



Miguel Augusto Reis Teixeira

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Estudo reológico de caldas hidráulicas para utilização na reabilitação do edificado

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

Orientadora: Maria Teresa Varanda Cidade, Professora
Doutora, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
Co-orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora
Doutora, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio
Arguente: Prof. Doutor Fernando M.A. Henriques
Vogais: Prof. Doutora Maria Teresa Varanda Cidade
Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio de 2013

“Copyright” Miguel Augusto Reis Teixeira, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm 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

Não posso deixar de salientar a importância que algumas pessoas tiveram na realização deste trabalho, às quais gostaria de deixar o meu sincero agradecimento pela ajuda, apoio e crítica.

Quero por isso, em primeiro lugar, expressar a minha gratidão às Professoras Teresa Cidade e Paulina Faria pela disponibilidade e simpatia constante que demonstraram desde o início deste trabalho, pela ajuda em todas as fases do mesmo, pela partilha e discussão de conhecimentos e pelas sugestões e críticas.

A todos os Técnicos pertencentes ao DEC, com um especial agradecimento ao Engenheiro Vítor Silva, sem a ajuda do qual o trabalho teria sido muito mais difícil de realizar. Agradeço também toda a simpatia e amizade demonstradas.

À minha família por fornecerem sempre o apoio necessário ao longo do meu percurso académico, sobretudo nesta fase.

Por fim, aos meus amigos, em especial à Emmy, tendo todos eles contribuído de forma directa ou indirecta para a realização deste trabalho.

RESUMO

A injeção de caldas constitui uma das mais comuns e eficazes técnicas aplicadas na reparação e reforço de estruturas de alvenaria antigas. Este método de reforço baseia-se na colmatação de vazios existentes no interior da alvenaria, de modo a melhorar o seu comportamento geral. Em alvenarias de panos múltiplos tem como objectivo criar uma ligação entre os panos interior e exterior e recuperar a coesão, continuidade e resistência das estruturas danificadas, sem alterar a sua morfologia. De facto, a calda injectada une os fragmentos incoerentes contidos no núcleo de alvenaria e ocupa os espaços vazios, o que permite um aumento da resistência. No entanto, esta é uma das mais complicadas técnicas de intervenção, principalmente por causa da compatibilidade entre a calda injectada e os materiais pré-existentes históricos e da sua não reversibilidade.

Os requisitos de desempenho de uma calda envolvem a injectabilidade, a resistência e a durabilidade. Uma vez que a capacidade de injectabilidade é um parâmetro essencial para o sucesso das intervenções (já que a consistência é uma característica fundamental para permitir o preenchimento de vazios), as propriedades das caldas no estado fresco são tão (ou mesmo mais) importantes como as do seu estado endurecido. Para garantir que uma calda possui uma fluidez que garanta uma boa injectabilidade é fundamental proceder-se a um estudo do comportamento reológico da calda no estado fresco.

Um dos projecto de investigação onde se insere esta dissertação tem como objectivo analisar e discutir as propriedades reológicas de caldas de injeção para a consolidação de alvenarias, que tenham compatibilidade química, física e mecânica com os materiais presentes nas alvenarias antigas. Outro tem como objectivo aferir as vantagens da utilização de metacaulino em pastas e argamassas. Devido a esses factos, as caldas utilizadas neste estudo são à base de cal hidráulica natural com adição de três diferentes percentagens de metacaulino e de superplastificante. Além disso, utilizaram-se dois rácios água/ligante. Como ferramenta para esta análise, foram determinados quatro parâmetros reológicos para cada calda, através de ensaios de fluidez com recurso a um reómetro rotacional. Os parâmetros obtidos através dos ensaios foram a viscosidade plástica, a tensão de cedência, a consistência e o índice “lei da potência”. Através de uma análise destes parâmetros constatou-se que tanto o rácio água/ligante como as adições de metacaulino e de superplastificante têm um forte impacto no comportamento reológico das caldas no estado fresco.

PALAVRAS-CHAVE:

Caldas, cal hidráulica natural, metacaulino, superplastificante, reologia.

ABSTRACT

Injection of grout is one of the most common and effective techniques used in the repair and reinforcement of masonry structures. This reinforcement method exploits the presence of voids within the masonry to improve their general behavior. It aims to create a link between the inner and outer panels and recover cohesion, continuity and strength of damaged structures without changing their morphology. In fact, the injected grout joins the incoherent fragments contained in the core of the masonry and occupies voids, enabling increased resistance. However, this is one of the most complicated intervention techniques, primarily because of the compatibility between the injected mortar and preexistent historical materials.

The performance requirements of grout involve injectability, resistance and durability. Since the capacity of injectability is a key parameter for the success of interventions (and consistency is a key feature to allow the filling of voids), the properties of the grout when fresh are as or even more important than when hardened. To ensure that grout has a fluidity that assures good injectability is essential to carry out a study of the rheological behavior of fresh grouts.

One of the research projects where this dissertation is inserted aims to analyze and discuss the rheological properties of injected grout to the consolidation of masonry that have chemical, physical and mechanical compatibility with the materials that are present in the ancient masonry. The other project aims to evaluate the use of metakaolin on this type of products. Due to this fact, the grout used in this study is based on natural hydraulic lime with addition of three different percentages of metakaolin and of superplasticizer. Furthermore, two ratios water / binder were used. As a tool for this analysis, four rheological parameters were determined for each grout through fluidity tests using a rotational rheometer. The parameters obtained from the tests were plastic viscosity, yield stress, the consistency and the power-law index. Through an analysis of these parameters it was found that both the ratio water / binder as well the additions of metakaolin and superplasticizer have a strong impact on the rheological behavior of fresh grouts.

KEYWORDS:

Grouts, natural hydraulic lime, metakaolin, superplasticizer, rheology.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objectivos.....	1
1.3	Estrutura	2
2.	ESTADO DOS CONHECIMENTOS.....	3
2.1	INJECCÃO DE CALDAS COMO TÉCNICA DE CONSOLIDAÇÃO DE ALVENARIA..	3
2.1.1	Introdução.....	3
2.1.2	Elementos de alvenaria	3
2.1.3	Tipologias da alvenaria.....	9
2.1.4	Principais causas de anomalias em paredes de alvenaria	11
2.1.5	Técnicas de consolidação de alvenaria	13
2.1.6	Técnica de injeção de caldas.....	15
2.2	REOLOGIA.....	18
2.2.1	Introdução.....	18
2.2.2	Tipos de escoamento	18
2.2.2.1	Deformação de corte simples	19
2.2.3	Conceito de viscoelasticidade.....	21
2.2.4	Classificação dos fluidos	22
2.2.4.1	Fluidos Newtonianos.....	22
2.2.4.2	Fluidos não-Newtonianos.....	24
2.2.4.3	Comportamentos transientes – fluidos dependentes do tempo.....	27
2.2.5	Viscoelasticidade	28
2.2.6	Descrição matemática do comportamento de fluidos reofluidificantes	29
2.2.7	Gamas de taxa de corte	32

2.2.8	Comportamento tixotrópico de suspensões de partículas com tensão de cedência	33
2.2.8.1	Forças actuantes em suspensões.....	35
2.2.8.2	Viscoelasticidade de suspensões	35
2.2.8.3	Interação entre partículas numa suspensão.....	36
2.2.8.4	Técnicas de medição de parâmetros reológicos	41
3.	CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE CALDAS À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL.....	43
3.1	Introdução.....	43
3.2	Desenvolvimento experimental	44
3.2.1	Materiais	45
3.2.1.1	Cal hidráulica natural (NHL 3.5)	45
3.2.1.2	Metacaulino.....	46
3.2.1.3	Superplastificante	48
3.2.2	Constituição das caldas.....	48
3.2.3	Processo de mistura	50
3.2.4	Parâmetros reológicos.....	50
3.2.5	Análise de resultados.....	51
4.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	61
	BIBLIOGRAFIA.....	63
	ANEXO I.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Componentes de alvenaria de pedra: pedra, argamassa e vazios.....	4
Figura 2.2 - Efeito do superplastificante na floculação das partículas de uma argamassa	9
Figura 2.3 - Exemplos de paredes com diferentes secções transversais: pano duplo com e sem ligações e pano triplo.....	10
Figura 2.4 – Exemplos de paredes de folha múltipla	11
Figura 2.5 - Efeito entre panos de uma parede de alvenaria de três panos com um pano interno de fracas características mecânicas, sob compressão.....	12
Figura 2.6 - Colapso do pano exterior devido a fraca ligação transversal.....	13
Figura 2.7 - Procedimento para avaliação da adequabilidade de uma injeção	16
Figura 2.8 - Movimento das partículas nos escoamentos de corte e nos escoamentos extensionais.....	19
Figura 2.9 - Escoamento de corte simples.....	19
Figura 2.10 - Camadas hipotéticas num escoamento de corte simples	20
Figura 2.11 – Comportamento de um fluido Newtoniano.....	23
Figura 2.12 - Curvas de fluxo para diferentes tipos de fluidos.....	24
Figura 2.13 - Comportamento de um fluido <i>reofluidificante</i>	25
Figura 2.14 - Comportamento de um fluido <i>reoespessante</i>	25
Figura 2.15 - Comportamento de um fluido <i>viscoplástico</i> (fluido de <i>Bingham</i>).....	26
Figura 2.16 - Comportamentos de um fluido <i>tixotrópico</i> e de um fluido <i>anti-tixotrópico</i> , respectivamente.....	28
Figura 2.17 - Modelos de Maxwell, Kelvin-Voigt e Burgers.....	28
Figura 2.18 - Diagrama que define a amplitude da curva abrangida pelos diferentes modelos	32
Figura 2.19 - Camada de escorregamento, durante a injeção de uma calda	33
Figura 2.20 - Formação de cadeias e camadas numa suspensão sob a acção de fluxo de corte	38

Figura 2.21 - Viscosidade em função do volume de fase para várias formas de partículas	39
Figura 2.22 - Curva de fluxo de uma suspensão de partículas coloidais (viscosidade vs. taxa de corte).....	40
Figura 2.23 – Reómetro rotacional Bohlin Gemini HRnano utilizado no trabalho.....	41
Figura 2.24 - Geometrias de um reómetro rotacional: cone e prato, pratos paralelos e cilindros coaxiais.....	42
Figura 3.1 - Análise granulométrica - inferior a 2 µm: 55%	47
Figura 3.2 – Misturadora com ponta helicoidal utilizada na amassadura das caldas	50
Figura 3.3 - Amostra de calda após ter sido ensaiada no reómetro Bohlin Gemini HR ^{nano}	51
Figura 3.4 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte da calda 1 (A0,5M0S0)	52
Figura 3.5 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte da calda 1 (A0,5M0S0).....	52
Figura 3.6 - Variação da tensão de cedência para diferentes percentagens de metacaulino	54
Figura 3.7 - Variação da tensão de cedência para diferentes percentagens de superplastificante	55
Figura 3.8 - Variação da viscosidade plástica para diferentes percentagens de metacaulino.....	57
Figura 3.9 - Variação da viscosidade plástica para diferentes percentagens de superplastificante	58
Figura I.1 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 1, 2 e 3	67
Figura I.2 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 1, 2 e 3.....	67
Figura I.3 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 4, 5 e 6	68
Figura I.4 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 4, 5 e 6.....	68
Figura I.5 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 7, 8 e 9	69
Figura I.6 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 7, 8 e 9.....	69
Figura I.7 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 10, 11 e 12	70
Figura I.8 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 10, 11 e 12.....	70
Figura I.9 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 13, 14 e 15	71
Figura I.10 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 13, 14 e 15.....	71

Figura I.11 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 16, 17 e 18	72
Figura I.12 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 16, 17 e 18.....	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da natureza da cal de acordo com a matéria-prima	6
Tabela 2 - Resistência à compressão de cais hidráulicas naturais	6
Tabela 3 – Valores de τ para diferentes materiais	22
Tabela 4 - Intervalos típicos de taxas de corte em vários processos	32
Tabela 5 - Características físicas da cal NHL 3.5	45
Tabela 6 - Características mecânicas da cal NHL 3.5	46
Tabela 7 - Características químicas da cal NHL 3.5	46
Tabela 8 - Características físicas do metacaulino Argical-M 1200S.....	47
Tabela 9 - Análise química do metacaulino Argical-M 1200S	47
Tabela 10 - Características técnicas do superplastificante Glenium Sky 544 da Basf	48
Tabela 11 - Composições de caldas com rácio água/ligante 0,5	49
Tabela 12 - Composições de caldas com rácio água/ligante 0,6	49
Tabela 13 - Valores de viscosidade plástica, tensão de cedência, consistência e índice "lei da potência" de cada calda	53

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

F	Força tangencial
A	Unidade de área
σ	Tensão de corte
u	Deslocamento
γ	Deformação de corte
h	Altura
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação de corte
$\dot{\gamma}_{\infty}$	Taxa de deformação de corte na região Newtoniana superior
v	Velocidade de deslocação da camada superior na direcção z
T	Tempo característico do processo de deformação
τ	Tempo característico do material
De	Número de Déborah
η	Coefficiente de viscosidade
vs	Versus
G	Coefficiente de elasticidade
η_0	Viscosidade na região Newtoniana inferior
η_{∞}	Viscosidade na região Newtoniana superior
m	Grau de reofluidez
k	Constante com dimensões de tempo
K_2	Consistência
n	Índice “lei da potência”
n-1	Índice de pseudoplasticidade
η_p	Viscosidade plástica

σ_y	Tensão de cedência
$[\eta]$	Viscosidade intrínseca
φ	Volume de fase – rácio entre a fase de volume sólida e o volume da mistura
φ_m	Fracção de acondicionamento máxima
c	Constante
W	Percentagem da massa de ligante
A/L	Rácio água/ligante
MK	Metacaulino
SP	Superplastificante
NHL	Cal hidráulica natural
NHL-Z	Cal hidráulica natural com materiais pozolânicos ou hidráulicos
DEC/UNL	Departamento de engenharia civil da Universidade Nova de Lisboa
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
IPQ	Instituto Português de Qualidade
ISO	International Organization of Standardization
EN	Norma Europeia
NP	Norma Portuguesa
Ex.	Exemplo

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O património edificado nacional e europeu é maioritariamente constituído por edifícios antigos com elementos estruturais de alvenaria. Hoje em dia, muitos desses edifícios necessitam de intervenções de reforço nesses elementos, devido a diferentes causas, tais como a idade ou ocorrências naturais. A preservação de património antigo tem como objectivo manter a utilidade dos edifícios, porém no caso de monumentos de valor cultural, o objectivo principal é preservar a herança cultural do passado. Por isso, as intervenções de consolidação da alvenaria efectuadas em edifícios de valor cultural devem preservar, tanto quanto possível, o seu aspecto original.

Existem várias técnicas de consolidação de alvenaria, sendo a técnica de injeção de caldas umas das mais eficazes para superar o enfraquecimento estrutural das paredes de alvenaria. Esta técnica consiste na introdução de um agente ligante nas aberturas, vazios e fendas da alvenaria. Após o endurecimento deste agente ligante, a alvenaria irá recuperar o seu comportamento monolítico e a sua resistência mecânica irá aumentar. A injeção de caldas é uma das mais bem-sucedidas técnicas de consolidação de alvenaria, devido à sua habilidade para reforçar a alvenaria do edifício histórico, sem alterar a sua aparência e a sua integridade, uma vez que a calda é introduzida na parte interna e não visível da alvenaria.

Para uma correcta selecção da calda devem-se ter em conta a sua injectabilidade e a sua estabilidade, além disso, deve-se garantir a existência de compatibilidade entre esta e os materiais das alvenarias antigas. Por isso, as propriedades das caldas no estado fresco são tão ou mais importantes como as do estado endurecido, uma vez que são estas que determinam a capacidade da calda em preencher vazios.

O projecto de investigação (METACAL) onde se insere esta dissertação tem como objectivo contribuir para o desenvolvimento de argamassas de cal aérea e metacaulino para conservação de edifícios antigos, que tenham compatibilidade química, física e mecânica com os materiais presentes nas alvenarias antigas.

1.2 Objectivos

Para contribuir para o desenvolvimento de uma calda de injeção para a consolidação de alvenarias, este trabalho, tem como objectivo, estudar a influência da adição de diferentes quantidades de superplastificante e metacaulino nas propriedades reológicas de caldas de cal hidráulica natural no estado fresco, com diferentes rácios água/ligante.

1.3 Estrutura

A presente dissertação é constituída por quatro capítulos. No capítulo 1 é feito um enquadramento do tema desta dissertação e são apresentados os objectivos deste estudo. No capítulo 2 apresenta-se um estado do conhecimento dos temas da consolidação de alvenaria (com foco na técnica de injeção de caldas) e da reologia de fluidos com comportamento semelhante ao de caldas hidráulicas. O capítulo 3 descreve o procedimento experimental e apresenta e discute os resultados obtidos. Por fim, as conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros são apresentadas no capítulo 4.

2. ESTADO DOS CONHECIMENTOS

2.1 INJECCÃO DE CALDAS COMO TÉCNICA DE CONSOLIDAÇÃO DE ALVENARIA

2.1.1 Introdução

A preservação do património tem como objectivos continuar a dar uso ao edifício e principalmente, mantê-lo como testemunho do passado para as gerações futuras. Para isso, as técnicas de conservação devem preservar tanto quanto possível o aspecto original, os materiais e as técnicas de construção dos edifícios.

As intervenções em alvenaria antiga em edifícios e monumentos durante algumas décadas foram erradamente feitas através da reconstrução de áreas degradadas e substituindo a pedra natural ou alvenaria defeituosa por pedras e argamassas novas. Contudo, este tipo de abordagem, para além de muitas questões técnicas, estéticas e éticas, podia deixar os edifícios com bastantes disparidades, devido à diferente erosão de áreas antigas e novas. Os materiais utilizados na conservação devem ser compatíveis com os materiais antigos, mecânica, física e quimicamente. As intervenções não devem causar danos à estrutura e não devem afectar o edifício do ponto de vista estético e devem, tanto quanto possível, ser reversíveis.

A técnica de injeção de caldas constitui uma solução de reforço “passiva” e irreversível. Preserva o aspecto original exterior das paredes pelo que é uma solução frequentemente utilizada em intervenções sobre edifícios de reconhecido valor arquitectónico. É particularmente indicada para a reparação de alvenarias de pedra onde exista uma fina rede de vazios interiores, comunicantes entre si.

2.1.2 Elementos de alvenaria

A alvenaria é constituída por blocos de pedra e argamassa, tijolos e argamassa, ou pedras, tijolos e argamassa (Fig. 2.1). O tipo de deterioração da alvenaria é não só influenciado pela natureza da argamassa e dos blocos constituintes, mas também pela sua estrutura construtiva (Van Gemert D. et al., 2003).

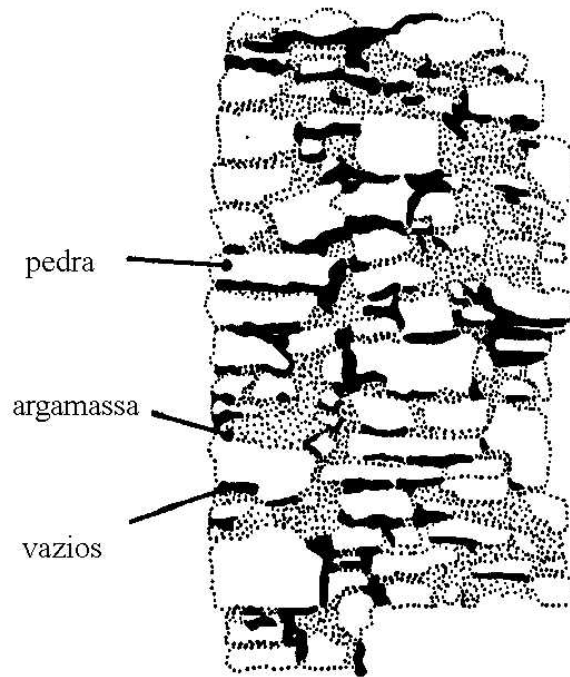


Figura 2.1 - Componentes de alvenaria de pedra: pedra, argamassa e vazios (Adaptado de Binda L. et al., 1993)

Os sistemas de construção com base na utilização de alvenaria são muito numerosos e diversificados. Para desenvolver e usar técnicas de consolidação estrutural, o projectista deve começar pelo estudo e compreensão profunda da natureza e comportamento da alvenaria. Diversos e variados exemplos podem ser encontrados em edifícios históricos, seja em monumentos ou em construções menores. Estas diferenças estão relacionadas principalmente com a morfologia, a tipologia e a qualidade dos materiais empregue nos edifícios. Estes aspectos, juntamente com o sistema de construção utilizado, caracterizam as diferentes alvenarias e isto resulta numa grande influência no seu comportamento mecânico. Neste sentido, a catalogação de diferentes tipologias de alvenaria torna-se fundamental, para identificar e escolher o respectivo sistema estrutural (Binda L. et al., 2001), (Binda L. et al., 1997).

Vários factores, tais como agentes químicos ou físicos e incidentes mecânicos, influenciam a durabilidade dos materiais e causam a degradação geral da alvenaria. Com base na análise dos danos mais comuns para cada tipologia, diferentes técnicas de intervenção de reforço foram desenvolvidas ao longo dos anos, que visam limitar e resolver os problemas mais comuns que surgem em diferentes tipologias de alvenaria. Por outro lado, essas técnicas devem ser validadas antes da sua utilização para evitar induzir danos maiores nas estruturas (Binda L. et al., 2000), (Modena C., 1997).

A maioria dos edifícios foi construída utilizando as pedras disponíveis nas imediações, como o granito, marga, calcário ou arenito e a alvenaria de tijolo era usualmente combinada com alvenaria de

pedra natural, especialmente em edifícios de grande valor, uma vez que a pedra natural dá ao edifício uma imagem nobre e geralmente aumenta a sua durabilidade. Quando num processo de reabilitação de um edifício é necessária a substituição de pedras naturais, estas devem ser substituídas por pedras semelhantes às originais, com a mesma composição e a mesma porosidade, proporcionando propriedades semelhantes, principalmente no que diz respeito ao transporte da água. A substituição de pedras naturais pode ser um grande problema, uma vez que as pedras originais e as pedras de substituição têm uma estrutura diferente, que faz com que se comportem de forma distinta, quando expostas a acções exteriores (por exemplo: a poluição do ar). Uma das possíveis consequências deste problema é a perturbação da homogeneidade da fachada. Por outro lado, o trabalho em pedras naturais de forma artesanal é caro e a mão-de-obra qualificada é escassa (Van Rickstal F., 2000).

Uma escolha adequada de argamassas de substituição é fundamental para o sucesso de um processo de consolidação. A argamassa utilizada na consolidação deve ser compatível com os componentes originais da alvenaria, tendo em conta diversos factores: compatibilidade química, fundamentalmente ao nível das juntas; compatibilidade física, com especial atenção para o processo de solubilidade e de transporte de água; compatibilidade estrutural e mecânica, uma vez que as resistências entre as argamassas devem ser similares. Até ao século passado, utilizavam-se, frequentemente, na reabilitação de edifícios argamassas de cimento. No entanto, na maioria dos casos, verificaram-se extensos danos nas alvenarias originais provocados pela incompatibilidade entre as argamassas de cimento e as argamassas antigas de cal e principalmente com os blocos (Binda L. et al., 2000), (Corradi et al., 2002).

