



Diogo Vasco Gonçalves dos Reis

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Medição da tensão de cedência em caldas hidráulicas com recurso a reometria rotacional

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

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

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

Júri:

Presidente: Prof Doutor António Manuel Pinho Ramos

Arguente: Prof.^a Doutora Catarina Almeida da Rosa Leal

Vogal: Prof Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar

Medição da tensão de cedência em caldas hidráulicas com recurso a reometria rotacional

Copyright © Diogo Vasco Gonçalves dos Reis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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 objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Luís Baltazar muito agradeço os ensinamentos transmitidos não só no desenvolvimento da presente tese, como também durante todo o percurso académico no ensino superior. Agradeço ainda todo o apoio dado aquando da execução dos trabalhos que constituíram a campanha experimental.

À Professora Doutora Maria Teresa Varanda Cidade e ao CENIMAT agradeço o apoio prestado sempre que foi preciso, tanto com a presente dissertação, como quando integrei um curso sobre reologia no CENIMAT.

Aos técnicos de laboratório quero também deixar uma palavra de agradecimento, pois nalgumas situações foram efetivamente uma ajuda.

Quero deixar um grande agradecimento à minha família, aos meus pais Paula e Vasco bem como à minha irmã Cristina, pelo apoio e capacidade de motivar, quando algo corria menos bem. Uma palavra especial aos meus avós pelo seu carinho.

Por último, agradecer aos meus colegas Afonso, Gonçalo e Miguel, que se tornaram amigos após todas as experiências que passámos e pelos momentos de convívio, ao longo deste capítulo de vida.

A todos os referidos dedico a dissertação.

Resumo

Cada vez mais, em Portugal, a consolidação de alvenarias de edifícios antigos e históricos é mais importante. A otimização de técnicas já existentes e o desenvolvimento de outras inovadoras é crucial para o sucesso das intervenções de conservação.

A injeção de caldas como técnica de consolidação, é nos dias de hoje uma realidade, tendo como finalidade o aumento da compacidade, e a garantia da existência de ligações entre os diversos elementos que constituem uma parede de alvenaria, aumentando o cariz monolítico da parede. Sendo, por conseguinte, a injeção de caldas a técnica maioritariamente escolhida para a consolidação de alvenarias degradadas.

A otimização da calda em termos de injectabilidade e fluidez garante a boa execução da intervenção de consolidação. Há fatores extrínsecos à calda que têm também um papel importante quanto à garantia das características reológicas da mesma, por exemplo a temperatura e a pressão de injeção.

O trabalho em questão visa estudar a tensão de cedência, através da análise feita por meio de diferentes protocolos de medição com recurso à reometria rotacional. As caldas estudadas são à base de cal hidráulica natural incorporam fibras de polipropileno e um superplastificante com o intuito de se variarem algumas características da calda, como a tixotropia, e simultaneamente garantir trabalhabilidade suficiente durante os tempos de ensaio.

A análise feita, está dividida em duas partes, ensaios no estado fresco, onde se afere as características reológicas e ensaios no estado endurecido, que explanam o comportamento mecânico após a hidratação da calda.

Com os resultados que advém desta análise, consegue-se aferir qual o método mais eficaz para a medição das tensões de cedência e estudo da tixotropia. Através da utilização de um reómetro rotacional equipado com a geometria de pratos paralelos podem tirar-se as relações de qual dos procedimentos facultam mais informação acerca do comportamento reológico das caldas de injeção.

Termos Chave: alvenaria, caldas de injeção, reologia, tensão de cedência dinâmica, tensão de cedência estática, cal hidráulica natural, fibras de polipropileno, superplastificante.

Abstract

The conservation and consolidation of old buildings in Portugal has become more relevant in the last years. Developing new technologies and optimizing the existing ones is crucial for increasing the success of conservation interventions.

Grout injection is a consolidation technique for old stone masonry walls that is widely used nowadays, with the purpose of improve its monolithic behavior by increasing compactness and ensuring the existence of connections between the various elements of masonry construction.

This work aims to study different methods to determine the yield stress and the thixotropic nature of natural hydraulic lime-based grouts proportioned with polypropylene fibers and superplasticizer. Different grout mixtures were studied for different polypropylene fiber dosages and the rheological measurements were carried out using a rotational rheometer equipped with parallel plates. In order to ensure a good consolidation intervention, it is necessary to optimize the grout behavior in terms of injectability, workability and flowability.

This work is divided into two parts, (i) fresh state tests, in which the rheological characteristics of the grouts are measured based on different protocols; (ii) hardened state tests that describe the mechanical behavior after the grout curing process.

With the results that come from this research, it is possible to determinate which the most effective method is for measuring yield stresses and to analyze the thixotropic nature of the grouts using a rotational rheometer.

Key words: masonry, grouts, rheology, dynamic yield stress, static yield stress, natural hydraulic lime, polypropylene fibers, superplasticizer.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CALDAS DE INJEÇÃO UTILIZADAS.....	2
1.2. DESCRIÇÃO DAS CALDAS DE INJEÇÃO	3
1.3. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	4
1.4. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2. CALDAS HIDRÁULICAS E PROPRIEDADES REOLÓGICAS.....	7
2.1. CAL NA CONSTRUÇÃO	7
2.1.1. <i>Considerações iniciais</i>	7
2.1.2. <i>Cal hidráulica natural</i>	7
2.1.3. <i>Hidratação da cal hidráulica natural</i>	9
2.1.4. <i>Fibras de Polipropileno</i>	11
2.1.5. <i>Adjuvante</i>	12
2.2. REOLOGIA.....	14
2.2.1. <i>Noções Gerais</i>	14
2.2.2. <i>Reologia de suspensões</i>	16
2.2.3. <i>Comportamento das caldas hidráulicas estudadas</i>	20
2.2.4. <i>Reómetro rotacional</i>	21
3. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	23
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
3.2. MATERIAIS	23
3.2.1. <i>Cal hidráulica natural</i>	23
3.2.2. <i>Superplastificante</i>	24
3.2.3. <i>Fibras de polipropileno</i>	25
3.3. COMPOSIÇÃO DAS CALDAS DE INJEÇÃO	27
3.4. PROCEDIMENTO DE AMASSADURA	28
3.5. MEDIÇÕES REOLÓGICAS	30
3.5.1. <i>Medições de escoamento com tensão de corte controlada (CSS)</i>	31
3.5.2. <i>Ensaio de fluência - tensão de corte controlada</i>	32
3.5.3. <i>Medição de escoamento com taxa de corte controlada (CSR)</i>	33
3.6. PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	34
3.6.1. <i>Resistência mecânica</i>	34
3.6.2. <i>Aderência</i>	38
3.6.3. <i>Termogravimetria</i>	38
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	41
4.2. MEDIÇÕES REOLÓGICAS	41
4.2.1. <i>Medições com controlo de tensão de corte (CSS)</i>	41

4.2.2.	<i>Medições com controlo de taxa de corte (CSR)</i>	47
4.2.3.	<i>Ensaio de fluência a tensão de corte constante</i>	49
4.2.4.	<i>Comparação dos diversos métodos de ensaio</i>	51
4.3.	ENSAIOS ESTADO ENDURECIDO	54
4.3.1.	<i>Resistência mecânica</i>	54
4.3.2.	<i>Aderência</i>	58
4.3.3.	<i>Termogravimetria</i>	59
4.4.	SUMÁRIO DE RESULTADOS	60
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	63
5.1.	CONCLUSÕES.....	63
5.1.1.	<i>Considerações Iniciais</i>	63
5.1.2.	<i>Avaliação das Propriedades no Estado Fresco das caldas</i>	63
5.1.3.	<i>Avaliação das Propriedades no Estado Endurecido</i>	65
5.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	66
ANEXOS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO DE CAL NATURAL	9
FIGURA 2.2 - FORMAÇÃO DAS LIGAÇÕES ENTRE AS PARTÍCULAS DE CAL HIDRÁULICA.....	10
FIGURA 2.3 - 1.5G DE FIBRAS DE POLIPROPILENO	12
FIGURA 2.4 - AÇÃO DO SUPERPLASTIFICANTE NA DESFLOCULAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE UMA CALDA OU ARGAMASSA	13
FIGURA 2.5 - COMPORTAMENTO TÍPICO DOS FLUÍDOS DESCRITOS.....	15
FIGURA 2.6 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS PRINCIPAIS MODELOS REOLÓGICOS.....	17
FIGURA 2.7 COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE BINGHAM E HB AOS 20MIN. DE ENSAIO	18
FIGURA 2.8 - EFEITO DE INJEÇÃO DE CALDAS COM MAIOR E MENOS VISCOSIDADE PLÁSTICA	20
FIGURA 2.9 - ESQUEMA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO: H, É A DISTÂNCIA – “GAP” E R O RAIOS DA GEOMETRIA.	22
FIGURA 3.1 - MATERIAL UTILIZADO PARA A AMASSADURA (ESQ.), BERBEQUIM + HASTE HELICOIDAL (DIR.).....	29
FIGURA 3.2 - MATERIAL PARA SE PROCEDER ÀS DOSAGENS MAIS DETALHADAS E SENSÍVEIS	29
FIGURA 3.3 - BALANÇA DIGITAL PRECISÃO 0.001G (ESQ.), BALANÇA DIGITAL PRECISÃO 0.1G (DIR.).....	30
FIGURA 3.4 - REÓMETRO ROTACIONAL GEMINI HR ^{NANO} DA BOHLIN INSTRUMENTS (MALVERN, UK)	30
FIGURA 3.5 - GEOMETRIA SEM LIXA (ESQ.), GEOMETRIA COM LIXA (DIR.)	31
FIGURA 3.6 - GRÁFICO TÍPICO ENSAIO CSS	32
FIGURA 3.7 - GRÁFICO TÍPICO ENSAIO DE FLUÊNCIA	33
FIGURA 3.8 - GRÁFICO TÍPICO DE ENSAIO CSR.....	33
FIGURA 3.9 - PROVETES PARA POSTERIORMENTE SEREM ENSAIADOS MECANICAMENTE	34
FIGURA 3.10 - MOLDE PRISMÁTICO.....	35
FIGURA 3.11 - PROVETES NA SALA CONDICIONADA	35
FIGURA 3.12 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO DE FLEXÃO (ESQ.), PROVETES DE ENSAIO APÓS ENSAIO DE FLEXÃO (DIR.).....	36
FIGURA 3.13 - ENSAIO DE COMPRESSÃO	37
FIGURA 3.14 - PROVETES APÓS SER COLOCADA A FITA ADESIVA (ESQ.), PROVETE A SER ENSAIADO NA MÁQUINA DE ENSAIO "ZWICK Z050" (DIR.).....	38
FIGURA 3.15 - PROCESSO DE PREPARAÇÃO DA AMOSTRA PARA O ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA.	39
FIGURA 4.1 - EVOLUÇÃO DA VISCOSIDADE PLÁSTICA COM O TEMPO E COM AS DIFERENTES DOSAGENS DE FIBRAS	42
FIGURA 4.2 - GRÁFICO TÍPICO, TENSÃO DE CORTE VS TAXA DE CORTE.....	43
FIGURA 4.3 - EXEMPLO DA CURVA DE ESCOAMENTO DA CALDA 0.18G QF COM CONTROLO DA TENSÃO DE CORTE	43
FIGURA 4.4 - DECRÉSCIMO DE VISCOSIDADE MEDIANTE QF DE PP.....	44
FIGURA 4.5 - TENSÃO DE CEDÊNCIA ESTÁTICA (CSS) EM FUNÇÃO DO TEMPO E DA DOSAGEM DE FIBRAS DE PP	45

FIGURA 4.6 - VISCOSIDADE VS TAXA DE CORTE DO ENSAIO CSS A) CURVAS DO CARREGAMENTO B) CURVAS DO DESCARREGAMENTO	46
FIGURA 4.7 - RELAÇÃO TENSÃO DE CEDÊNCIA DINÂMICA VS QUANTIDADES DE FIBRAS DE POLIPROPILENO (20MIN.).....	46
FIGURA 4.8 - REOGRAMA DO ENSAIO CSR PARA A CALDA REF.	47
FIGURA 4.9 - COMPARAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO NOS DIVERSOS TEMPOS DE ENSAIO PARA A CALDA REF.	48
FIGURA 4.10 - TENSÃO DE CEDÊNCIA ESTÁTICA (CSR) EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS DOSAGENS DE FIBRAS DE PP	48
FIGURA 4.11 - TENSÃO DE CEDÊNCIA DINÂMICA EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE FIBRAS DE PP (20MIN.)	49
FIGURA 4.12 - EVOLUÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE EM FUNÇÃO DO TEMPO E DA TENSÃO NO ENSAIO DE FLUÊNCIA PARA A CALDA REF.	50
FIGURA 4.13 - COMPARAÇÃO ENTRE O ENSAIO CSR E CSS AOS 20 MINUTOS	51
FIGURA 4.14 - COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS CSS E CSR QUANTO ÀS CURVAS DE CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO	52
FIGURA 4.15 - RELAÇÃO CSR E CSS QUANTO À TENSÃO DE CEDÊNCIA ESTÁTICA	52
FIGURA 4.16 - RELAÇÃO CSR E CSS QUANTO À TENSÃO DE CEDÊNCIA DINÂMICA	53
FIGURA 4.17 - VALORES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO (KPA) DOS VÁRIOS PROVETES	55
FIGURA 4.18 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO MEDIANTE AS QUANTIDADES DE FIBRAS DE PP.....	56
FIGURA 4.19 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MEDIANTE AS QUANTIDADES DE FIBRAS DE PP	57
FIGURA 4.20 - RESISTÊNCIA AO CORTE MEDIANTE A QUANTIDADE DE PP	58
FIGURA 4.21 - PROVETES APÓS ENSAIO DE ADERÊNCIA, OS PROVETES AQUI REPRESENTADOS SÃO O DE REF.(ESQ.) E O 0.35G (DIR.) DE QF	59
FIGURA 4.22 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA : COMPARAÇÃO ENTRE AS CALDAS SELECIONADAS	59

