presença do hidrófugo comercial e do óleo de linhaça e contrasta com a fase posterior, a 900°C , em que o carbonato de cálcio aumenta.

Pode afirmar-se que as resistências mecânicas aos 28 dias são menores na presença dos aditivos. Estas conclusões são ainda corroboradas pelos resultados dos ensaios de resistência à flexão e compressão, apresentados em 4.3.1, visto que as amostras com valores de perda de massa elevados registaram também as resistências mecânicas mais baixas, em particular o *S 1:6*, sendo, portanto os aditivos o principal elemento a influenciar este parâmetro.

4.4 Sumário de Resultados

Os resultados dos ensaios apresentados ao longo deste capítulo possuem como principais destaques os seguintes:

- Nos ensaios reológicos em regime estacionário, as quatro amostras com hidrófugo (*H 0.5_1.2*, *H 0.5_1.6*, *H 1_1.2* e *H 1_1.6*) apresentam os parâmetros reológicos pretendidos para um *grout* de injeção, uma vez que os valores tensão de cedência (τ_0), viscosidade plástica (η), índice de consistência (K) possuem valores baixos, aproximados à referência e por consequência os ambicionados;
- Contrariamente, as amostras com óleo de linhaça (*O 0.5_1.2*, *O 0.5_1.6*, *O 1.5_1.2* e *O 1.5_1.6*) apresentam valores de tensão de cedência e viscosidade plástica não muito prometedores. A amostra *S 1:6*, com silicone na composição constitui-se como uma das formulações menos promissora, uma vez que todos os parâmetros apresentam valores muito elevados e divergentes dos de referência, o não se constituindo como composições ideais para realização da técnica de injeção;
- Relativamente à caracterização reológica, efectuada por intermédio dos ensaios no reómetro em regime dinâmico, de um modo geral, todas as composições apresentaram os valores do módulo elástico (G') sempre superior ao módulo viscoso (G''). A amostra *O 1.5* é aquela que apresenta a maior componente viscoelástica uma vez que os valores do módulo elástico (G') e módulo viscoso (G'') são os mais destacados. De maneira oposta surge *S 1:6*;
- O ensaio de estabilidade constatou que as amostras *S 1:6* e *H 1* são as que melhores resultados apresentaram em termos de estabilidade, ou seja, transmitem garantias ao

nível da manutenção de todas as propriedades desde o estado fresco até ao estado endurecido e durante o processo de injeção de um *grout*. Por outro lado, *H 0.5* ultrapassa o limite imposto pela norma de ensaio;

- O ensaio de retenção de água, o último a ser efectuado no estado fresco, permitiu identificar *S 1:6* como a amostra que melhor capacidade em reter a água na constituição de um *grout*, uma vez que manifestou o período de tempo mais longo para extração de uma quantidade *standard* de água da amostra. As amostras *H 0.5* e *H 1* pelo contrário, registaram os períodos de tempo de retenção de água mais curtos;
- Quanto aos ensaios no estado endurecido, realizados sobre provetes das composições seleccionadas, no ensaio de resistência à flexão, *S 1:6* apresentou a melhor resistência mecânica; ao invés, as amostras *H 0.5* e *H 1*, por apresentarem fracturas patentes logo após a desmoldagem e devido à impossibilidade de realização deste ensaio possuem um valor nulo devido;
- As alvenarias alvo destas intervenções estão sujeitas a esforços compreendidos entre 1 e 2.5 *MPa*. No ensaio de resistência à compressão, os valores apresentados são todos muito aproximados e superiores a este limite, desta forma as composições analisadas não colocam em causa a integridade estrutural da parede;
- No que diz respeito ao ensaio de porosidade aberta, *H 0.5* e *H 1* exibem resultados muito similares entre eles e ao de referência, ao passo que *O 0.5* manifesta o resultado menos favorável;
- Finalmente, na termogravimetria, as perdas de massa mais significativas foram evidenciadas pela amostra *S 1:6*, em todos os picos de perda registados aos 150°C, 500°C e 900°C.

5. Conclusões Finais e Desenvolvimentos

Futuros

5.1 Introdução

A conclusão dos ensaios permitiu a avaliação e a análise dos resultados alcançados durante a campanha experimental. Assim foi viável realizar as conclusões finais essenciais para percepção destes resultados. São apresentadas de seguida essas mesmas conclusões, que resultam do acompanhamento das várias amostras de *grouts* analisadas, onde a formulação e o modo de aplicação divergem em consequência das condicionantes impostas, tais como, o tipo e dosagem dos materiais constituintes, o ambiente presente durante a preparação e durante a análise das amostras ou o tempo de repouso prévio ao início da análise reológica.

A partir dos objectivos inicialmente apresentados, pretendeu-se avaliar e otimizar novas formulações de *grouts* de modo a melhorar o sucesso e performance desta técnica na consolidação e conservação de elementos de alvenaria danificados. Ainda neste capítulo são propostas recomendações para desenvolvimentos futuros, com o intuito de aprofundar e ampliar os conhecimentos nesta área, em particular no que concerne à introdução de novos hidrófugos e elementos para aprimorar as propriedades fundamentais dos *grouts* de injeção.

É importante salientar que o estudo realizado ao longo desta dissertação possibilitou a elaboração de uma comunicação científica, apresentada também sob a forma de poster, na exposição do Encontro Ibérico de Reologia “IBEREO” (“*Iberian Meeting on Rheology*”) Valência, 2017. Estes documentos podem ser consultados em ANEXO.

5.2 Avaliação das Propriedades no Estado Fresco dos *Grouts*

A influência do silicone, do óleo de linhaça e do hidrófugo comercial nas propriedades reológicas e mecânicas de *grouts* à base de cal hidráulica para consolidação de paredes de alvenaria foram investigadas.

Os resultados apresentados e que possibilitaram a determinação dos parâmetros reológicos fundamentais das diversas composições em estudo, permitiram deduzir que os modelos de Herschel-Bulkley e Power-Law são os que melhor se adaptam às curvas de fluxo e às características dos *grouts* que possuem estes três aditivos na sua constituição.

De um modo geral e de um ponto de vista reológico, todos os aditivos contribuíram para uma diminuição da fluidez e da trabalhabilidade dos *grouts*. No entanto, a solução de silicone revelou-se como o aditivo mais promissor na optimização do desempenho reológico dos *grouts*. Por sua vez o óleo de linhaça foi o que apresentou os piores resultados durante o ensaio reológico em regime estacionário. Este aditivo, em particular numa dosagem de 1.5 % (em relação à massa do ligante) na constituição do *grout*, apresentou um aumento de 89 % no valor da tensão de cedência, um incremento de 92 % no valor da viscosidade plástica comparativamente aos valores de referência, sem qualquer aditivo e apenas com superplastificante na constituição.

Relativamente à tixotropia das amostras e correspondente histerese exibida nas curvas de fluxo, o óleo de linhaça e a solução de silicone exibiram uma vez mais os valores mais elevados. Estes valores provocam, essencialmente, uma resposta lenta por parte das amostras que possuem estes aditivos hidrofóbicos. Tal significa um retorno a uma fase inicial e de repouso, sem tensões de corte, muito mais lenta em relação às outras amostras.

Além destes factos, os ensaios no reómetro adicionais, em regime dinâmico, possibilitaram constatar que o módulo viscoso de todas as amostras foi sempre inferior ao módulo elástico. Este comportamento deriva do efeito produzido pelos aditivos que, como já foi explicado, funcionam como uma rede de partículas que preenche os espaços vazios da estrutura interna do *grout*.

Este estudo demonstrou que os aditivos hidrofóbicos analisados alteram significativamente as propriedades reológicas dos *grouts*. A sua contribuição geral para melhorar e impulsionar a performance reológica não é muito prometedora, uma vez que durante o processo de injeção, devem subsistir valores de viscosidade plástica e tensão de cedência baixos, de forma a providenciar um correcto escoamento do *grout* no meio poroso, um eficaz preenchimento dos vazios, fendas e a realização da ligação entre os panos que constituam a alvenaria.

Uma caracterização adicional foi realizada sobre cinco das composições de *grout* analisadas, ainda durante o estado fresco. Recorreu-se aos ensaios de estabilidade e de retenção de água, dado que se constituem como complementares e fundamentais para averiguar se os aditivos em questão contribuem positivamente para as propriedades neste estado em particular.