As argamassas usadas tradicionalmente como parte integrante em construções de alvenaria eram compostas por cal e areia. A cal era entregue no local de construção, onde ficava em contacto com água antes da sua aplicação na argamassa, para que ocorresse a hidratação da mesma. As argamassas tradicionais eram constituídas por pasta de cal, ou cal hidratada combinada com areia local. Antes da descoberta e da generalização da utilização do cimento Portland, o ligante correntemente utilizado era o que resultava da cozedura dos calcários em fornos artesanais a baixa temperatura (Faria P., 2004). Frequentemente, eram adicionados à argamassa, outros componentes, mas a formulação básica permaneceu a mesma durante séculos, até ao aparecimento do cimento Portland ou do seu antecessor, cimento romano, um cimento natural. Em 1930, foram introduzidos novos produtos de argamassas, incluindo cimento de alvenaria, que é uma combinação de cimento Portland e de calcário moído e eliminou a necessidade de hidratação da cal no local.

Segundo (Faria P., 2004), *“Quando o calcário que se sujeita à acção da temperatura (1200°C e 1500°C) tem quantidades de argila compreendidas entre 5% e 20%, além de se formar óxido de cálcio, há combinação da sílica e da alumina da argila com esse óxido de cálcio, em quantidades significativas. Designam-se por cais hidráulicas os produtos formados por silicatos e aluminatos, que*

hidratando-se (por extinção com água necessária para a hidratação da cal viva), dão origem a produtos que endurecem tanto na água como no ar. Nestes produtos, uma parte da cal está livre, hidratando-se com expansão e endurecendo após a amassadura por carbonatação, pois contêm pelo menos 3% de massa de cal livre”.

Cais com propriedades hidráulicas produzidas por cozedura (inferior a 1250°C) de rocha calcária mais ou menos argilosa ou siliciosa, extintas e reduzidas a pó, com ou sem moagem, são designadas por cais hidráulicas naturais (NHL); não podem ter adições nem sulfatos e têm de ter um valor elevado de hidróxido de cal (Faria P., 2012).

Tabela 1 - Classificação da natureza da cal de acordo com a matéria-prima (Faria P., 2004)

Natureza da cal	Teor de argila	Índice de hidráulicidade	Tempo de presa
	%	CaO/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	dias
Cal aérea, gorda	<1	-	-
Cal aérea, magra	1 a 5	-	-
Cal fracamente hidráulica	5,3 a 8,2	10 a 6,2	16 a 30
Cal mediamente hidráulica	8,2 a 14,8	6,2 a 3,1	10 a 15
Cal hidráulica	14,8 a 19,1	3,2 a 2,4	5 a 9
Cal eminentemente hidráulica	19,1 a 21,8	2,4 a 2,0	2 a 4
Cal limite ou cimento de presa lenta	21,8 a 26,7	2,0 a 1,5	1
Cimento de presa rápida	26,7 a 40	1,5 a 0,8	-

Tabela 2 - Resistência à compressão de cais hidráulicas naturais (EN 459-1, 2010)

Tipo de cal	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
NHL2	-	≥ 2 a ≤ 7
NHL3,5	-	≥ 3,5 a ≤ 10
NHL5	≥ 2	≥ 5 a ≤ 15

É o teor de argila que distingue a cal aérea da cal hidráulica natural; quanto maior a percentagem de argila, maior vão ser as propriedades hidráulicas da cal e maior vai ser a capacidade de esta ganhar presa na presença de água. A utilização de argamassas de cal relativamente macias e de endurecimento ao ar deram à alvenaria antiga uma boa capacidade de recuperação a assentamentos. A resistência das argamassas de cal desenvolve-se de forma lenta. Para os edifícios antigos que eram construídos lentamente não era uma grande desvantagem. Pelo contrário, as deformações que ocorriam durante a construção distribuíam e moderavam as tensões. Além disso, a argamassa mantém-se menos forte do que as pedras. As fendas que surgiam localizavam-se nas juntas de argamassa, onde poderiam facilmente ser reparadas através de um refechamento de juntas. Geralmente, uma argamassa de cal é mais deformável, o que proporciona uma segurança adicional no que se refere a assentamentos diferenciais. As argamassas de cal não contêm nenhum ou quase nenhum sulfato, o que reduz o risco de aparecimento de eflorescências.

Isto implica que existe uma dupla razão para usar argamassas que são compatíveis com as argamassas originais. Em primeiro lugar, existem razões técnicas: usando uma argamassa moderna resultaria na introdução de um componente que é mais duro do que a argamassa antiga e na maioria dos casos também mais dura do que as pedras que foram usadas. Deste modo, os assentamentos tornam-se difíceis de analisar. A nova argamassa divide a alvenaria por cima da zona rígida, provocando forças de tensão na alvenaria existente, uma vez que essa zona é mais macia e deformável. Obtém-se uma espécie de acção de dobragem/desdobramento causada pela parte mais rígida da argamassa de assentamento e a massa de alvenaria localizada logo acima. Além disso, uma argamassa de cimento tem uma porosidade diferente originando uma acção diferente no que diz respeito ao transporte de água.

Em segundo lugar, não se devem introduzir materiais que não foram utilizados na construção original, como é mencionado na Carta de Veneza. Assim sendo, devem-se aplicar argamassas que imitem a original e que não ultrapassem a sua dureza (Brás A., 2010).

Até ao século XVIII, o reboco era aplicado imediatamente após a colocação das pedras, resultando assim uma unidade sólida. Mais tarde, no mesmo século começou a aplicar-se uma fina camada de argamassa entre tijolos e posteriormente o reboco. O refechamento de juntas é, muitas vezes, uma acção importante na manutenção de uma fachada. Na maioria das vezes, só parte da fachada se encontra danificada. No entanto, frequentemente é efectuado um refechamento global, de modo a garantir uma harmonia estética. Assim, o reboco existente é arrancado. Isto deve ser feito com cautela, uma vez que as pedras e o reboco sem danos formam uma unidade, que é frequentemente danificada por esta acção. O novo reboco torna-se mais espesso do que o original, mudando completamente a perspectiva do edifício histórico. Além disso, muitas vezes a argamassa utilizada no refechamento é quase impermeável à água em comparação com a original e por isso a água concentra-se logo atrás da

camada de refechamento. A cristalização de sais ou gelo pode facilmente empurrar a nova camada, causando ainda mais danos na parede, já que a aderência da argamassa de refechamento aos tijolos é muito boa. Por estas razões, deve limitar-se o refechamento às partes danificadas e usar uma composição de argamassa que corresponda à composição da argamassa original (Van Rickstal F., 2000).

O metacaulino é um material pozolânico artificial que decorre da calcinação de argila caulinítica (caulino) entre 600°C e 900°C e moagem a uma finura reduzida, entre 700m²/kg e 900m²/kg, de modo a apresentar elevada superfície específica. As pozolanas surgiram como aditivo da cal aérea, proporcionando propriedades hidráulicas às argamassas e tornando-as mais resistentes e duráveis. A utilização do metacaulino em argamassas pode permitir também obter melhorias na trabalhabilidade, redução dos efeitos da reactividade álcali-sílica e da permeabilidade à água e maior resistência aos ataques químicos. O metacaulino, quando utilizado com cal aérea, permite a sua aplicação em locais de difícil acesso do dióxido de carbono, como em meios húmidos ou debaixo de água, uma vez que as reacções (carbonatação e reacção pozolânica) acontecem simultaneamente. As pozolanas são constituídas por sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), que na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio da cal presente nos ligantes (cal hidráulica natural), formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, que desta forma proporcionam novas características às argamassas. Cada matéria-prima caulinítica sujeita a diferentes tratamentos térmicos e moagens conduz a um metacaulino com características também distintas (Faria P., 2004).

No caso das caldas, a utilização de metacaulino pode contribuir para que se obtenham valores de resistências mecânicas e durabilidade adequadas à aplicação na reabilitação, um melhor comportamento relativo ao transporte de água e uma maior capacidade de resistir ao ataque de sais, comparativamente às caldas só de cal hidráulica natural (Carneiro J., 2012). O metacaulino não é utilizado com frequência em aplicações de caldas para injeção, porque, por vezes, leva a um aumento da necessidade de água e a um aumento da viscosidade, devido à elevada superfície específica das suas partículas, o que é incompatível com aplicações em que a reologia deve ser controlada (Sonebi M. et al., 2012).

A utilização de superplastificantes em caldas pode ter dois objectivos, aumentar a fluidez de uma calda para uma dada relação água/ligante, ou manter uma determinada consistência para uma redução da quantidade de água utilizada (Björnström J. et al., 2003), (Sonebi M. et al., 2012). Os superplastificantes contrariam a forte tendência para as argamassas flocularem na presença de água, pelo menos, de três maneiras (Fig. 2.2):

1. Aumento do potencial zeta; se todas as partículas possuírem uma carga de superfície do mesmo sinal e magnitude, elas repelem-se mutuamente, e assim dispersam-se;

2. Aumento da afinidade líquido/sólido; se as partículas tiverem maior atracção pelo líquido do que umas pelas outras, então terão tendência para se dispersar;
3. Impedimento estérico, a adsorção orientada de um polímero não-iónico pode enfraquecer a atracção entre as partículas sólidas (Adaptado de Björnström J. et al., 2003).

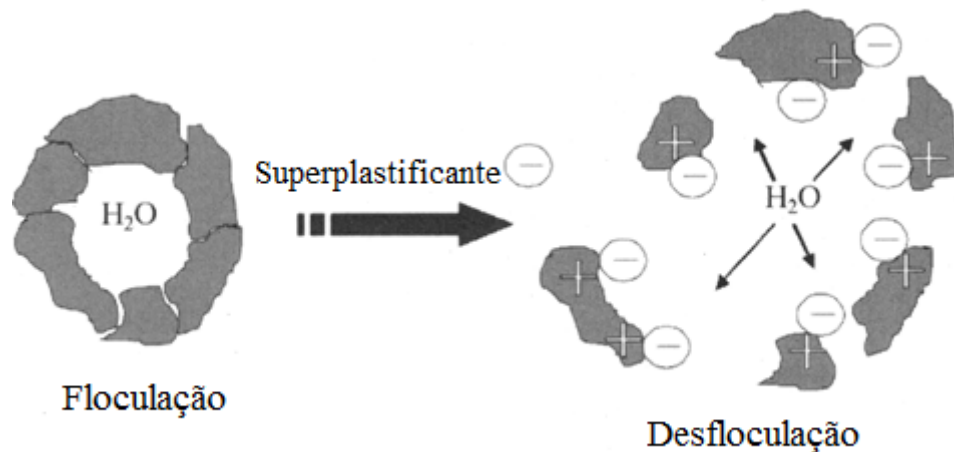


Figura 2.2 - Efeito do superplastificante na flocculação das partículas de uma argamassa (Adaptado de Björnström J. et al., 2003)

2.1.3 Tipologias da alvenaria

A subdivisão dos tipos de alvenarias existentes é um tema difícil. A variedade de alvenarias que podem ser pesquisadas torna difícil uma possível classificação, que envolva todas as tipologias. Na verdade, os materiais utilizados, a sua combinação e fabrico e o processo de execução são apenas alguns aspectos entre várias questões importantes, que devem ser consideradas.

No entanto, uma definição correcta das tipologias de alvenaria existentes permite identificar as suas características mecânicas em geral, através de investigações in situ e exames laboratoriais. Além disso, os resultados obtidos e informação adicional obtida por investigações conduziram à selecção das técnicas de intervenção mais apropriadas.

Existem vários tipos de alvenaria; alguns são constituídos por apenas um pano e outros por dois ou mais panos. As paredes de múltiplas folhas são uma tipologia frequentemente encontrada em edifícios históricos em todo o mundo e, geralmente consistem em duas ou três folhas feitas de diferentes materiais, tais como alvenaria de tijolo ou pedra; quando em paredes de folha tripla, por vezes a espessura interior é preenchida por cascalho, entulho ou terra. As últimas décadas têm testemunhado

graves danos, ou mesmo o colapso de paredes em edifícios emblemáticos, devido à carga de compressão elevada aplicada em pilares e paredes (Binda L., 2006). Uma das possíveis classificações de paredes é baseada na constituição de folhas da secção transversal de uma parede:

- Pano único: os elementos de pedra são unidos usando argamassa e pedras individuais são dispostas desordenadamente. Os elementos de pedra devem possuir formas irregulares e a argamassa das juntas é normalmente espessa e disposta na horizontal. Caso contrário, os elementos podem ser regulares, escalonados e dispostos em filas horizontais.
- Pano duplo (Fig. 2.3): podem ser identificadas duas camadas diferentes na secção transversal. No entanto, esta tipologia pode ser diferenciada em duas secções adicionais:
 - Panos completamente separados por uma junta vertical, que pode ser constituída por argamassa ou espaços vazios;
 - Panos interligados, onde as pedras de filas subsequentes de camadas opostas são ligeiramente sobrepostas.
- Pano triplo (Fig. 2.3 e 2.4): a secção é composta por dois panos exteriores e uma camada interna e a ligação entre as diferentes camadas pode ser diferente, bem como o material que preenche a camada intermédia, que geralmente é composta por pequenas pedras, areia, argamassa ou outro tipo de material.

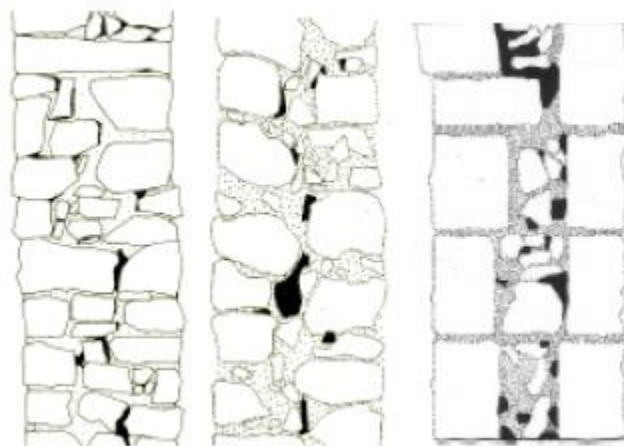


Figura 2.3 - Exemplos de paredes com diferentes secções transversais: pano duplo com e sem ligações e pano triplo (Binda L. et al., 2001)

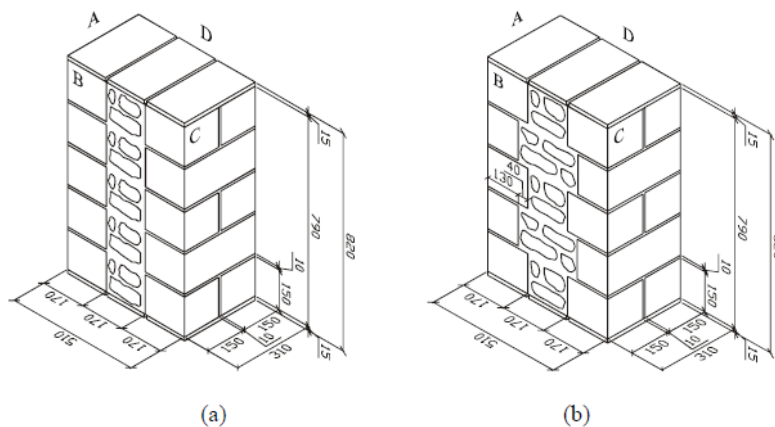


Figura 2.4 – Exemplos de paredes de folha múltipla (Binda L., 2006)

2.1.4 Principais causas de anomalias em paredes de alvenaria

A principal causa de anomalias em edifícios antigos é o envelhecimento dos próprios materiais, tratando-se de algo natural e inevitável (Appleton J., 2003).

Destacam-se como anomalias mais frequentes em paredes de alvenaria de edifícios antigos:

- Fendilhação
- Desagregação
- Esmagamento

As causas das anomalias são de natureza muito diversa, podem estar relacionadas com razões de natureza estrutural ou podem ser devidas à presença de água (especialmente águas infiltradas, quer águas da chuva, quer provenientes de infiltrações de origens diversas ou de humidade do terreno ascendendo por capilaridade) ou à ação dos agentes climáticos.

As principais anomalias de uma construção antiga de alvenaria podem resultar do comportamento estrutural, originando patologia com instabilidade local ou global em elementos ou na própria estrutura, ou resultar do comportamento do material, originando patologia mais localizadas ao nível do elemento. No entanto, as anomalias nas alvenarias manifestam-se geralmente como uma combinação destes comportamentos, sendo por vezes difícil atribuir-lhes uma origem específica. As principais anomalias encontradas em paredes de alvenaria, resultantes do comportamento do material, estão normalmente associadas às seguintes causas (Gelmi A. et al., 1993), (Binda L. et al., 1997), (Roque J., 2002), (Valluzzi M., 2007):

- Fraca ligação promovida pela argamassa, que normalmente tem como função, apenas o preenchimento do espaço das juntas. Desta fraca ligação resulta uma fraca resistência à tracção, o que gera uma fraca resistência a esforços transversos.
- Distribuição de tensões não-uniforme em paredes de três panos, devido a, geralmente, o pano intermédio ser constituído por materiais de muito fraca resistência mecânica. A deformação do pano interno provoca a expulsão para fora dos panos externos. Para além da fraca resistência à compressão, o pano interno apresenta também uma distribuição aleatória de vazios, tornando o comportamento das paredes ainda mais heterogéneo e complexo (Fig. 2.5).

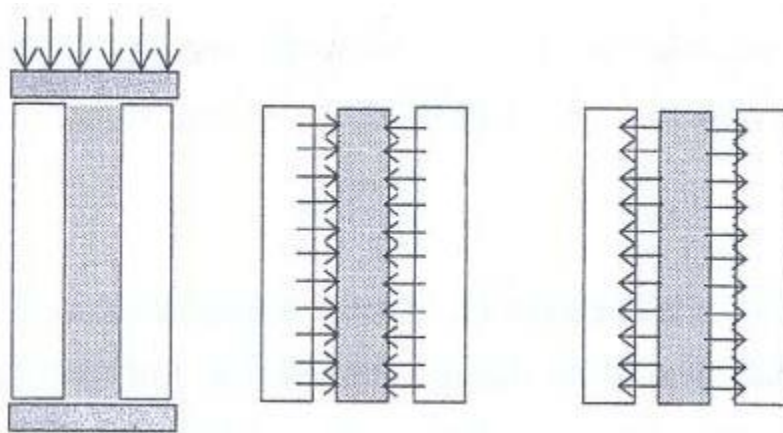


Figura 2.5 - Efeito entre panos de uma parede de alvenaria de três panos com um pano interno de fracas características mecânicas, sob compressão (Valluzzi M., 2000)

- Formação de mecanismos de tracção diagonal em paredes solicitadas por cargas horizontais, devido à fraca resistência à tracção da argamassa ou ligação argamassa/bloco.
- Contrações e expansões sucessivas, devido a acção dos agentes climatéricos.

Em relação às anomalias que têm origem em causas estruturais destacam-se as seguintes (Gelmi A. et al., 1993), (Binda L. et al., 1997), (Roque J., 2002), (Valluzzi M., 2007):

- Desenvolvimento de mecanismos de rotura por instabilização causada pela fraca ou inexistente ligação transversal entre panos, promovida pela possível presença de pano interno. Isto pode provocar a separação e colapso dos panos externos, quer por acções verticais, quer por acções horizontais (acção sísmica ou impulsos de arcos, abobadas, etc.), (Fig. 2.6);

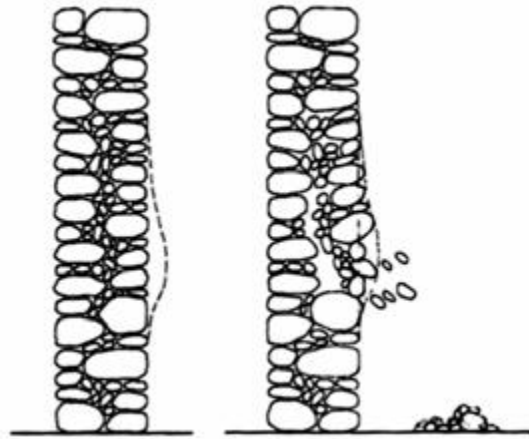


Figura 2.6 - Colapso do pano exterior devido a fraca ligação transversal (Binda L., 2006)

- Baixa ductilidade, traduzindo-se em mecanismos de rotura frágil;
- Fraca ou inexistente ligação entre elementos resistentes: 1) fraca ligação entre paredes ortogonais; 2) fraca ligação entre pavimentos/coberturas e paredes resistentes que os suportam;
- Movimentos de assentamento das fundações, particularmente assentamentos diferenciais;
- Acção de sismos;
- Erros de construção;
- Deficiente isolamento térmico, tendo como consequência variações dimensionais;

A maioria dos problemas estruturais exibidos por paredes de três panos resulta da má ou ausente ligação entre panos, da fraqueza do núcleo interno ou da deterioração da argamassa das juntas externas.

2.1.5 Técnicas de consolidação de alvenaria

Diversas técnicas como a injeção de calda ou o reforço de juntas horizontais estão hoje disponíveis para reparações estruturais. No entanto, uma avaliação da segurança e uma adopção de uma intervenção mínima exige uma visão adequada sobre o comportamento estrutural e dos mecanismos de falha, o que é um problema especialmente complexo no caso de paredes de três panos. De facto, a distribuição de tensões é largamente dependente das propriedades mecânicas dos panos, das dimensões dos panos e da forma como os panos estão ligados.

Actualmente, quer os materiais tradicionais, quer os inovadores, são empregues de inúmeras maneiras nos processos de consolidação de alvenarias. Qualquer tipo de intervenção deve, em primeiro lugar,

respeitar importantes requisitos de forma a garantir a eficácia e a viabilidade das técnicas a utilizar. Requisitos como (Binda L. et al., 1997), (Modena C. et al., 2007), (Modena C., 1997):

- Recuperação das condições de segurança a nível estrutural;
- Melhoramento das características mecânicas (nem sempre é facilmente atingível, uma vez que esta depende das condições iniciais dos danos);
- Compatibilidade mecânica e estrutural de materiais e técnicas para garantir uma alteração mínima das características originais;
- Compatibilidade química e física de materiais;
- Durabilidade (aplicação de materiais e tecnologias específicos);
- Reversibilidade e aplicação de intervenções reparáveis. Deve ser salvaguardada a possibilidade de facilmente poderem remover, sem provocar danos nos materiais originais, os novos elementos resultantes da intervenção, no fim de vida útil ou no caso de revelarem sinais de inadequabilidade.

Na grande maioria dos edifícios de património cultural, as intervenções de consolidação não devem ser visíveis, devido ao seu valor artístico (frescos, estuques ou texturas de alvenaria particulares). O segundo requisito fundamental, o qual se torna indispensável, em vários casos, é a reversibilidade das intervenções. Isto significa que deve haver a possibilidade de se poder remover os materiais aplicados em cada intervenção, sem provocar qualquer dano na estrutura, e substituí-lo com tecnologias novas e inovadoras.

Tendo em conta os requisitos e restrições na consolidação de alvenarias, as técnicas mais apropriadas neste tipo de intervenções são as seguintes (Binda L. et al., 1997), (Corradi M. et al., 2008), (Modena C. et al., 2006), (Modena C. et al., 2007), (Valluzzi M., 2000):

- Substituição de elementos deteriorados: através da reconstrução no local e usando novos elementos. Esta técnica, normalmente, é aplicada em combinação com outras técnicas;
- Injecção: técnica amplamente utilizada no reforço estrutural de paredes de três panos, aplicada através da introdução de caldas em alvenarias multi-folha. A injecção é realizada utilizando furos nas juntas de argamassa e visa preencher vazios;
- Refechamento de juntas de argamassa: consiste na remoção de argamassa deteriorada e sua substituição por novos materiais, os quais têm melhores características em termos de resistência e durabilidade. Destina-se a aumentar a resistência global e durabilidade da alvenaria;
- Confinamento transversal: aplicável em alvenarias multi-folha, a fim de ligar panos externos opostos através da inserção de barras de aço na espessura da alvenaria. Esta técnica tem como objectivo limitar a separação de panos da alvenaria.