Índice de Tabelas

TABELA 2-1 - REQUISITOS DOS DIFERENTES TIPOS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL SEGUNDO NP 459 - 1 : 2011 .	8
TABELA 2-2 - RELAÇÃO ENTRE TENSÃO DE CORTE E TAXA DE CORTE.....	16
TABELA 2-3 - FATORES MAIS INFLUENTES NA REOLOGIA DE SUSPENSÕES	19
TABELA 3-1 - CARACTERÍSTICAS DA CAL HIDRÁULICA NHL5	24
TABELA 3-2 - FICHA TÉCNICA SUPERPLASTIFICANTE [ANEXO VII].....	25
TABELA 3-3 - FICHA TÉCNICA FIBRAS DE POLIPROPILENO [ANEXO V].....	26
TABELA 3-4 - COMPOSIÇÕES DAS VÁRIAS CALDAS.....	27

Lista de Abreviaturas e siglas

CaO - Óxido de cálcio

Ca(OH)₂ - Hidróxido de cálcio

CSH - silicatos de cálcio hidratados

C₂S - silicato bicálcico

C₃S - silicato tricálcico

C₃A – aluminato tricálcico

FL – Cal formulada)

HL – Cal hidráulica)

NHL –Cal hidráulica natural)

PES – Poliéster

PA – Poliamida

PAC – Acrílico

PP – Polipropileno

PUR – Poliuretano

QF – Quantidade de Fibras de Polipropileno

Ref. - Referência

1. Introdução

Ao longo dos tempos de existência, o ser humano tem mudado um pouco a maneira de pensar na construção e de criar património edificado. No início das civilizações, o que era necessário, era criar o máximo de edifícios, dentro das exigências funcionais (estruturais e de proteção do utilizador), de maneira a ocupar o máximo de espaço possível, de maneira a criar cidades extensas horizontalmente o que traria um acréscimo da comunidade e por consequente da proteção e desenvolvimento do local[1].

Era moderna, as cidades evidenciam limitações em termos de espaço horizontal e então começou-se a crescer verticalmente. Em simultâneo e devido a vários fatores socioeconómicos observou-se uma migração das populações para a periferia das cidades, o que, por conseguinte, desencadeou o abandono de edifícios nos centro históricos e subsequente degradação desses locais/edifícios. Contudo, ao longo da última década começou-se a ter como “problemática do dia” a conservação e a reabilitação urbana, que não é mais do que melhorar e/ou restituir as condições ideais de serviço dos edifícios que já existem. Então, esta problemática é um dos principais responsáveis para o desenvolvimento deste estudo, pois é uma área da construção que está numa constante mudança e que vai de encontro à otimização da técnica de injeção de caldas[1].

Também nos edifícios que constituem o património cultural, há uma necessidade interventiva, uma vez que devido à época da sua construção as paredes são em geral, paredes resistentes, o que as torna importantes no panorama estrutural. É aí que a injeção de caldas, bem como as diversas técnicas de reforço (pregagens, reconstrução de partes de alvenaria, entre outras), são quase imperativas, pois vão reduzir a necessidade de uma substituição dos materiais originais ou, ter a título de exemplo, uma das paredes que sustenta o edifício, com construção mista (utilização de betão e elementos metálicos).

Segundo Callebaut et al, existe uma grande quantidade de más utilizações de materiais ou negligência quanto à escolha do material o que tem causado vários problemas de compatibilidade entre materiais [2]. Como tal, e para minimizar tais incompatibilidades, deve privilegiar-se o uso de materiais tradicionais, tais como a cal hidráulica natural, como ligante, na formulação duma calda para consolidação. A cal é um ligante utilizado, em termos históricos, anterior à utilização do cimento de Portland [3]. O que anteriormente foi relatado juntamente com o facto de o cimento ter uma grande quantidade de sais solúveis, que são prejudiciais à boa execução da calda hidráulica e posterior consolidação da parede, faz com que a escolha da cal hidráulica natural como ligante seja a mais acertada para este tipo de intervenções[4].

As paredes antigas em alvenaria de pedra podem ter um ou mais panos¹. O que inevitavelmente faz com que existam espaços por preencher ao nível dos diferentes panos e uma elevada heterogeneidade de materiais, por conseguinte as alvenarias apresentam um fraco comportamento monolítico. Contudo, é possível melhorar o monolitismo destas alvenarias através da injeção de caldas, que vai promover uma maior adesão entre os panos de alvenaria, menor vulnerabilidade e fragilidade quando sujeitos a esforços de flexão.

Sendo o presente estudo focado numa das técnicas de consolidação e reabilitação de alvenarias antigas com carácter estrutural. É então o processo de injeção de caldas (*grouting – termo em Inglês*) o cerne desta dissertação.

A injeção de caldas é uma das principais técnicas de reparação e reforço de paredes de alvenaria de pedra [5]. Tendo como principais constituintes: cal hidráulica natural, superplastificante, água e eventuais aditivos para otimização da performance da calda. O superplastificante serve para garantir uma melhor trabalhabilidade da calda hidráulica e fluidez do elemento tanto antes, como durante a injeção.

A melhor maneira para se caracterizar uma calda hidráulica quanto à sua trabalhabilidade e fluidez é recorrendo a medições reológicas[6]. A reologia é a ciência que estuda e classifica os diversos materiais tanto líquidos como sólidos quando sujeitos a uma deformação sob um fluxo. No entanto foca-se nos materiais cujo comportamento se enquadra entre os sólidos e líquidos. Há alguns materiais que até adquirem características de sólido, quando sujeitos a uma determinada taxa de corte ou condições de temperatura e depois características de líquido quando estão numa situação de repouso ou a uma temperatura pré-definida.

1.1. Caldas de injeção utilizadas

Como já referido, as caldas após a injeção vão preencher os espaços vazios, no entanto vão ter uma utilidade prática similar ao do elemento que preencherão, daí as principais forças atuantes na calda injectada serem forças de compressão.

As caldas que se vão utilizar para estudar o tema fundamental desta dissertação têm os materiais já descritos anteriormente, bem como percentagens variadas de fibras de polipropileno (PP). Portanto tem-se uma massa fixa de cal hidráulica (350g) e percentagens fixas de água (40%) e superplastificante (0.2%). A única percentagem não fixa será das fibras de PP que variam entre (0.025%, 0.1%). Todas as percentagens se referem à massa de cal hidráulica natural (NHL), ou seja quando se diz que há 40% de massa de água, é 40 % de 350g (massa de

¹ 1 - Conjunto de várias fiadas blocos que que formam uma parede de alvenaria. Se se tiver como exemplo uma parede dupla, esta tem dois panos de alvenaria.

NHL), 140g de água. Como se utiliza esta percentagem variável para aferir os resultados do estudo, tem que se fazer uma mistura sem as fibras que será a calda de referência.

Todos estes constituintes têm um propósito. A cal hidráulica é o ligante, a água é necessária para se poder concluir a mistura, conferir trabalhabilidade, escoamento do preparado e para hidratar a cal hidráulica. O superplastificante ajuda a diminuir a água adicionada para que se consiga injetar a calda e para que cumpra o seu objetivo (preenchimento dos espaços vazios). Por último, mas não menos importante, as fibras de PP, que fazem com que se observe um ligeiro aumento da viscosidade quando a calda estiver em repouso, isto deve-se à tixotropia. A tixotropia é a designação dada para o fenómeno no qual um fluido decresce a sua viscosidade a tensão constante. Trata-se da propriedade de um fluido não-newtoniano ou pseudoplástico que apresenta uma alteração dependente do tempo na sua viscosidade. A calda quando estiver sujeita a solicitações de aumento da taxa de corte baixa a sua viscosidade. A adição de fibras pode influenciar características tais como tixotropia e trabalhabilidade, daí ser o único constituinte que se altera a percentagem na mistura, para se poderem comparar os vários resultados.

1.2. Descrição das caldas de injeção

As injeções têm como alvo maioritário paredes de alvenaria, como é sabido as paredes têm uma baixa resistência à tração, logo se conseguir fazer uma adição de um material que contribua com alguma melhoria, ainda que não muito significativa, de resistência às forças de tração, seria vantajoso para o elemento.

As paredes de alvenaria que se encontram na maioria dos edifícios são constituídas por dois panos de alvenaria o que facilita o processo de injeção. Dando particular importância a paredes que tenham enchimentos irregulares e núcleos menos compactos e resistentes.

Há diferentes possibilidades de reforço de uma parede de alvenaria. São estes:

- Refechamento de juntas de alvenaria existentes, intervenção que vai garantir a consolidação da parede;
- Inclusão de armaduras metálicas e subsequente proteção das mesmas com calda que vai reforçar a ligação armadura-alvenarias. Contudo as caldas aqui referidas, são caldas para selar furos de pregagens, são outros tipos de caldas;
- Remoção e reposição do material deteriorado;
- Reconstrução total ou parcial.

O processo de injeção de caldas tem propósitos já anteriormente mencionados, mas para que tenha sucesso, tem um procedimento tipo que deve ser seguido.

Numa parede onde se queira fazer a intervenção, devem-se fazer três a quatro furos alinhados na vertical e introduzidos tubos para auxiliar na injeção. Horizontalmente deve-se fazer este procedimento com um espaçamento constante onde se acha necessária uma intervenção.

Em seguida com o auxílio de uma máquina de injeção de caldas faz-se a injeção de baixo para cima e por níveis, isto é primeiramente faz-se a injeção em todos os tubos à mesma cota e só depois se passa para os de cota superior. Injeta-se calda até haver refluxo no tubo acima, repetem-se estas ações nos tubos superiores. Espera-se o tempo suficiente para que a calda ganhe presa suficiente para se autossustentar e então retiram-se os tubos que tinham sido obturados quando concluída a injeção. Por fim repete-se este procedimento quantas vezes for preciso de maneira a garantir a consolidação do elemento que se quer reforçar.

Devido à fácil execução e se a alvenaria tiver volume de vazios suficiente e canais para que se possa proceder à injeção, este método, é portanto, utilizado e atua de forma eficaz, quando se fala de consolidação de paredes de panos múltiplos.

Contudo, deve haver um estudo prévio da compatibilidade química, mecânica e física entre os materiais constituintes da alvenaria e a calda de maneira a garantir o sucesso da injeção. Há que ter a preocupação de “reparar em vez de se substituir o material” [1].

1.3. Objetivos da Dissertação

Esta dissertação visa estudar as caldas antes da sua presa, daí empregar-se o termo, ensaios a “fresco”, quer isto dizer, que se analisa a reologia com base em medições do reómetro rotacional, num intervalo de tempo pré-definido e antes das partículas se organizarem e criarem ligações definitivas.

Ensaia-se também após a presa, ou seja, passados 28 dias. A calda hidráulica inicia o processo de hidratação, assim que se junta água, mas ao fim de 28 dias atinge cerca de 60 a 90% da sua resistência mecânica final.

No estado endurecido, fazem-se os ensaios de resistência à flexão, resistência à compressão, aderência e termogravimetria.

As caldas terão uma constituição variável, para se analisar se a tensão de cedência da calda durante a injeção ajuda e facilita o processo, daí variar-se a quantidade de fibras para se ter diferentes tixotropias nas composições executadas. Utiliza-se um superplastificante para preservar a fluidez das caldas durante as medições reológicas, pois o superplastificante usado também tem um efeito de retardador de presa.

A temperatura que é um fator que altera a viscosidade dos fluidos, também é tida em conta, daí ter-se tido a preocupação de mantê-la num valor fixo de 20 °C conforme recomendado em estudos anteriores [4, 7, 8].

No que diz respeito aos tempos, ensaia-se a calda sempre passado um tempo pré-definidos após o momento em que houve a junção dos constituintes e respetiva amassadura. Nos ensaios foi também estudado o tempo de repouso da calda.

1.4. Estrutura e Organização da Dissertação

Todo o trabalho que se vai apresentar está debruçado no estudo de caldas e maneiras de se otimizar a sua injeção, foi feita numa pesquisa bibliográfica significativa e que culmina num tema que tem suscitado curiosidade há algum tempo e ainda tem algumas lacunas que justificam o presente estudo.