O ensaio de estabilidade, com uma duração de três horas, permitiu constatar que o hidrófugo comercial não se afigura como uma mais valia, uma vez que o limite imposto pela norma de ensaio é superado, isto para a amostra com uma dosagem de 0.5 % de hidrófugo na sua constituição. Contudo, quando esta percentagem aumenta para 1.0 % existe uma melhoria de 68 % no valor da estabilidade. Relativamente a este ensaio, e contrariamente aos resultados negativos apresentados nos ensaios reológicos surge a amostra com silicone revela-se como o melhor aditivo no que concerne a reter e evitar perdas de água da constituição.

Estes resultados foram posteriormente corroborados pelos valores de retenção de água, que constata a estabilidade apresentada pelas amostras analisadas. O facto de possuírem baixa fluidez e trabalhabilidade permite que os *grouts* formulados com a solução de silicone e o óleo de linhaça preservem a água da sua constituição durante um período de tempo mais longo, evitando as perdas de água excessivas que ocorrem principalmente nos períodos iniciais do processo de injeção. Não obstante, estes valores não permitem considerar estes dois aditivos como benéficos para o processo de consolidação e para a técnica de injeção em concreto, uma vez que, por apresentarem resultados reológicos desfavoráveis, seria necessário, por exemplo, aumentar a pressão da injeção ou efectuar um incremento da percentagem de superplastificante de forma a ser possível a sua execução com sucesso. Estas alterações, para além de colocarem em risco o sucesso da técnica, iriam muito provavelmente alterar significativamente os valores de retenção e estabilidade.

Contrariamente surge o hidrófugo comercial, visto que a sua utilização na formulação destas composições se revela adequada, devido aos bons valores apresentados, sempre na dosagem de 1 %. Desta forma, o estudo de novas composições incorporando este aditivo, constitui-se como fundamental para se obter uma avaliação mais completa de *grouts* com hidrófugo comercial na sua constituição.

5.3 Avaliação das Propriedades no Estado Endurecido dos *Grouts*

Os ensaios complementares realizados no estado endurecido aos provetes das composições de *grout* permitiram depreender quais os aditivos que a longo prazo proporcionariam um bom desempenho no meio e na estrutura reabilitada. Deste modo, os resultados de resistência à compressão e flexão, bem como os valores de porosidade aberta e de termogravimetria, são cruciais para entender e averiguar a performance dos aditivos hidrofóbicos em análise.

De um modo geral a introdução dos aditivos na formulação de *grouts* para injeção afecta negativamente os valores de resistência à flexão e compressão, assim como os valores de porosidade aberta.

A amostra com silicone na composição possui as perdas de massa mais significativas registadas durante a análise termogravimétrica, com picos a 500°C e a 900°C. O primeiro pico está associado à quantidade de Ca(OH)_2 e possibilita obter uma visualização dos processos e reacções de hidratação ocorridos. O segundo pico é associado à quantidade de CaCO_2 durante o processo de carbonatação da cal, sendo facilitado pelo valor elevado de porosidade aberta. Esta amostra apresenta ainda, como referido, um dos valores mais elevados de porosidade aberta, ou seja, uma microestrutura interna e uma rede de poros bastante significativa, reflectindo-se desta forma num valor de resistência à compressão mais baixo, que, no entanto, é perfeitamente compatível com as tensões a que as alvenarias antigas estão sujeitas, valores que usualmente variam entre 1 e 2.5 MPa.

Pelo contrário, a amostra com hidrófugo exhibe os valores mais próximos dos de referência, estes apenas com superplastificante e sem qualquer aditivo hidrofóbico na constituição.

Sucintamente, pode concluir-se que, dos três aditivos hidrofóbicos analisados, o óleo de linhaça não se constitui como uma boa escolha por apresentar valores bastante negativos na generalidade dos ensaios realizados no estado fresco e endurecido, necessitando por isso de uma melhor investigação e afinação das dosagens na formulação. A solução de silicone, face aos resultados apresentados e para as composições estudadas, também não evidenciou ser um aditivo promissor. Contudo estes resultados devem ser

encarados com prudência, uma vez que carecem de estudos adicionais, como por exemplo a análise de outras dosagens, outro tipo de cal/ligante ou a realização de testes de injeção. Finalmente o hidrófugo comercial, em particular quando a sua dosagem é 1.0 %, apresentou resultados mais satisfatórias, de encontro ao pretendido quando se realiza uma avaliação e se procuram desenvolver novas formulações de *grouts* de injeção.

Estes resultados são por isso significativos e devem ser continuados e aprofundados, de forma a avaliar a performance positiva que este aditivo exibiu ao longo do estudo realizado e apresentado nesta dissertação.

5.4 Sugestões para Desenvolvimentos Futuros

A obtenção das diversas conclusões extraídas da presente dissertação representa um ponto inicial para o lançamento de estudos futuros nesta área, particularmente no desenvolvimento de novas formulações de *grouts* de injeção a fim de serem empregues na conservação de alvenarias antigas.

A adição de produtos hidrófugos como o silicone, o óleo de linhaça ou o hidrófugo comercial possibilita a inovação e aperfeiçoamento desta técnica de injeção.

Assim recomendam-se para desenvolvimentos futuros injeções em laboratório destas composições em diferentes meios porosos e com diferentes granulometrias para avaliar o desempenho em serviço de *grouts* com hidrófugos.

A introdução e análise de diferentes dosagens de hidrófugo comercial ou de novos aditivos hidrofóbicos também se constitui relevante, além do estudo da durabilidade destes novos *grouts*. A análise dos ângulos de contacto é também importante para averiguar se efectivamente ocorre a sua alteração quando se encontram presentes qualquer um destes três aditivos hidrofóbicos ou outros completamente distintos.

6. Bibliografia

- [1] E. Vintzileou, “Three-Leaf Masonry in Compression, Before and After Grouting: A Review of Literature,” *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 5, no. 4–5, pp. 513–538, Jul. 2011.
- [2] A. Kalagri, A. Miltiadou-Fezans, and E. Vintzileou, “Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures,” *Mater. Struct.*, vol. 43, no. 8, pp. 1135–1146, Oct. 2010.
- [3] A. Miltiadou-Fezans, “Contribution à l’étude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments,” *Doctorat Ecole nationale des Ponts et Chaussées*, 1990.
- [4] F. Telha, “Análise da influência da alteração do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts,” *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa*, 2015.
- [5] K. Callebaut, J. Elsen, K. Van Balen, and W. Viaene, “Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael’s Church (Leuven, Belgium),” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 397–403, Mar. 2001.
- [6] L. Binda, C. Modena, G. Baronio, and S. Abbaneo, “Repair and investigation techniques for stone masonry walls,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 11, no. 3, pp. 133–142, Apr. 1997.
- [7] F. J. Baltazar, Luis G., Fernando M. A. Henriques, “Hydraulic lime grouts for masonry injection - effects of admixtures on the fresh grout properties,” *Structural Anal. Hist. Constr. - Jerzy Jasinko*, pp. 1763–1770, 2012.
- [8] J. D. A. Guerreiro, “Avaliação do efeito combinado de temperatura , tempo de repouso e pressão de injeção na eficiência de injeção de grouts,” *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa*, 2014.
- [9] E. Luso, “Análise experimental de caldas à base de cal para injeção de alvenaria antiga,” *Ph.D. thesis, Univ. do Minho, Braga*, 2012.
- [10] M. Teixeira, “Estudo reológico de caldas hidráulicas para utilização na reabilitação do edificado,” *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac.*

Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa, 2014.