A aplicação destas técnicas é limitada a elementos e estruturas de alvenaria, sem considerar outros problemas relacionados com as fundações ou ligações entre os elementos verticais e horizontais.

2.1.6 Técnica de injeção de caldas

A injeção de calda constitui uma das mais comuns e eficazes técnicas aplicadas na reparação e reforço de estruturas de alvenaria ou em membros arquitectónicos fissurados, quando existe uma grande percentagem de vazios. Este método de reforço explora a presença de vazios no interior da alvenaria para melhorar o seu comportamento geral. Tem a vantagem de recuperar a coesão, continuidade e resistência das estruturas danificadas, sem alterar a sua morfologia, nem o sistema de suporte de carga (técnica com efeito passivo). De facto, a calda injectada une os fragmentos incoerentes contidos no núcleo de alvenaria, o que permite um aumento da resistência à compressão. As principais características desta técnica são: a capacidade para ligar as camadas exteriores opostas de uma parede; o preenchimento de vazios e fendas da alvenaria, aumentando a sua continuidade e resistência; a homogeneização das diferenças entre as propriedades mecânicas dos panos externos e internos. No entanto, esta é uma das mais complicadas técnicas de intervenção, devido à dificuldade em compatibilizar a calda injectada e os materiais históricos.

Dado que a técnica de injeção de caldas é uma intervenção irreversível, uma vez que não permite que o material utilizado para o preenchimento de vazios seja posteriormente removido, a concepção da calda, bem como o seu método de aplicação a estruturas históricas, devem satisfazer uma série de requisitos de desempenho, incluindo a possibilidade de futuras intervenções. Os requisitos de desempenho envolvem injectabilidade, resistência e durabilidade. Estes requisitos estão na base de uma abordagem geral da estrutura a ser reparada, antes e depois da intervenção (ou seja, tipo de construção e dimensões da estrutura, a natureza dos materiais existentes, a largura mínima nominal dos vazios, a eventual existência de sais solúveis, o comportamento desejado após a reparação, etc.), (Fig. 2,7). Quando estes requisitos são cumpridos, a técnica de injeção de caldas, é uma técnica fundamentada, de acordo com a Carta de Veneza (Carta de Veneza, 1964). Entre os requisitos acima, a capacidade de injectabilidade da calda constitui um parâmetro essencial para o sucesso das intervenções.

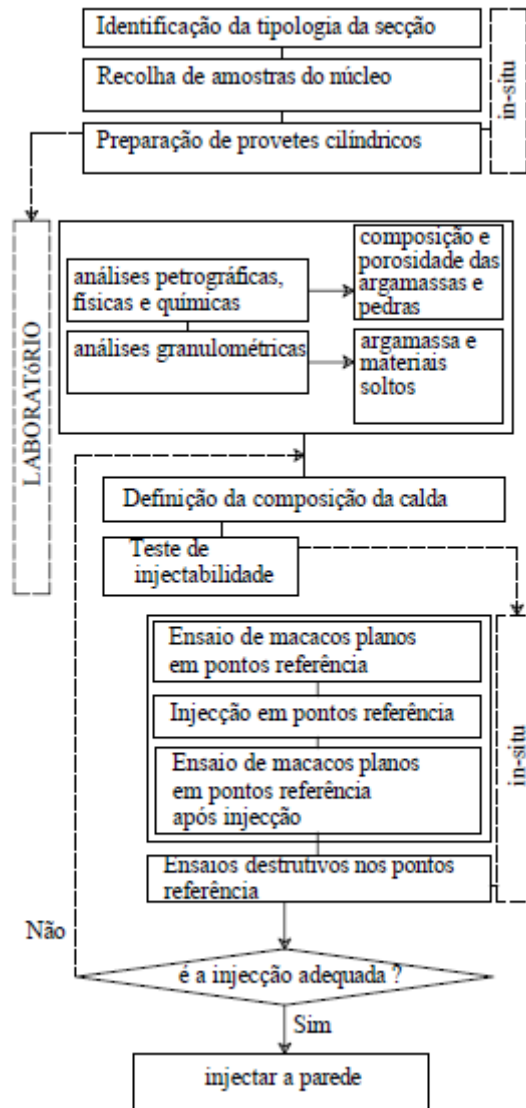


Figura 2.7 - Procedimento para avaliação da adequabilidade de uma injecção (Roque J., 2002)

Para além da irreversibilidade, esta técnica possui outras desvantagens e problemas associados à sua aplicação. Os principais problemas relacionados com esta técnica são os seguintes (Binda L., 2006):

1. Dificil conhecimento da distribuição dos vazios na parede;
2. Dificuldade de penetração das caldas de injecção em fendas de reduzida abertura;
3. Grande variedade da dimensão dos vazios das paredes, o que dificulta a escolha da dimensão das partículas da calda;
4. Segregação e retracção da calda, devido à rápida absorção de água por parte do meio a ser injectado;
5. Dificuldade de penetração da calda, especialmente na presença de materiais siltosos ou argilosos;

6. Necessidade de injeção com pressões baixas para evitar a acumulação e retenção de ar nos vazios e mesmo evitar a rotura da alvenaria;
7. Técnica economicamente dispendiosa, pela imprevisibilidade da quantidade de calda necessária.

A técnica de injeção de caldas consiste na emissão de um agente ligante fluido em furos, previamente efectuados na alvenaria, para preencher os orifícios, os vazios e as fendas. Depois da calda endurecer a alvenaria recupera o seu aspecto e comportamento monolítico e aumenta a sua capacidade de resistência a cargas. A calda deve preencher os vazios e aberturas na alvenaria, para permitir que o fluxo de força seja distribuído uniformemente sobre a massa de alvenaria, evitando-se assim as forças de separação. Além disso, a calda deve aumentar a coesão interna da argamassa original, bem como a aderência da argamassa às pedras. A calda é introduzida no interior, na parte não visível da alvenaria e não afecta o edifício do ponto de vista estético (Brás A., 2010).

A eficácia desta técnica tem sido bem-sucedida em alvenarias, com um índice de vazios compreendido entre os 2% e os 15%. Abaixo de 2% os resultados são em geral fracos, salvo os casos em que esta percentagem corresponda à presença de vazios de grande dimensão. Na ausência de tais condições a injeção não é aplicável, ou é pouco eficaz, havendo que recorrer a técnicas combinadas ou alternativas. Por outro lado, os vazios devem estar interligados, para que permitam a sua injeção total, a partir do furo de injeção (Valluzzi M., 2000).

As características e tipos de danos da alvenaria determinam as características da calda e o processo de injeção a utilizar. Existem três métodos básicos de técnicas de injeção de caldas: injeção sob pressão, injeção por gravidade e injeção por vácuo.

- *Injeção por gravidade*: destina-se a paredes muito degradadas e é realizada através da emissão de calda através de tubos de adução, inseridos nas aberturas da parede ou mediante utilização de seringas hipodérmicas actuando sobre tubos predispostos na parede.
- *Injeção sob pressão*: é utilizado frequentemente, desde que a alvenaria tenha capacidade para conter a pressão das injeções. A calda é injectada, por norma, de baixo para cima e dos extremos para o centro, para evitar o desequilíbrio da estrutura. Os problemas comuns neste tipo de aplicação prendem-se com a distribuição, o número de furos e a pressão de injeção a adoptar.
- *Injeção sob vácuo*: nesta solução a ascensão da calda é provocada pela aspiração do ar por tubos superiores, enquanto a calda é inserida por tubos inferiores. É indicada para o reforço de pequenos elementos arquitectónicos, com requisitos de caldas muito fluidas (Valluzzi M., 2000).

2.2 REOLOGIA

2.2.1 Introdução

A reologia é a ciência que estuda o escoamento e deformação dos materiais quer no estado líquido/fundido, quer no estado sólido, pelo que abarca igualmente o comportamento mecânico dos sólidos. No entanto, é habitual, na linguagem corrente, associar-se comportamento mecânico a sólidos e reologia a líquidos ou materiais no estado fundido. A diferença entre um sólido e um líquido reside nas características de deformação do material. Um sólido é um material que sofre uma deformação finita em resposta a um conjunto de forças aplicadas. Um fluido é definido como um material que se deforma de um modo constante quando submetido a um conjunto de forças. Há certos materiais que exibem as características de um sólido ou de um fluido, dependendo do nível de tensão de corte a que estão submetidos. Uma vez que a reologia estuda o escoamento e deformação da matéria, na base do seu estudo aparecem, naturalmente, os conceitos de tensão e deformação, sendo o objectivo da reologia o estabelecimento de relação entre as tensões, as deformações e o tempo (Olson R.M. et al., 1990).

2.2.2 Tipos de escoamento

Existem dois tipos básicos de escoamento, que têm a ver com o movimento relativo das partículas adjacentes no líquido; estes são chamados escoamentos de corte e extensionais (Fig. 2.8). Nos escoamentos de corte os elementos do líquido escoam, por cima ou por baixo, uns dos outros, ao passo que no escoamento extensional, elementos adjacentes escoam aproximando-se ou afastando-se uns dos outros; na figura abaixo encontra-se uma ilustração dos escoamentos de corte e extensionais e as respectivas deformações. A viscosidade opõe-se sempre ao escoamento, deste modo, se vazarmos um balde com água, o seu escoamento será mais rápido do que se vazarmos um balde com calda hidráulica (cujas viscosidade é maior). Está na natureza dos líquidos escoarem quando lhes é aplicada uma velocidade ou uma força. Para uma dada velocidade, a força resultante aumenta quando a viscosidade aumenta, logo para uma dada força, a velocidade diminui quando a viscosidade aumenta (Barnes H.A., 2000).

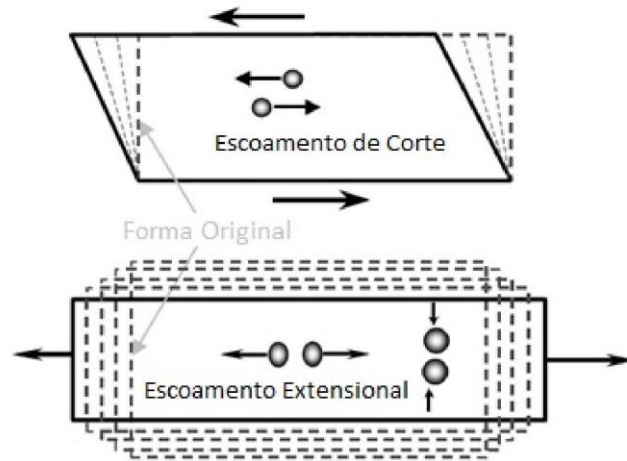


Figura 2.8 - Movimento das partículas nos escoamentos de corte e nos escoamentos extensionais (Adaptado de Barnes H.A., 2000)

2.2.2.1 Deformação de corte simples

Em deformação de corte uma força F é aplicada tangencialmente a um volume elementar, tal como se mostra na figura 2.9, de tal modo que a camada superior se desloca de uma distância u .

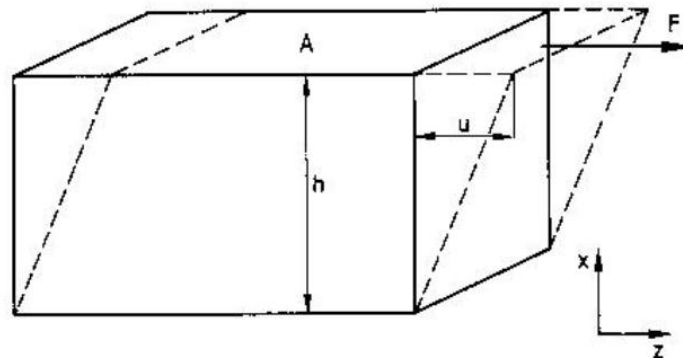


Figura 2.9 - Escoamento de corte simples (Birley A.W. et al., 1991)

Este tipo de escoamento pode ser visualizado como o movimento de camadas hipotéticas de líquido que deslizam umas por cima das outras, tal como na figura 2.10. No caso mais simples, a velocidade de cada camada vai aumentar linearmente em relação à respectiva camada que a antecede, assim sendo, uma camada com o dobro da distância ao plano estacionário vai-se mover com o dobro da velocidade. A este gradiente de velocidades dá-se o nome de taxa de deformação de corte e à força por unidade de área, produzida pelo escoamento, o nome de tensão de corte (Barnes H.A., 2000). De notar que, por uma questão de simplificação de linguagem, à taxa de deformação de corte se dá muitas

vezes, simplesmente, o nome de taxa de corte. Outros termos, igualmente, utilizados são taxa de deformação e gradiente de velocidade.

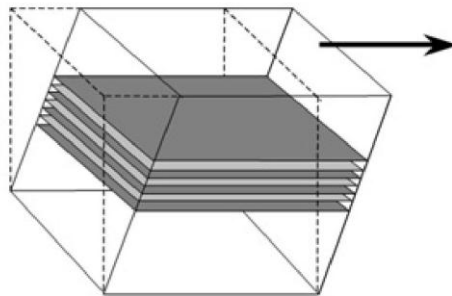


Figura 2.10 - Camadas hipotéticas num escoamento de corte simples (Adaptado de Barnes H.A., 2000)

A deslocação relativa de duas camadas é chamada deformação de corte (“shear strain”, em inglês) (γ), que é, naturalmente, adimensional e dada por:

$$\gamma = \frac{u}{h} = \operatorname{tg} \theta \quad (2.1)$$

A tensão de corte (força tangencial por unidade de área; “shear stress”, em inglês) é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

E tem unidade, no sistema SI, de N.m^{-2} (ou Pa).

A taxa de deformação de corte (“shear rate”, em inglês) é dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad \text{ou} \quad \dot{\gamma} = \frac{dv}{dx} \quad (2.3)$$

Com unidades, no sistema SI, de s^{-1} , onde v é a velocidade de deslocação da camada superior, na direcção z (a do escoamento).

2.2.3 Conceito de viscoelasticidade

Os conceitos de elasticidade e viscosidade precisam de ser qualificados, uma vez que há materiais que podem apresentar uma das propriedades ou uma combinação de ambas simultaneamente. A propriedade dominante e os valores dos parâmetros dependem da tensão aplicada no material e do tempo em que essa tensão lhe é aplicada.

Quando se olha em redor, em casa ou no laboratório, distinguem-se sólidos e líquidos através de uma observação geral do seu comportamento perante tensões baixas, usualmente provocadas pela força gravítica e durante poucos minutos ou mesmo poucos segundos. Contudo, se for aplicada uma gama de tensões muito ampla ao longo de um espectro de tempo muito amplo, usando aparelhos reológicos, pode observar-se propriedades de líquidos em sólidos e propriedades de sólidos em líquidos.

Para ilustrar estas ideias considere-se, como exemplo, um material de silicone apelidado de “*Pasta Maluca*” (“*Bouncing Putty*”, em inglês). Este material é bastante viscoso, mas quando colocado num recipiente, durante um período de tempo longo, este vai acomodar-se ao recipiente, tomando a sua forma (como um líquido). Contudo, se uma bola deste material for largada no chão, esta irá ressaltar (como um sólido). Pode, então concluir-se que um dado material pode comportar-se como um sólido ou como um líquido dependendo da escala de tempo do processo de deformação.

Em reologia, a escala de tempo é tida em conta pelo número de *Déborah*, que é definido através da expressão:

$$D_e = \frac{\tau}{T} \tag{2.4}$$

Onde T é o tempo característico do processo de deformação e τ é o tempo característico do material. O tempo τ é infinito para um slido elástico *Hookeano* e zero para um líquido viscoso *Newtoniano*. Para a grande maioria dos materiais τ toma valores entre estes dois extremos, tal como se pode observar na tabela 3.

Tabela 3 – Valores de τ para diferentes materiais

Material	τ (s)
Água (estado líquido)	10^{-12}
Óleos lubrificantes (sujeitos a altas pressões)	10^{-6}
Polímeros (às temperaturas de processamento)	Alguns segundos

Assim sendo, a números de *Déborah* elevados correspondem comportamentos do tipo sólido e a números de *Déborah* pequenos correspondem comportamentos do tipo líquido. Um material pode então apresentar características de sólido, quer por ter um tempo característico muito grande, quer porque o processo de deformação que se está a utilizar é muito rápido. Sendo que até líquidos com baixos tempos característicos podem comportar-se como sólidos em processos de deformação muito rápidos.

Pode assim definir-se de sólido, o material que não modifica continuamente a sua forma quando sujeito a uma dada tensão, ou seja, para uma dada tensão haverá uma deformação final fixa, que pode ou não ser atingida simultaneamente aquando da aplicação da tensão. Líquido será todo o material que modifica continuamente a sua forma (isto é, flui) quando sujeito a uma dada tensão, por muito pequena que esta seja.

O termo Viscoelasticidade surge assim para descrever o comportamento que cai entre os extremos clássicos da resposta elástica *Hookeana* e do comportamento viscoso *Newtoniano*. Em termos ideais de resposta de material, um material sólido com viscoelasticidade pode ser chamado de sólido viscoelástico. No caso dos líquidos, existe mais do que uma terminologia utilizada na literatura. Sendo que, os termos líquido viscoelástico, líquido elástico-viscoso e líquido elástico são todos utilizados para descrever um líquido que apresente propriedades viscoelásticas.

Líquidos cujo comportamento não pode ser descrito pelas equações de *Navier-Stokes* são chamados de líquidos *não-Newtonianos*. Estes podem ou não apresentar propriedades viscoelásticas. Ou seja, todos os líquidos viscoelásticos são *não-Newtonianos*, mas nem todos os líquidos *não-Newtonianos* são viscoelásticos (Barnes H. A. et al., 1993).

2.2.4 Classificação dos fluidos

2.2.4.1 Fluidos Newtonianos

Como foi referido anteriormente, num estado estacionário em escoamento de corte simples, para líquidos *Newtonianos* é aplicável a lei de *Newton* (Fig. 2.11):

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Onde σ é a tensão de corte necessária para produzir o movimento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de corte (ou gradiente de velocidade) e η , a constante de proporcionalidade entre a tensão e a taxa de deformação, que toma o nome de coeficiente de viscosidade.

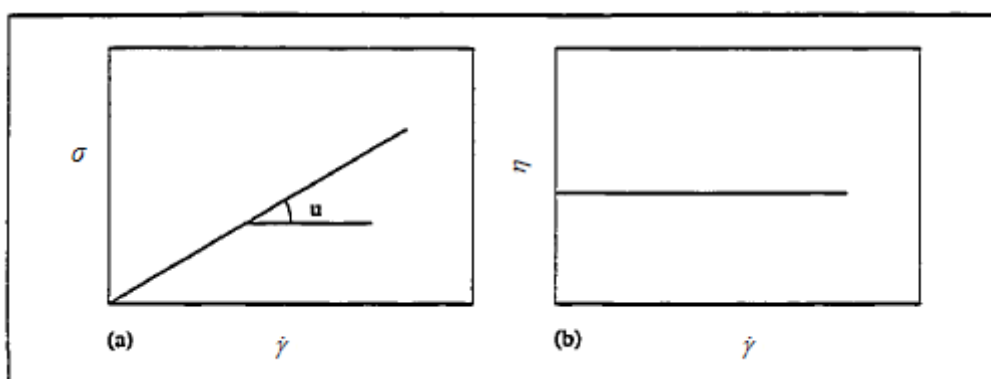


Figura 2.11 – Comportamento de um fluido Newtoniano (Adaptado de Roy V., 1996)

Assim sendo, pode-se afirmar que, em experiências conduzidas a temperatura e pressão constantes, o comportamento dos fluidos *Newtonianos* tem as seguintes características (Barnes H. A. et al., 1993):

- A única tensão gerada, em escoamento de corte simples, é a tensão de corte σ_{xy} , que sendo neste caso única, é somente referida como σ ;
- A tensão de corte é independente da taxa de corte;
- A viscosidade é constante no tempo (independentemente do tempo de aplicação da tensão) e a tensão do líquido cai a zero imediatamente após paragem do escoamento. Quando o mesmo material é posteriormente sujeito a novas deformações (escoamento), e independentemente do tempo decorrido entre as diferentes solicitações, o valor da viscosidade mantém-se inalterado;
- As viscosidades medidas em diferentes tipos de deformação são sempre proporcionais; por exemplo, o valor da viscosidade medida num escoamento uniaxial extensivo (a viscosidade extensional) é sempre o triplo do valor medido numa experiência de corte simples (viscosidade de corte, normalmente chamada somente de viscosidade; em inglês “*shear viscosity*”).

Um líquido que apresente um qualquer desvio ao comportamento acima descrito é um líquido (ou fluido) *não-Newtoniano*.

Há que ter em mente, que para taxas de corte suficientemente elevadas, todos os líquidos adoptam um comportamento *não-Newtoniano*. Note-se que, no caso dos líquidos *Newtonianos* até agora abordados, para que tal comportamento se verifique, são realmente necessárias taxas de corte bastante elevadas, veja-se o exemplo da água que obtém este comportamento a uma taxa de corte impossível de alcançar, 10^{12} s^{-1} (Barnes H. A. et al., 1993).

2.2.4.2 Fluidos não-Newtonianos

Ao contrário dos líquidos *Newtonianos*, nos *não-Newtonianos* é notável a variação da viscosidade com a variação das taxas de corte. Isto significa que a viscosidade da amostra se vai alterando consoante a taxa de corte e cada valor é específico de uma dada taxa de corte.

Estes fluidos podem ser subdivididos em três tipos, de acordo com a curva tensão de corte vs taxa de corte que apresentam, tal como indicado na figura 2.12:

- *Reofluidificante* (*shear-thinning* ou *pseudoplastic*);
- *Reoespassante* (*shear-thickening* ou *dilatant*);
- *Viscoplástico* (*viscoplastic*).

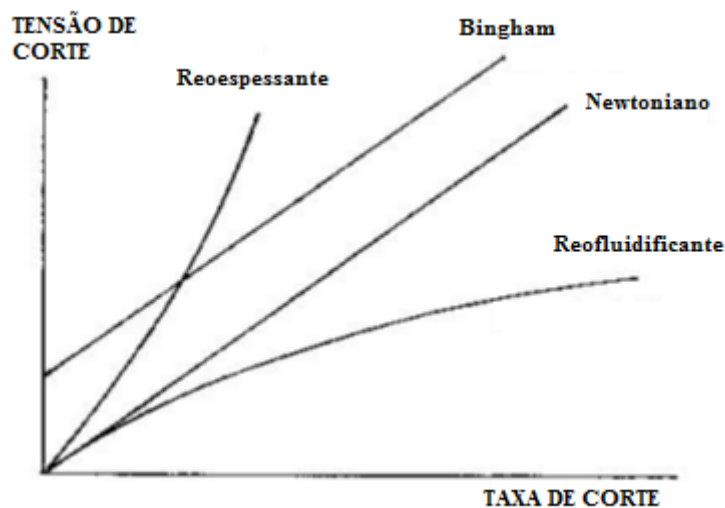


Figura 2.12 - Curvas de fluxo para diferentes tipos de fluidos (Adaptado de Birley A.W. et al., 1991)

Assim sendo, chama-se fluido *reofluidificante* ao fluido cuja viscosidade diminui com o aumento da taxa de corte, o que resulta numa curva tensão de corte vs taxa de corte com concavidade para baixo (Fig.2.13).