A pesquisa bibliográfica incidiu tanto em fontes nacionais como internacionais, pois como já referido, pouco se sabe e nem há propriamente uma normalização de ensaios devido à pouca exploração que tem havido sobre a reologia de caldas de injeção.

Numa primeira fase consolidam-se alguns conceitos que são menos comuns, para posteriormente se proceder à explicação dos ensaios e conseqüente análise de resultados.

A dissertação está dividida em cinco capítulos, neste primeiro apresentam-se os motivos que levam o autor a querer explorar o tema e clarificam-se os pontos observados e porque suscitam interesse.

No capítulo 2, tem-se o estado do conhecimento. Neste capítulo vai falar-se um pouco dos constituintes do preparado e as características que os fazem ser parte integrante deste estudo.

No capítulo 3 faz-se a explicação dos procedimentos de ensaio e normas experimentais. Neste capítulo tenta-se ainda referir a utilização dos equipamentos para fazer os ensaios. A campanha experimental foi ainda faseada:

- Campanha experimental da calda no estado fresco;
- Campanha experimental de calda no estado endurecido.

No capítulo 4, são apresentados os resultados que foram obtidos durante a campanha experimental, fazendo um paralelismo com a bibliografia que advém de explicações do capítulo 2.

Por fim, no capítulo 5, faz-se um resumo do trabalho realizado, com algumas conclusões retiradas do comportamento dos materiais ensaiados e propostas para trabalhos futuros.

2. Caldas hidráulicas e propriedades reológicas

2.1. Cal na construção

2.1.1. Considerações iniciais

A calda como já referido, pode ter diversos constituintes entre eles a cal aérea. Este material (cal aérea) já é usado desde o século X a.C. visto ser um material com grande encaixe nas construções de várias civilizações, sofreu inúmeras melhorias. Houve povos como os gregos que lhe adicionaram adjuvantes como solo vulcânico, mistura esta que potenciou as características hidráulicas da cal[4].

Como este material está a ter cada vez mais adesão, entidades como o Comité Europeu de Normalização (CEN), definiu uma norma referente à cal de construção. No entanto não há ainda uma norma de ensaios pré-definidos para se testar propriedades como a reologia das caldas de injeção.

A NP EN 459 – 1: 2011, foi uma norma que saiu em 2011, referente à cal de construção, que veio substituir uma já existente que datava de 2002[9].

A nova versão da norma classifica as diversas caldas hidráulicas como caldas formuladas (FL), caldas hidráulicas (HL) e as caldas hidráulicas naturais (NHL). Esta última é a cal utilizada na campanha experimental [9].

De forma a introduzir a cal utilizada no presente trabalho, esta está de acordo com a norma NP EN 459 – 1: 2011, a mais recente norma acerca de caldas.

2.1.2. Cal hidráulica natural

Como indicado na NP EN 459-1: 2011, a cal hidráulica natural (NHL) é uma cal com propriedades hidráulicas. Esta é produzida através da queima de calcários, uns com maiores quantidades de argila outros com menores, ou pode ter também na sua constituição silicatos (incluindo giz) e redução a pó por extinção. Tem como característica, o facto de fazer presa e endurecer quando misturada com água reagindo também com o dióxido de carbono do ar, reacção que tem o nome de carbonatação. Contrariamente ao mencionado na versão anterior desta norma, a EN 459-1 de 2011 explana que a cal hidráulica natural (NHL) não contém qualquer outro tipo de aditivos, como materiais pozolânicos ou gesso[9].

Quanto à cal hidráulica natural há várias classes, referentes à resistência mínima à compressão ao fim de 28 dias. Tendo a designação de NHL 2, NHL 3,5 e NHL 5. O número que segue a sigla NHL é referente à resistência mínima em MPa. Estas diferem das caldas aéreas por serem capazes de ganhar presa, ou endurecer em contacto com o dióxido de carbono (CO₂), e

de concluir o endurecimento totalmente imersas em água. No caso das cais aéreas, esse endurecimento só é possível em contacto com o CO₂, chamando-se a esta reação carbonatação, contudo quando imersas em água, não o conseguem fazer, pois não está presente o principal responsável pela presa, o dióxido de carbono[10, 11].

Na tabela 2.1 podem-se consultar os requisitos dos diferentes tipos de cal hidráulica natural.

Tabela 2.1 - Requisitos dos diferentes tipos de cal hidráulica natural segundo NP 459 - 1 : 2011 [9]

Designação	Notação	Requisitos químicos (% massa)		Resistência à compressão (MPa)	
		SO ₃	Ca(OH)	7 dias	28 dias
Cal hidráulica natural 2	NHL 2	≤ 2	≥ 35	-	≥ 2 a ≤ 7
Cal hidráulica natural 3,5	NHL 3,5	≤ 2	≥ 25	-	≥ 3,5 a ≤ 10
Cal hidráulica natural 5	NHL 5	≤ 2	≥ 15	≥ 2	≥ 5 a ≤ 15

Nota: Os valores de SO₃ são baseados no produto após ter subtraído o teor de água livre e água absorvida

As cais hidráulicas naturais são obtidas através de rocha calcária, podendo ter alguma quantidade de argila ou sílica, quando cozidas, a uma temperatura inferior a 1250°C, evitando assim a sinterização (operação que consiste na aglomeração e compactação de pós ou partículas muito pequenas, a altas temperaturas) e a formação do clínquer como no cimento Portland. A presença de impurezas, como sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) na rocha calcária, matéria-prima das cais hidráulicas naturais, é o que garante as suas propriedades hidráulicas[4, 12]. Segundo a norma agora regente, a hidráulidade resulta exclusivamente da composição química especial da matéria-prima natural, como referido acima [9]. As reações que ocorrem entre o hidróxido de cálcio, a sílica e a alumina conduzem à formação de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. A hidratação destes compostos garante o ganho de consistência e de resistência mecânica que se pretende[4, 12].

O processo de fabrico de cal hidráulica natural é constituído por várias fases (Figura 2.1). Até à temperatura de 105-110°C dá-se a evaporação da água que está presente na cal, aos 500-700°C ocorre a desidratação das margas e a 850-900°C decompõe-se o calcário. A partir deste ponto até aos 1200°C a reação entre o hidróxido de cálcio, a sílica e a alumina conduz à formação de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio, como já foi referido[10].

Quando se conclui a cozedura da matéria-prima, é necessário extinguir a cal que se retira do forno, este é um processo lento, que se dá no intervalo térmico dos 130 aos 400 °C. Deve-se ter em atenção a quantidade de água a juntar, pois apenas deve ser fornecida a quantidade necessária para hidratar a cal viva. O processo é executado também com sucesso se se conseguir uma reação expansiva que garanta a pulverização dos grãos que contêm os aluminatos e silicatos. A garantia da finura da cal hidráulica natural é deste modo assegurada, que contrariamente ao cimento de Portland, não precisa de ser moída[10].

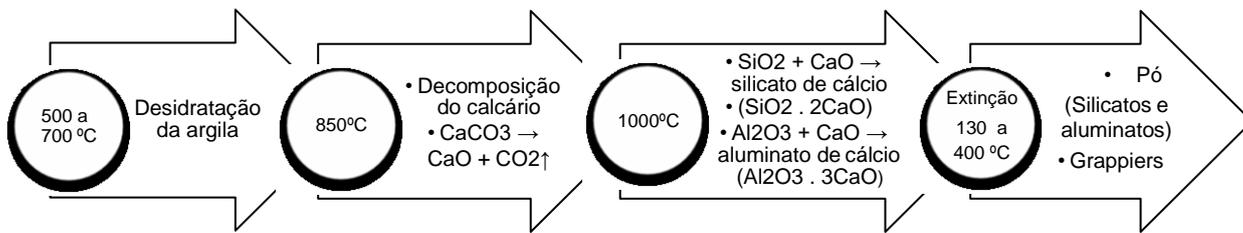


Figura 2.1 - Esquemática do processo de fabricação de cal natural [4]

Após a extinção e como fase final faz-se a separação dos produtos que ficaram subcozidos e os que ficaram sobrecozidos. Todos os sobrecozidos podem ser moídos e adicionados à cal, pois aumentam as suas propriedades hidráulicas. Pode ser aproveitado este subproduto, porque tem na sua composição silicato bicálcico (C_2S), há também como subproduto mas numa quantidade muito reduzida silicato tricálcico (C_3S) [13].

Consegue-se então dizer que as principais diferenças entre a NHL e o cimento de Portland são o teor de argila, mas essencialmente a temperatura de cozedura [10].

A principal dissemelhança entre NHL e do cimento reside na fase hidráulica. Para a cal hidráulica natural, a fase hidráulica provém do silicato bicálcico (C_2S) com a existência de algum silicato tricálcico (C_3S). Há também na sua constituição óxido de cálcio (CaO), ao qual também se chama cal livre, este dá origem ao hidróxido de cálcio ou portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), por extinção com a água e Gehlenite ou alumino silicato bicálcico (C_2AS), que se forma a temperaturas inferiores a 1200 °C, mas é um fenómeno que não é observado quando o produto final é o cimento. Podem contudo estar presentes também aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF), sendo que a participação em termos quantitativos é reduzida, pois são provenientes do material sobrecozido [2, 4].

2.1.3. Hidratação da cal hidráulica natural

Há duas reações que mais caracterizam a presa e o endurecimento da NHL, são estas, a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio ao ar ou submersos em água, e a recarbonatação do hidróxido de cálcio quando sujeito à exposição ao CO_2 [14].

O ganho de resistência mecânica advém do processo de hidratação, cujo aumento se verifica ao longo do tempo, devido a inúmeros componentes hidráulicos que dão origem aos silicatos de cálcio hidratados (CSH) [4].

A análise feita em primeiro diz respeito à reação do silicato bicálcico (eq. 2.1 e 2.2), pois é a fase hidráulica proeminente na NHL. Como se observa na equação 2.1 que o C_2S dá origem ao silicato de cálcio hidratado e ao hidróxido de cálcio [14].



O silicato bicálcico (C_2S), detém a responsabilidade da resistência mecânica da NHL, contudo a sua contribuição começa a ter maior significado a partir dos 182 dias após o início da hidratação. A demorada hidratação do C_2S , está dependente da diminuição da razão da percentagem de CO_2 pela percentagem de água máxima junta à molécula CSH. Portanto, o aumento da quantidade de H_2O associado ao CSH evidencia a hidratação do C_2S [12].

A rápida hidratação e a formação de silicatos de cálcio hidratados, atribuí aos 28 dias a resistência inicial à cal hidráulica, pois forma C_3S (Figura 2.2). A baixa quantidade de C_3A , pode ser benéfica, principalmente porque acelera a hidratação de C_3S [12] há também outra faculdade relevante para o estudo desta tema, que é o facto de reagir com o adjuvante que se utilizou neste estudo, o superplastificante. Neste caso, o superplastificante altera a microestrutura da calda endurecida, alterando a forma e dimensão dos produtos de hidratação, consequentemente afeta a resistência mecânica, aumentando-a.

Quando se inicia o processo, as partículas estão dispersas, mas com o passar do tempo (ver Figura 2.2) (processo representado da esquerda para a direita) formam-se ligações devido à interação do CSH (pontos mais escuros e de pequenas dimensões) com as partículas de cal hidráulica, havendo de seguida flocculação da restante estrutura, formando-se ligações mais rígidas ao longo do tempo[15].

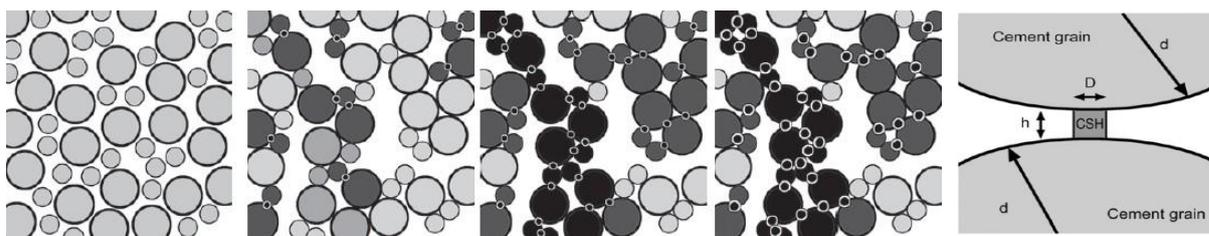


Figura 2.2 - Formação das ligações entre as partículas de cal hidráulica [12]

A segunda fase da reação começa aquando da conclusão da evaporação do excesso de humidade, sendo esta a transformação novamente do carbonato de cálcio (ver equação 2.3). Este fenómeno ocorre devido à recarbonatação com o dióxido de carbono da atmosfera. Contudo, esta reação pode demorar anos e depende da temperatura, da estrutura porosa e humidade da suspensão [14].