- [11] J. C. A. Roque, “Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria,” Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Universidade do Minho, Braga, 2002.
- [12] N. Gonçalves, “Caldas de Injecção Pré-doseadas para Alvenarias Antigas Estudo da Capacidade de Injecção,” Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa, 2013.
- [13] J. Mascarenhas, "Sistemas de Construção III – Paredes (2.^a parte) e Materiais Básicos (1.^a parte)", 5.^a ed. | Livros Horizonte.
- [14] L. Binda, G. Baronio, and C. Modena, “Strengthening of masonries by injection technique,” in 6th North American Masonry Conference, 1993, pp. 1–15, 1993.
- [15] I. Martínez, A. Castillo, E. Martínez, and M. Castellote, “Physico-chemical material characterization of historic unreinforced masonry buildings: The first step for a suitable intervention,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 352–360, March 2013.
- [16] T. Cardoso, “Influência da exsudação e da perda de água nas propriedades reológicas de grouts,” Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa, 2015.
- [17] M. Rosário Veiga e Paulina Faria, "Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética," LNEC, 1990.
- [18] B. Silva, M. Dalla Benetta, F. da Porto, and C. Modena, “Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 149–161, Feb. 2014.
- [19] B. L. Silva, “Diagnosis and strengthening of historical masonry structures: numerical and experimental analysis,” PhD Thesis, University of Brescia, Italy, 2012.
- [20] F. Van Rickstal, “Grout injection of masonry, scientific approach and modeling / Mörtelinjektion in mauerwerk, ein wissenschaftlicher ansatz und Mmodellbildung,” *Restor. Build. Monum.*, vol. 7, no. 3–4, pp. 407–432, Jan. 2000.
- [21] L. Binda, A. Saisi, and C. Tedeschi, "Compatibility of materials used for repair of

- masonry buildings: research and applications," *Fracture and Failure of Natural Building Stones - Applications in Restoration of Ancient Monuments*. 2006.
- [22] A. Bras and F. M. A. Henriques, "Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 135–144, Jul. 2012.
- [23] F. Jorne, F. M. A. Henriques, and L. G. Baltazar, "Evaluation of consolidation of different porous media with hydraulic lime grout injection," *J. Cult. Herit.*, vol. 16, no. 4, pp. 438–451, Jul. 2015.
- [24] E.-E. Toumbakari, "Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls," PhD Thesis, Kathol. Univ. Leuven, Belgium, 2002.
- [25] E. Vintzileou, "Grouting of three-leaf stone masonry: Types of grouts, mechanical properties of masonry before and after grouting," *Structural analysis of historical constructions*, New Delhi 2006.
- [26] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, F. Jorne, and M. T. Cidade, "Performance improvement of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation: an experimental study," in *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 131, pp. 417–430, 2013.
- [27] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, F. Jorne, and M. T. Cidade, "Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 584–597, Jan. 2014.
- [28] A. Miltiadou-Fezans and T. P. Tassios, "Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening," *Mater. Struct.*, vol. 46, no. 10, pp. 1631–1652, Oct. 2013.
- [29] D. Laefer, G. Baronio, A. Anzani, and L. Binda, "Measurement of grout injection efficacy for stone masonry walls," vol. 1, pp. 484–496, 1996.
- [30] J. J. Assaad and Y. Daou, "Cementitious grouts with adapted rheological properties for injection by vacuum techniques," *Cem. Concr. Res.*, vol. 59, pp. 43–54, 2014.
- [31] F. Rosquoët, A. Alexis, A. Khelidj, and A. Phelipot, "Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 713–722, 2003.
- [32] B. Biçer-şimşir, I. Griffin, B. Palazzo-Bertholon, and L. Rainer, "Lime-based

- injection grouts for the conservation of architectural surfaces,” *Stud. Conserv.*, vol. 54, no. sup1, pp. 3–17, Jun. 2009.
- [33] F. Jorne, F. M. A. Henriques, and L. G. Baltazar, “Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media,” *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 7, pp. 2211–2233, Jul. 2015.
- [34] M. Cappellari, A. Daubresse, and M. Chaouche, “Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: Relationship with water-retention,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 950–961, Jan. 2013.
- [35] A. Miltiadou-Fezans and T. P. Tassios, “Fluidity of hydraulic grouts for masonry strengthening,” *Mater. Struct.*, vol. 45, no. 12, pp. 1817–1828, Dec. 2012.
- [36] H. A. Barnes, "A handbook of elementary rheology," University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000.
- [37] H. A. Barnes, J. F., John F. Hutton, and K. Walters, "An introduction to rheology," Elsevier, 1989.
- [38] A. Malkin, “Rheology Fundamentals,” ChemTec Publishing, Canada, 1994.
- [39] J. Matos, “Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de policarboxilato,” *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa*, 2013.
- [40] C. F. Ferraris, “Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 104, no. 104, 1999.
- [41] M. T. Cidade, "Reologia de polímeros - Texto de apoio," *Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa*, 2005.
- [42] J. Mewis and N. J. Wagner, “Thixotropy,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 147, pp. 214–227, 2009.
- [43] P. Banfill, “The rheology of fresh cement and concrete - a review,” *School of the Built and Environment, Heriot-Watt University, Edinburgh*, 2003.
- [44] A. F. Azevedo, “Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes,” *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil*,

Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga, 2002.

- [45] W.-G. Lei and L. J. Struble, "Microstructure and flow behavior of fresh cement paste," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 80, no. 8, pp. 2021–2028, Jan. 2005.
- [46] L. J. Struble and W.-G. Lei, "Rheological changes associated with setting of cement paste," *Adv. Cem. Based Mater.*, vol. 2, no. 6, pp. 224–230, Nov. 1995.
- [47] A. Papo, "Rheological models for cement pastes," *Mater. Struct.*, vol. 21, no. 1, pp. 41–46, Jan. 1988.
- [48] P. F. G. Banfill, "Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 6, pp. 2955–2960, 2011.
- [49] P. F. G. Banfill, "Rheology of fresh cement and concrete," *Rheol. Rev.*, vol. 2006, pp. 61–130, 2006.
- [50] S. Greszczyk and L. Kucharska, "The influence of chemical composition of cement on the rheological properties," *Rheol. Fresh Cem.*, 1990.
- [51] A. Papo, L. Piani, L. Ceccon, and V. Novelli, "Flow behavior of fresh very high strength portland cement pastes," *Part. Sci.*, vol. 28, pp. 74–85, 2010.
- [52] H. Vikan, H. Justnes, F. Winnefeld, and R. Figi, "Correlating cement characteristics with rheology of paste," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, pp. 1502–1511, 2007.
- [53] A. Yahia and K. Khayat, "Applicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture," *Mater. Struct.*, vol. 36, pp. 402–412, July 2003.
- [54] A. Bras, "Grout optimization for masonry consolidation," Ph.D. thesis, *Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa*, 2011.
- [55] F. Jorne, F. M. A. Henriques, and L. G. Baltazar, "Grout injection in porous media with different internal structures," in *Proceedings of the 14th International Conference - Structural Faults & Repair*, 2012.
- [56] A. Bras, F. M. A. Henriques, and M. T. Cidade, "Effect of environmental temperature and fly ash addition in hydraulic lime grout behaviour," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 8, pp. 1511–1517, 2010.

- [57] R. J. Hunter, "Foundations of colloid science," Oxford University Press, 2001.
- [58] K. Yamada, T. Takahashi, S. Hanehara, and M. Matsuhisa, "Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 2, pp. 197–207, 2000.
- [59] M. R. Valluzzi, "Requirements for the Choice of Mortar and Grouts for Consolidation of Three-Leaf Stone Masonry Walls," in *RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft, January 2005.
- [60] M. Corradi, C. Tedeschi, L. Binda, and A. Borri, "Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 4, pp. 463–472, 2008.
- [61] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, F. Jorne, and M. T. Cidade, "The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls," *Rheol. Acta*, vol. 52, no. 2, pp. 127–138, 2013.
- [62] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, and M. T. Cidade, "Contribution to the design of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 21, no. 6, pp. 698–709, Aug. 2015.
- [63] A. Pereira, "Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de betumes com o reómetro de corte dinâmico," *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa*, 2014.
- [64] J. Read and C. D. Whiteoak, "The Shell Bitumen Handbook," Fifth Edit., UK: Thomas Telford Publishing, London, 2003.
- [65] G. Airey, "Rheological characteristics of polymer modified and aged bitumens," *PhD Thesis, University of Nottingham, Department of Civil Engineering*, 1997.
- [66] F. Jorne, F. Henriques, and L. Baltazar, "Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography," *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 494–506, September 2014.
- [67] T. Silva, "Optimização da influência do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts," *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa*, 2016.

- [68] F. Balo and H. Yucel, “Assessment of thermal performance of green building materials produced with plant oils,” *Int. J. Mater. Sci.*, vol. 3, pp. 118–129, 2013.
- [69] Y. Xie, A. K. H. Kwan, H. C. Chan, and S. H. Rizkalla, “Linseed oil-based concrete surface treatment for building and highway structures in Hong Kong,” *Hong Kong Inst. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 36–41, Hong Kong, 1999.
- [70] A. Sá, “Renders for stone masonry,” *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, IST - UTL, Lisboa*, 2005.
- [71] G. Torracca, “Lectures on materials science for architectural conservation,” *The Getty Conservation Institute, Los Angeles*, 2009.
- [72] S. Argamassas and S. Martingança, “Secil Cal Hidráulica (HL5),” *Ficha Técnica*, 2016
- [73] C. F. Premia et al., “CHRYSO ® Fluid Premia 180 Superplasticizer – New generation admixture,” *Ficha Técnica*, 2010
- [74] H. Vikan, “Rheology and reactivity of cementitious binders with plasticizers,” *PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway*, 2005.
- [75] N. Mikanovic and C. Jolicoeur, “Influence of superplasticizers on the rheology and stability of limestone and cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. *Cem Concr*, pp. 907–919, 2008.
- [76] N. Roussel, A. Lemaître, R. J. Flatt, and P. Coussot, “Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 77–84, Jan. 2010.
- [77] A. Frade, “Análise da injectabilidade do grout variando o meio poroso ao longo do escoamento,” *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa*, 2015.
- [78] Sika, “Plastocrete ® 05,” *Ficha Técnica*, 2012.
- [79] J. Gomes, “Caracterização experimental do comportamento reológico e mecânico de grouts com hidrófugo vegetal,” *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa*, 2016.
- [80] S. Silva, J. Lima, and P. Faria, “Rebocos de Terra: Influência de óleo de linhaça e comparação com rebocos convencionais,” 2016.