Existem duas regiões em que a viscosidade é constante, conhecidas por primeira região Newtoniana e segunda região Newtoniana. Na primeira região Newtoniana, a viscosidade constante verifica-se devido aos deslocamentos macroscópicos serem muito lentos para baixas taxas de corte, havendo a possibilidade de ocorrerem rearranjos a nível microscópico (processos mais rápidos) que permitem assim o estabelecimento de novas condições de equilíbrio. Na zona intermédia, as taxas de corte são suficientemente fortes para obrigar ao alinhamento das moléculas, aumentando assim a facilidade de escorregamento entre estas e consequentemente diminuindo a viscosidade do fluido. Para as taxas de corte mais elevadas, que correspondem à segunda região Newtoniana, as moléculas vão atingir o máximo alinhamento possível e daí a impossibilidade de diminuição da viscosidade.

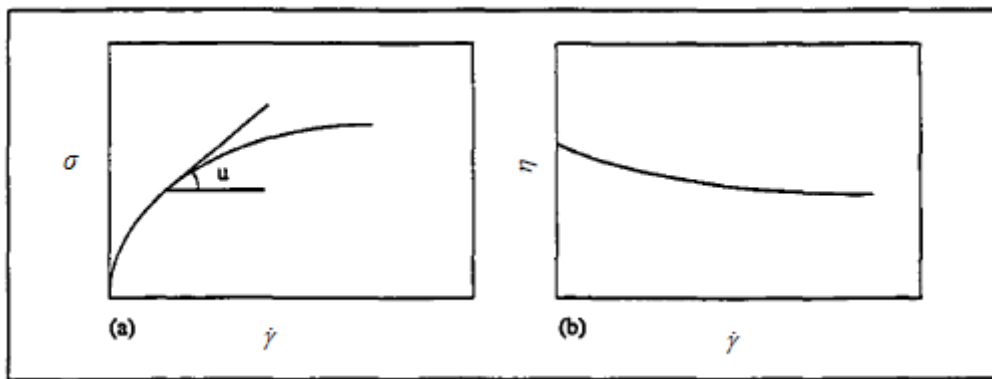


Figura 2.13 - Comportamento de um fluido *reofluidificante* (Adaptado de Roy V., 1996)

Ao fluido cuja viscosidade aumenta com o aumento da taxa de corte, dá-se o nome de fluido *reoespesante*, o que resulta numa curva de tensão de corte vs taxa de corte com concavidade para cima (Fig. 2.14).

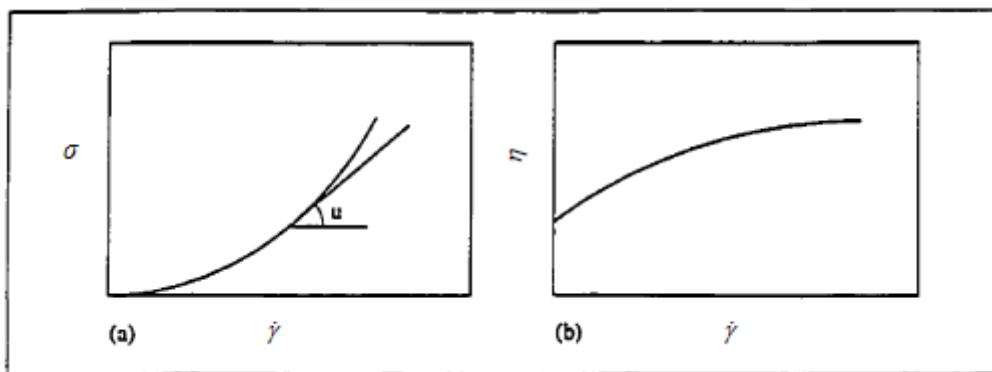


Figura 2.14 - Comportamento de um fluido *reoespesante* (Adaptado de Roy V., 1996)

O fluido *viscoplástico* corresponde a um material que só se deforma a partir de um dado valor crítico de tensão aplicada, isto é, que apresenta uma tensão de cedência, comportando-se como um sólido abaixo do valor da tensão de cedência e como um fluido para tensões superiores a esse valor (Fig. 2.15).

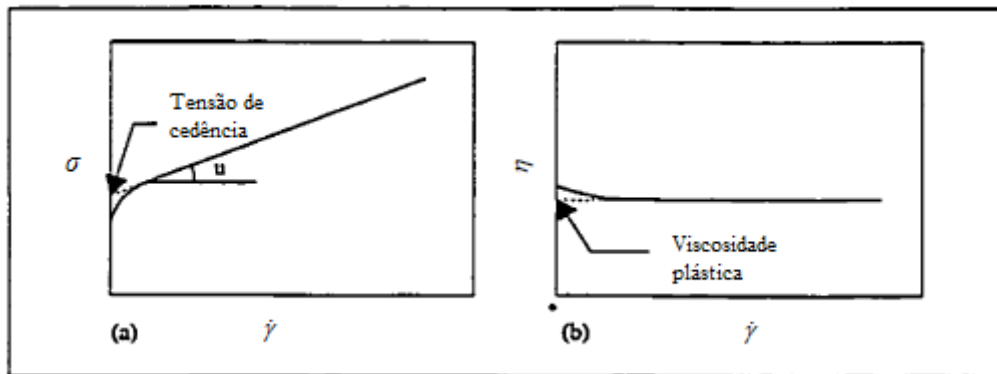


Figura 2.15 - Comportamento de um fluido *viscoplástico* (fluido de *Bingham*), (Adaptado de Roy V., 1996)

A maioria das pastas de cimento e argamassas apresentam um comportamento de fluxo não-Newtoniano. Dependendo da concentração de partículas sólidas, o comportamento de fluxo varia progressivamente entre um comportamento de fluido de Bingham e um comportamento reofluidificante. Caldas com elevados rácios de água/ligante exibem um comportamento de escoamento de fluido de Bingham (Roy V., 1996).

Existem casos de fluidos que possuem um comportamento não linear depois de ser atingido o valor da tensão de cedência. Este tipo de comportamento é encontrado em suspensões floculadas, como o cimento ou caldas de cal hidráulica, argamassas e betões. Estes fluidos são dispersões onde as partículas dispersas formam uma rede que é responsável por um limite de cedência. Quanto mais forte for o sistema, maior a tensão necessária para superar a estrutura interna. Se a tensão aplicada for inferior à de cedência, esta irá provocar uma deformação elástica da amostra e a sua forma recuperada. Se pelo contrário, a tensão de corte for superior à de cedência, então irá resultar num fluxo contínuo. Existem algumas dúvidas quanto à existência deste tipo de comportamento; de facto a “aparente” tensão de cedência pode dever-se simplesmente a limitações experimentais ou a muito elevadas viscosidades às taxas de corte nulas. Para soluções diluídas e suspensões não há quaisquer dúvidas que estas fluem mesmo para tensões de corte muito baixas, não apresentando tensões de cedências. Para sistemas mais concentrados, como são os casos de argamassas e caldas, a existência de tensões de cedência levanta algumas dúvidas. No entanto, estes materiais podem parecer não escoar para taxas de corte muito baixas, simplesmente porque a sua viscosidade à taxa de corte nula é muito alta. Se a

viscosidade fosse da ordem de 10^{10} Pa.s, seriam necessários anos para que o movimento fosse detectado visualmente (Barnes H. A. et al., 1993), (Barnes H.A., 2000).

2.2.4.3 *Comportamentos transientes – fluidos dependentes do tempo*

Até ao momento verificou-se, que mesmo para um fluido *não-Newtoniano*, a uma dada taxa de corte corresponde um dado valor da tensão de corte (e como tal da viscosidade), valor esse que não sofre qualquer alteração enquanto o valor da taxa de corte se mantiver constante. No entanto, casos existem em que isto não é verdade. A tensão de corte (e consequentemente a viscosidade) medida para uma dada taxa de corte, pode aumentar ou diminuir com o tempo de aplicação da deformação. Tais mudanças podem ser reversíveis ou irreversíveis.

A um comportamento que apresenta uma diminuição gradual da viscosidade, quando sujeito a um dado valor de tensão, seguido de uma recuperação gradual da estrutura, quando a tensão é removida, dá-se o nome de *tixotropia* (Fig. 2.16). Este comportamento tem origem na microestrutura do fluido, devido à coagulação e floculação de partículas em suspensão e ao tempo necessário para mudar a microestrutura. O termo microestrutura, quando associado a sistemas tixotrópicos, refere-se a partículas floculadas, mas também se pode referir ao alinhamento das fibras ou ainda à distribuição espacial favorável de partículas ou gotas. À medida que a suspensão é sujeita a tensões de corte, as ligações entre as partículas são interrompidas e a rede entre elas decompõe-se em diferentes aglomerados, que ainda se podem desintegrar em flocos mais pequenos, mas se a suspensão estiver em repouso, as partículas começam novamente a coagular e flocular em aglomerados. Durante a ruptura da estrutura de partículas, o movimento faz com que elas se comecem a orientar na linha de fluxo, o que reduz a viscosidade. No entanto, esse comportamento reofluidificante não ocorre simultaneamente, mas sim passado algum tempo, fazendo com que o material seja dependente do tempo (Barnes H.A., 1997).

O comportamento inverso, aumento gradual da viscosidade quando sujeito a tensão, seguido da recuperação após retirada da tensão, tem o nome de *tixotropia negativa* ou *anti-tixotropia* (Fig. 2.16).

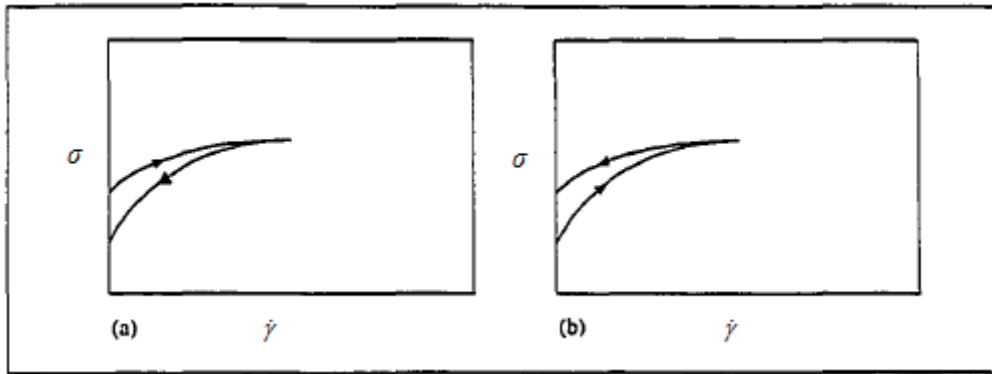


Figura 2.16 - Comportamentos de um fluido *tixotrópico* e de um fluido *anti-tixotrópico*, respectivamente (Adaptado de Roy V., 1996)

2.2.5 Viscoelasticidade

A palavra “viscoelasticidade” significa a existência, em simultâneo, de propriedades viscosas e propriedades elásticas num material. Não é razoável supor que todos os materiais são viscoelásticos, isto é, que coexistam propriedades viscosas e elásticas, mas muitos dos líquidos estruturados, como é o caso das suspensões floculadas, apresentam efeitos de viscoelasticidade muito fortes para baixas deformações (abaixo da tensão de cedência), e a sua mensuração é então bastante útil na caracterização da sua microestrutura.

Uma das formas mais simples de compreender este comportamento é o de utilizar modelos mecânicos simples. Estes consistem na combinação de elementos elásticos e lineares com elementos viscosos, como por exemplo, molas e amortecedores (Fig. 2.17).

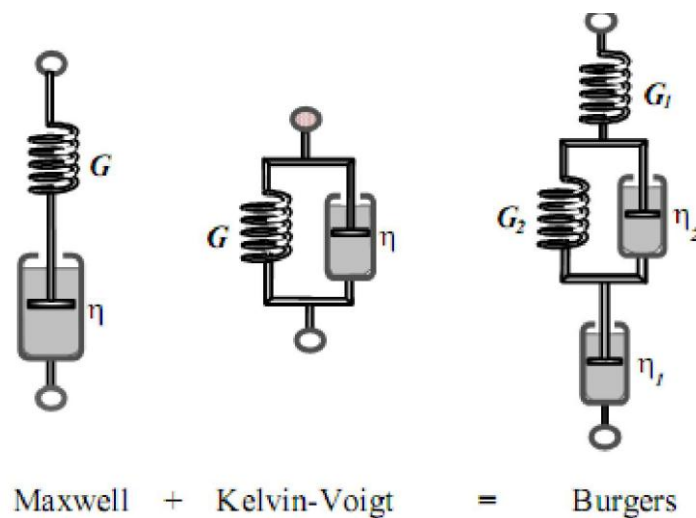


Figura 2.17 - Modelos de Maxwell, Kelvin-Voigt e Burgers (Barnes H.A., 2000)

A mola é a representação de um elemento elástico linear que obedece à lei de Hooke. Numa deformação de corte simples a constante de proporcionalidade é o módulo elástico, G :

$$\sigma = G \times \gamma \quad (2.6)$$

Se aplicarmos uma deformação γ ao nosso modelo, irá surgir uma tensão σ , se removermos essa mesma deformação, a tensão cai imediatamente para zero.

De forma semelhante, o comportamento viscoso linear vai ser representado por um amortecedor. A resposta deste elemento pode ser descrita matematicamente pela seguinte equação (lei de Newton):

$$\sigma = \eta \times \dot{\gamma} \quad (2.7)$$

Se aplicarmos uma tensão σ , o amortecedor começa imediatamente a deformar a uma taxa constante de $\dot{\gamma}$ sem sofrer qualquer mudança com o tempo até que a tensão seja removida, parando a deformação imediatamente.

Quando ligamos uma mola e um amortecedor em série obtemos a representação mais simples de um líquido viscoelástico, dando-se a este modelo o nome de Modelo de Maxwell. Se ligarmos uma mola e um amortecedor em paralelo obtemos a representação mais simples de um sólido viscoelástico, tendo este modelo o nome de Modelo de Kelvin-Voigt. Se combinarmos estes dois modelos em série vamos obter o chamado Modelo de Burgers. Este modelo descreve todas as características básicas que interessam neste tipo de estudo.

O estudo dos fluidos em regime de viscoelasticidade linear é normalmente realizado recorrendo a experiências dinâmicas. Um dos métodos mais utilizados são os ensaios oscilatórios. Nestas experiências dinâmicas quer a tensão quer a deformação variam sinusoidalmente, existindo uma defasagem entre a resposta da tensão e a deformação aplicada (Barnes H.A., 2000).

2.2.6 Descrição matemática do comportamento de fluidos reofluidificantes

O comportamento reofluidificante pode ocorrer por vários motivos, como por exemplo (Barnes H.A., 1997):

- Alinhamento de partículas na direcção do fluxo;

- Perda de junções em soluções poliméricas;
- Rearranjo da microestrutura em suspensão e fluxo de emulsão;
- Ruptura de flocos.

Para a interpretação de comportamentos de fluidos é, geralmente, suficiente perceber o modo como a viscosidade depende explicitamente da velocidade de deformação ou da tensão. Para descrever matematicamente todas as características do comportamento reofluidificante de uma calda à base de cal hidráulica ou de cimento, vários modelos matemáticos têm sido propostos, cujas equações permitem relacionar a viscosidade e a taxa de corte através de um número mínimo de parâmetros. As equações que descrevem a forma da curva de fluxo de fluidos reofluidificantes necessitam de pelo menos quatro parâmetros.

- **Modelo de Cross:**

Considere-se o modelo que Cross propôs em 1965 e que descreve toda a curva de fluxo:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{(1 + (k\dot{\gamma})^m)} \quad (2.8)$$

Onde η_0 e η_{∞} se referem aos valores da viscosidade nas regiões Newtonianas inferior e superior, respectivamente, k é uma constante com dimensões de tempo e m é uma constante adimensional. Neste modelo, o grau de reofluididez é dado pelo valor de m , onde um valor de m a tender para zero descreve um líquido perto do comportamento Newtoniano, enquanto que os fluidos mais reofluidificantes apresentam valores de m mais próximos da unidade.

- **Modelo “lei da potência”:**

A partir do modelo de Cross e em situações em que $\eta_0 \gg \eta \gg \eta_{\infty}$, $k\dot{\gamma} \gg 1$ e η_{∞} é pequena, com uma simples redefinição de parâmetros é possível obter outros modelos matemáticos, como é o caso do modelo “lei da potência”:

$$\eta = k_2 \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.9)$$

Onde k_2 é chamado de “consistência” (Pa.s^n) e n de índice da “lei da potência” (adimensional). A $n-1$ dá-se o nome de índice de pseudoplasticidade. Para os fluidos não-Newtonianos, o índice n varia de 1 (valor para os líquidos Newtonianos) a 0.

- **Modelo de Sisko:**

Para escoamentos em que a viscosidade sai do domínio de aplicação da “lei da potência”, ou seja, em que a curva de fluxo se vai aplanando em direção a η_∞ , basta adicionar-se uma contribuição Newtoniana à “lei da potência”:

$$\eta = k_2 \dot{\gamma}^{n-1} + \eta_\infty \quad (2.10)$$

Este modelo, proposto por Sisko em 1958, é bastante útil para descrever comportamentos de muitas emulsões e suspensões usadas no dia-a-dia.

- **Modelo de Bingham**

Se no modelo de Sisko fizermos $n = 0$, obtém-se:

$$\eta = \eta_\infty + \frac{k_2}{\dot{\gamma}} \quad (2.11)$$

Que modificada ($\sigma_y = k_2$ e $\eta_p = \eta_\infty = \sigma_\infty/\dot{\gamma}_\infty$) pode ser escrita sob a forma:

$$\sigma = \sigma_y + \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.12)$$

Chamada equação de Bingham, onde σ é a tensão de corte (Pa), $\dot{\gamma}$ é a taxa de corte, σ_y é a tensão de cedência (Pa) e η_p é a viscosidade plástica (Pa.s). Este modelo pode ainda ser redefinido, dando origem à equação de Bingham modificada (Brás A., 2010):

$$\sigma = \sigma_y + \eta_p \times \dot{\gamma} + c \times \dot{\gamma}^2 \quad (2.13)$$

Os modelos apresentados aplicam-se a zonas mais ou menos limitadas da curva de fluxo, pelo que a escolha do modelo a utilizar está muito condicionada pela gama de taxas de corte experimentadas, devendo usar-se sempre que possível o modelo mais simples em cada situação. Na figura 2.18, estão representadas diferentes zonas da curva onde podem ser aplicados os modelos anteriormente descritos.

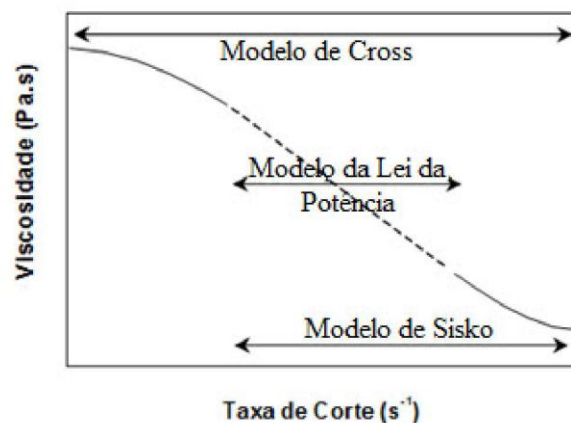


Figura 2.18 - Diagrama que define a amplitude da curva abrangida pelos diferentes modelos (Adaptado de Barnes H.A., 2000)

2.2.7 Gamas de taxa de corte

Na vida quotidiana encontram-se valores de taxa de corte muito variados consoante as circunstâncias. Na figura 4 é possível observar o valor aproximado de alguns exemplos de taxas de corte.

Tabela 4 - Intervalos típicos de taxas de corte em vários processos (Adaptado de Barnes H.A., 2000)

Processo	Taxa de Corte (s^{-1})	Exemplos
Sedimentação de pós em líquidos	$10^{-6} - 10^{-3}$	Medicamentos, tintas, vestuário
Nivelamento devido a tensão superficial	$10^{-2} - 10^{-1}$	Tintas
Escoamento por acção da gravidade	$10^{-1} - 10^1$	Tintas, revestimentos
Extrusão	$10^0 - 10^2$	Polímeros, alimentos
Mastigação e engolir	$10^1 - 10^2$	Alimentos
Revestimentos por imersão	$10^1 - 10^2$	Tintas, confeitaria
Mistura e agitação	$10^1 - 10^3$	Manufatura de líquidos
Esfregamento	$10^4 - 10^5$	Crems para pele, loções
Revestimento a alta velocidade	$10^4 - 10^6$	Produção de papel
Pulverização	$10^5 - 10^6$	Spray, atomização
Lubrificação	$10^3 - 10^7$	Rolamentos, motores
Escoamento em tubagens	$10^0 - 10^3$	Manufatura de líquidos

A aplicação de uma taxa de corte muito elevada pode provocar uma alteração na estrutura de uma suspensão de partículas cimentícias, devido por exemplo, à dilatância. A suspensão irá criar várias camadas com grande concentração de partículas, intercaladas por camadas líquidas. Por isso, a fluidez da suspensão ensaiada pode ser completamente diferente da fluidez da mesma suspensão quando for

aplicada *in situ*. Por exemplo, se numa injeção se utilizar uma calda muito pouco viscosa e com uma tensão de cedência significativamente baixa, irá ocorrer corte na secção transversal da tubagem (Fig. 2.19). Como a calda tem uma viscosidade muito maior do que a camada de deslizamento, a pressão necessária para manter o movimento na tubagem será muito maior (Brás A., 2010). O limite superior de taxa de corte, de interesse no estudo de caldas de cimento, situa-se entre 60 a 80 s⁻¹ (Wallevik O., 2009).

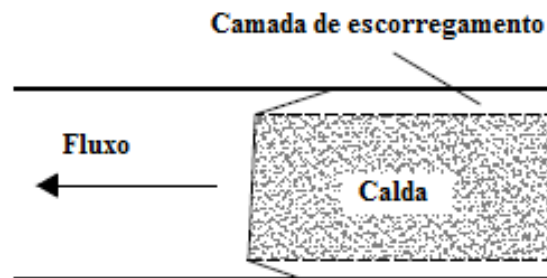


Figura 2.19 - Camada de escorregamento, durante a injeção de uma calda (Brás A., 2010)

2.2.8 Comportamento tixotrópico de suspensões de partículas com tensão de cedência

As caldas de cal hidráulica são um material composto essencialmente por cal, água e em alguns casos, aditivos. Assim que os componentes da argamassa entram em contacto uns com os outros, uma série de reacções químicas e físicas ocorrem, o que dá à calda as suas propriedades reológicas específicas. Os factores que afectam as propriedades reológicas das caldas são:

- Finura e distribuição de tamanho das partículas e dos materiais suplementares;
- Forma das partículas;
- Solubilidade de iões a partir da superfície;
- Grau de floculação inicial;
- Rácio água/ligante;
- Composição química da cal e dos materiais suplementares;
- Aditivos;
- Tempo de mistura;
- Separação das partículas (concentração);
- Superfície das partículas;
- Temperatura.