O Ca(OH)_2 presente, deve-se ao processo de hidratação do C_2S como do C_3S , e vai ser o responsável pelo processo de carbonatação. O fenómeno identifica-se através da análise do ensaio termogravimétrico, pois clarifica-se a razão CaCO_3 (%) / Ca(OH)_2 (%) das amostras com diferentes idades[12].

2.1.4. Fibras de Polipropileno

Fibras de polipropileno, entra nos aditivos que podem ser incorporados à calda de injeção. Estas têm tido adesão no âmbito da construção, na medida em que são um material obtido com facilidade e com ganhos em termos de performance no estado endurecido de materiais de base cimentícia, contudo como é um derivado do petróleo, há uma consciencialização para o não uso frequente. Há, contudo, fibras de diversas origens. Temos como outro exemplo as fibras de sisal e bambu.

Pode-se fazer uma subdivisão, quanto à origem, sendo então classificadas como naturais (orgânicas e inorgânicas) e sintéticas. A celulose e o bambu são dos exemplos mais conhecidos de fibras naturais orgânicas, enquanto o amianto é uma fibra natural inorgânica.

Quanto às fibras sintéticas são produzidas através de produtos químicos, como a indústria petroquímica, já referido anteriormente. Os exemplos que são mais utilizados nas várias industriais atualmente são o poliéster (PES), a poliamida (PA), o acrílico (PAC), o polipropileno que é o material que será utilizado nesta dissertação e o poliuretano (PUR) também muito utilizado na indústria da construção, mas com um encaixe noutras temáticas.

Quanto à composição e produção, o polipropileno $(\text{C}_3\text{H}_6)_n$, é um polímero, derivado do propeno. A sua produção é feita em monofilamentos contínuos por extrusão, com recurso a uma secção circular ou uma fita fibrilada de secção transversal retangular. Em seguida são cortadas com as dimensões definidas pelo cliente[8].

Noutro estudo [16] foi analisado o comportamento das fibras, mas inseridas no betão. Esta adição proporcionou ao betão melhorias (aumento) de comportamento em termos do módulo de elasticidade, resistência ao choque, à fendilhação, durabilidade, abrasão, choque, fadiga, retração e expansão. Mesmo em termos de resistência térmica há um aumento modesto, mas é um benefício retirado desta adição.

Como se referiu anteriormente, os materiais que têm ganhos com esta introdução são geralmente betões, mas também betonilhas e suspensões na sua extensão. As fibras ajudam no controlo da fendilhação com alguma significância e por vezes, como se pode observar no capítulo da análise de resultados deste trabalho, as fibras ajudam quando os elementos são solicitados à flexão. Há uma outra razão que justifica a sua incorporação nas caldas e betões é,

para aquando da sua injeção aumentarem a tixotropia da suspensão que pode ajudar na sua manobrabilidade.

Aleado à resistência que atribuem, ainda se trata de uma solução económica e de fácil aplicação, daí a sua utilização em betões, caldas e betonilhas.

Fez-se o estudo sobre o interesse do desenvolvimento da técnica de injeção pois houve autores [17] a terem já a curiosidade de explorar o tema, pois sabe-se que é uma técnica que pode trazer grandes benefícios à conservação e reutilização de alvenarias.

Mas a junção de fibras de PP pode também trazer desvantagens à solução, como diminuição da homogeneidade da calda e dificuldade de injeção devido a alterações da tensão de cedência conforme se vai explorar nos capítulos seguintes.

Como se pode ver através do trabalho de Bindiganavile [8, 17], há a possibilidade de haver uma quantidade ótima de fibras de PP que se possam juntar a uma calda de NHL de maneira a ter uma suspensão mais otimizada. Na Figura 2.3 pode-se observar uma imagem de 1.5g de fibras[8].



Figura 2.3 - 1.5g de fibras de polipropileno [7]

2.1.5. Adjuvante

Superplastificante

A principal constituição dos superplastificantes são moléculas poliméricas com diversos segmentos aniónicos. Na sua constituição podem ser utilizados diferentes tipos de monómeros (moléculas de pequenas dimensões) que formam polímeros e que atuam como dispersores das partículas do ligante em argamassas, caldas de injeção e betões.

Através da reação policondensação são formados os superplastificantes, que têm na sua base melamina ou naftaleno. Esta reação dá-se por intermédio de criação de ligações poliméricas através da separação de água [7].

Torna-se importante compreender os fenómenos que surgem quando se combinam, a água com cimento e cal, para se entender como funciona este componente adjuvante, que é um constituinte das caldas ensaiadas.

Tem-se como exemplo, as partículas de cimentos que têm pequenas dimensões e formas irregulares. A sua estrutura cristalina tem cargas positivas e negativas. Quando estas se combinam com a água começam a flocular devido à atração entre as cargas positivas e negativas. A água acaba retida entre os vazios da amostra floculada.

A influência do superplastificante faz-se sentir na amostra, quando as cargas negativas do polímero são absorvidas pelas cargas negativas presentes na superfície das partículas de cimento ou cal. Há um aumento assim na carga negativa de cada partícula. Este incremento excessivo de carga negativa, leva à repulsa das partículas entre elas e que quebra a floculação e liberta a água aprisionada nos vazios.

A libertação da água retida, bem como a dispersão do cimento ou da cal resultam numa redução de viscosidade plástica. Há uma melhoria da trabalhabilidade e a relação água/ligante pode ser reduzida. Este fenómeno está clarificado na Figura 2.4[18].

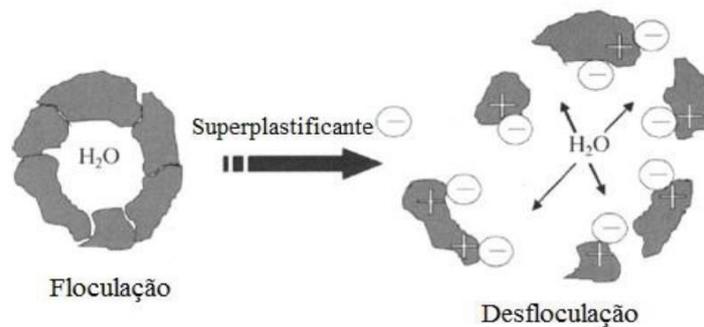


Figura 2.4 - Ação do superplastificante na desfloculação das partículas de uma calda ou argamassa [17]

A estrutura molecular do superplastificante assume um papel de grande importância no modo de ação e desempenho da calda. De modo a permitir uma boa fluidez e viscosidade, a densidade da carga dos polímeros deve ser controlada, devendo assim permitir a ligação correta entre as partículas de cimento ou cal, com carga positiva e impedindo o retorno ao estado de floculação. Por forma a melhorar as propriedades reológicas da calda de injeção, o controlo e afinação das cargas do polímero permitem assim um aumento da eficácia do efeito de dispersão do superplastificante.

2.2. Reologia

2.2.1. Noções Gerais

A primeira vez que a definição atual de Reologia foi defendida, foi pelo Professor Eugene Cook Bingham, no ano de 1929, e está baseada no desígnio de uma ciência que estuda o escoamento e da deformação dos materiais, no geral. Como as leis de Hooke e de Newton se relevaram manifestamente insuficientes para clarificar o comportamento de vários materiais que tinham características comportamentais que saíam do típico comportamento referido pelas anteriores leis clássicas[19, 20].

A proporcionalidade direta entre tensões e deformações, foi estabelecida pela lei de Hooke, que está apresentada na equação 2.4.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.4)$$

Sendo que σ , tensão em Pascal (Pa), E é o módulo de elasticidade ou módulo de Young também em Pa, por último ε que é a deformação linear longitudinal, logo adimensional. Contudo faz-se uma simplificação e utiliza-se no lugar da tensão uma pressão, porque o valor que advém da fórmula diz respeito a uma força por unidade de área (F/A), em que a F é a força (N) e A a área (m^2), em que a força atua. Contudo a equação 2.4 apenas se aplica a sólidos lineares elásticos ou sólidos hookeanos[19, 20, 21].

Tanto a lei clássica de Newton como a exploração e posterior reconhecimento da Reologia como ciência, deram aso à introdução de uma formulação menos complexa de descrever comportamentos reológicos dos fluídos e tem por base a equação 2.5.

$$\frac{F}{A} = \tau = \eta \times \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Em que F é a força (N), aplicada num corpo por unidade de área (A m^2), τ a tensão de corte (Pa), η a viscosidade (Pa.s) e $\dot{\gamma}$ a taxa de corte (s^{-1}).

A temperatura, pressão ou taxa de corte, vão ser fatores de grande influência, pois afetam significativamente, entre outros, a viscosidade dos materiais.

Como é relevante compreender e diferenciar os tipos de fluidos que surgem quando afetados pelos parâmetros enunciados, há que ter em atenção quais os fluidos Newtonianos e os não Newtonianos[21].

A verdadeira diferença entre ambos os fluidos diz respeito ao comportamento dos mesmos quando sujeitos a diferentes taxas de corte e à variação de temperatura. Num fluido Newtoniano a viscosidade pode variar quando alterada a temperatura e com a pressão, contudo não varia com a aplicação de uma taxa de corte. Existem ainda três tipos diferentes de fluidos,

são estes, os reofluidificantes, os reoespessantes e os de Bingham, sendo qualquer um dos três, fluidos não-newtonianos.

Quanto aos fluidos reofluidificantes, a viscosidade tem um decréscimo quando há um aumento da taxa de corte. Em tudo diferente, com os reoespessantes onde a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de corte. Uma calda de injeção pode ser de Bingham (dependente da sua formulação), apenas inicia o escoamento quando é excedida a valor da tensão de cedência, é este o valor crítico de um fluido de Bingham[22], após se atingir este valor o comportamento passa a ser semelhante com um fluido Newtoniano[4].

Tal como ilustrado na Figura 2.5 a tixotropia representa, quando aplicada uma tensão constante a um fluido que parte do repouso, a diminuição contínua da viscosidade e a recuperação da sua estrutura inicial quando a tensão é removida. Logo está-se perante um fluido tixotrópico, sempre que há uma recuperação da viscosidade, após o fluido deixar de escoar. De realçar que esta recuperação não é instantânea, mas sim ao longo de determinado intervalo de tempo após interrupção da tensão.

Tal, também se verifica quando se está perante o comportamento inverso, isto é, quando há um aumento gradual da viscosidade, quando se submete o líquido a uma determinada tensão, seguida de uma recuperação. A este fenómeno dá-se o nome de anti tixotropia, ou tixotropia negativa.

O comportamento dos fluidos já descritos está representado na Figura 2.5.

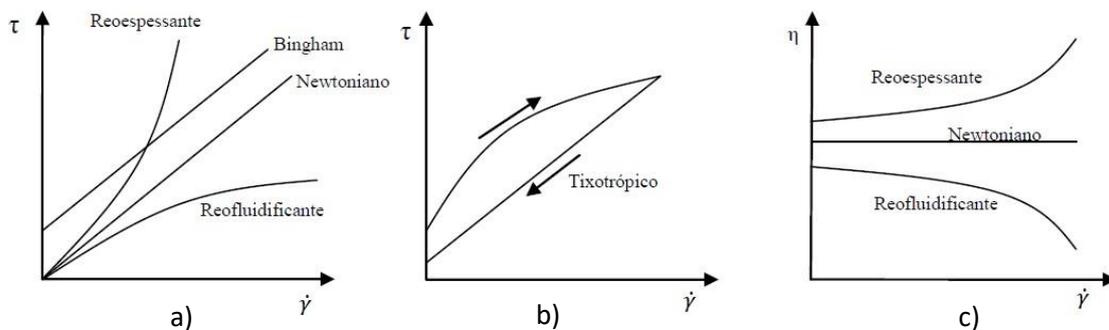


Figura 2.5 - a) Comportamento típico dos fluidos descritos (Tensão vs taxa de corte), b) Descrição da zona de carregamento e descarregamento, c) Comportamento típico de três tipos de fluidos (viscosidade aparente vs taxa de corte) [24]

Existem também materiais (reoespessantes) em que, a viscosidade e a tensão de corte, para uma determinada taxa de corte, diminuem ou aumentam com o decorrer do tempo. Estas alterações por vezes são de cariz irreversíveis, embora haja ocasiões em que não o são [13]. Temos como exemplo para os fluidos reoespessantes a solução de água junta com amido de milho e para os fluidos reofluidificantes o *ketchup*.

2.2.2. Reologia de suspensões

As caldas utilizadas para este estudo são também denominadas por suspensões, pois estas são uma suspensão de partículas sólidas num meio aquoso.

A reologia estuda as propriedades reológicas das caldas de injeção, tal como já referido, as quais têm uma importância relevante atualmente na indústria da construção. Deve por este motivo, ser uma parte integrante do estudo dos materiais e não só uma especialidade, tida em conta, apenas para obras de relevância maior ou estudo apenas teórico[24].

As caldas de injeção, que têm por base ligantes hidráulicos, têm um comportamento complexo. Estas estão sujeitas a alterações com o decorrer do tempo, tanto ao nível da hidratação, como ao nível de alteração de viscosidade, que só finda quando adquirida a resistência mecânica necessária para se tornar no material para o qual foi executada.