- [81] E. Neno, “Optimização de injeção de grout no âmbito da sua formulação e modo de aplicação,” Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa, 2016.
- [82] Henkel, “Rubson Silicone Líquido ® SL3000,” Ficha Técnica, 2011.
- [83] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, and F. Jorne, “Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 838–845, Oct. 2012.
- [84] NP EN 445 - Caldas de Injeção para armaduras de pré-esforço: Métodos de ensaio, IPQ, 2008.
- [85] American Society for Testing and Materials (ASTM) - Standard Test Method for Water Retentivity of Grout Mixture for Preplaced-Aggregate Concrete, C 941-02, United States, ASTM, 2002.
- [86] EN 1015-11 - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, IPQ, 1999.
- [87] EN 1936 - Método de ensaio para pedra natural; Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta, IPQ, Monte da Caparica, 2008.
- [88] P. J. Haines, G. R. Heal, P. G. Laye, D. M. Price, S. B. Warrington, and R. J. Wilson, “Thermogravimetry and derivative thermogravimetry,” *Princ. Therm. Anal. Calorim.*, 2002.
- [89] E. E. Toumbakari, D. Van Gemert, T. P. Tassios, and E. Vintzileou, “Experimental investigation and analytical modeling of the effect of injection grouts on the structural behaviour of three-leaf masonry walls,” *Conference SAHC - Structural Analysis of Historical Constructions*, pp. 707–718, 2005.
- [90] J. J. Assaad, “Correlating water extraction to viscosity variations of injection grouts,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 74–82, Feb. 2015.
- [91] F. A. Cardoso, V. M. John, R. G. Pileggi, and P. F. G. Banfill, “Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 57, pp. 79–87, 2014.

Anexos

Effects of Hydrophobic Additives on the Rheology of Hydraulic Grouts

Luis G. Baltazar¹, Fernando M.A. Henriques¹, Diogo Miguel¹, Maria Teresa Cidade²

¹ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal)

² Departamento de Ciência dos Materiais & Cemat/I3N, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).

Introduction

During many centuries the stone masonry walls were used as a constructive technique and it represents the large majority of old buildings and dwellings in Europe. Unfortunately, stone masonry walls have demonstrated particular weakness, specially the multiple-leaf masonry walls. Some of the major causes for deterioration of multiple-leaf masonry are attributable to inadequate connections between leafs, voids, and the poor quality of mortar, so the load bearing capacity of such walls, especially horizontal loading, is very low. Rehabilitation and strengthening of this kind of masonry has undergone a remarkable development on the basis of new techniques and materials. Grout injection (or grouting) is amongst other techniques, a powerful consolidation solution to overcome masonry structural decay through the re-instate the connection between external leafs and inner core [1]. The complete and uniform filling of masonry voids with grout is essential in consolidation works. The success of grouting operation depends on several parameters, such as the rheological properties and water retention capacity. Over the last years, some researchers [2,3,4] have studied the use of several admixtures and additives in hydraulic grouts with the purpose of improve their performance. The use of hydrophobic additives, like silicone, in injection grouts is one of the main trends in development of grouts with improved injectability by reducing their wettability. A low wettability may reduce or even prevent the loss of constitutive water which dramatically changes the rheological properties and with direct consequences on fluidity. The wettability can be accessed through the contact angle formed between the grout and a solid surface (see Fig.1).

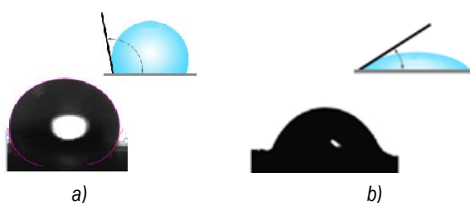


Figure 1. The contact angle between fresh grout and brick surface a) high contact angle; b) low contact angle

A high angle of contact ($> 90^\circ$) is indicative of a reduced wettability and according to previous studies [5,6] it can reduce the water loss from the grout, which allows to achieve more successful injections [7]. This means that high contact angle is desired from grout injection point of view. Thus, hydrophobic materials can be incorporated into grout composition with the purpose of reducing the grout's wettability [7]. In this context, this research work examines the effect of different hydrophobic additives (such as linseed oil, polydimethylsiloxan solution and a commercial available mass-hydrophobic agent) on the rheological performance of injection grouts. The lack of information about the influence of these additives in the rheological properties particularly under steady and oscillatory shear emphasizes the relevance of the proposed study.

Experimental

Materials

In this study hydraulic lime (HL) conforming to the European standard EN459-1:2010 [8] was used. HL was chosen because it is the hydraulic binder that presents properties closer to those of pre-existing materials in old masonries and is able to set both in dry and wet conditions. A commercially available high range water reducer (HRWR), namely a polycarboxylate ether, conforming to ASTM C494-05 [9] Type F was used. Regarding the hydrophobic additives three types were used: (i) linseed oil extracted by the cold press method from the flax seeds; (ii) a mass-hydrophobic agent (*plastocrete*) and (iii) poly(dimethylsiloxane) (PDMS) solution (PDMS was diluted in water in a ratio of 1:7 by weight). The water/binder (w/b) ratio and amount of each additive used to prepare all grouts samples are shown in Table 1. The proportions were selected on the basis of the results reported in previous studies [5,6,7,10]. The grout mixtures were prepared in laboratory in batches of 300 ml and the components mixed using a mechanical shear mixer. Binder and water were mixed for 10 min, additive was then added and the mixture was blended for plus 3 min.

Table 1 – Grouts mixture proportions

	Linseed oil (wt%)	PDMS solution (-)	Hydrophobic agent (plastocrete) (wt%)	HRWR (wt%)	w/b (-)
ref				1.6	0.5
O 0.5	0.5			1.6	0.5
O 1.5	1.5			1.6	0.5
S 1:6		1:6		1.6	0.5
H 0.5			0.5	1.6	0.5
H 1.0			1.0	1.6	0.5

Rheological measurements

The rheological measurements were performed with a Bohlin Gemini HR^{nano} rotational rheometer (Malvern, UK). The tests were carried out with parallel-plate geometry. The diameter of the geometry was 40 mm and the gap was 2 mm. The surface roughness of the upper plate was modified by means of an emery paper (grid 120) to minimize the slippage during the measurements. The steady-shear data were obtained over the shear rate in the range of 0.5-300 s⁻¹. Downwards curve (300 - 0.5 s⁻¹) was also determined to evaluate the existence of thixotropy. To avoid the undesirable influence from shearing histories, fresh samples were subjected to a pre-shearing at an identical shear rate of 1 s⁻¹ for 1 min and left standing for an additional 1 min before measurements took place.

Small amplitude oscillatory rheological measurements were used to evaluate the dynamic properties of grouts. In the oscillatory assays all the samples were sheared in the range of 1.6 - 16 Hz at 5.7x10⁻³ % strain in order to determine the storage (G') and the loss (G'') modulus. To ensure that the measurements were in the linear viscoelastic region (LVR) a dynamic strain sweeps at a constant frequency was performed as shown in Fig. 2 in order to identify the LVR. The knowledge of the LVR is of great importance since it allows obtaining information on the micro-structure of the suspension in conditions close to the unperturbed state. All grout samples were analysed with a constant temperature of 20 °C.

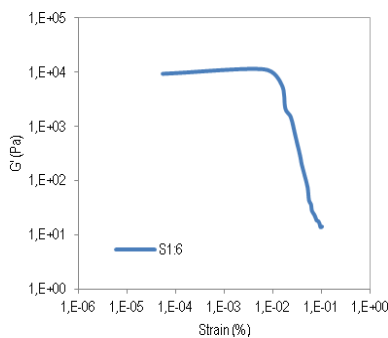


Figure 2 Example of typical strain sweep behaviour for these grout compositions

Results and Discussion

The flow curves of HL grouts as function of type and dosage of hydrophobic additive are presented in Fig. 3.