O rácio água/ligante e a finura do ligante são os dois principais factores que determinam o comportamento do sistema de suspensão. Quanto mais fino for o ligante, maior será o número de partículas, bem como a sua superfície específica e cada partícula irá absorver e ligar mais moléculas de água, por isso a necessidade de água será maior. Por outro lado, pequenos núcleos de partículas de ligante, chamados flóculos, tendem a formar-se. Este efeito combinado com as forças entre as partículas e a atracção da água pela superfície da cal, também tem um efeito sobre o comportamento reológico. Quando ocorre uma dispersão dos flóculos, provocada, por exemplo, por agitação da calda, formam-se novas áreas superficiais nas partículas, o que irá aumentar o processo de coagulação, pois estas novas áreas podem consumir ou ligar a água e eventualmente aditivos químicos.

A tixotropia é a variação da viscosidade com tempo de corte, ao invés da taxa de corte, e é geralmente vista como uma propriedade problemática. A tixotropia surge em primeiro lugar, devido ao tempo finito necessário para ocorrer qualquer alteração numa microestrutura submetida ao corte. A microestrutura é levada a um novo estado de equilíbrio provocado, por um lado, por processos de separação induzidos pela tensão de corte, e por outro lado, processos de união, devido à colisão de partículas induzida pelo fluxo e pelo movimento Browniano, durante um determinado período, que pode ser de minutos. Depois, quando o fluxo termina, o movimento Browniano (a única força restante) é capaz de movimentar lentamente os elementos da microestrutura para posições mais favoráveis e assim, reconstruir a estrutura. Isto pode demorar várias horas e todo o processo é reversível (Barnes H.A., 1997).

No caso de fluidos simplesmente reofluidificantes, quando submetidos ao corte, o raio dos flocos ajusta-se, imediatamente, ao valor apropriado para uma dada taxa de corte. No caso de fluidos tixotrópicos o mesmo não sucede, pois existe um tempo finito necessário para tais mudanças ocorrerem. De facto, qualquer mudança na microestrutura induzida por corte leva tempo a ocorrer. Isto é verdade para as mais simples alterações, como a transição de uma suspensão em repouso para uma situação de desagregação de flocos em partículas primárias, devido à aplicação de elevadas taxas de corte.

O comportamento tixotrópico pode ser identificado quando, através de testes a taxas de corte idênticas ascendentes e descendentes, estas não coincidem. Este fenómeno é atribuído à destruição das ligações entre partículas, como resultado da aplicação de uma velocidade de corte constante. Portanto, os *loops* de histerese são observados quando o fluido, em questão, é submetido a ciclos de carregamento. A tensão de cedência e a viscosidade plástica dependem do historial de tensões a que a calda já esteve sujeita. Um ciclo de histerese indica, apenas, que a ruptura estrutural ocorreu, pois não fornece uma medida quantitativa (Banfill P.F.G., 1994). Os fluidos com este tipo de comportamento recuperam a sua rigidez original com o tempo, assim considera-se o fenómeno tixotrópico reversível. No caso das caldas, se deixadas em repouso durante algum tempo, ocorre um aumento da tensão de cedência,

sendo necessário aplicar uma maior tensão de corte para se reiniciar o fluxo. Esta propriedade pode causar problemas no processo de uma injeção de caldas, se a injeção for interrompida durante algum tempo (Roy V., 1996).

2.2.8.1 Forças actuantes em suspensões

Na maioria das suspensões de partículas possuidoras de valor de tensão de cedência coexistem três tipos de forças (Barnes H. A. et al., 1993):

1) Forças de origem coloidal

Este tipo de forças surge de interações entre as partículas. Estas forças podem provocar repulsa (cargas electrostáticas ou de repulsão entrópica do material polimérico ou surfactante presente nas superfícies das partículas) ou atracção (atracção de London-van der Waals entre as partículas ou atracção electrostática entre cargas diferentes em partes diferentes da partícula) entre as partículas. Se a resultante das forças for atracção formam-se flóculos de partícula, se for repulsão as partículas permanecem separadas (este fenómeno ocorre, por exemplo, quando se adicionam superplasticantes a caldas de cimento).

2) Força de Brown (térmica)

Os movimentos Brownianos são a agitação térmica aleatória dos átomos e moléculas, de modo que os elementos da microestrutura estejam constantemente a ser bombardeados, o que leva a que eles se movam para uma posição favorável, onde se podem unir a outras partes da microestrutura. A força de Brown previne o assentamento de partículas pequenas, apesar de terem maior densidade do que o fluido.

3) Forças viscosas que actuam sobre as partículas devido ao fluxo

Estas forças são proporcionais à diferença da velocidade local entre as partículas e o fluido envolvente, por isso a forma como estas afectam a viscosidade depende da viscosidade da fase contínua.

2.2.8.2 Viscoelasticidade de suspensões

Os sistemas viscoelásticos sujeitos a tensões de corte na sua região linear apresentam uma dependência do tempo, porque a microestrutura leva tempo a responder ao fluxo/tensão. A curto prazo a estrutura não responde com rapidez, e o que se observa é uma resposta elástica, enquanto a longo

prazo, o sistema pode ajustar-se a ele próprio continuamente, isto é, pode fluir, apresentando efeitos viscosos. Por isso, quando observado ao longo de todas as escalas de tempo, o sistema é viscoelástico.

Para sistemas de viscoelasticidade não linear, não só a microestrutura leva tempo a responder ao fluxo, como também é alterada pelo fluxo e esta mudança também leva o seu tempo. Esta é a diferença principal entre a viscoelasticidade linear e a tixotropia. Apesar de ambas serem dependentes do tempo, a primeira ocorre na região linear, onde a estrutura responde, mas permanece inalterada e a segunda tem lugar na região não-linear, onde a estrutura é partida pela deformação.

Uma vez que as mudanças em qualquer destes estados demoram algum tempo a ocorrer (quer a partir do repouso ou de qualquer outra forma), é expectável a existência de tixotropia em qualquer mecanismo reofluidificante. Contudo, a tixotropia torna-se significativa quando a escala de tempo durante a qual é observada se torna significativamente maior do que um tempo de fluxo de um determinado processo, como por exemplo, o tempo médio que um líquido leva a fluir através de um tubo. As escalas de tempo da tixotropia podem ser maiores do que as da viscoelasticidade e são particularmente importantes, quando equivalem a unidades de tempo traduzidas por vários minutos, até que a sua estrutura entre em ruptura. Isto significa que muitos mais minutos ou mesmo horas serão necessários para a recuperação da estrutura (Barnes H. A. et al., 1993), (Barnes H.A., 2000).

2.2.8.3 *Interacção entre partículas numa suspensão*

O primeiro trabalho teórico de relevo relacionado com a previsão da viscosidade de suspensões diluídas foi realizado por Albert Einstein, quando calculou que a viscosidade de uma dispersão com uma quantidade muito pequena de material, sob a forma de partículas esféricas solidas, é dada por:

$$\eta = \eta_0(1 + [\eta]\varphi) \quad (2.14)$$

Onde η é a medida da viscosidade e η_0 é a viscosidade na fase continua Newtoniana: $[\eta]$ é chamada de viscosidade intrínseca, o que para esferas é de $5/2$, segundo Einstein. Na equação, φ é adequadamente chamado o volume da fase, uma vez que representa o volume da dispersão ocupado pela fase dispersa, mas não significa fracção de peso, dado que nesta fase se considera que as partículas não têm peso. Contudo, esta equação não é indicada para fluidos com grandes concentrações de partículas sólidas como é o caso de caldas, argamassas e betões.

A influência da concentração de partículas na viscosidade de suspensões concentradas é melhor determinada em relação à fracção de acondicionamento máxima. Quando se adicionam quantidades de

partículas suficientes para tornar o fluxo impossível, isto é, viscosidade a tender para o infinito, dá-se o nome de fracção de acondicionamento máxima ϕ_m , e o seu valor dependerá da disposição das partículas. A fracção de acondicionamento máxima varia entre cerca de 0,5-0,75, mesmo para esferas monodispersas e é muito sensível à distribuição de tamanho e forma das partículas. A floculação de partículas também pode conduzir a uma baixa fracção de acondicionamento máxima, porque, em geral, os flocos não são em si sistemas fechados. A partir das considerações anteriores, pode concluir-se que a relação de ϕ/ϕ_m é uma concentração normalizada relevante.

Apesar da equação de Einstein ser um ponto de partida importante, dá pouca ajuda em situações reais. Muitas equações empíricas seguiram o esforço matemático de Einstein, cada uma das quais procurando aumentar o intervalo de concentração para uma região mais prática. Uma das mais úteis é conhecida como equação de Dougherty Kreiger, a qual é dada por:

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (2.15)$$

Onde ϕ_m é chamado de fracção de acondicionamento máxima, que é a concentração onde foram adicionadas apenas partículas suficientes para tornar a viscosidade infinita. Uma análise mais aprofundada da equação de Dougherty Kreiger mostra que o produto de $[\eta]\phi_m$ é geralmente cerca de 2, para uma variedade de situações. À luz desse facto podemos simplificar a equação para:

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2} \quad (2.16)$$

Se se pretende controlar ou entender a viscosidade de dispersões concentradas, ϕ_m é uma importante variável a controlar. Tanto o aumento como a redução da distribuição de tamanho das partículas deve ser controlado, uma vez que uma mistura deliberada de tamanhos de partículas tem grandes consequências na ϕ_m . Se as partículas estiverem monodispersas, então podem efectuar-se misturas de partículas de diversos tamanhos para reduzir a viscosidade, se a proporção de tamanho for de cerca de 4:1, uma vez que as partículas pequenas podem encaixar nos orifícios deixados quando as partículas grandes se tocam. Esta manipulação do tamanho das partículas é muito eficaz para suspensões de concentração mais elevada. Se forem misturados três tamanhos, sob a mesma restrição de rácio de tamanho, o efeito é igualmente bom. Mais do que três tamanhos e a restrição de tamanhos torna-se impraticável. Este exercício é utilizado no fabrico de betão, quando o material de agregados tem de ser adicionado, tanto quanto possível, para manter o betão bastante fluido.

O efeito do tamanho das partículas em dispersões prende-se com um mecanismo muito importante, que está relacionado com o arranjo espacial das partículas. Quando a dispersão está em repouso, as partículas estão dispersas aleatoriamente ao longo da fase contínua, devido à acção permanente do movimento Browniano. Se a dispersão é sujeita a taxas de corte muito baixas, então tem de haver um movimento cooperativo para permitir que essas partículas se movam na direcção do fluxo, mantendo a distribuição aleatória global e assim, a viscosidade é elevada. No entanto, quando a dispersão é submetida a taxas de corte mais elevadas, as partículas podem ser movidas do seu plano geral aleatório para uma situação em que começam a formar-se cadeias e camadas (Fig. 2.20).

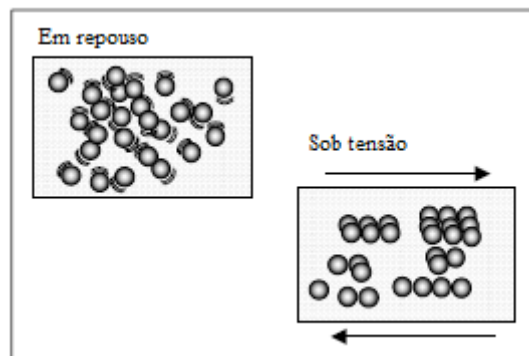


Figura 2.20 - Formação de cadeias e camadas numa suspensão sob a acção de fluxo de corte (Adaptado de Barnes H.A., 2000)

Esta alteração do arranjo espacial torna o movimento entre partículas muito mais fácil, reduzindo a viscosidade. Isto manifesta-se na equação de Dougherty Kreiger por um pequeno, mas significativo aumento do valor de ϕ_m , com o aumento da taxa de corte. Os valores típicos de ϕ_m são à volta de 0,63 para dispersões monodispersas, partículas esféricas com taxas de corte muito baixas e cerca de 0,71 para velocidades de corte muito elevadas. Esta mudança aparentemente pequena produz grandes efeitos em concentrações elevadas, resultando na introdução em grande quantidade de um comportamento refluidificante em suspensões concentradas.

O comportamento refluidificante é mais evidente em fluidos compostos por partículas grandes, onde o movimento Browniano é menos eficaz e as forças de corte são correspondentemente mais influentes. Quando uma dispersão de partículas pequenas é submetida ao corte, o efeito do movimento Browniano é mais duradouro ao longo do eixo da velocidade de corte e são necessários valores de taxa de corte mais elevados para atingir os mesmos valores de refluidez.

O efeito espessante das partículas no que diz respeito à sua forma segue a seguinte ordem decrescente: barras/hastes, placas/pratos, cubos/grãos, esferas, quando o mesmo volume de fase de partículas é adicionado a um líquido. Isto está ilustrado na figura 2.21, onde se pode ver a ordem aproximada do

poder de espessamento de cada partícula, com as barras/fibras a serem as mais eficientes para qualquer volume de fase. Quanto aos parâmetros de viscosidade, $[\eta]$ aumenta para partículas não esféricas em suspensões diluídas, como foi explicado anteriormente, mas ϕ_m diminui. Contudo, o produto destes dois termos não difere muito de 2.

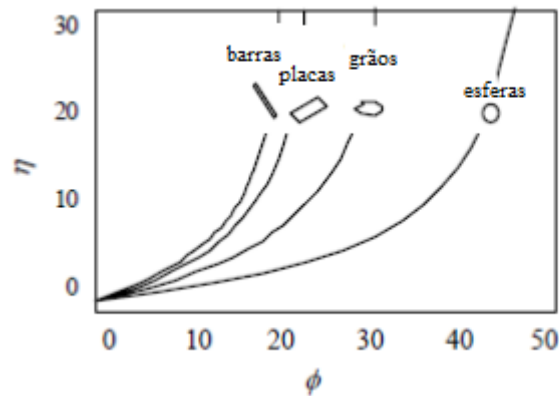


Figura 2.21 - Viscosidade em função do volume de fase para várias formas de partículas (Adaptado de Barnes H.A., 2000)

A forma mais simples de se observar uma dispersão de partículas é quando as partículas são livres de se aproximar e afastar umas das outras sob a acção do movimento omnipresente Browniano e tendo apenas a resistência provocada pelo movimento através do líquido viscoso interveniente. No entanto, para partículas muito pequenas, surgem outro tipo de forças significativas entre partículas. Por exemplo, a força de atracção de van-der-Waals. Esta, se não for contrariada, fará com que as partículas se mantenham unidas. Esta força de atracção está sempre presente em todas as interacções entre partículas. Se as partículas estiverem completamente desprotegidas, a mínima força a pequenas distâncias pode ser suficientemente grande para dar contacto permanente entre partículas – a isso dá-se o nome de coagulação. No entanto, na maioria das situações, existem efeitos combinados da atracção de van-der-Waals e uma força repulsiva resultante da presença de um agente de protecção na superfície das partículas ou uma repulsão electrostática entre partículas vizinhas que transportam carga do mesmo sinal.

Se as forças de repulsão forem elevadas e de longo alcance, então serão capazes de contrariar as forças de atracção de van-der-Waals, formando assim uma dispersão estável (coloidal). Existem polímeros, como é o caso dos superplastificantes, que têm um lado solúvel na fase contínua, e outro insolúvel e capaz de ser absorvido pela superfície das partículas. Estes podem proteger as partículas, que de outra maneira iriam flocular – isto tem o nome de repulsão estérica. Assim como se pode produzir repulsão através da introdução de um polímero sobre a superfície das partículas, também se pode combinar os dois efeitos usando polielectrólitos, isto é, polímeros com carga distribuída ao longo das cadeias. A

natureza particular das forças resultantes é diferente em cada caso, mas o efeito global é sempre o mesmo, produzir uma força de repulsão.

Quando as partículas se aproximam umas das outras e a distância entre elas é muito pequena, quaisquer moléculas de polímero grandes que estejam na vizinhança, são excluídas desse pequeno espaço. O resultado é uma região empobrecida em relação à concentração do polímero e isto leva a uma diferença de pressão osmótica local. O efeito geral é que as duas partículas adjacentes que produzem a pequena abertura são reunidas. Este impulso pode ser tão forte que excede todas as forças repulsivas, e com a adição da força de van-der-Waals, pode produzir a floculação das partículas. O efeito é chamado de floculação de esgotamento e também pode ser causado por partículas muito pequenas ou micelas de detergente presentes na dispersão.

Todos estes tipos de interação conduzem a um aumento de viscosidade. No entanto, embora estas forças coloidais ditem a forma da dispersão a uma velocidade de corte baixa, quando a velocidade de corte é maior do que um certo valor crítico, a viscosidade começa a diminuir. Eventualmente, as viscosidades atingem valores semelhantes a taxas de corte elevadas, em grande parte ditadas pelos efeitos hidrodinâmicos.

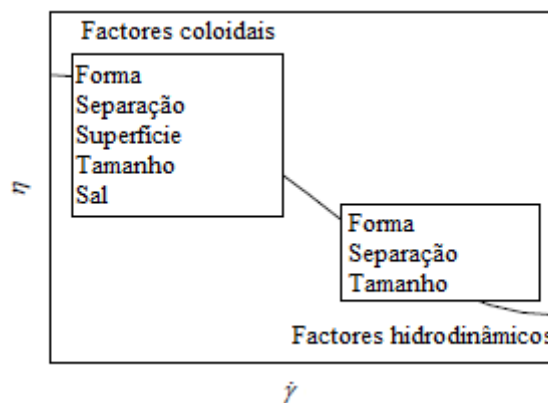


Figura 2.22 - Curva de fluxo de uma suspensão de partículas coloidais (viscosidade vs. taxa de corte), (Adaptado de Barnes H.A., 2000)

Na figura 2.22, pode observar-se que os efeitos coloidais ditam a viscosidade a taxas de corte baixas. No entanto, a velocidades de corte muito elevadas, os efeitos hidrodinâmicos controlam amplamente a situação e somente os três primeiros factores são importantes (Barnes H. A. et al., 1993), (Barnes H.A., 2000), (Brás A., 2010).

2.2.8.4 Técnicas de medição de parâmetros reológicos

Ao contrário da complexidade dos comportamentos reológicos que as argamassas podem apresentar, os ensaios, que tradicionalmente as caracterizam, são simples, como a mesa de fluidez, o viscosímetro capilar ou reómetro rotacional.

A variedade de instrumentos de medição de parâmetros reológicos é muito grande. Desde instrumentos simples, capazes de dar uma informação, ainda que indirecta, acerca da viscosidade de um fluido, passando pelos instrumentos altamente sofisticados, capazes de medir não só viscosidades e tensões normais, em regime estacionário ou transitório, mas também módulos e viscosidades complexas, em regimes oscilatórios, em função da taxa de corte (ou tensão de corte) no primeiro caso e da frequência no segundo, até aos aparelhos capazes de medir viscosidades extensionais. Podem dividir-se os aparelhos de medida de funções reológicas em três grandes grupos: reómetros de corte, reómetros (ou viscosímetros) capilares e os reómetros extensionais.

Os testes reológicos podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos. Nos testes dinâmicos a energia é fornecida ao material através de acções como a vibração, impacto ou corte. Já os testes estáticos baseiam-se apenas no fluxo do material sobre o seu próprio peso.

Neste trabalho de investigação foi usado um reómetro rotacional Bohlin Gemini HR^{nano}, com uma geometria de pratos paralelos, da Bohlin Instruments (Fig. 2.23).



Figura 2.23 – Reómetro rotacional Bohlin Gemini HRnano utilizado no trabalho

Os reômetros rotacionais são equipamentos de alta precisão dedicados à avaliação de propriedades reológicas de fluidos, suspensões, argamassas e betões. Determinam parâmetros como viscosidade e tensão de escoamento, através de dois princípios básicos de funcionamento: (1) uma velocidade de rotação é mantida constante e a resultante da torção gerada pela amostra é determinada, através de um dispositivo de detecção de tensão; (2) uma torção constante é aplicada ao instrumento de medição a fim de gerar a rotação e a velocidade de rotação resultante é então determinada. Nos métodos de rotação, o fluido é sujeito a um corte contínuo entre duas superfícies, em que uma ou ambas são rotativas. Estes dispositivos são capazes de aplicar um corte à amostra por um período ilimitado de tempo, permitindo que o comportamento transiente seja monitorizado ou que um estado de equilíbrio seja atingido, sob condições reométricas controladas. Os sistemas de rotação básicos consistem em quatro partes:

1. Uma ferramenta de medição com uma geometria bem definida;
2. Um aparelho para aplicar uma torção constante ou uma velocidade rotacional numa ampla gama de valores de tensão de corte ou taxa de corte;
3. Um aparelho para determinar a resultante de tensão ou de taxa de corte;
4. Sistema de controlo de temperatura para o fluido e para a ferramenta de medição.

A maioria dos reômetros é baseada na rotação relativa em torno de um eixo comum de uma das três geometrias: cilindros coaxiais, cone e prato ou pratos paralelos (Fig. 2.24). O fluido é colocado no espaço compreendido entre o sistema de medição (geometria de cones paralelos, neste caso), que é chamado de entreferro ou “gap”, em inglês (Barnes H. A. et al., 1993), (Koehler E. P. et al., 2003).

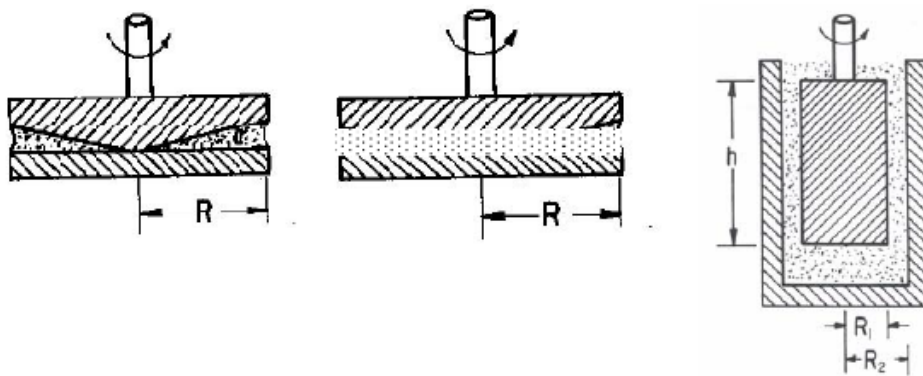


Figura 2.24 - Geometrias de um reómetro rotacional: cone e prato, pratos paralelos e cilindros coaxiais (Adaptado de Nielsen L.E., 1977)

3. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE CALDAS À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL

3.1 Introdução

Neste capítulo procede-se à caracterização reológica de caldas à base de cal hidráulica natural com diferentes teores de água e com adição de diferentes percentagens de um metacaulino e um superplastificante com o objectivo de avaliar a influência da constituição e contribuir para o desenvolvimento de uma calda de injeção para a consolidação de alvenarias antigas. A caracterização reológica é fundamental, uma vez que no processo de injeção de uma calda, esta é manuseada no estado fresco. Só assim, se pode garantir uma boa injectabilidade e estabilidade da calda durante um certo período de tempo.

Do ponto de vista reológico, o tipo e o número de parâmetros necessários para caracterizar um fluido como uma calda hidráulica depende do seu tipo de comportamento reológico. Segundo investigações anteriores (Bras A. et al., 2009), admite-se que o comportamento de uma calda de cal hidráulica pode ser comparado ao de um “fluido reofluidificante”, a partir duma dada tensão de corte, ou seja, um fluido cuja viscosidade diminui com o aumento da taxa de corte, o que resulta numa curva σ vs. $\dot{\gamma}$ com concavidade para baixo. Os modelos que melhor descrevem o comportamento reológico de argamassas são o modelo de Bingham modificado e o de Sisko, devido à possibilidade de medirem quatro parâmetros independentes, já que as argamassas resistem sem fluir a tensões de corte inferiores à tensão de cedência, mas acima desta, apresentam um comportamento “reofluidificante”. O modelo de Bingham deriva do modelo de Sisko:

$$\eta = \eta_{\infty} + K_2 \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3.1)$$

Onde K_2 é chamado de “consistência” e tem unidades Pa.sⁿ e n é chamado de índice da “lei da potência” e toma valores entre 0 e 1. Quanto mais o valor de n se aproximar de 1, menor será o carácter reofluidificante e mais se aproximará de um comportamento Newtoniano.