Através da observação da Tabelas 2.2 conseguem-se distinguir os dois principais grupos de equações que se utilizam para caracterizar as diversas suspensões de partículas sólidas num líquido viscoso, tais como [4, 25, 26].

Tabela 2.2 - Relação entre tensão de corte e taxa de corte [21, 24].

Nome da Equação	Equação
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Bingham modificado	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} + B \dot{\gamma}^2$
Casson	$\tau = \tau_0 + \eta_\infty \dot{\gamma} + 2(\tau_0 \eta_\infty)^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}$
Casson generalizado	$\tau^n = \tau_0^n + [\eta_\infty \dot{\gamma}]^n$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$

O modelo matemático de Herschel-Bulkley é semelhante ao modelo de Newton, para valores de $\tau_0 = 0$ e $n = 1$, idêntico ao modelo de Bingham sempre que $n = 1$ e igual à lei da Potência quando $\tau_0 = 0$ [22].

Como tal, conclui-se que os modelos explanados na tabela 2.2 baseiam-se em dois parâmetros que caracterizam o escoamento. Para uma suspensão concentrada há uma tensão de cedência (τ_0), isto é, uma tensão que é necessária transpor para que seja assegurado o início do escoamento. Há várias equações que afirmam tal facto, são estas equações: Bingham, Herschel e Bulkley, entre outras[7, 21, 28].

Prosseguindo para uma análise gráfica de um fluido, constata-se que há uma equivalência entre o valor da tensão de cedência e a intersecção do eixo de tensões de corte (τ), isto, num diagrama tensão de corte, taxa de corte, nos eixos ordenados. O declive deste diagrama caracteriza a viscosidade do fluido e pode ser observado na Figura 2.6.

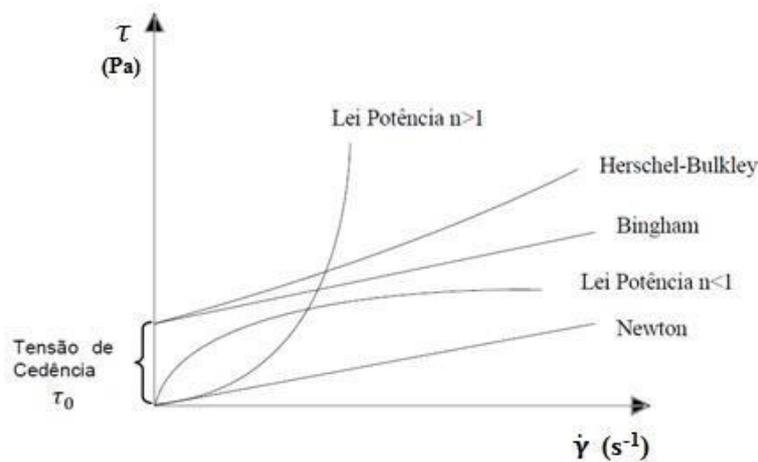


Figura 2.6 - Representação gráfica dos principais modelos reológicos[24]

De salientar que todos os modelos apresentados nas tabelas anteriores, são meramente informativas, apenas visam demonstrar a quantidade de modelos que existem e podem ser utilizadas para caracterizar o comportamento de escoamento de diversos fluidos.

O modelo de Bingham, é nos dias de hoje muito utilizado para descrever o comportamento de suspensões à base de cal e cimento. Devido à forma independente de medição dos parâmetros, faz com que o cálculo dos mesmos se torne simples. Com este modelo como base, visto que tem presente uma viscosidade constante, assim que se ultrapassa a tensão de cedência a suspensão comporta-se como um fluido Newtoniano. Contudo tem pontos menos positivos, um deles é a não permissão de cálculo do comportamento de reofluidificantes, que tornam este modelo incompleto no que diz respeito ao estudo de fluidos não Newtonianos[25, 29].

O modelo é então observado na tabela 2.3 pela equação apresentada de seguida (vd. Eq 2.6)

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (2.6)$$

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

Em contrapartida o modelo de Herschel-Bulkley, contrariamente ao modelo anteriormente discutido (modelo de Bingham), permite que se descreva o comportamento dos fluidos reofluidificantes para $n < 1$ e permite ainda descrever o comportamento dos fluidos

reoespessantes quando $n > 1$. Caso os valores dos parâmetros n e τ_0 , sejam 1 e 0, respetivamente, este remete para o modelo Newtoniano[25].

A fórmula empírica característica do modelo de Herschel-Bulkley é dada pela equação 2.7:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (2.7)$$

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

Na Figura 2.7 apresenta-se a comparação entre os métodos de Bingham e Herschel-Bulkley.

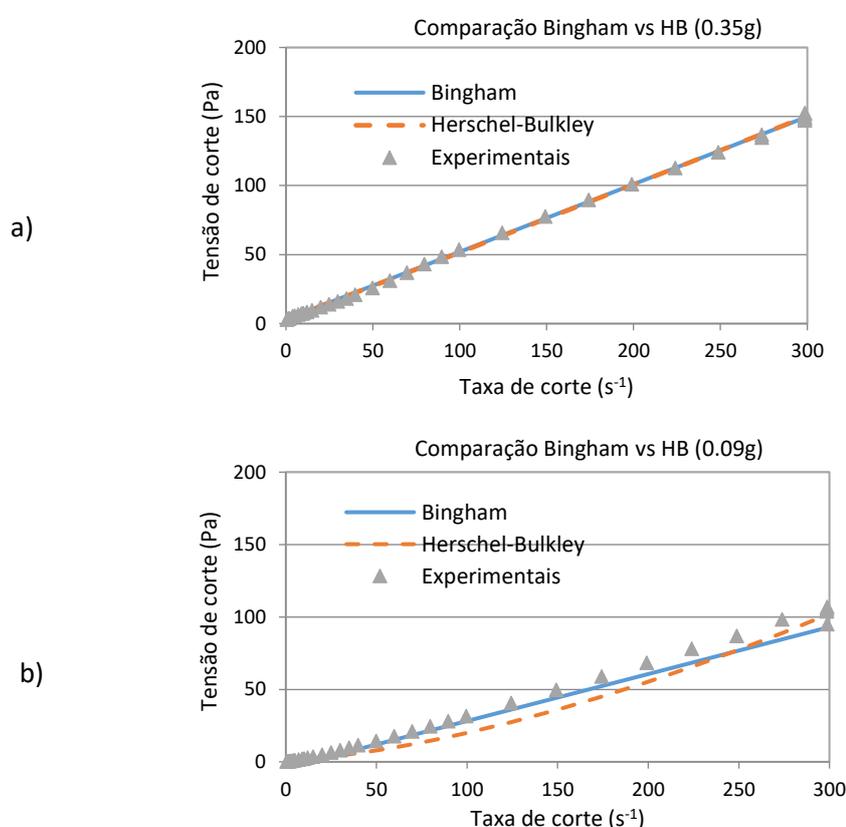


Figura 2.7 Comparação dos modelos de Bingham e HB aos 20min. de ensaio a) calda com 0.35g de QF, b) calda com 0.09g de QF

Quando comparados os dois modelos mais utilizados no estudo reológico de caldas constata-se que ambos os modelos acompanham aceitavelmente os valores experimentais. Contudo, para taxas de corte mais baixas como se pode verificar na Figura 2.7 b), composição de 0.09g de QF, o melhor modelo é o Bingham. Para as propriedades que se querem estudar o modelo de Bingham é o mais adequado, pois conforme ilustrado nas Figuras 2.7 a) e b) as composições (0.09g e 0.35g) é o modelo que apresenta melhor ajuste aos valores experimentais.

Fez-se a análise para estas duas composições pois nas restantes o comportamento das curvas é similar e os valores estariam entre os valores apresentados nas Figuras 2.7 a) e b).

Na Tabela 2.3 apresentada de seguida, é resumidamente apresentada e de forma organizada os aspetos mais significativos e influentes para a calda de injeção em estudo[27, 29–31].

Tabela 2.3 - Fatores mais influentes na reologia de suspensões [6, 7]

Fatores físicos	<ul style="list-style-type: none"> • Razão água/ligante; • Distribuição granulométrica dos constituintes; • Densidade, superfície específica e textura da superfície do ligante;
Fatores químicos e mineralógicos	<ul style="list-style-type: none"> • Reactividade química dos componentes; • Tempo e processo de hidratação; • Propriedades químicas dos adjuvantes; • Propriedades dos aditivos minerais;
Condições de amassadura	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento; • Velocidade; • Duração do processo de amassadura; • Capacidade da misturadora; • Temperatura e humidade no local de preparação
Condições de medição	<ul style="list-style-type: none"> • Duração; • Espaçamento ("Gap"); • Dimensão das geometrias; • Rugosidade das geometrias; • Taxa de corte aplicadas; • Temperatura e humidade no local de análise
Presença de aditivos e/ou adjuvantes	<ul style="list-style-type: none"> • Aditivos minerais (por exemplo sílica de fumo, cinzas volantes ou metacaulino); • Agentes redutores de água (por exemplo plastificante); • Agentes tensoactivos (como introdutores de ar); • Hidrófugos.

2.2.3. Comportamento das caldas hidráulicas estudadas

Para se garantir o escoamento de uma calda de injeção, tem de se aferir alguns fenómenos como segregação, exsudação e capacidade de retenção de água. Com este controlo assegura-se a performance da calda a longo prazo e o seu escoamento no meio poroso (i.e. núcleo da alvenaria). A capilaridade é também um fenómeno que pode ter consequências negativas, uma vez que pode incrementar a perda excessiva da água da constituição da calda de injeção.

Garantir a capacidade de escoamento, fluidez e de preenchimento do meio poroso durante o processo de injeção é preponderante, para o sucesso da técnica de consolidação. A eficácia de uma calda, está diretamente relacionada com o estudo e otimização de duas grandezas fundamentais, a tensão de cedência e a viscosidade plástica. Os valores que se prendem com a tensão de cedência, permitem observar o valor crítico necessário a transpor para que se verifique o escoamento.

Quanto à tensão de cedência, esta divide-se em estática e dinâmica. A tensão de cedência estática, é a tensão mínima que é necessário aplicar ao fluido para dar início ao escoamento. Tensão de cedência dinâmica, é a tensão mínima que é necessário aplicar para que continue a haver escoamento.

Quanto à viscosidade plástica, esta permite distinguir quais as caldas que têm maior ou menor facilidade de bombagem e trabalhabilidade. Sendo um valor mais baixo de viscosidade plástica característico de uma calda com maior fluidez de escoamento. Este fenómeno é explicado através das interações entre as partículas coloidais da suspensão que dificultam o fluxo[32, 33].

Na Figura 2.7 está representada diferença de efeitos entre um maior e menor viscosidade plástica.

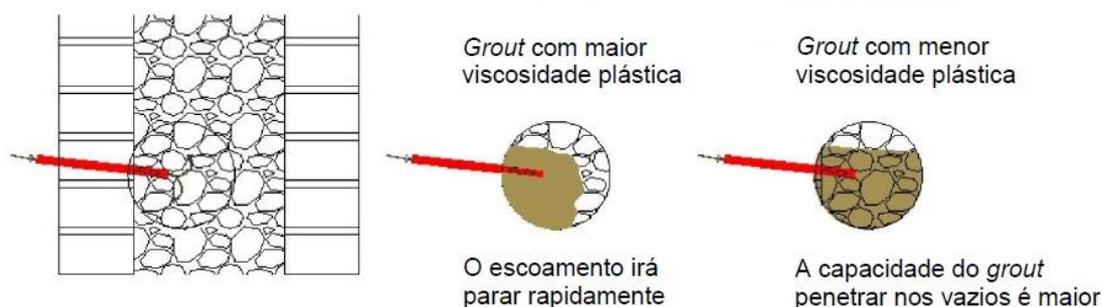


Figura 2.8 - Efeito de injeção de caldas com maior e menos viscosidade plástica [6]

Há relação entre o escoamento de um fluido com comportamento tixotrópico e o comportamento apresentado no decorrer do escoamento de caldas de injeção. Significa isto, que existem decréscimos da viscosidade durante uma taxa de corte imposta e a recuperação da estrutura inicial quando findada a tensão que tinha sido imposta. A calda apresenta, contudo, um comportamento reversível, entre floculação e desfloculação, que se deve às reações

químicas do ligante não serem suficientemente significativas no intervalo de tempo característico deste tipo de comportamento.

A calda de injeção que tenha na sua constituição apenas ligante e água, apresenta um comportamento usualmente insatisfatório, tornando o desempenho manifestamente inadequado reologicamente no que diz respeito à aplicabilidade da técnica de injeções. Para contrariar tal acontecimento, é fulcral introduzir-se um adjuvante à composição. Tem-se como exemplo de adjuvante um superplastificante, e assim reduzir a dosagem de água/ligante, que nalguns casos é demasiada elevada, técnica utilizada para garantir uma boa fluidez e injectibilidade, mas que traz repercussões negativas à suspensão noutras propriedades [34].

2.2.4. Reómetro rotacional

Quanto aos equipamentos que se podem utilizar para haver um posterior estudo reológico, há uma distinção entre os reómetros.