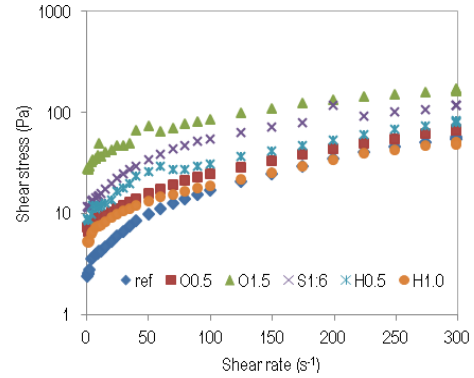


Figure 3 Experimental data of steady-shear flow

The rheograms (Fig. 3) show that the flow curve for all cases of hydrophobic additive has a shear-thinning behaviour, where the rheological behaviour can be modelled using the Herschel-Bulkley model (Eq. 1)

$$\tau = \tau_0 + K \times \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

where: τ is the shear stress (Pa), τ_0 is the yield stress (Pa), k is the consistency index (Pa.sⁿ), $\dot{\gamma}$ is the shear rate (s⁻¹) and n is the fluidity index which characterizes shear-thinning behaviour of grout. Experimental data were satisfactorily fitted to Herschel-Bulkley model ($R^2 > 0.98$) as presented in Table 2. Then, the Herschel-Bulkley parameters were chosen to compare grouts (Table 2). From a practical point of view, yield stress is associated with the minimum stress that is necessary to apply for the suspension to start flowing. The knowledge of the yield stress enables to understand if a fluid will flow or not. On the other hand, consistency coefficient is associated to grout's viscosity, since an increase of the consistency index leads to a grout viscosity increase. Hence, a low consistency index means that the grout flows easily.

Table 2 -Rheological properties as function of type and dosage of hydrophobic additive

	τ_0 (Pa)	K (Pa.s ⁿ)	n (-)	R ² (-)	Hysteresis area (Pa.s ⁻¹)
ref	2.7	0.07	0.57	0.999	298
O 0.5	7.9	0.09	0.37	0.999	346
O 1.5	24.4	0.99	0.34	0.987	4928
S 1:6	7.5	1.04	0.47	0.993	1618
H 0.5	8.9	0.21	0.40	0.997	134

From Table 2 it can be observed significant differences between rheological parameters when the different additives are compared. For the compositions studied the yield stress increased in the presence of any hydrophobic additive; nevertheless, this increase is more significant in the case of linseed oil, in which the yield stress increases around 89% compared with the reference grout. However, this trend inverted with the PDMS solution as well as for the highest dosage of *plastocrete*. According with the consistency results it is clear that the grout becomes less workable when these additives are added. This behaviour is supported with the decrease of fluidity index, which means grouts with stronger shear-thinning behaviour. As a consequence, if during injection the flow velocity decreases for some reason it leads to a viscosity increase which compromises the grout application and the effectiveness of the consolidation operation. It is expected that grouts proportioned with this kind of additives will present lower injectability, so to achieve the required injectability a higher dosage of HRWR is recommended [9], but further studies on its impact over other fresh and hardened properties are need.

The evolution of shear stress as a function of shear rate resulting from the hysteresis loop has also been analysed. The presence of a hysteresis area indicates that the grout shows thixotropy. Previous studies [11,12] demonstrated that the thixotropy constitutes a critical parameter for cementitious suspensions. Based on the results obtained it can be stated that all grouts are thixotropic, however, the influence of linseed oil and PDMS solution on the hysteresis area is great as it could be seen from the Table 2. Grouts proportioned with linseed oil or PDMS solution appears to have stronger interaction forces among particles and hence the dispersion state is not so easily achieved, but on the other hand they are the ones that recover their initial state slower (i.e. a higher delay in the material answer).

As it is well known, the mechanisms behind the thixotropy of HL-based grouts are the same found in colloidal domain; nevertheless, the results obtained demonstrated that these additives can affect those interaction mechanisms so that significant differences in de-flocculation and flocculation can be seen. It has to be noted that grouts containing the *plastocrete* additive were found to have lower hysteresis area, and it seems to flocculate more quickly than the reference grout.

Fig. 4 shows the effects of the hydrophobic additives on the values of storage modulus (G') and loss modulus (G'').

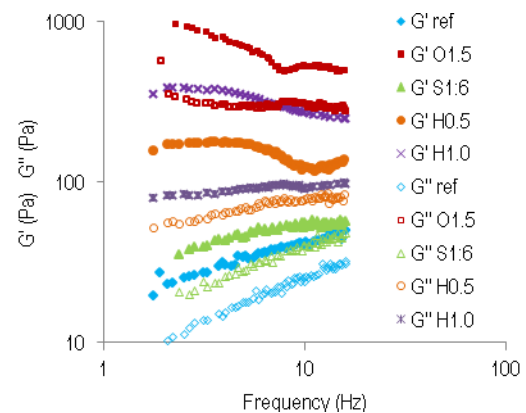


Figure 4 Storage and loss moduli as a function of frequency for the grout compositions studied

It can be observed that G' was higher than G'' over angular frequency range for all tested grouts. It is also remarkable that all the hydrophobic additives tested presented G' value at each angular frequency higher than the one presented by the reference grout. Moreover, the linseed oil and the *plastocrete* were the additives that exhibit strongest viscoelastic properties. Considering for example the grout H0.5 and H1.0 (proportioned with *plastocrete* at concentration of 0.5 and 1.0%, respectively) it is clear that at each angular frequency, both modulus increase with increasing the additive concentration.

The preponderance of elastic behaviour can be attributed to the interparticle association caused by the additive in the continuous phase. This could happen with the interaction of the polymer chains into the suspension that act as a space-filling particulate network and causing an elastic microstructure. Note that the *plastocrete* additive had one of the highest G' values over the experimental frequency range but it was also the one with lower hysteresis area (i.e. a quicker answer). This behaviour can be of particular interest to improve service life of grouting interventions, since following the end of injection process the grouts should be stable enough until onset of hardening to ensure proper homogeneity and avoid exudation (bleeding) of constitution water that is often coupled with sedimentation of HL particles [13]. From the results obtained, it is believed that this additive, besides contributing to higher water retention, may also minimize the occurrence of instability phenomena.

Concluding Remarks

We have investigated the effects of different hydrophobic additives, such as linseed oil, polydimethylsiloxan solution and a commercial hydrophobic agent, on the rheological properties of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation. The results showed that grouts with hydrophobic additives exhibited characteristics that follow the Herschel-Bulkley model. We found that all the additives lead to the reduction of grout fluidity and the linseed oil was the most harmful. For instance, when the content of linseed oil was 1.5 wt%, the yield stress values were increased by 89% compared to the reference grout. The results also showed that grouts proportioned with linseed oil or PDMS solution exhibited a delayed answer (i.e. a higher hysteresis area). Moreover, for all additives the storage modulus was higher than loss modulus over the frequency range studied. This preponderance of elastic behaviour can be attributed to the effect of the additive in the continuous phase of grout, since it acts as a space-filling particulate network.

This study has showed that these hydrophobic additives significantly change the rheological properties of grouts and their overall contribution to improving the rheological performance of grouts is not very promising, since injection grouts should have high fluidity in order to provide a proper flow and to fill small openings and interconnected voids, even using low pressures. Notwithstanding, additional characterization of the contribution of these additives in exudation and water retention is needed, including an assessment of their effective ability for reducing the grout's wettability during injection of a granular medium. Anyway, the presented results are still important in the design of injection grouts and will stimulate further investigations towards understanding the benefits of hydrophobic materials in injection grouts.

Acknowledgements

This work is funded by National Funds through FCT/MCTES - Portuguese Foundation for Science and Technology, Reference UID/CTM/50025/2013 and FEDER funds through the COMPETE 2020 Programme under the project number POCI-01-0145-FEDER-007688. The first author would like to thank the financial support from FCT/MCTES under the grant SFRH/BPD/108427/2015.