Se no modelo de Sisko se considerar $n=0$, obtém-se a equação do modelo de Bingham:

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{K_2}{\dot{\gamma}} \quad (3.2)$$

Que com uma redefinição de parâmetros pode ser escrito sob a forma,

$$\sigma = \sigma_y + \eta_p \dot{\gamma} \quad (3.3)$$

Onde σ é tensão de corte (Pa), σ_y é uma tensão de cedência (Pa), $\dot{\gamma}$ é a taxa de corte e η_p é a viscosidade plástica (Pa.s).

Este modelo pode ainda ser redefinido, dando origem à equação de Bingham modificada (Brás A., 2010):

$$\sigma = \sigma_y + \eta_p \times \dot{\gamma} + c \times \dot{\gamma}^2 \quad (3.4)$$

Os ensaios experimentais vão permitir determinar a viscosidade plástica (η_p), a tensão de cedência (σ_y), a consistência (K_2) e o índice de pseudoplasticidade ($n-1$).

As caldas hidráulicas também podem ser vistas como suspensões floculadas. Estas são dispersões, onde as partículas dispersas formam uma cadeia, que é responsável pelo ponto de cedência. Quanto mais forte for a cadeia, maior a tensão necessária para destruir a estrutura interna. Por outras palavras, a tensão de cedência está provavelmente associada com habilidade da calda em preencher os vazios e com a sua capacidade de escoar, quando lhe é aplicada uma dada tensão de corte.

A viscosidade e a consistência vão ser usadas como parâmetros que indicam se a calda se encontra em condições de ser injectada. Quanto maior for a consistência, maior será a viscosidade e quanto menor for a viscosidade, maior será a velocidade de escoamento dentro do meio poroso.

3.2 Desenvolvimento experimental

As caldas são constituídas no mínimo por um ligante e água. No entanto, para otimizar as suas características, podem ser utilizados ainda *fillers* (agregado em granulometria fina), tais como pozolanas (como é o caso do metacaulino) e adjuvantes (caso de superplastificante).

No âmbito do projecto financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia METACAL a orientação do trabalho definiu que nas caldas objecto desta campanha experimental seria avaliada a influência da adição de uma pozolana artificial, no caso um metacaulino. Uma vez que se pretendiam caldas que, após injeção e com fraco contacto com o dióxido de carbono do ambiente, pudessem endurecer rapidamente, a orientação do trabalho definiu a utilização de uma cal hidráulica natural, produzida em Portugal.

O desenvolvimento experimental que se apresenta nesta dissertação baseia-se na avaliação reológica de caldas constituídas por uma cal hidráulica natural e água, com eventual utilização de um metacaulino e de um superplastificante. O desenvolvimento experimental efectuado no âmbito desta dissertação, ao nível da formulação e preparação das caldas, decorreu em paralelo com a dissertação elaborada por Catarina Patrício. No âmbito da referida dissertação as mesmas caldas foram moldadas em provetes, que foram submetidos a curas distintas (húmida a 95% de humidade relativa, HR, em imersão e a 65% de HR). Os provetes de caldas efectuados foram submetidos, a diferentes idades, a ensaio de compressão e amostras dos provetes de caldas sujeitos à cura húmida foram caracterizados a nível mineralógico e microestrutural.

3.2.1 Materiais

3.2.1.1 Cal hidráulica natural (NHL 3.5)

A cal hidráulica é constituída por silicatos ($\text{SiO}_2 / 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$) que hidratando-se endurecem na água ou ao ar e também por óxido de cálcio (CaO) – pelo menos 25%, que continua livre e que vai endurecer por carbonatação ou por reacção com a pozolana. Utilizou-se a cal hidráulica natural NHL3.5 como ligante das caldas desenvolvidas.

A NHL3.5 utilizada foi produzida pela Secil, de acordo com a nova versão da norma NP EN 459-1:2011 (IPQ, 2011) e fornecida em Janeiro de 2012 e tem as características apresentadas nas tabelas seguintes, de acordo com a informação fornecida pelo fornecedor.

Tabela 5 - Características físicas da cal NHL 3.5 (Secil)

Características Físicas	Valor	Norma
Cor	Bege	
Baridade (Kg/dm^3)	$0,65 \pm 0,05$	EN 459-1
Densidade (g/cm^3)	2,7	
Finura (%)	$90 \mu\text{m} \leq 15,0$ $200 \mu\text{m} \leq 2,0$	EN 459-1
Blaine (cm^2/g)	9000	
Expansibilidade - método alternativo (mm)	≤ 20	EN 459-1
Água livre (%)	$\leq 2,0$	EN 459-1
Teor de ar (%)	≤ 5	EN 459-1
Penetração (mm)	$<10 \text{ e } > 50$	EN 459-1
Tempo de presa (h)	$> 1,0$ (inicial) $\leq 30,0$ (final)	EN 459-1

Tabela 6 - Características mecânicas da cal NHL 3.5 (Secil)

Características Mecânicas	Valor	Norma
Resistência mecânica à compressão 28 dias (Mpa)	$\geq 3,5$ e ≤ 10	EN 459-1

Tabela 7 - Características químicas da cal NHL 3.5 (Secil)

Análise Química (iq+) (%)		
	Out-12	Jan-12
CO ₂	25.160	25.660
Na Na ₂ O	0.071	0.084
Mg MgO	1.305	1.364
AL Al ₂ O ₃	1.888	1.840
Si SiO ₂	6.135	5.704
P P ₂ O ₅	0.035	0.033
S SO ₃	1.164	1.292
K K ₂ O	0.518	0.493
Ca CaO	62.061	62.073
Ti TiO ₂	0.156	0.136
Mn MnO	0.018	0.017
Fe Fe ₂ O ₃	1.389	1.218
Ni NiO	-	-
Rb Rb ₂ O	-	0.003
Sr SrO ₂	0.068	0.064
Y Y ₂ O ₃	0.002	0.002
Zr ZrO ₂	0.015	0.004
Ba Bao	-	-
Cl Cl	0.017	0.016

3.2.1.2 Metacaulino

Nas caldas desenvolvidas utilizou-se uma pozolana, no caso o metacaulino Argilcal M 1200 S produzido pela Imerys (França), que tem vindo a ser utilizado no âmbito do projecto METACAL.

As características técnicas do metacaulino utilizado estão apresentadas nas tabelas e figura seguintes, de acordo com as informações fornecidas pelo fornecedor.

Tabela 8 - Características físicas do metacaulino Argical-M 1200S (AGS Minéraux)

Características Físicas	
pH	6
Pozzolanic index (Chapelle test)	1400 mg Ca(OH) ₂ /g
Brightness photovolt blue filter	74%
Specific area (BET)	19 m ² /g
Water demand (Marsh cone)	1650 g/Kg
Specific gravity	2,2 g/cm ³
Bulk density	
Loose	250 Kg/m ³
Tamped	400 Kg/m ³

Tabela 9 - Análise química do metacaulino Argical-M 1200S (Gameiro A. et al., 2012)

Análise Química	
SiO ₂	54,39%
Al ₂ O ₃	39,36%
Fe ₂ O ₃	1,75%
MnO	0,01%
TiO ₂	1,55%
MgO	0,14%
CaO	0,10%
Na ₂ O	-
K ₂ O	1,03%
P ₂ O ₅	0,06%
Loss on ignition	1,90%

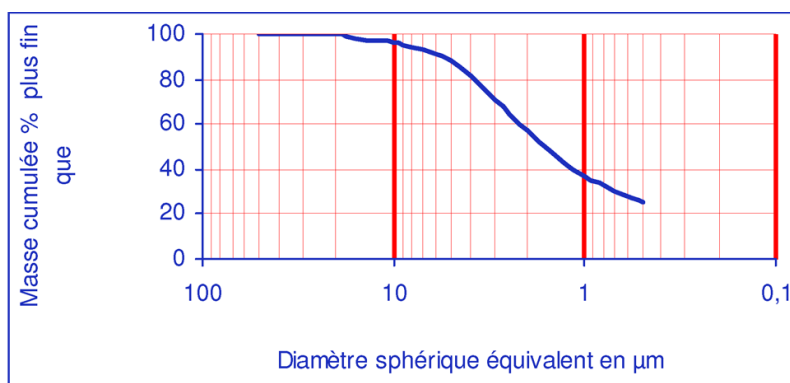


Figura 3.1 - Análise granulométrica - inferior a 2 μm: 55% (AGS Minéraux)

3.2.1.3 Superplastificante

Os plastificantes permitem a redução da quantidade de água de amassadura e fluidificam o material, ou seja, possibilitam um aumento da trabalhabilidade sem ser necessário aumentar a quantidade de água. Os principais efeitos secundários dos plastificantes são o retardamento da presa e a redução das resistências iniciais. Os superplastificantes são mais poderosos do que os plastificantes, concebendo às argamassas maior fluidez e trabalhabilidade do que os plastificantes. As suas limitações são o seu custo elevado e a curta duração de acção. Os superplastificantes são agentes activos de superfície, ou seja, modificam as cargas superficiais das partículas do ligante e assim fazem com que as partículas se dispersem. Deste modo, a capacidade de fluxo e consistência é aumentada. Os superplastificantes têm reactividade variada, dependendo da sua configuração química e peso molecular. A sua reactividade ou capacidade para dispersar as partículas, também depende do tipo de ligante utilizado (Björnström J. et al., 2003).

O superplastificante utilizado é o Glenium Sky 617 da BASF e as suas características técnicas estão apresentadas na tabela abaixo, de acordo com as informações fornecidas pelo fornecedor.

Tabela 10 - Características técnicas do superplastificante Glenium Sky 544 da Basf (BASF)

Marcação CE	Segundo NP EN 934-2 como T11.1, T11.2
Aparência	Líquido castanho
Densidade relativa (20°C)	1,05 ± 0,02 g/cm ³
pH	7,3 ± 1,5
Teor em iões cloreto (%)	≤ 0.1

3.2.2 Constituição das caldas

As caldas deste estudo são constituídas por cal hidráulica NHL 3.5, água corrente e eventualmente, metacaulino e superplastificante. Quando foi utilizado metacaulino, este substituiu parcialmente a massa correspondente do ligante; quando foi utilizado superplastificante, este foi adicionado em percentagem de massa do ligante e da pozolana. Nas tabelas 11 e 12, apresentam-se as quantidades e percentagens de cada material para uma relação água/ligante de 0,5 e outra de 0,6, em que o ligante se considerou a soma de NHL3.5 e metacaulino.

Para além da variação da relação água/ligante, para se poder avaliar a influência do metacaulino e do superplastificante no comportamento das caldas compostas por cal hidráulica natural, foram ensaiadas

caldas com diferentes percentagens de cada material para as duas relações água/ligante. Assim, efectuaram-se 3 variações na percentagem de metacaulino e 3 variações na quantidade de superplastificante para cada relação água/ligante, resultando assim, um total de 18 caldas ensaiadas.

Tabela 11 - Composições de caldas com rácio água/ligante 0,5

Calda	(W%)			A/L	Massa (g)			
	NHL 3.5	MK	SP		NHL 3.5	MK	SP	Água
1 A0,5M0S0	100	0	0	0,5	3000	0	0	1500
2 A0,5M0S0,3			0,3				9	
3 A0,5M0S0,6			0,6				18	
4 A0,5M5S0	95	5	0		2850	150	0	1500
5 A0,5M5S0,3			0,3				9	
6 A0,5M5S0,6			0,6				18	
7 A0,5M2,5S0	97,5	2,5	0		2925	75	0	1500
8 A0,5M2,5S0,3			0,3				9	
9 A0,5M2,5S0,6			0,6				18	

Tabela 12 - Composições de caldas com rácio água/ligante 0,6

Calda	(W%)			A/L	Massa (g)			
	NHL 3.5	MK	SP		NHL 3.5	MK	SP	Água
10 A0,6M0S0	100	0	0	0,6	3000	0	0	1800
11 A0,6M0S0,3			0,3				9	
12 A0,6M0S0,6			0,6				18	
13 A0,6M5S0	95	5	0		1995	105	0	1260
14 A0,6M5S0,3			0,3				6,3	
15 A0,6M5S0,6			0,6				12,6	
16 A0,6M2,5S0	97,5	2,5	0		2925	75	0	1800
17 A0,6M2,5S0,3			0,3				9	
18 A0,6M2,5S0,6			0,6				18	

3.2.3 Processo de mistura

Para o processo de mistura utilizou-se uma misturadora com ponta helicoidal operada manualmente e um balde com 30 litros de capacidade (Fig. 3.2). Primeiramente colocou-se 75% do total de água a utilizar, adicionou-se o ligante (só cal ou cal e metacaulino) e misturou-se a 800rpm durante oito minutos. De seguida, adicionaram-se os restantes 25% da água total (com ou sem superplastificante dissolvido) durante trinta segundos, sem deixar de mexer. Por fim, misturou-se durante mais três minutos e meio.



Figura 3.2 – Misturadora com ponta helicoidal utilizada na amassadura das caldas

3.2.4 Parâmetros reológicos

Neste estudo utilizou-se um reómetro rotacional Bohlin Gemini HR^{nano}, com uma geometria prato/prato de diâmetro igual a quarenta milímetros, com um “gap” de 2 milímetros (que corresponde a aproximadamente dez vezes o tamanho máximo das partículas). As amostras foram sujeitas a um “loop test”, passados 11 minutos de ter sido terminada a sua preparação, com um “pre-shear” com taxa de corte de 10s^{-1} durante 30 segundos. O “loop test” consiste numa subida linear da taxa de corte de zero a um máximo, neste caso de 300 s^{-1} e de seguida regressa a zero com o mesmo tipo de evolução de taxas de corte. Os tempos de cisalhamento foram escolhidos de modo a garantir que o estado estacionário tivesse sido atingido (2000 unidades de deformação).



Figura 3.3 - Amostra de calda após ter sido ensaiada no reómetro Bohlin Gemini HR^{nano}

Para verificação da reprodutibilidade dos resultados e por motivos de problemas com o equipamento e necessidade de validação de resultados, foram realizadas várias repetições de caldas.

3.2.5 Análise de resultados

Com o intuito de obter os parâmetros necessários para analisar a influência dos diferentes materiais constituintes das caldas e admitindo que o comportamento das caldas de cal hidráulica natural pode ser comparado com o comportamento de um fluido reofluidificante foram adoptados dois modelos matemáticos, o de Sisko e o de Bingham modificado. Com o primeiro modelo obtém-se a consistência (K_2) das caldas e o índice “lei da potência” (n). Para calcular a viscosidade plástica (η_p) e a tensão de cedência (σ_y) utilizou-se a equação de Bingham modificada. Estes modelos matemáticos foram aplicados nos dados obtidos através dos ensaios reológicos realizados nas diferentes caldas. Para cada ensaio foram analisados gráficos da tensão de corte em função da taxa de corte e da viscosidade aparente em função da taxa de corte. As figuras 3.4 e 3.5, apresentam um exemplo das curvas obtidas nos ensaios. No ANEXO I apresentam-se as curvas das restantes caldas ensaiadas.

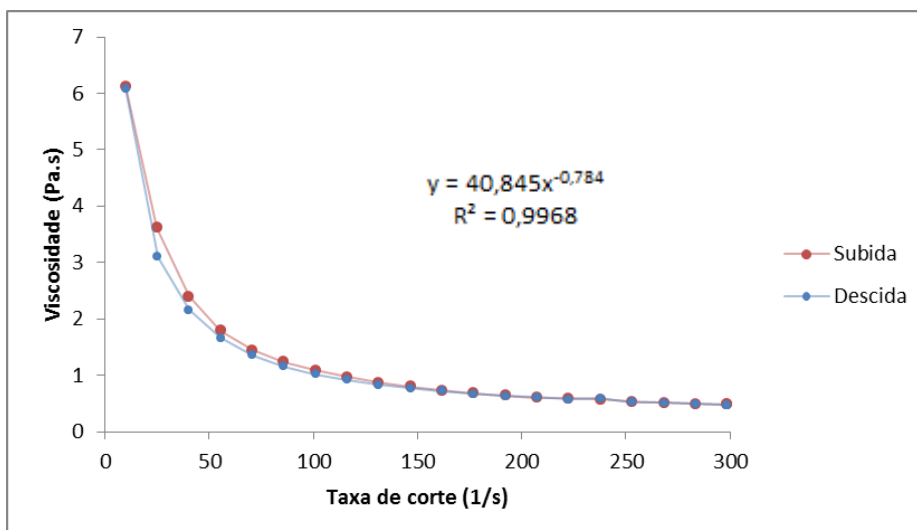


Figura 3.4 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte da calda 1 (A0,5M0S0)

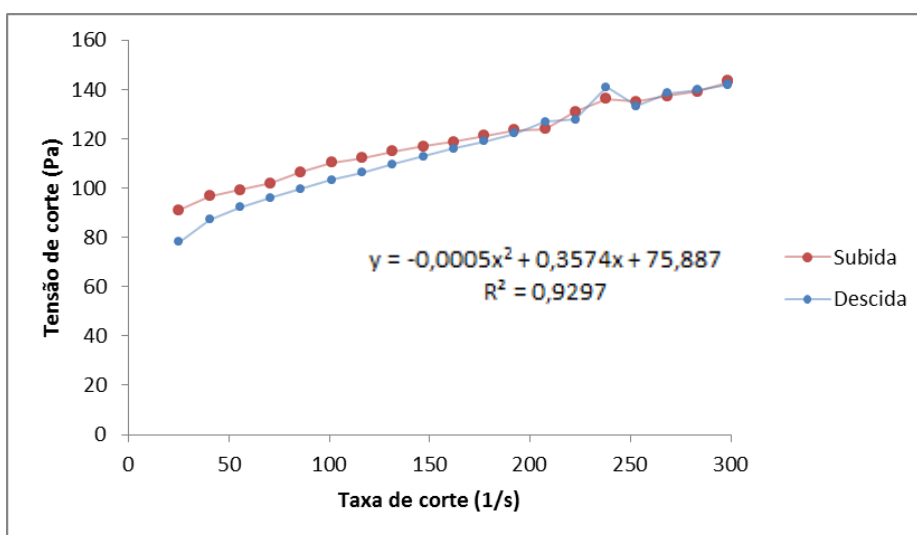


Figura 3.5 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte da calda 1 (A0,5M0S0)

Como seria expectável existe um decréscimo da viscosidade das caldas, quando a taxa de corte aumenta, mostrando assim, um comportamento de “fluido refluidificante”. A forma das partículas é a principal responsável por este tipo de comportamento das caldas. Uma das principais razões que leva à diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de corte é o facto das partículas de forma alongada que compõem as caldas de cal hidráulica natural tenderem a adquirir orientações que favorecem o aumento do fluxo e deste modo a diminuição da viscosidade (Bras A. et al., 2009).

Na tabela seguinte, estão apresentados os valores da viscosidade plástica, tensão de cedência, consistência e índice “lei da potência” de cada calda.

Tabela 13 - Valores de viscosidade plástica, tensão de cedência, consistência e índice "lei da potência" de cada calda

Calda	Tensão de cedência (Pa)	Viscosidade Plástica (Pa.s)	K_2 (Pa.s ⁿ)	n
1 (A0,5M0S0)	75,89	0,35	40,85	0,22
2 (A0,5M0S0,3)	46,28	0,28	19,91	0,3
3 (A0,5M0S0,6)	22,34	0,15	8,17	0,35
4 (A0,5M5S0)	153,75	0,45	129,68	0,09
5 (A0,5M5S0,3)	140,10	0,43	88,21	0,16
6 (A0,5M5S0,6)	55,47	0,31	25,61	0,27
7 (A0,5M2,5S0)	94,59	0,52	88,00	0,13
8 (A0,5M2,5S0,3)	77,38	0,47	45,82	0,21
9 (A0,5M2,5S0,6)	45,73	0,23	11,84	0,34
10 (A0,6M0S0)	22,61	0,24	8,35	0,38
11 (A0,6M0S0,3)	9,44	0,14	2,96	0,45
12 (A0,6M0S0,6)	4,33	0,04	0,82	0,56
13 (A0,6M5S0)	57,36	0,25	30,63	0,22
14 (A0,6M5S0,3)	25,27	0,18	10,59	0,32
15 (A0,6M5S0,6)	11,19	0,10	3,68	0,4
16 (A0,6M2,5S0)	40,65	0,37	16,38	0,28
17 (A0,6M2,5S0,3)	22,34	0,18	4,93	0,41
18 (A0,6M2,5S0,6)	7,42	0,10	1,81	0,46

Tensão de cedência:

Conforme demonstrado na tabela 13 e figuras 3.6 e 3.7, o valor da tensão de cedência foi influenciado por diferentes dosagens de superplastificante, de metacaulino e diferentes rácios água/ligante. Com base nas figuras 3.6, quando a dosagem de superplastificante e o rácio água/ligante se mantiveram constantes e se aumentou a dosagem de metacaulino, verificou-se um aumento do valor da tensão de cedência. Por outro lado, um aumento do teor de superplastificante resulta numa diminuição da tensão de cedência, como se pode verificar nas figuras 3.7. Comparando as duas linhas de dispersão de qualquer um dos gráficos das figuras 3.6 e 3.7, verifica-se que um aumento do rácio água/ligante também leva a uma redução da tensão de cedência. Portanto, o rácio água/ligante e o superplastificante são dois factores favoráveis, uma vez que quanto menor for a tensão de cedência mais facilitada é a injeção, necessitando de menores pressões. O superplastificante, quando aplicado com uma percentagem de 0,6%, é ligeiramente mais influente, que o rácio água/ligante, pois atingem-se tensões mais baixas com a sua aplicação. Também se pode verificar que as caldas com um rácio água/ligante de 0,6 são mais estáveis, isto é, são menos influenciadas pela variação do metacaulino e do superplastificante.