São estes os reómetros capilares, rotacionais entre vários outros equipamentos (tais como viscosímetros e reómetros extensionais), que têm como objetivo aferir características semelhantes às estudadas na presente dissertação.

O primeiro (reómetro capilar), força a extrusão, através da imposição de uma pressão alta e por meio de um cilindro de dimensões pré-definidas à amostra que se está a ensaiar. A queda de pressão no cilindro é medida para fornecer dados de taxa de fluxo mediante a pressão do fluido, a partir dos quais a viscosidade é calculada. A temperatura e a velocidade de corte podem ser controladas de perto para simular o ambiente de processamento relevante.

A reologia capilar é útil para aferir a viscosidade de suspensões que contenham partículas relativamente grandes, com altas concentrações de partículas. Os reómetros capilares aplicam forças altas, que facultam um perfil de comportamento em velocidades de corte, com valores mais altos do que na reologia rotacional. Como tal, está mais vocacionado para os processos industriais, visto que tem um desempenho mais otimizados para velocidades de corte mais altas. Em certos casos a aplicação requer maiores volumes de material de maneira a gerar uma curva de fluxo, tendo em conta esta limitação que depende do tipo de material em estudo, constata-se que não encaixaria com a escala da presente dissertação.

O reómetro rotacional, foi o utilizado para ensaiar as amostras da calda de injeção que servem de base ao estudo executado. Será descrito em seguida, juntamente com a descrição dos procedimentos de medição efetuados.

Protocolo de medições reológicas

A determinação dos parâmetros reológicos das caldas de injeção, têm como base e principais fatores de escolha de procedimento e equipamentos, o grau de precisão, a disponibilidade de recursos e a finalidade de aplicação dos resultados alcançados.

Existe um sem fim de procedimentos para se conseguir aferir estas determinações, há ensaios expeditos, que são executados com equipamento mais simples e que indiretamente fornecem indicadores de fluidez e estimativas de tensão de cedência. Há também instrumentos de medida tecnologicamente evoluídos, como é o caso dos reómetros rotacionais e viscosímetros. A maioria destes equipamentos permite realizar a análise e o tratamento dos resultados através de um *software* associado ao equipamento. É possível determinar a viscosidade em função da velocidade angular (no caso do ensaio dinâmico), tempo, temperatura e da tensão de corte aplicada. O equipamento utilizado em toda a campanha experimental desenvolvida no âmbito deste trabalho, os ensaios reológicos portanto, foi o reómetro rotacional Bohlin Gemini HR^{NANO} da Malvern Instruments, equipado com uma geometria de pratos paralelos, com 40mm de diâmetro. Na Figura 2.8 pode-se observar o esquema do modo de funcionamento do reómetro durante um ensaio de uma amostra de calda de injeção.

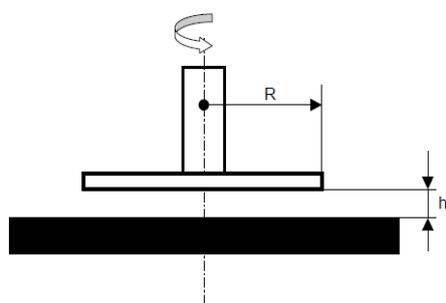


Figura 2.9 - Esquema do sistema de medição: h , é a distância - "Gap" e R o raio da geometria [7].

Quando se procedeu à campanha experimental, a geometria escolhida foram os pratos paralelos, ao invés da geometria cilíndrica coaxial ou de cone e prato, visto se tratar da geometria mais apropriada e usualmente utilizada neste tipo de estudos, acerca do comportamento reológico de caldas de injeção à base de cal hidráulica. Para além dos fatores já referidos, a geometria de pratos paralelos, foi também a utilizada em estudos desenvolvidos anteriormente e de carácter reológico idêntico[7, 35 , 36].

Autores como Yahia e Khayat [37] estudaram os modelos de Birgham e Herschel-Bulkley entre outros por forma a caracterizarem o comportamento reológico de caldas com aditivos minerais e adjuvantes. Os autores, contudo, não recorreram ao uso de equipamento como reómetros, recorreram à análise experimental do mini-cone para os ensaios e de dois viscosímetros. No geral, os modelos tiveram uma melhor resposta quanto menor fosse o comportamento reofluidificante das caldas, aproximando-se do comportamento Newtoniano[4]. Estados de pré-corte também foram aplicados noutros trabalhos para assegurar o estado estacionário. A variação das taxas de corte e da tensão ocorreram de maneira similar às descritas no presente trabalho[6].

3. Métodos e Procedimentos Experimentais

3.1. Considerações iniciais

O capítulo aqui introduzido descreve o procedimento experimental que foi adotado ao longo do estudo, que resultou na dissertação apresentada. Realiza-se uma descrição da metodologia experimental e uma caracterização dos materiais e equipamentos utilizados, bem como os critérios que serviram de base.

Os ensaios estão divididos em duas categorias, são estas, ensaios reológicos (estado fresco), resistência mecânica (estado endurecido), o ensaio de termogravimetria (estado endurecido, ainda que reduzido a pó), corresponde a uma subcategoria no estado endurecido. Foram realizados três ensaios, no estado fresco. Os ensaios são, conforme indicado no capítulo 2: – medições da taxa de corte com tensão de corte controlada (CSS), ensaios de fluência com tensão de corte controlada e medições com taxa de corte controlada (CSR). A segunda metade de ensaios recai nos ensaios realizados aos provetes das amostras no estado endurecido, são estes, os ensaios de resistência mecânica à flexão, compressão e ensaio de termogravimetria.

Houve uma fase preliminar de experimentação das quantidades de material utilizado, de forma a colocar-se o mínimo possível de água e superplastificante. Teve-se tal em consideração, pois, o superplastificante tem o efeito de retardar a presa, através do afastamento das moléculas, dificultando a sua agregação, tal como referido no capítulo anterior. Mas quando se junta à suspensão superplastificante em demasia, este tem o efeito contrário e faz com que haja exsudação e segregação, que são os principais fenómenos prejudiciais. Primeiramente, fizeram-se algumas amassaduras de caldas. Colocando-se várias quantidades de cal (NHL 5), mas abaixo do valor de 350 g reparou-se que a amassadura não se conseguia fazer. Como a dosagem de material é quantificada em percentagem, ao utilizarem-se quantidades de NHL 5 inferiores a 350g, ter-se-iam repercussões significativas, quando se incorresse nalgum erro de medições. Quanto à água depreendeu-se que a melhor relação água/ligante foi de 0,4.

Tal como se fez com a água/ligante também se determinou uma relação adjuvante/ligante ótima, este valor teve em conta a mesma linha de pensamento. Reduziu-se a relação ao mínimo admissível mas que, simultaneamente, garantisse a maior fluidez da suspensão em estudo.

3.2. Materiais

3.2.1. Cal hidráulica natural

O ligante hidráulico utilizado para a execução das diferentes caldas de injeção foi a cal hidráulica natural (NHL 5) da Secil Argamassas [Anexo VI]. A base deste ligante é essencialmente constituída por silicatos e aluminatos de cálcio, contendo, porém, um baixo teor de hidróxido de cálcio e este obtém-se da cozedura de calcário margoso. Através da norma NP EN 459-1:2011 classifica-se o produto como NHL5 e as suas características podem ser observadas na Tabela 3.1.

Embora as características do produto em questão tenham um fator preponderante, a sua compatibilidade comparativamente aos materiais existentes em alvenarias antigas é satisfatória, o que reflete uma boa opção de escolha para a produção de todas as amostras que constituem os ensaios experimentais.

Tabela 3.1 - Características da cal hidráulica NHL5 [30]

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

3.2.2. Superplastificante

Na campanha experimental foi usado como adjuvante principal Sika Viscocrete 225P em pó, um superplastificante de terceira geração da Sika, fabricado de acordo com a norma EN 934-2 [Anexo VII]. É um produto que tem na base policarboxilatos, que garantem a repulsa entre partículas sólidas na sua essência, tal fenómeno deve-se à dispersão iónica e combinação de efeitos estéricos e electrostáticos [7].

Segundo alguma literatura, esta repulsão electroestérica produzida pela adição do adjuvante na amassadura da calda de injeção incrementa a distância entre partículas sólidas, de modo a que a sua reaproximação não ocorra, diminuindo assim os fenómenos de floculação e permitindo uma mais simples injeção aumentando a sua eficiência [22].

O superplastificante em questão tem ainda como vantagens principais permitir uma relação água/cimento baixa, além deste facto, consegue-se preservar a fluidez durante mais

tempo após a amassadura da calda de injeção. Na Tabela 3.2 são apresentadas as características deste adjuvante.

Tabela 3.2 - Ficha técnica superplastificante [Anexo VII]

Nome Comercial	Sika Viscocrete 225 P
Função	Reduzir dosagem de água Promover fluidez Evitar floculação
Estrutura do Material	Policarboxilato
Cor	Branca
Massa Volúmica (g/cm³)	0,6 ± 0,1
PH	4,2 ± 1,0
Carga	Aniônica
Teor de Iões Cloreto (%)	≤ 0,1

No presente estudo, após se terem juntado tanto o aditivo de fibras de polipropileno, também se introduziu o superplastificante à calda. Sendo deste modo possível chegar a várias amostras, todas com uma relação de água/ligante e quantidade de superplastificante constante, sendo apenas variada a percentagem de fibras da suspensão. Foi fixada uma percentagem de 0.2% de superplastificante tendo em conta a massa de NHL, ou seja uma massa constante de 0.7 g, por amassadura.

O excesso de superplastificante, como já referido, para além de provocar a instabilidade da amostra, promove os fenómenos de segregação, exsudação e sedimentação, o que dificulta todo o processo de injeção da calda e a sua performance.

3.2.3. Fibras de polipropileno

Para além da mistura entre a água, cal hidráulica e superplastificante ainda se juntou mais um aditivo, que teve repercussões mais significativas do que as restantes. As fibras de polipropileno que são derivadas do petróleo. As fibras surgiram do enquadramento deste estudo, com alguns outros já realizados e visam aferir o resultado prático na tensão de cedência tanto estática como dinâmica [8, 16].

Para testar a influência que as fibras teriam na injeção das caldas, executaram-se quatro misturas, cada uma com uma quantidade predefinida de fibras, contabilizada através de percentagens em relação à massa total de NHL. Foram então as percentagens de 0.025%, 0.05%, 0.1% e 0%, dando em gramas 0.09, 0.18, 0.35 e 0 respetivamente. Com estas diferentes dosagens, percebe-se que o reajustamento das fibras mediante a sua quantidade é diferente,

trazendo benefícios em termos tixotrópicos, por outro lado também traz malefícios, pois quando há uma elevada concentração de fibras pode haver dificuldade em escoar a calda [32].

Na Tabela 3.3 podem observar-se as características do produto.

Tabela 3.3 - Ficha técnica fibras de polipropileno [Anexo V]

Nome Comercial	Vimafiber- fibras cortadas em polipropileno
Função	Reforço de argamassas e betonilhas
Estrutura do Material	Polipropileno
Cor	Transparente/Branco natural
Massa Volúmica (kg/m³)	910
Comprimento da Fibras (mm)	6 a 12
Forma	Frisada
Alongamento médio à Ruptura (%)	80

Quanto às características das fibras, após consulta da ficha técnica do produto, fornecido pelo fabricante Vimaplás, a dosagem de fibras inicia-se a 0.6 Kg/m³, contudo mediante a utilização assim se doseia a quantidade de fibras. Está sujeita ao enquadramento do objeto onde vai ser aplicada.

As fibras de polipropileno têm ainda uma grande vantagem, no que diz respeito ao fator económico, pois estas representam uma solução vantajosa e de fácil aplicação.

3.3. Composição das caldas de injeção

Na Tabela 3.4 estão representadas todas as composições de calda utilizadas na realização do estudo.

Tabela 3.4 - Composições das várias caldas

	Fibras de Polipropileno		Superplastificante		Relação água/ligante	
	(%)	g	(%)	g	(%)	g
ref_1.1	0	0	0.2	0.7	0.4	140
ref_1.2	0	0	0.2	0.7		
ref_1.3	0	0	0.2	0.7		
ref_1.4	0	0	0.2	0.7		
0.09_qf_2.1	0.025	0.09	0.2	0.7		
0.09_qf_2.2	0.025	0.09	0.2	0.7		
0.09_qf_2.3	0.025	0.09	0.2	0.7		
0.09_qf_2.4	0.025	0.09	0.2	0.7		
0.18_qf_3.1	0.05	0.18	0.2	0.7		
0.18_qf_3.2	0.05	0.18	0.2	0.7		
0.18_qf_3.3	0.05	0.18	0.2	0.7		
0.18_qf_3.4	0.05	0.18	0.2	0.7		
0.35_qf_4.1	0.1	0.35	0.2	0.7		
0.35_qf_4.2	0.1	0.35	0.2	0.7		
0.35_qf_4.3	0.1	0.35	0.2	0.7		
0.35_qf_4.4	0.1	0.35	0.2	0.7		

A nomenclatura atribuída às composições das caldas analisadas, exibidos na Tabela 3.4 coluna da esquerda, respeita a seguinte ordem: quantidade de fibras de polipropileno que contém, que diz respeito ao primeiro número. Em seguida tem duas letras que indica que o valor anterior é exatamente quantidade de fibras e em seguida o outro número que faz parte da nomenclatura é para diferenciar as amostras, pois para cada amassadura utilizaram-se 4 amostras, para se conseguir apresentar um valor médio para as propriedades aferidas.