References

1. Corradi, M., Borri, A., Vignoli, A. (2002). Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the

- Umbrian–Marche earthquake of 1997–1998. *Constr. Build. Mater.* 16(4), 229–239.
2. Griffin, I. (2004). Pozzolanas as additives for grouts: An investigation of their working properties and performance characteristics *Studies in Conservation* 49(1), 23–34.
3. Kalagri, A., Miltiadou-Fezans, A., Vintzileou, E. (2010). Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures. *Mater. Struct.* 43, 1135–1146.
4. Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Cidade, M.T. (2015). Contribution to the design of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation. *J. Civ. Eng. Manag.* 21(6), 698–709.
5. Jorne, F., Henriques, F.M.A., Baltazar, L.G. (2014). Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography. *Constr. Build. Mater.* 66, 494–506.
6. Telha, F. (2015). Análise da influência da alteração do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts. (in Portuguese). Master Thesis, Department of Civil Engineering, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Caparica.
7. Silva, T. (2016). Optimização da influência do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts. (in Portuguese). Master Thesis, Department of Civil Engineering, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Caparica.
8. EN 459-1 (2010). Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria. CEN, European Committee for Standardization.
9. ASTM C494 (2005). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
10. Neno, E. (2016). Optimização de injeção de grout no âmbito da sua formulação e modo de aplicação. (in Portuguese). Master Thesis, Department of Civil Engineering, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Caparica.
11. Billberg, P. (2006). Form pressure generated by self-compacting concrete - Influence of thixotropy and structural behaviour at rest. PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
12. Jorne, F., Henriques, F.M.A., Baltazar, L.G. (2015). Influence of superplasticizer, temperature, resting time and injection pressure on hydraulic lime grout injectability. Correlation analysis between fresh grout parameters and grout injectability. *J. Build. Engin.* 4, 140–151.
13. Miltiadou, A., Tassios, T.P. (2013). Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening, *Mater. Struct.* 46(10), 1631–1652.

Effects of hydrophobic additives on the rheology of hydraulic grouts

Contact Address:

Maria Teresa Cidade (mtc@fct.unl.pt)

Departamento de Ciência dos Materiais e Cénimat/13N

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade NOVA de Lisboa

2829-516 Caparica (Portugal)

Tel.: +351 212948584 ; Fax: +351 212957810

Introduction

During many centuries stone masonry walls were used as a constructive technique and they represent the vast majority of old buildings and dwellings in Europe

Unfortunately, masonry walls (specially the multi-leaf type) are usually characterized by their constructive weaknesses, such as scarce or no connection through the thickness and presence of voids and cracks which lead to instability of the masonry under both horizontal and vertical loads. These constructive peculiarities facilitate the collapse of the external leaves that may lead to the global overturning of the wall (see Fig. 1)

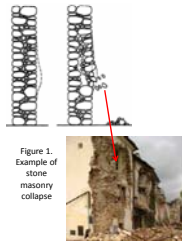


Figure 1. Example of stone masonry collapse

Grout injection (or grouting) is a powerful consolidation solution (Fig. 2) to overcome masonry structural decay through the re-instate the connection between external leafs and inner core [1]

The use of hydrophobic additives, like polydimethylsiloxan, in injection grouts is one of the main trends in development of high-performance grouts with improved injectability by reducing their wettability



Figure 2. Grouting of a stone masonry

Objectives

The efficacy of the grouts depends mainly on the injectability properties [2]. A low wettability may reduce or even prevent the loss of constitutive water which dramatically changes the rheological properties of grouts and consequently their flow inside the masonry.

The wettability can be accessed through the contact angle formed between the grout and a solid surface (see Fig. 3)

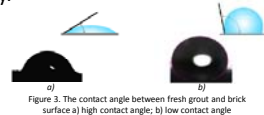


Figure 3. The contact angle between fresh grout and brick surface a) high contact angle; b) low contact angle



Figure 4. Lotus effect – desired behaviour for injection grouts

A high angle of contact (> 90°) is indicative of a reduced wettability and according to previous studies [3,4] it can reduce the water loss from the grout, which allows to achieve more successful injection operations [5]



To these ends, hydrophobic materials were incorporated into grout composition with the purpose of reducing the grout's wettability

The main objective of this study is to assess the effect of different hydrophobic additives on the rheological performance of injection grouts

Experimental Details

Three types of hydrophobic additives were tested: (i) linseed oil extracted by the cold press method from the flax seeds; (ii) a mass-hydrophobic agent (plastocrete) and (iii) poly(dimethylsiloxane) (PDMS) solution (PDMS was diluted in water in a ratio of 1:7 by weight)

The water/binder (w/b) ratio and the amount of each additive used to prepare all grouts samples are shown in Table 1

Linseed oil (wt%)	PDMS solution (g)	Hydrophobic agent (plastocrete) (wt%)	HRWR (wt%)	w/b (g)
inf	1.6	0.5	0.5	0.5
O0.5	0.5	1.6	0.5	0.5
O15	1.5	1.6	0.5	0.5
S1.6	1.6	1.6	0.5	0.5
H0.5	0.5	1.6	0.5	0.5
H1.0	1.0	1.6	0.5	0.5



Figure 5. Rotational rheometer and plate-plate geometry

The rheological measurements were performed with a Bohlin Gemini HR^{nano} rotational rheometer. The surface roughness of the upper plate was modified by means of an emery paper (grid 120)

Two different measurements procedures were employed, i.e. steady shear (over the shear rate in the range of 0.5-300 s⁻¹) and dynamic oscillatory shear (in the range of 1.6 - 16 Hz at 5.7x10⁻³ % strain)

Results and Discussion

The rheograms (Fig. 6) show that the flow curve for all cases of hydrophobic additive has a shear-thinning behaviour, where the rheological behaviour can be modelled using the Herschel-Bulkley model

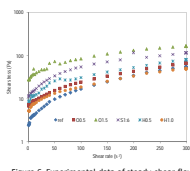


Figure 6. Experimental data of steady-shear flow

Table 2 - Rheological properties as function of type and dosage of hydrophobic additive

inf	(Pa)	K (Pa·s ⁿ)	n (s)	RF (s)	Hysteresis area (Pa·s)
inf	2.7	0.07	0.57	0.999	298
O0.5	7.9	0.09	0.37	0.999	346
O15	24.4	0.99	0.34	0.987	4928
S1.6	7.5	1.04	0.47	0.993	3638
H0.5	8.9	0.21	0.40	0.997	134
H1.0	5.5	0.09	0.40	0.998	222

The yield stress increased in the presence of any hydrophobic additive

The grout becomes less workable when these additives are added. This behaviour is supported with the decrease of fluidity index. It is expected that grouts proportioned with this kind of additives will present lower injectability, so to achieve the required injectability a higher dosage of HRWR is recommended

From Table 2 it can be observed significant differences between rheological parameters when the different additives are compared

Fig. 7 shows the effects of the hydrophobic additives on the values of storage modulus (G') and loss modulus (G'')

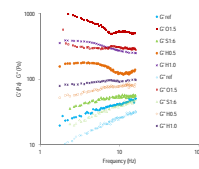


Figure 7. Storage and loss moduli as a function of frequency

It can be observed that G' was higher than G'' over angular frequency range for all tested grouts

The preponderance of elastic behaviour can be attributed to the interparticle association caused by the additive in the continuous phase

Grouts proportioned with linseed oil or PDMS solution appears to have stronger interaction forces among particles and hence the dispersion state is not so easily achieved, but on the other hand they are the ones that recover their initial state slower

Conclusions

- All the additives lead to the reduction of grout fluidity and the linseed oil was the most harmful
- Grouts proportioned with linseed oil or PDMS solution exhibited a delayed answer (i.e. a higher hysteresis area)
- For all additives the storage modulus was higher than loss modulus over the frequency range studied
- Additional characterization of the contribution of these additives in exudation and water retention is needed, including an assessment of their effective ability to improve the grout's injectability

Acknowledgements

This work is funded by FEDER funds through the COMPETE 2020 Programme and National Funds through FCT - Portuguese Foundation for Science and Technology under the project UID/CTM/50025/2013

References

1. Corradi, M. et. al. *Construction and Building Materials* (2002) 16(4), 229–239
2. Jorne, F. et. al. *Journal of Building Engineering* (2015) 4, 140-151
3. Jorne, F. et. al. *Construction and Building Materials* (2014) 66, 494-506
4. Telha, F. (2015). Análise da influência da alteração do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts. (in Portuguese). Master Thesis, Department of Civil Engineering, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Caparica
5. Silva, T. (2016). Optimização da influência do ângulo de contacto na injectabilidade de grouts. (in Portuguese). Master Thesis, Department of Civil Engineering, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Caparica

Fichas Técnicas dos Materiais

Cal hidráulica (HL5)

Secil CAL HIDRÁULICA HL 5

HL 5 – CAL HIDRÁULICA

T.C.E.035.5

1. DESCRIÇÃO

A *Secil CAL HIDRÁULICA HL 5* é um ligante hidráulico constituído por silicatos e aluminatos de cálcio e um baixo teor em hidróxido de cálcio. Obtém-se por cozedura de calcário margoso, seguida de moagem. A *Secil CAL HIDRÁULICA HL 5* é classificada como HL 5 segundo a NP EN 459-1.