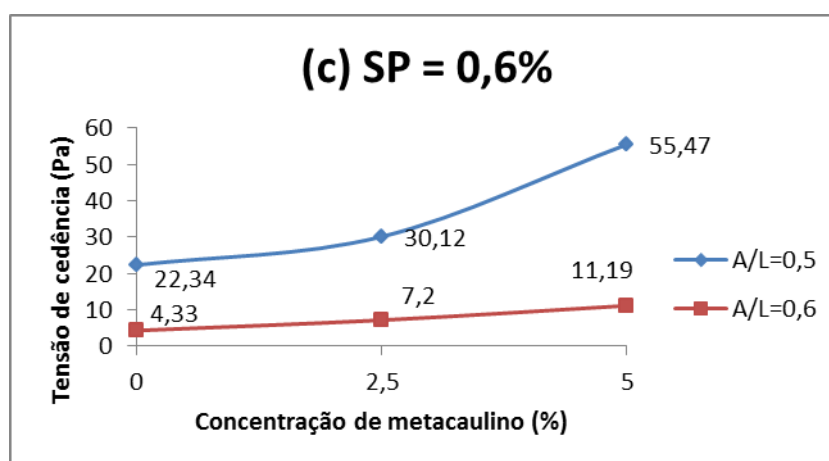
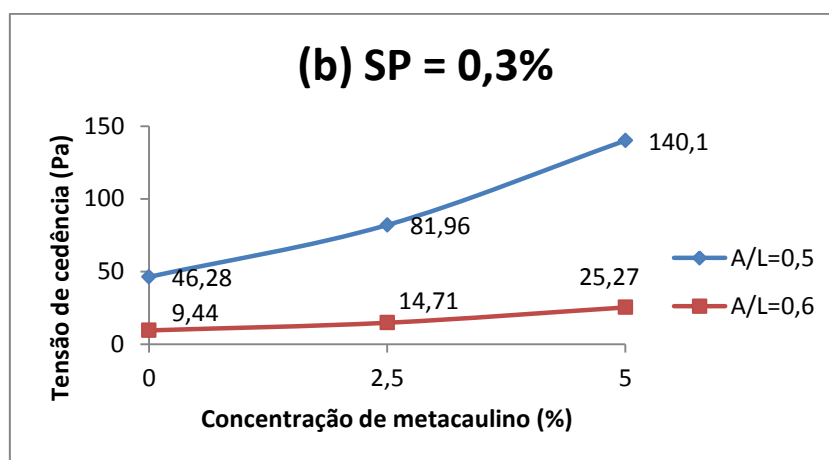
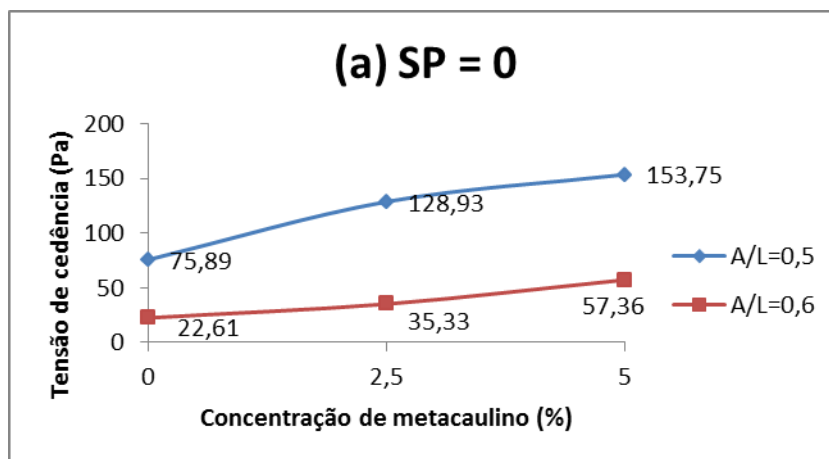


Figura 3.6 - Variação da tensão de cedência para diferentes percentagens de metacaulino

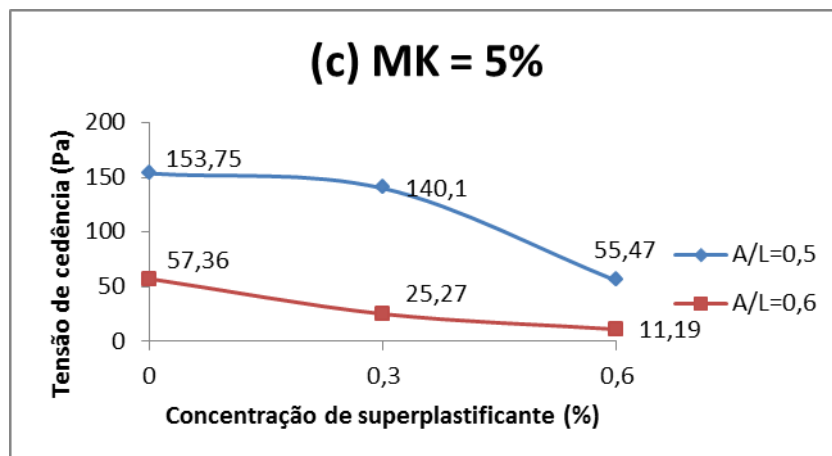
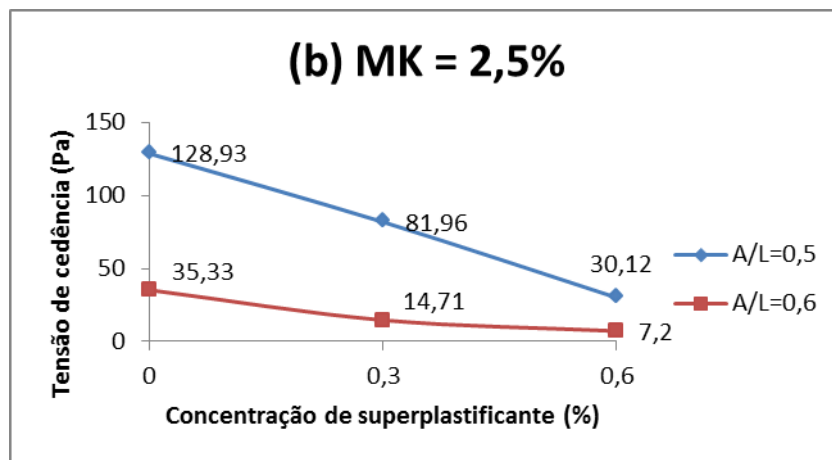
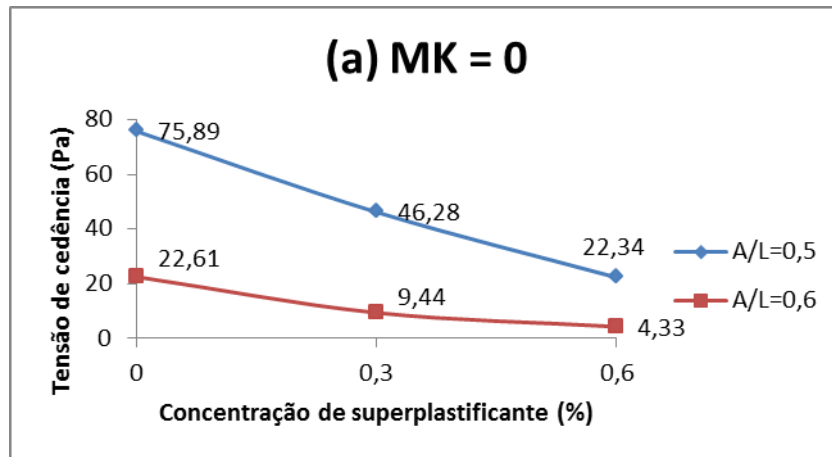
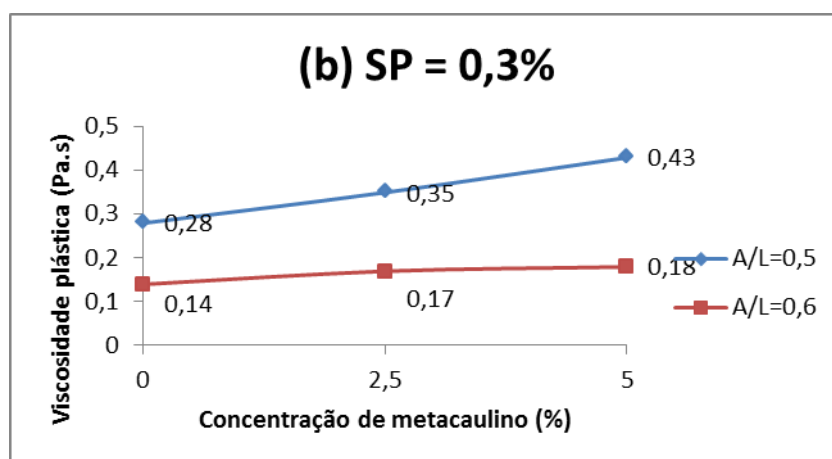
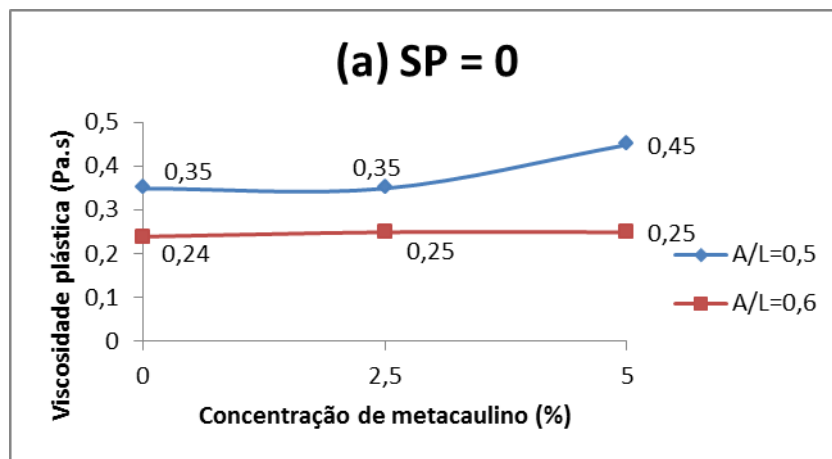


Figura 3.7 - Variação da tensão de cedência para diferentes percentagens de superplastificante

Viscosidade plástica:

Conforme demonstrado na tabela 13 e figuras 3.8 e 3.9, o valor da viscosidade plástica foi influenciado por diferentes dosagens de superplastificante, de metacaulino e diferentes rácios água/ligante. Com base nas figuras 3.8, quando a dosagem de superplastificante e o rácio água/ligante

se mantiveram constantes e se aumentou a dosagem de metacaulino, verificou-se um aumento do valor da viscosidade plástica. Este aumento foi menos notório, para caldas com reduzidas quantidades de metacaulino, com relação água/ligante de 0,6 e sem superplastificante. Por outro lado, um aumento do teor de superplastificante resulta numa diminuição da viscosidade plástica, como se pode verificar nas figuras 3.9. Para caldas com metacaulino e com rácio água/ligante de 0,5 a redução da viscosidade plástica só é notória quando a percentagem de superplastificante aplicada é superior a 0,3%. Comparando as duas linhas de dispersão de qualquer um dos gráficos das figuras 3.8 e 3.9, verifica-se que um aumento do rácio água/ligante também leva a uma redução da viscosidade plástica. Logo, o rácio água/ligante e o superplastificante são, uma vez mais e tal como era esperado, dois factores favoráveis. O superplastificante, quando aplicado com uma percentagem de 0,6% e em caldas sem metacaulino, é ligeiramente mais influente, que o rácio água/ligante, pois atingem-se tensões mais baixas com a sua aplicação. Por outro lado, em caldas com percentagens de metacaulino de 5%, o rácio água/ligante é um factor mais influente do que o superplastificante.



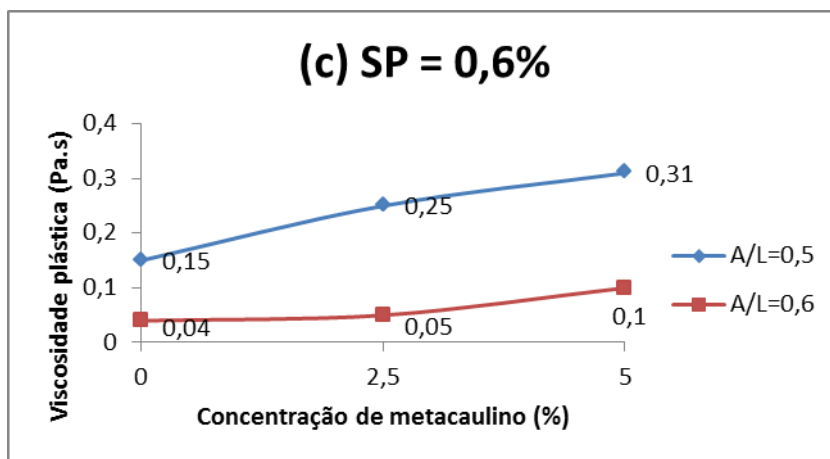
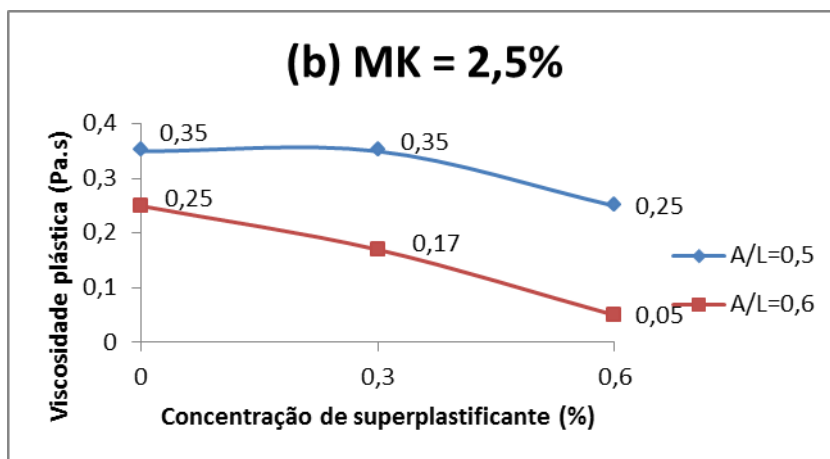
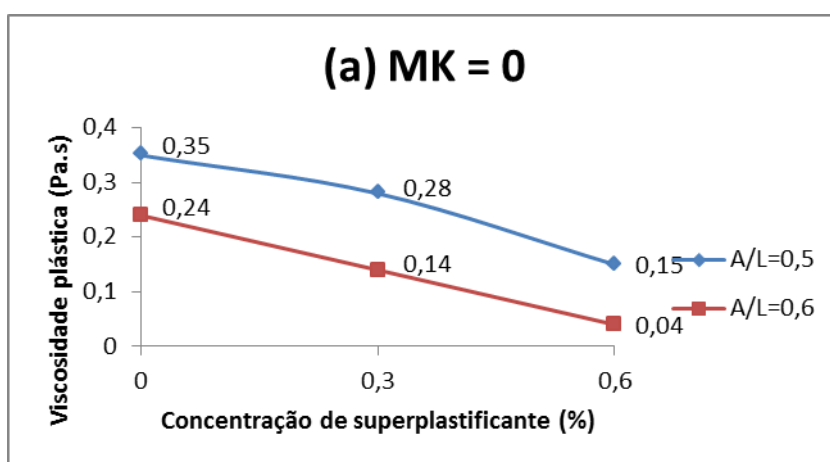


Figura 3.8 - Variação da viscosidade plástica para diferentes percentagens de metacaulino



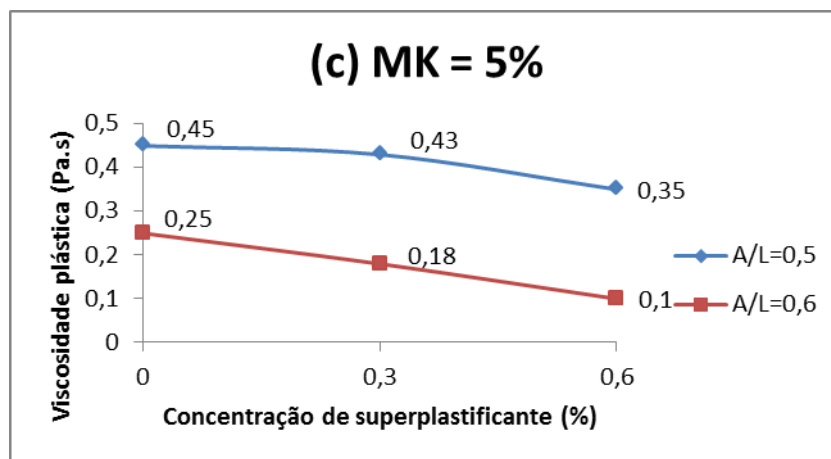


Figura 3.9 - Variação da viscosidade plástica para diferentes percentagens de superplastificante

Discussão do efeito do superplastificante e do metacaulino:

Um aumento no teor de superplastificante resultou numa redução da tensão de cedência, da viscosidade plástica, da consistência e num aumento do índice “lei da potência”. Isto pode ser atribuído à intensificação das repulsões estéricas e electrostáticas entre as partículas do ligante, que reagem com o superplastificante, conduzindo a uma melhor desfloculação das partículas da calda e consequentemente à redução da viscosidade plástica e consistência. A desfloculação das partículas é também responsável pela diminuição do carácter reofluidificante, o que se traduz por um aumento do índice da “lei da potência”. Estes resultados estão em conformidade com as conclusões de outros estudos (Baltazar L. et al., 2013), (Wallevik O., 2011), (Björnström J. et al., 2003), (Sonebi M. et al., 2012).

O rácio A/L, do ponto de vista reológico, tem um efeito semelhante ao do superplastificante, como seria de esperar de acordo com os resultados obtidos noutros estudos (Baltazar L. et al., 2013), (Wallevik O., 2011). Contudo, a simples adição de água com o intuito de tornar a calda mais fluida não é a opção mais adequada, uma vez que um maior rácio A/L enfraquece a calda quando esta endurece, aumenta as deformações de retracção e aumenta a quantidade de água livre, que contribui para fenómenos de instabilidade (Baltazar L. et al., 2013).

Um aumento da percentagem de metacaulino resultou num aumento da tensão de cedência, da viscosidade plástica, da consistência e numa diminuição do índice “lei da potência”. Isto deveu-se à elevada superfície específica das partículas do metacaulino, resultando numa redução da presença de água na calda, que é necessária para a sua lubrificação e a um aumento do carácter reofluidificante. Estes resultados estão em conformidade com outros estudos (Sonebi M. et al., 2012), (Moulin E. et al., 2001).

Como é sabido, um dos principais requisitos para um bom desempenho de uma calda de injeção é a sua habilidade para preencher os vazios. Para uma calda ter uma boa capacidade de escoamento dentro do meio poroso, as suas tensão de cedência, viscosidade plástica e consistência devem ser tão baixas quanto possível. Em relação ao índice da “lei da potência”, quanto maior for o seu valor, menor será o carácter reofluidificante da calda. Esta situação, representa um factor positivo, uma vez que num fluido com comportamento reofluidificante, a diminuição da velocidade de escoamento conduz ao aumento da viscosidade. Deste modo pode concluir-se que a calda que apresenta parâmetros mais favoráveis para uma injeção é a calda 12 ($A/L=0,6$; $MK=0$; $SP=0,6\%$), com relação água/ligante de 0,6, sem metacaulino e com 0,6% de superplastificante. Do estudo realizado salienta-se que o metacaulino não favoreceu o comportamento das caldas no estado fresco; porém fornece outras propriedades já referidas anteriormente na bibliografia, tais como melhoria do comportamento relativo ao transporte de água, maior capacidade de resistir ao ataque de sais, maior durabilidade e maiores resistências mecânicas, que podem ser fundamentais em casos específicos.

4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os efeitos da adição de diferentes dosagens de metacaulino (2,5% e 5%), superplastificante (0,3% e 0,6%) e de diferentes rácios água/ligante (0,5 e 0,6) foram estudados, nas propriedades reológicas das caldas de injeção. Com base nos resultados desta investigação, podem ser salientadas as seguintes conclusões:

- A adição de superplastificante tem um efeito positivo nos valores da tensão de cedência, viscosidade plástica, consistência e índice “lei da potência”. Um aumento da dosagem de superplastificante resulta num aumento da fluidez da calda e numa redução do seu carácter “reofluidificante”. O superplastificante é absorvido pelos grãos do ligante, os quais adquirem uma carga electrostática, o que leva à dispersão das partículas de ligante e ao aumento da fluidez;
- O aumento do rácio água/ligante, tal como, o superplastificante tem um efeito positivo nos parâmetros reológicos das caldas. O seu aumento, também provoca um aumento da fluidez e uma redução do carácter “reofluidificante”;
- O aumento da percentagem de metacaulino, em termos reológicos, tem um efeito negativo nos valores da tensão de cedência, viscosidade plástica, consistência e índice “lei da potência”. Um aumento da dosagem de metacaulino resulta numa redução da fluidez e num aumento do carácter “reofluidificante”. Isto deve-se ao aumento da necessidade de água induzido pela elevada área específica das partículas de metacaulino;
- O aumento do rácio água/ligante e do teor de superplastificante são factores positivos na injeção de caldas uma vez que promovem uma melhor capacidade de escoamento dentro de um meio poroso e deste modo uma maior habilidade de preenchimento de vazios.

Deve realçar-se que os resultados obtidos nesta investigação são válidos para o tipo de materiais ensaiados e dentro do intervalo de parâmetros utilizados neste estudo. Por isso, é necessária ainda mais pesquisa experimental relativamente ao estudo reológico de caldas de injeção. Este estudo pode ser facilmente alargado através da utilização de diferentes ligantes, pozolanas, fileres e de diferentes percentagens dos materiais utilizados.

Uma vez que casos de aplicação específicos podem requerer características também específicas das caldas, esta avaliação reológica deve ser cruzada com caracterização complementar.

BIBLIOGRAFIA

Alexandrou A.N., Constantinou N., Georgiou G., (2009) “Shear rejuvenation, aging and shear banding in yield stress fluids”, *J. Non-Newtonian Fluid Mech*, 158, 6-17.

Appleton J., (2003) “Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e Tecnologias de Intervenção”, Lisboa: Edições Orion.

Azeiteiro L., (2011) “Estudo de caldas de injeção para consolidação de revestimentos”, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia dos Materiais, Universidade de Aveiro.

Baltazar L., Henriques F., Jorne F., Cidade M., (2013) “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*, 52, 127-138.

Banfill P.F.G., (1994) "Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials", *Construction and Building Materials*, 8, 1, 43-50.

Barnes H. A., Hutton J. F., Walters K., (1993) “An Introduction to Rheology”, Elsevier Publishers.

Barnes H.A., (1997) “Thixotropy – a review”, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 70, 1-33.

Barnes H.A., (2000) “A Handbook of Elementary Rheology”, University of Wales, Institute of Non-Newtonian, Fluid Mechanics, Aberystwyth.

Binda L., (2006) “The Difficult Choice of Materials Used for the Repair of Brick and Stone Masonry Walls”, 1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, Cairo, Egypt.

Binda L., Baronio G., Modena C., (1993) “Strengthening of masonries by injection technique”, 6th North American Masonry Conference, Philadelphia, Pennsylvania, June 6-9, 1-15.

Binda L., Modena C., Baronio G., Abbaneo S., (1997) “Repair and Investigation Techniques for Stone Masonry Walls”, *Construction and Building Materials*, 11(3), 133-142.

Binda L., Saisi A., (2001) “State of the art of research on historic structures in Italy”, Department of Structural Engineering, Politecnico of Milan, Italy.

Binda L., Saisi A., Tiraboschi C., (2000) “Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries”, *Construction and Building Materials*, 14(4), 199-233.

Birley A.W., Haworth B., Batchelor J., (1991) “Physics of Plastics: Processing, Properties and Materials Engineering”, Hanser Publishers.

Björnström J., Chandra S., (2003) “Effect of Superplasticizers on the Rheological Properties of Cements”, *Materials and Structures*, 36, 685-692.

Brás A., (2010) “Grout Optimization for Masonry Consolidation”, tese de Doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Bras A., Henriques F., (2009) “The influence of the mixing procedures on the optimization of fresh grout properties”, RILEM Materials and Structures, 42, 1423-1432.

Bras A., Henriques F., Cidade M.T., (2010) “Effect of environmental temperature and fly ash addition in hydraulic lime grout behaviour”, Construction and Building Materials, 24, 1511-1517.

BSI BS EN 459-1, (2010) “Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria”.

Carneiro J., (2012) “Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa.

Carta de Veneza, (1964) Carta Internacional sobre a conservação e restauro dos monumentos e dos sítios, Veneza.