0.09_qf_2.1

(1) (2) (3)

Legenda: Nomenclatura utilizada: (1) Quantidade de fibras de polipropileno em gramas – 0, 0.09, 0.18, 0.35; (2) Siglas (quantidade de fibras); número atribuído ao provete, a contagem vai desde 1.1 até 4.4.

Consegue-se observar, na tabela 3.4 para além dos provetes com a designação anteriormente descrita, outros com a designação de *ref_1.1*, *ref_1.2*, *ref_1.3*, *ref_1.4*, estes referem-se aos provetes de referência, apenas têm na sua constituição água, NHL e superplastificante nas quantidades explanadas na Tabela 3.4.

Com um total de 14 provetes analisados e 4 composições, todas foram analisadas no estado fresco, mediante ensaios no reómetro em regime estacionário, assunto à frente mais explorado.

De notar que o rácio água/ligante é o mesmo em todas as amostras, com um valor de 40% do valor da massa de NHL (350g). Como se conclui após a observação da Tabela 3.4, estão discriminadas as quantidades, bem como a percentagem em relação à massa de ligante, de todos os constituintes da calda.

3.4. Procedimento de amassadura

Todas as amostras que foram utilizadas na fase experimental deste trabalho foram elaboradas no laboratório de materiais do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da FCT-NOVA, entre os meses de Março e de Maio de 2019. Os ensaios que dizem respeito à fase endurecida da calda foram também todos executados no DEC, porém os ensaios reológicos, foram realizados no laboratório de reologia do Centro de Investigação de Materiais (CENIMAT-i3N) do Departamento de Ciência dos Materiais da FCT-NOVA.

As amassaduras das diversas composições, que foram apresentadas na Tabela 3.4 foram executadas no laboratório a uma temperatura ambiente de 20 ± 2 °C e uma humidade relativa de $55 \pm 5\%$. A água utilizada para preparar as amostras, foi água corrente a uma temperatura de 18 ± 2 °C. As amostras foram preparadas num recipiente previamente humedecido com

capacidade para 20 L e uma hélice helicoidal para facilitar a homogeneização, objetos que podem ser observados nas Figura 3.1:



Figura 3.1 - Material utilizado para a amassadura (esq.), Berbequim + haste helicoidal (dir.)

O procedimento de amassadura adotado, assemelhou-se aos utilizados em trabalhos anteriores[8]. Este processo inicia-se quando se junta à totalidade da NHL, o superplastificante e as fibras de polipropileno (se não for a mistura de referência). Após a homogeneização destes, junta-se a água necessária para concluir a mistura, todos estes componentes são amassados mecanicamente durante 10 minutos.

Há trabalhos que promovem um atraso na incorporação do superplastificante[38, 39, 40] contudo, como indicado anteriormente, adicionou-se o superplastificante em pó à NHL antes de se juntar a água.

Na Figura 3.2 pode-se observar o material utilizada no laboratório para execução da suspensão.



Figura 3.2 - Material para se proceder às dosagens mais detalhadas e sensíveis

Na Figura 3.3, mostram-se a balanças com diferentes sensibilidades de medição.



Figura 3.3 - Balança digital precisão 0.001g (esq.), Balança digital precisão 0.1g (dir.)

3.5. Medições reológicas

Após a execução da calda conforme descrito no subcapítulo da amassadura, a calda era colocada num recipiente próprio com uma tampa de rosca, que servia para fazer o transporte do laboratório de materiais do DEC, para o CENIMAT. Começaram-se os ensaios sempre ao fim de 10 minutos após se juntar a água à NHL, pois era o tempo que se tinha de despendar para percorrer a distâncias entre os laboratórios e colocar a amostra no reómetro rotacional (Figura 3.4). Este equipamento tem associado um *software* que é o Bohlin Rotational.



Figura 3.4 - Reómetro rotacional Gemini HR^{nano} da Bohlin Instruments (Malvern, UK)

Utilizou-se uma geometria de pratos paralelos com 40 mm de diâmetro e colou-se uma lixa (GR 600) no prato superior (Figura 3.5). A presença da lixa tem como objetivo impedir deslizamentos entre o prato superior e a amostra, pois o atrito entre a amostra e a superfície lisa da geometria pode ser insuficiente. Impôs-se uma distância entre ferros (“gap”) de 2 mm,

em todas as medições reológicas executadas, bem como a temperatura constante de 20 °C, estes parâmetros vão ser constantes durante o ensaio da amostra.

A distância que está compreendida entre os dois pratos (“gap”), tem restrições para que haja uma livre rotação da geometria superior, estão entre estas restrições o facto de o “gap”(2 mm), não poder ser inferior a dez vezes o tamanho da maior partícula da suspensão. Ao haver um não cumprimento desta premissa, os resultados que adviessem desta medição, estariam a incorrer em erros de precisão.



Figura 3.5 - Geometria sem lixa (esq.), Geometria com lixa (dir.)

3.5.1. Medições de escoamento com tensão de corte controlada (CSS controlled shear stress)

O ensaio CSS, como o próprio nome indica, consiste na aplicação de uma tensão de corte controlada para se aferir as características que se pretendem estudar, sendo que neste estudo é a tensão de cedência que se quer aferir. Aplica-se uma tensão de 0.006 Pa até um máximo de 15 Pa e quando atingido, retorna-se ao valor inicial. O declive da rampa é de 0.2 Pa/s, o que quer dizer que a cada segundo que passa, aumenta-se ou diminui-se (na descida), 0.2 Pa. Segue-se um período de 300 s (5 minutos) em que a amostra não é solicitada. Este ciclo repete-se até se atingir os 50 minutos após o momento em que se inseriu a amostra.

Fez-se este ensaio para as quatro composições já referidas, apresentando-se os resultados em capítulos seguintes. Neste ensaio consegue-se ainda estudar o valor da tensão de cedência dinâmica e estática devido à abrangência de valores a que a amostra é sujeita.

Pode visualizar-se na Figura 3.6, como é o comportamento típico deste tipo de ensaios.

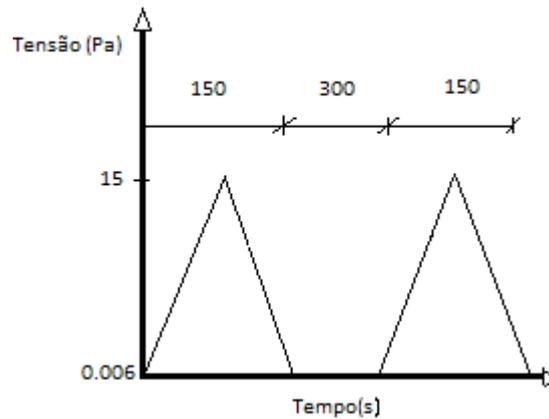


Figura 3.6 - Gráfico típico ensaio CSS

3.5.2. Ensaio de fluência - tensão de corte controlada

O ensaio consiste na aplicação de forma instantânea de uma tensão constante e após tal imposição mede-se a deformação e/ou taxa de deformação da amostra. A resposta de amostras líquidas dentro dos parâmetros Newtonianos e viscoelásticos (líquida) efetuados em regime linear são ilustrados na Figura 3.7, que representa um comportamento típico.

O regime linear faz alusão à linearidade entre solicação mecânica, a tensão imposta à calda e à deformação constante no tempo da aplicação da tensão, após o seu período transitório primário.

A calda deixa de fluir abaixo da tensão de corte critica e recomeça a fluir quando se aplica uma tensão superior.

De igual forma, o regime linear tem o significado prático de um comportamento de relaxação do material que depende de um só fator, o tempo.

Este ensaio foi feito com quatro valores de tensão, mas apenas está representado o ensaio com a tensão de 0.006 Pa, sendo que com os restantes valores de tensão o comportamento mantém-se similar. Os valores que solicação são, 0.006 Pa como já referido, 0.06 Pa, 0.6Pa e 6 Pa.

O ensaio tem a duração total de 1200 s (20 minutos), em que a amostra é solitada ininterruptamente ao longo desse período de tempo.

Neste teste pode tirar-se o valor da tensão de cedência através da deteção de uma mudança abrupta da viscosidade aparente, a isto dá-se o nome de fenómeno de bifurcação da viscosidade.

A análise deste teste está feita no capítulo 4.2.3.

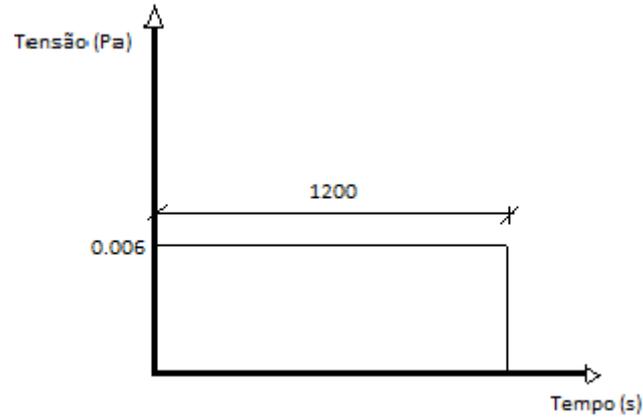


Figura 3.7 - Gráfico típico ensaio de fluência

3.5.3. Medição de escoamento com taxa de corte controlada (CSR – controlled shear rate)

Neste ensaio, controla-se a taxa de corte variando a sua tensão. Com a interpretação dos resultados, tiram-se conclusões também da tensão de cedência dinâmica e estática, mas a amostra neste caso é sujeita a patamares de taxa de corte.

Pode visualizar-se em seguida na Figura 3.8 o comportamento típico do ensaio.

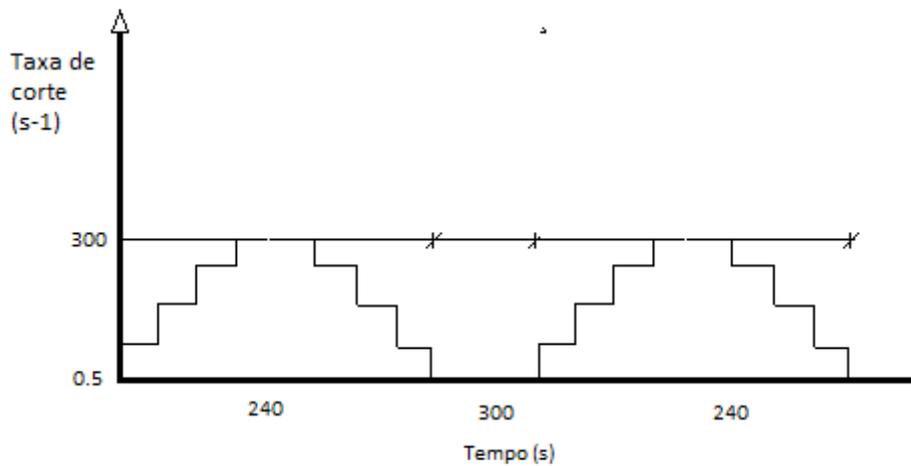


Figura 3.8 - Gráfico típico de ensaio CSR

3.6. Propriedades no estado endurecido

Utilizando o mesmo procedimento de ensaio das amassaduras para o estudo reológico e após a sua conclusão, dividiu-se a calda executada por diversos moldes prismáticos, com dimensões indicadas no subcapítulo seguinte.

Em seguida, na Figura 3.9 podem-se observar um dos moldes já com a calda.



Figura 3.9 - Provetes para posteriormente serem ensaiados mecanicamente

3.6.1. Resistência mecânica

Foram realizados vários ensaios no estado endurecido de forma a simular e avaliar o comportamento mecânico das diversas caldas aos 28 dias.

Para estes estudos fizeram-se as amassaduras iguais às executadas para o estudo das propriedades reológicas. Após a amassaduras, colocaram-se as amostras em moldes prismáticos de dimensões 40x40x160 mm, apresentados na Figura 3.10. Após a cura de 28 dias, a uma temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $65 \pm 5\%$, sob as condições que existem na sala condicionada do DEC, os provetes estavam prontos a ser ensaiados. Foram desmoldados após se ter a certeza que já tinham resistência superficial suficiente para se auto-sustentarem.



Figura 3.10 - Molde prismático

Na Figura 3.11, os provetes na sala condicionada, temperatura e humidade controladas



Figura 3.11 - Provetes na sala condicionada

Após o desmolde os provetes foram cuidadosamente pesados (balança já observada no capítulo 3.4 “Procedimento de Amassadura “, na Figura 3.3 direita) e com o auxílio de uma craveira foram obtidas as dimensões das amostras prismáticas.