A *Secil CAL HIDRÁULICA HL 5* é um ligante que apresenta maioritariamente uma presa hidráulica, mas apresenta alguma presa aérea.

2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

Aplica-se como substituto do filler nos pavimentos betuminosos, a utilizar segundo o procedimento preconizado no caderno de encargos da obra onde val ser aplicado. Na fabricação de argamassas, como único ligante ou em mistura com outros ligantes hidráulicos ou aéreos, conferindo-lhes trabalhabilidade e flexibilidade, reduzindo significativamente a retração das argamassas hidráulicas (p.ex. argamassas de alvenaria, argamassas de reboco e acabamentos).

Na produção de produtos para a construção, como, elementos de alvenaria e outros tipos de produtos pré-fabricados.

Em diferentes utilizações de engenharia civil tais como tratamento de solos ou misturas asfálticas.

3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	VALOR	NORMA
Cal disponível Ca(OH) ₂	≥ 4,0 %	EN 459-1
Sulfato	≤ 3,0 %	EN 459-1
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	VALOR	NORMA
Água livre	≤ 1,0 %	EN 459-1
Finura	90 µm ≤ 15,0 % 200 µm ≤ 5,0 %	EN 459-1
Expansibilidade	≤ 2,0 mm	EN 459-1
Penetração	> 10 mm e < 50 mm	EN 459-1
Teor de ar	≤ 25,0 %	EN 459-1
Início de presa	> 1 h	EN 459-1
Fim de presa	≤ 15 h	EN 459-1
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	VALOR	NORMA
Resistência à compressão (28 dias)	≥ 5,0 MPa	EN 459-1

4. APLICAÇÃO

FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS

A dosagem de *Secil CAL HIDRÁULICA HL 5* numa argamassa deve adequar-se ao fim a que se destina. Nas argamassas de reboco e de assentamento, a *Secil CAL HIDRÁULICA HL 5* tem um papel preponderante como ligante único ou conjugado com outros.

Misturar previamente a *Secil CAL HIDRÁULICA HL 5* com o agregado e posteriormente adicionar água na quantidade adequada de forma a obter uma boa trabalhabilidade.

Restrições

Não aplicar argamassas a temperaturas inferiores a 5 °C e superiores a 30 °C, evitando a aplicação em situações de elevada exposição solar e/ou sob ventos fortes.

Não utilizar argamassas amolentadas ou que tenham iniciado a sua presa.

Evitar a secagem rápida das argamassas, regando o suporte, 1 a 2 horas antes da aplicação e voltando a regar logo que a argamassa se apresente suficientemente resistente. Repetir a rega 1, 2 e 7 dias depois.

Conselhos complementares

- ▶ O excesso de água de amassadura é prejudicial às características físicas do reboco;
- ▶ Deve ser sempre utilizada a quantidade mínima de água que permita boa trabalhabilidade;
- ▶ A água de amassadura deve estar isenta de quaisquer impurezas (argilas, matéria orgânica), devendo, de preferência, ser utilizada água potável;

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.
Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



1/2

www.secilargamassas.pt

Secil CAL HIDRÁULICA HL 5

HL 5 – CAL HIDRÁULICA

T.C.E.035.5



Pedreira



Fábrica de Cal Hidráulica



Pedra no interior do forno

- ▶ Uma vez determinado o traço a utilizar para uma argamassa, manter as dosagens constantes e o tempo de amassadura.

TRATAMENTO DE SOLOS

A adição de **Secil CAL HIDRÁULICA HL 5** a certos solos argilosos e húmidos permite a sua estabilização, melhorando a sua resistência, pela diminuição do índice de plasticidade e de uma maior compactação, a qual permite um aumento do CBR (California Bearing Ratio, índice de capacidade de suporte).

A adição de **Secil CAL HIDRÁULICA HL 5** reduz a humidade do solo contribuindo para a aglutinação das suas partículas e constituindo um aglomerado muito mais compacto.

Processo de aplicação

A quantidade de **Secil CAL HIDRÁULICA HL 5** a utilizar deve ser de 0,5 a 5 % (sendo 3% o valor típico) da massa de solo a tratar, de onde devem ser retiradas as pedras de grandes dimensões.

De seguida, espalhar a **Secil CAL HIDRÁULICA HL 5**, misturando-a e homogeneizando-a com o solo em tratamento. Depois, compactar o solo tratado, que ficará muito mais

resistente à penetração das águas pluviais e mais apto a funcionar como base de fundações.

Estes procedimentos encontram-se documentados em suporte vídeo disponibilizado em www.secilargamassas.pt. Também poderá solicitar-se cópia aos nossos Serviços Comerciais.

SUBSTITUTO DE FÍLER

(Ver ficha técnica da Cal como filler comercial T.C.E.055)

5. EMBALAGEM E VALIDADE

Embalagem

- ▶ Sacos de papel de 25 kg em paletes plastificadas;
- ▶ Granel para utilização em sistema de silo.

Validade

12 meses desde que permaneçam inalteradas as condições da embalagem originais e em condições de armazenagem ao abrigo de temperaturas extremas e da humidade.

6. HIGIENE E SEGURANÇA

(NÃO DISPENSA A CONSULTA DA FICHA DE SEGURANÇA DO PRODUTO)

- ▶ Provoca irritação da pele;
- ▶ Provoca danos graves nos olhos;
- ▶ Pode provocar irritação respiratória;
- ▶ Manter fora do alcance das crianças;
- ▶ Usar luvas de proteção/ vestuário de proteção/ proteção ocular/ proteção facial;
- ▶ Evitar respirar poeiras/ vapores.

Estando as condições de aplicação dos nossos produtos fora do nosso alcance não nos responsabilizamos pela sua incorrecta utilização. É dever do cliente verificar a idoneidade do produto para o fim previsto. Em qualquer caso a nossa responsabilidade está limitada ao valor da mercadoria por nós fornecida. A informação constante da presente ficha pode ser alterada sem aviso prévio. Em caso de dúvida, e se pretender esclarecimentos complementares solicitamos o contacto com os nossos serviços técnicos.



11

Secil CAL HIDRÁULICA HL 5

EN 459-1:2011

Certificado: 1328-CPR-0215

Cal hidráulica – HL 5

Revisão de Julho de 2016
T.C.E.035.5

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



2/2

www.secilargamassas.pt

Superplastificante CHRYSO Fluid Premia 180



CHRYSO® Fluid Premia 180 Superplasticizer – New generation admixture

1.1.3



Description

CHRYSO® Fluid Premia 180 is a new generation superplasticizer based on modified polycarboxylate.

CHRYSO® Fluid Premia 180 has been designed for use in precast concretes. When used in concretes containing many fine particles, exceptional fluidity can be obtained, which greatly helps the laying of the concrete, even without using vibrating techniques (self compacting concrete). It produces concrete with very high early and 28 days age strengths.

Excellent workability can be obtained in the space of 60-80 minutes without compromising mechanical properties at early age. CHRYSO® Fluid Premia 180 is compatible with most of the cements. As a matter of fact, its particular formulation reduces the high incompatibility risks characterizing the new generation admixtures.

Conformity

CHRYSO® Fluid Premia 180 conforms to EN 934-2 standard.

Characteristics

- ◆ Nature: dark green opalescent liquid
- ◆ Density at 20°C: 1,05 g/ml ± 0,02
- ◆ pH at 20°C: 7,0 ± 1,5
- ◆ Cl ions content: ≤ 0,1%
- ◆ Na₂O equivalent : ≤ 1,5 %

Packaging

Bulk, 1000 litres tanks, 200 litres drums, 20 litres cans.

Storage

Store away from frost.

Should the product freeze, its properties can be recovered after thawing and agitating thoroughly.

Store in plastic tanks, PVC excluded.

Shelf life: 12 months.

Application

Application fields

- All types of cement (according to UNI EN 197 standard)
- Concrete requiring high resistance at early and long term age
- Pre-stressed concrete
- Self-compacting concrete
- High performance concrete
- Concrete with high level of exposed face finish
- Concrete with good workability.

Dosage

Dosage range: 0,3 - 2,9 litres per 100 kg of cement.
Standard dosage: 0,8% of the weight of cement.