Corradi M., Borri A., Vignoli A., (2002) “Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria-Marche earthquake of 1997-1998”, Construction and Building Materials, 16(4), 229-239.

Corradi M., Tedeschi C., Binda L., Borri A., (2008) “Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing”, Construction and Building Materials, 22(4), 463-472.

Faria P., Silva V., Flores-Colen I., (2012) “Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais. Avaliação laboratorial”, 4º Congresso Português de Argamassas e Etics, Coimbra.

Faria P., (2004) “Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes”, Tese de doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Felgueiras N., (2011) “Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino sujeitas a ambientes de diferente humidade relativa”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa.

Ferraris C., Obla K., Hill R., (2001) “The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete”, Cement and Concrete Research, 31, 245-255.

- Gameiro A., Santos-Silva A., Faria P., Branco T., Veiga R., Velosa A., (2012) “Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio”, Submitted to Cement and Concrete Composites.
- Gelmi A., Modena C., Rossi P.P., Zaninetti A., (1993) “Mechanical characterization of stone masonry structures in old urban nuclei”, 6th North American Masonry Conference, Philadelphia, Pennsylvania, June 6-9, 505-516.
- Kalagri A., Miltiadou-Fezans A., Vintzileou E., (2010) “Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures”, *Materials and Structures*, 43, 1135-1146.
- Koehler E. P., Fowler D. W., (2003) “Summary of Concrete Workability Test Methods”, International Center for Aggregates Research, University of Texas.
- Modena C., (1997) “Criteria for cautious repair of historic buildings. In Evaluation and Strengthening of Existing Masonry Structures”, L. Binda & C. Modena Ed., 25-42.
- Modena C., Valluzzi M., (2006) “Mechanical behaviour of masonry structures strengthened with different improvement techniques”, Springer Netherlands, 137-156.
- Modena C., Valluzzi M., (2007) “Repair techniques and long-term damage of massive structures”, WIT press, 175-204.
- Moulin E., Blanc P., Sorrentino D., (2001) “Influence of key cement chemical parameter on the properties of MK blended cement”, *Cem Concr Compos*, 23(6), 463-9.
- Nielsen L.E., (1977) “Polymer Rheology”, Marcel Dekker, Inc.
- Olson R.M., Wright S.J., (1990) “Essentials of Engineering Fluid Mechanics”, Harper and Row, Publishers, 638.
- Roque J., (2002) “Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Rosquoët F., Alexis A., Khelidj A., Phelipot A., (2003) “Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation”, *Cement and Concrete Research*, 33, 713-722.
- Roussel N. (2005) “Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, 35, 1656-1664.
- Roy V., (1996) “Rheological and Mechanical Behavior of High Volume Fly Ash Cement Grouts”, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada.

- Sonebi M., Lachemi M., Hossain K.M.A., (2012) "Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture", *Construction and Building Materials*, 38, 126-138.
- Toumbakari E., Van Gemert D., Tassios T.P., Tenoutasse N., (1999) "Effect of mixing procedure on injectability of cementitious grouts", *Cement and Concrete Research*, 29, 867-872.
- Valluzzi M., (2000) "Comportamento meccanico di murature consolidate con material e tecniche a base di calce", Università di Padova, Italy.
- Valluzzi M., (2007) "On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation", *Materials and Structures*, 40(7), 723-743.
- Van Gemert D., Van Rickstal F., Ignoul S., Toumbakari E., Van Balen K., (2003) "Structural Consolidation and Strengthening of Masonry: Historical Overview and Evolution", MSR VI International Conference Materials Science and Restoration, Karlsruhe, Seminar Consolidation of Masonry, *Advances in Materials Science and Restoration AMSR 1*, 1-20.
- Van Rickstal F., (2000) "Grout injection of masonry, scientific approach and modeling", PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.
- Velosa A., (2006) "Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Vintzileou E., Miltiadou-Fezans A., (2008) "Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts", *Engineering Structures*, 30, 2265-2276.
- Wallevik O., (2009) "Introductions to Rheology of Fresh Concrete", Course compendium, ICI Rheocenter course, 17th-18th August 2009, Reyjavik, Iceland.
- Wallevik O., Wallevik J., (2011) "Rheology as a tool in concrete science: the use of rheographs and workability boxes", *Cem Concr Res*, 41, 1279-1288.

ANEXO I

Neste anexo estão presentes os gráficos da tensão de corte em função da taxa de corte e da viscosidade em função da taxa de corte de todas as caldas, obtidos através dos ensaios no reómetro rotacional.

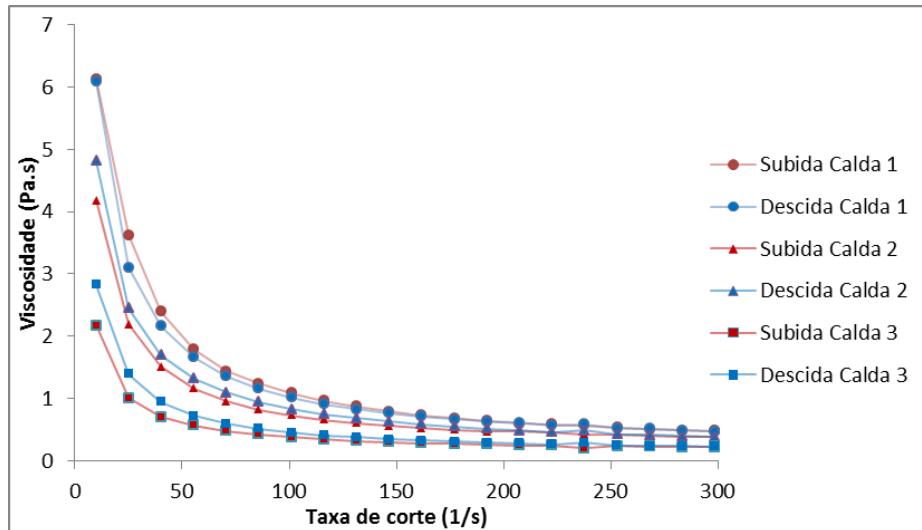


Figura I.1 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 1, 2 e 3

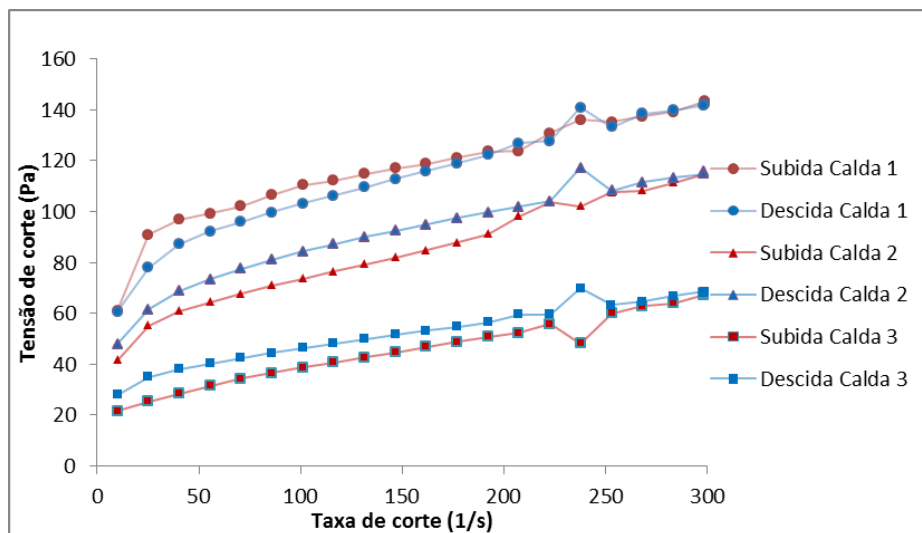


Figura I.2 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 1, 2 e 3

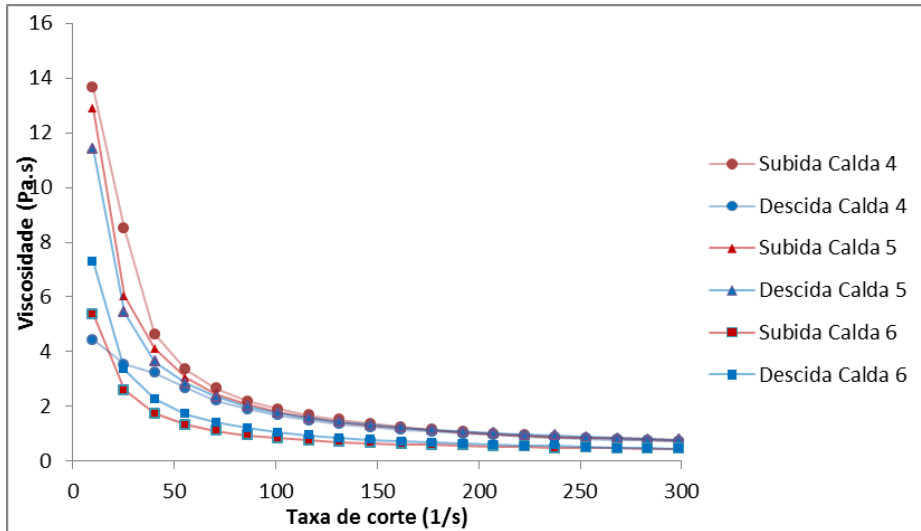


Figura I.3 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 4, 5 e 6

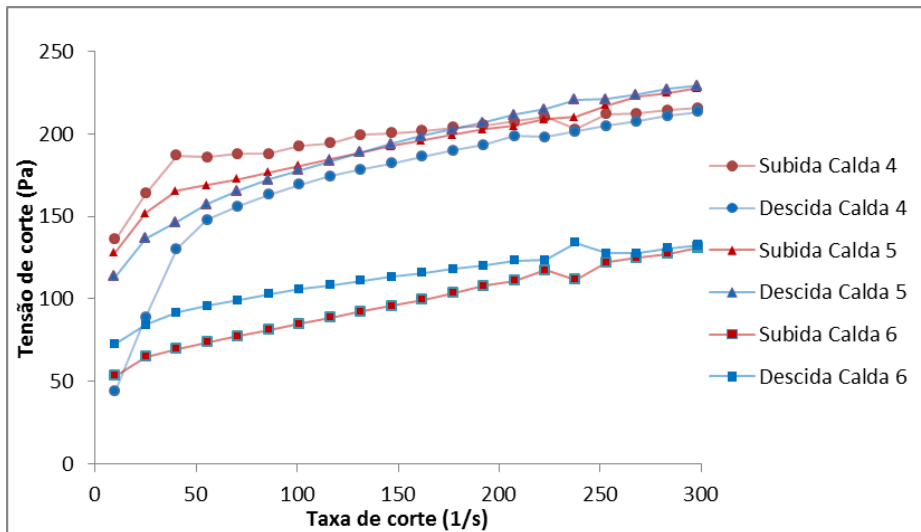


Figura I.4 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 4, 5 e 6

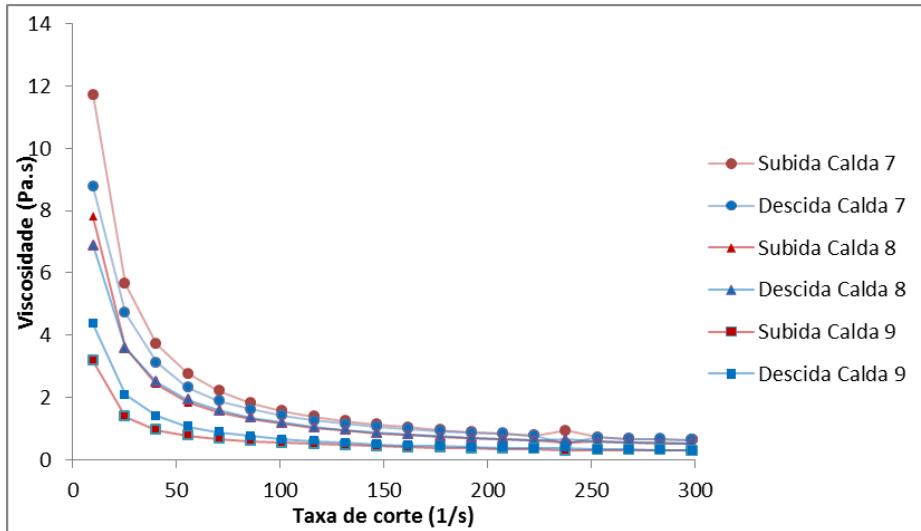


Figura I.5 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 7, 8 e 9

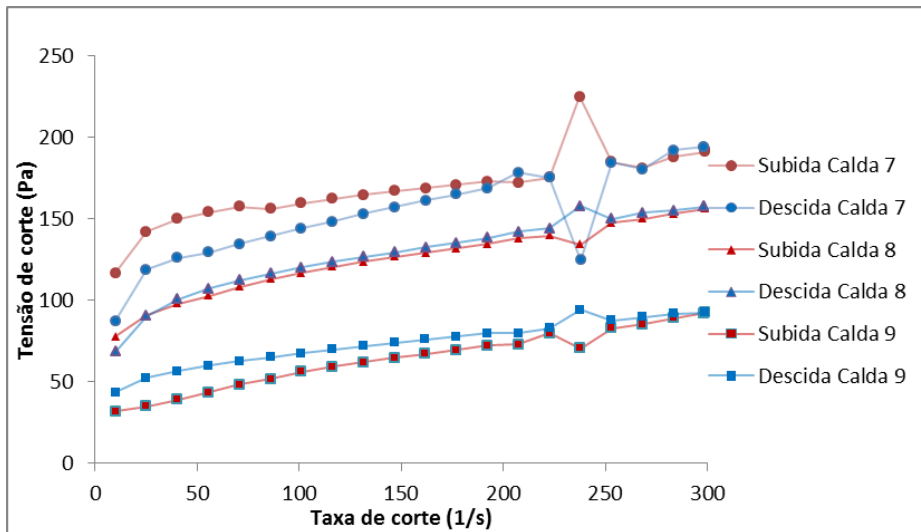


Figura I.6 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 7, 8 e 9

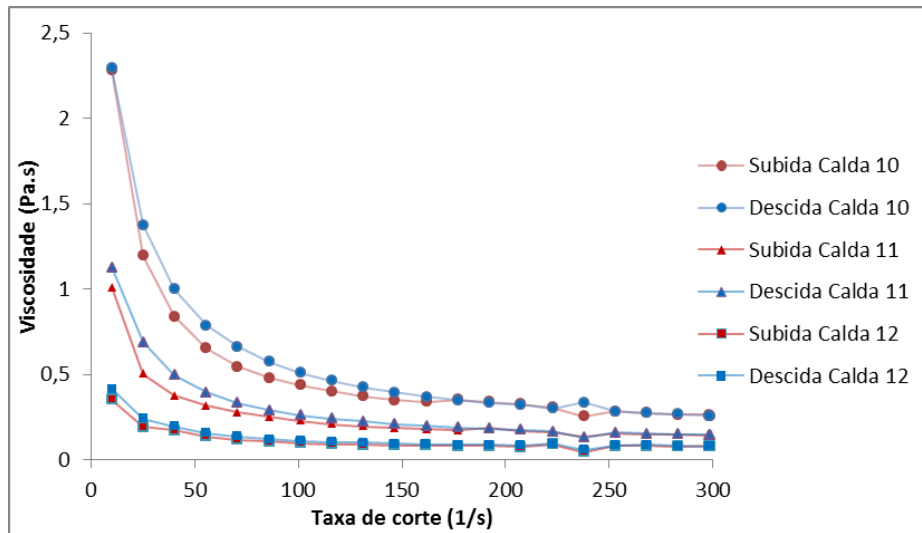


Figura I.7 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 10, 11 e 12

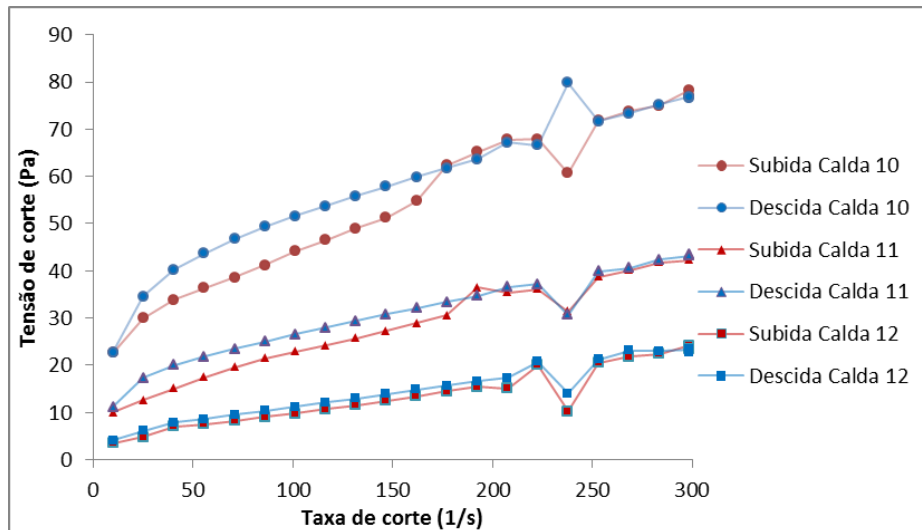


Figura I.8 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 10, 11 e 12

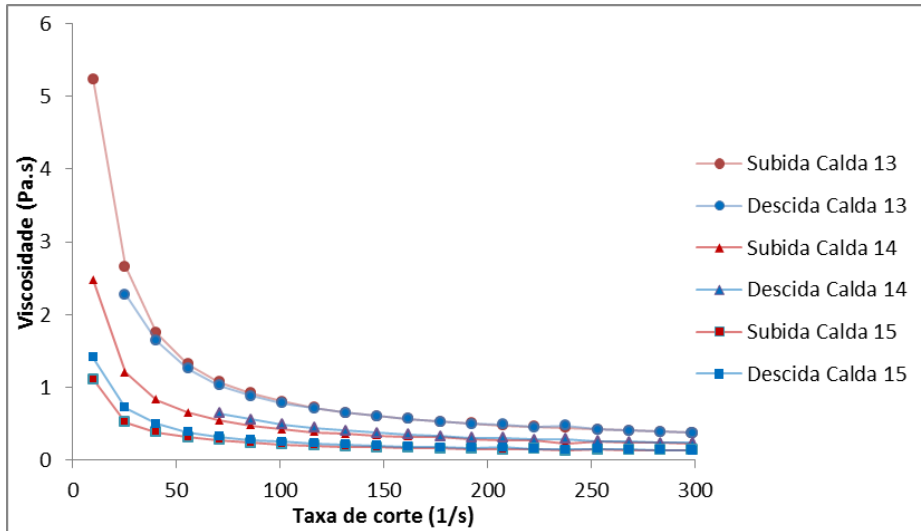


Figura I.9 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 13, 14 e 15

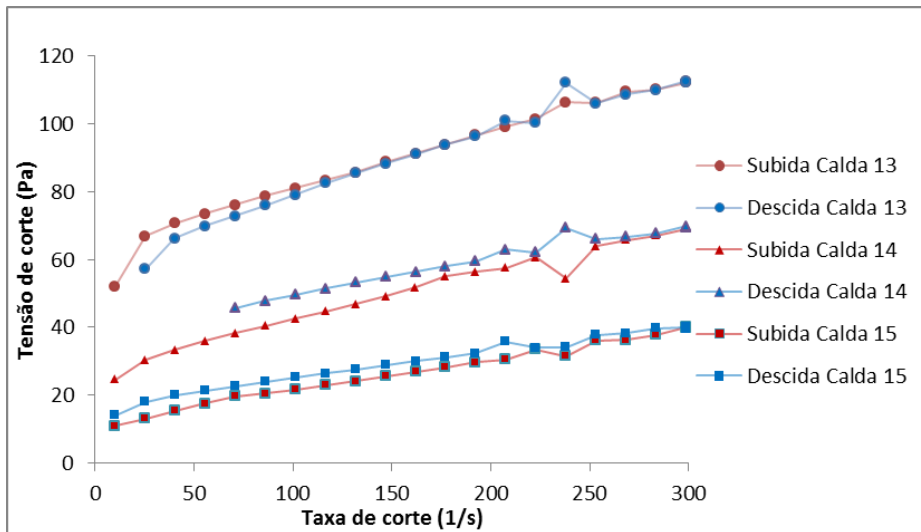


Figura I.10 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 13, 14 e 15

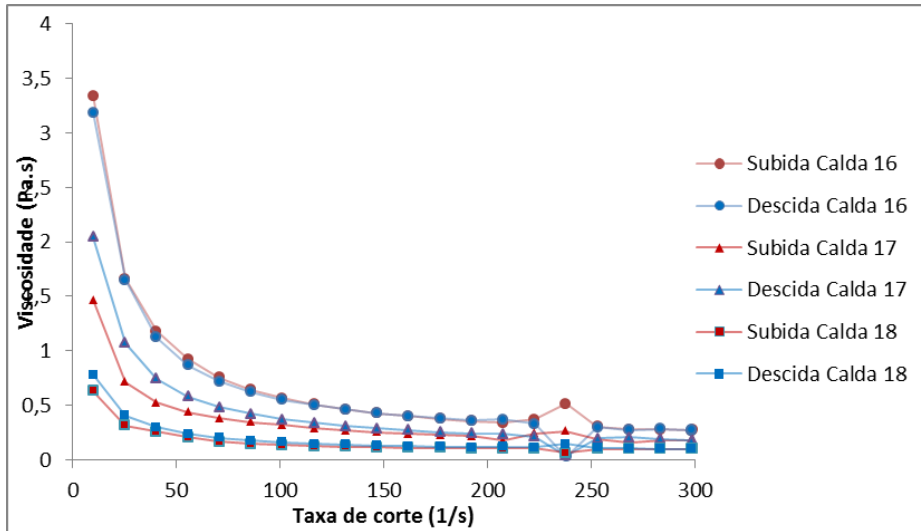


Figura I.11 - Gráfico viscosidade vs. taxa de corte das caldas 16, 17 e 18

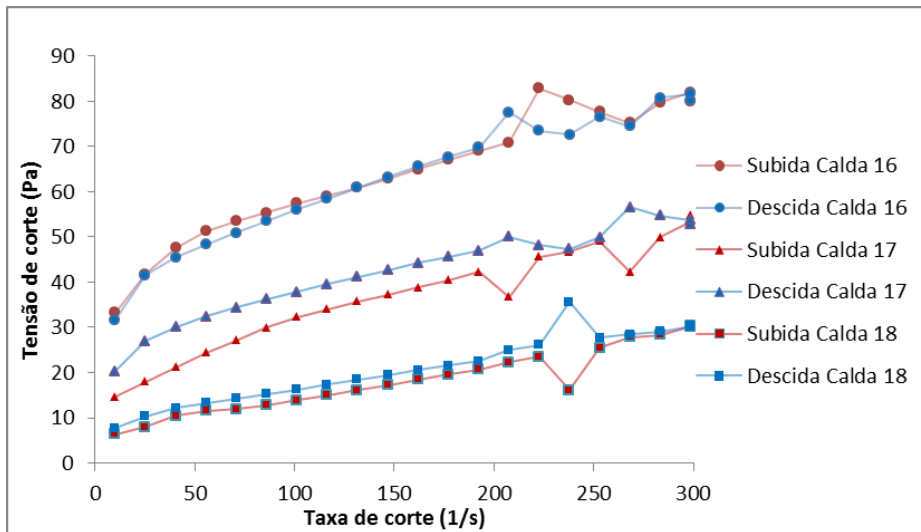


Figura I.12 - Gráfico tensão de corte vs. taxa de corte das caldas 16, 17 e 18