The optimum dosage of CHRYSO® Fluid Premia 180 can only be established after local trial tests, taking into account the rheological characteristics and mechanical strength required for the concrete.

Method of use

CHRYSO® Fluid Premia 180 must be preferably added in the mixing water. However it can be added later.

As with all concrete, it must be mixed sufficiently until fully homogeneous.

According to applications, it is possible to use CHRYSO® Fluid Premia 180 in synergy with other product ranges, such as CHRYSO® Xel, CHRYSO® Tard, CHRYSO® Air, CHRYSO® Fuge, CHRYSO® Dem and CHRYSO® Cure.



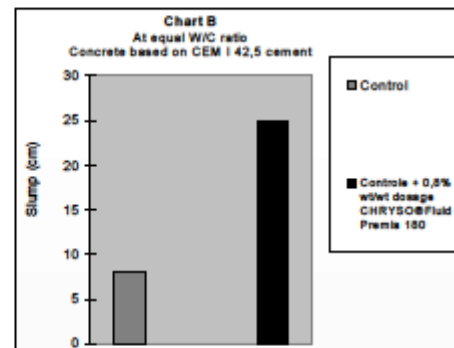
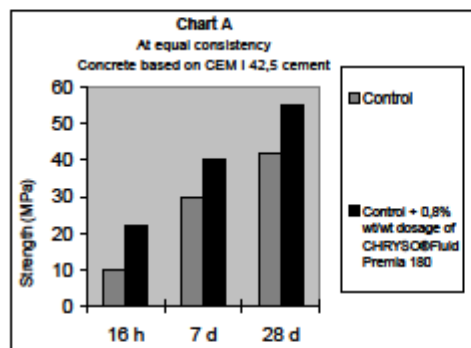
CHRYSO® Fluid Premia 180
 Superplasticizer – New generation admixture

1.1.3



Tests

The following results have been obtained according to the methods defined in the ISO 4012 standard (resistance tests, chart A) and the EN 12358 standard (consistency tests, chart B).



SAFETY

CHRYSO® Fluid Premia 180 is a product classified as "harmless".

For further information, please refer to the safety data sheet.

The information contained in this document is given to the best of our knowledge and the results from extensive testing. However, it cannot, under any circumstances be considered as a warranty involving our liability in case of misuse. Tests should be carried out before any use of the product to ensure that the methods and conditions of use of the product are satisfactory. Our specialists are at the disposal of the users in order to help them with any problem encountered.

Last update: 04/2010

N.B. PRODUCT FOR PROFESSIONAL USE ONLY

Hidrófugo comercial Plastocrete 05

Ficha de Produto
Edição de Setembro de 2012
Nº de identificação: 01.707
Versão nº 2
Plastocrete® 05



Plastocrete® 05

Hidrófugo concentrado para betão e argamassa

Descrição do produto	Plastocrete® 05 é um adjuvante hidrófugo para betão de acordo com a norma NP EN 934-2:T9.
Utilizações	Em betão e argamassa para: reservatórios, fundações, pontes, túneis, centrais eléctricas, fachadas, piscinas, caves, etc.
Características/ Vantagens	<p>Qualquer betão possui sempre uma certa porosidade e uma certa capilaridade, ambas decorrentes da saída em excesso de água em relação aquela que se combina quimicamente com o cimento.</p> <p>Plastocrete® 05 actua em três direcções:</p> <ul style="list-style-type: none">■ Permite uma ligeira introdução de ar que diminui a absorção capilar porque interrompe os canais mais finos.■ Permite uma redução da razão água/cimento de pelo menos 10%, diminuindo assim a rede de capilares e aumentando as resistências mecânicas.■ Facilita a dispersão do cimento e dos agregados mais finos, aumentando a homogeneidade e diminuindo o risco de existência de zonas fracas de penetração de água. <p>Plastocrete® 05 tem, assim, uma acção múltipla na hidrofugação do betão. Plastocrete® 05 é isento de cloretos. Pode ser usado sem qualquer objecção no betão armado ou pré-esforçado.</p>
Certificados/ Boletins de Ensaio	Conforme as especificações da norma NP EN 934-2:T9.

Dados do produto

Aspecto / Cor	Líquido castanho.
Fornecimento	5,5 kg (5 l); 22 kg (20 l); 220 kg (200 l); 1100 kg (1 m³).
Armazenagem e conservação	O produto conserva-se durante 24 meses a partir da data de fabrico, na embalagem original não encetada, a temperaturas entre +5 e +30 °C. Armazenar em local seco e ao abrigo da luz solar directa.

Dados técnicos

Base química	Mistura de sais alcalinos com compostos complexos.
Massa volúmica	1,10 ± 0,02 kg/dm³ (a +23 ± 2 °C)
pH (23 ± 2 °C)	11,0 ± 1,0.
Teor de sólidos	18,5 ± 1,5%.
Teor em cloretos	≤ 0,1%.



Informação sobre o sistema

Formenores de aplicação

Consumo/ Dosagem Para betão, dosear 0,5% sobre o peso do cimento, o que equivale a aprox. 455 ml/100 kg de cimento.
Para rebocos, recomenda-se dobrar a dosagem para obter a máxima eficácia.

Na prática, diluir o adjuvante na água de amassadura:

- Com 40 partes de água (para rebocos).
- Com 80 partes de água (para betões).

Uma sobredosagem accidental implica um retardamento de presa. Proceder a imediatas medidas excepcionais de cura até início do endurecimento.

Instruções de aplicação

Mistura Se for possível, deverá preparar-se o betão com apenas cerca de $\frac{2}{3}$ da água prevista e adicionar então o adjuvante misturando energeticamente cerca de 1 minuto/m³; só então será adicionada mais alguma água até à consistência desejada. Este processo conduz ao aproveitamento máximo do adjuvante e permite controlar convenientemente a razão água/ligante. Se o processo não for viável, então adicionar o produto à água de amassadura previamente determinada e misturar o betão até obter uma mistura homogénea.

Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia).

É possível a adição na autobetoneira desde que seja garantida a uniformidade do betão, rodando a cuba em velocidade suficiente pelo menos 1 minuto por cada m³ de betão e verificando o aspecto antes de descarregar.

Aplicação Plastocrete® 05 permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação e a cura do betão.

Limpeza de ferramentas Limpar todas as ferramentas e equipamento com água imediatamente após a utilização. Material curado/endurecido só pode ser removido mecanicamente.

Importante

A obtenção de um betão estanque exige:

- Uma composição cuidadosa do betão: nenhum hidrófugo consegue tornar estanque um betão deficiente, contendo vazios importantes ou falta nítida de cimento.
- Uma dosagem mínima de cimento: pelo menos 300 kg/m³.
- Uma boa operação de mistura, garantindo a dispersão completa do Plastocrete® 05 por toda a massa.
- Uma compactação e vibração adequadas.
- Uma cura cuidadosa: a hidratação é mais completa e obtém-se um betão mais denso.
- Um cuidado essencial: para aproveitar ao máximo o efeito do Plastocrete® 05 recomenda-se a adição de apenas 75-80% da água teoricamente prevista, proceder à mistura (já com o Plastocrete® 05) e acrescentar alguma água no final até obter a consistência desejada.

- Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem ótima do adjuvante e sempre que se altere os componentes do betão ou a própria composição.
- Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, agitado cuidadosamente e verificada a homogeneidade, poderá voltar a empregar-se.

Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.

Nota Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.

Risco e segurança

Medidas de segurança Para informações complementares sobre o manuseamento, armazenagem e eliminação de resíduos do produto consultar a respectiva Ficha de Dados de Segurança e o rótulo da embalagem.

"O produto está seguro na C^o Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nºCH00003018LI06A), a título de responsabilidade civil do fabricante".

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que solicitada.

Marcação CE

A Norma Europeia EN 934-2:2009 "Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e rotulagem" especifica as definições e os requisitos dos adjuvantes para uso no betão. Abrange adjuvantes para betão simples, armado e pré-esforçados usados no betão fabricado no local da obra, no betão pronto e no betão fabricado em centrais de produção de elementos prefabricados.

Nesta norma os requisitos de desempenho aplicam-se a adjuvantes usados no betão de consistência normal. Eles podem não ser aplicáveis a adjuvantes para outros tipos de betão tais como betões meio secos e de consistência terra húmida.



Sika Portugal, SA
R. de Santarém, 113 Tel. +351 22 377 69 00
4400-292 V. N. Gaia Fax +351 22 370 20 12
Portugal www.sika.pt