Em seguida descrevem-se os ensaios para aferir a resistência mecânica.

3.6.1.1. Flexão

Os ensaios realizados estado endurecido dos provetes, visaram determinar a resistência à flexão de 16 provetes prismáticos (4 de cada composição). A norma que serve de base para este ensaio é a EN 1015-11:1999^a [46], utilize-se a máquina “ZWICK Z050”, equipada com uma célula de carga de 2 kN. O ensaio baseia-se na aplicação de uma força a meio vão na face superior do provete. Como o provete está apoiado a uma distância fixa de 10 cm na fase inferior, acaba por estar solicitado superiormente a uma força de compressão e inferiormente a uma força de tração. Tipicamente neste tipo de ensaio o provete acaba por ceder primeiramente na fase em

que está sujeito à tração. Sendo uma característica típica destes materiais quando atingida a presa, uma rotura frágil, na zona em que é solicitado com a força de tração, pois apenas resistem a baixos esforços de tração. A forma como se coloca o provete na máquina de ensaio é crucialmente importante, uma vez que se tem de garantir a equidistância dos locais de apoio.

Após a colocação adequada do provete, procede-se ao início do ensaio, que começa com a aplicação de uma carga a uma taxa de 0.2 mm/min até se atingir a rotura do provete. Quando o provete atinge a carga última na zona tracionada, finda-se o ensaio, resultando duas metades do provete, utilizadas para ensaios posteriores.

O *software* de leitura regista os valores de força aplicada e através do tratamento dos dados resultantes do ensaio e calcula-se o valor da resistência à flexão (R_f), a expressão é apresentada de seguida na equação 3.1:

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times L}{a \times b^2} [Pa] \quad (3.1)$$

Onde R_f representa a resistência à flexão (Pa), F_f a carga de rotura à flexão (N), L a distância fixa entre os apoios na face inferior dos provetes (m), a é a largura do provete em relação à posição de aplicação da carga (m) e b a altura do provete relativamente ao local de aplicação da carga, isto é, a e b são as dimensões médias das bases dos provetes ensaiados. A Figura 3.12 explana o ensaio anteriormente descrito tanto como o equipamento utilizado e alguns provetes após o ensaio.

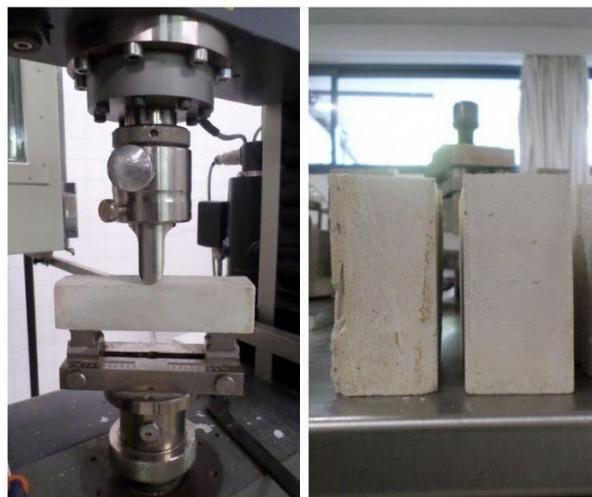


Figura 3.12 - Equipamento utilizado no ensaio de flexão (esq.), provetes de ensaio após ensaio de Flexão (dir.)

3.6.1.2. Compressão

Este ensaio realizou-se segundo a norma EN 1015-11: 1999 [41] e o equipamento utilizado é o mesmo do ensaio anterior, a máquina universal de tração “ZWICK Z050”, contudo foi utilizado uma célula de carga de 50 kN, em vez da de 2 kN (utilizada no ensaio de flexão).

Utilizaram-se as metades resultantes do ensaio de flexão. Estas metades foram colocadas num molde metálico, que garante uma área de ação por parte da “ZWICK Z050” de 40 x 40 mm², garantindo deste modo uma maior uniformização da aplicação da carga e uma mais eficaz aderência entre o provete e a prensa. O ensaio inicia-se quando se coloca o provete entre os dois pratos. O carregamento sofre um aumento à taxa de 0.7 mm/min de forma constante até se atingir a rotura do provete em ensaio. No decorrer do ensaio, os valores de deformação e força aplicada são registados no *software* de apoio da máquina e o máximo valor de força aplicada foi registado logo após a rotura do provete. A Figura 3.13 apresenta o ensaio descrito.



Figura 3.13 - Ensaio de compressão

A resistência à compressão é calculada a partir da equação 3.2

O valor da resistência à compressão sai da expressão:

$$R_c = \frac{F}{L \times H} \text{ [Pa]} \quad (3.2)$$

Em que, R_c é o valor médio de resistência à compressão (Pa), F é o valor da força máxima que provoca rotura à compressão (N), L é a largura (m) e o H a altura (m).

3.6.2. Aderência

A importância de se estudar a aderência prende-se com o facto de quando se recorre à técnica de injeção para consolidar elementos de alvenaria, não se sabe a que esforços a calda vai estar sujeita. Como muitas vezes há paredes resistentes, as forças de corte têm uma importância significativa, daí a importância de se realizar esta caracterização.

O ensaio de aderência é uma técnica que consiste em submeter o provete a forças de corte. A máquina que se utiliza para o ensaio, é mais uma vez a “ZWICK Z050”, e os apoios são iguais ao utilizados no ensaios de flexão, contudo a distância dos apoios é diferente pois têm de se criar condições que vão de encontro ao que se pretende aferir.

Os blocos de alvenaria, foram previamente cortados com as dimensões 4 x 4 x 2 cm. Posteriormente, foram juntos em conjuntos de 3, com uma distância entre eles de 2 cm. Utilizou-se uma fita adesiva de alumínio (Figura 3.14 esq.), para que aquando da colocação da calda nos espaços entre blocos, não houvesse fugas de material. Após este processo colocaram-se os provetes na sala condicionada a uma temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de 65 ± 5 %, conforme já referido e esperam-se 28 dias.

O ensaio é executado com a garantia da distância entre apoios ser de 8 cm entre eles e o carregamento aumenta à taxa de 0.7 mm/min.



Figura 3.14 - Provetes após ser colocada a fita adesiva (esq.), Provete a ser ensaiado na máquina de ensaio "ZWICK Z050" (dir.)

3.6.3. Termogravimetria

A análise termogravimétrica (TGA – “*Thermogravimetric Analysis*”) é uma técnica que visa medir a alteração e registo das perdas de massa, através da submissão da substância a uma variação de temperaturas [42].

O equipamento de termogravimetria baseia-se numa microbalança inserida numa mufla (Figura 3.15 d), monitorizada por um programa de computador que regista temperaturas e variações de massa da amostra. As variações de massa surgem quando se perde um componente volátil que faz parte da constituição da amostra[33].

Neste estudo, amostras das diferentes composições, resultantes da fragmentação dos provetes dos ensaios de resistência mecânica (Figura 3.15 a) e b)), já foram secas em ambiente condicionado, com as mesmas características mencionadas em capítulos anteriores. Procedese à moagem com o auxílio de um almofariz e de apenas 1 g destas amostras (Figura 3.15c), sendo apenas esta quantidade o necessário para a realização do ensaio. Pode observar-se na Figura 3.15 o processo de preparação da amostra.

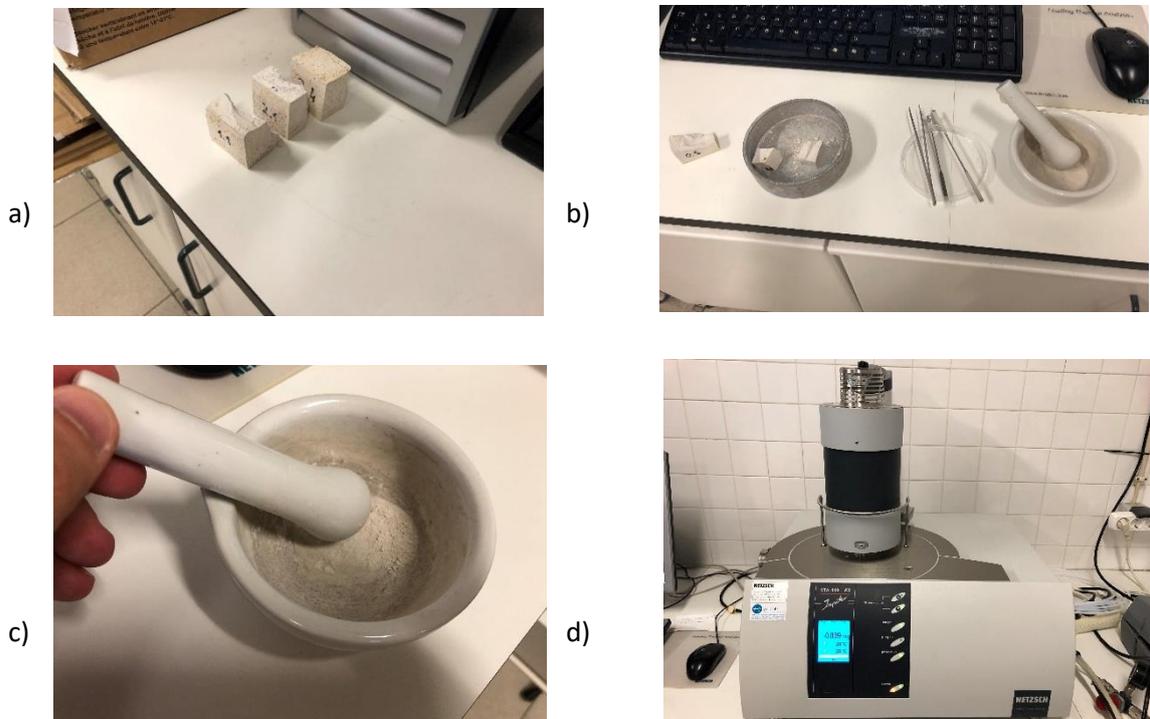


Figura 3.15 - Processo de preparação da amostra para o ensaio de Termogravimetria.

A análise é efetuada com o auxílio do equipamento de análise termogravimétrica TG-DTA/DSC STA 449 F3 Jupiter da Netzsch-Gerätebau GmbH existente no DEC.

O presente ensaio, executa-se com base em condições experimentais que são impostas pelo *software* ao equipamento de análise. O equipamento para garantir as condições ideais, produz uma atmosfera dinâmica com recurso ao gás N_2 (40 ml/min) com uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ desde os $20\text{ }^\circ\text{C}$ até aos $1000\text{ }^\circ\text{C}$, sendo que a paragem de segurança se faz no valor de $1010\text{ }^\circ\text{C}$.

4. Apresentação e análise dos resultados

4.1. Considerações Iniciais

No presente capítulo, expõem-se os resultados obtidos nos diversos procedimentos anteriormente referidos no capítulo 3. Juntamente faz-se um paralelismo com a bibliografia apontada no capítulo 2.

Nos resultados obtidos há semelhanças com trabalhos relativos a temas idênticos. Como Miguel [7] concluiu, embora os aditivos sejam diferentes, à medida que estes são juntos à calda há um aumento da tixotropia da calda. Este autor fez uma análise mais detalhada em termos tixotrópicos através da área em gráficos similares ao apresentado na Figura 4.3 [7].

Começa-se por demonstrar os resultados dos ensaios por meio da ilustração gráfica. Primeiramente, demonstra-se como as fibras de polipropileno podem alterar as propriedades reológicas das caldas. De seguida, efetua-se a avaliação das tensões de cedência dinâmica e estática, tenta-se avaliar o comportamento da calda quanto à sua tixotropia com base em diferentes procedimentos de medição.

4.2. Medições reológicas

4.2.1. Medições com controlo de tensão de corte (CSS)

Dos modelos reológicos explanados em capítulos anteriores, fez-se uma análise dos resultados obtidos.

Os dois modelos mais usados são o modelo de Bingham e o modelo Herschel-Bulkley, que como referido em capítulos anteriores, que dependendo do valor de “n” até podem coincidir.

Devido ao facto comentado no parágrafo anterior e observando a Figura 2.6, decidiu fazer-se a análise com base no modelo de Bingham. Porém os valores entre os dois modelos são próximos. Faz-se a escolha em conformidade com escolhas feitas noutros trabalhos [4, 43, 44].

A partir da Figura 4.1, pode constatar-se que, com o decurso do tempo, aumenta a viscosidade plástica. A viscosidade plástica surge do modelo utilizado, em que Bingham relaciona a proporcionalidade entre a tensão de corte e taxa de corte para tensões superiores ao limite de escoamento. Este fenómeno deve-se ao facto de, ao longo do tempo as partículas se irem agrupando o que torna a ligação mais coesa, é um processo reversível. Por outro lado, como se está a trabalhar com cal hidráulica, assim que se procede à sua mistura com água, a calda começa a hidratar, fenómeno este, em tudo diferente ao anterior descrito pois é um processo não reversível. Só se consegue preservar a trabalhabilidade ao longo do tempo, porque a mistura tem superplastificante e como já referido anteriormente, retarda a presa.

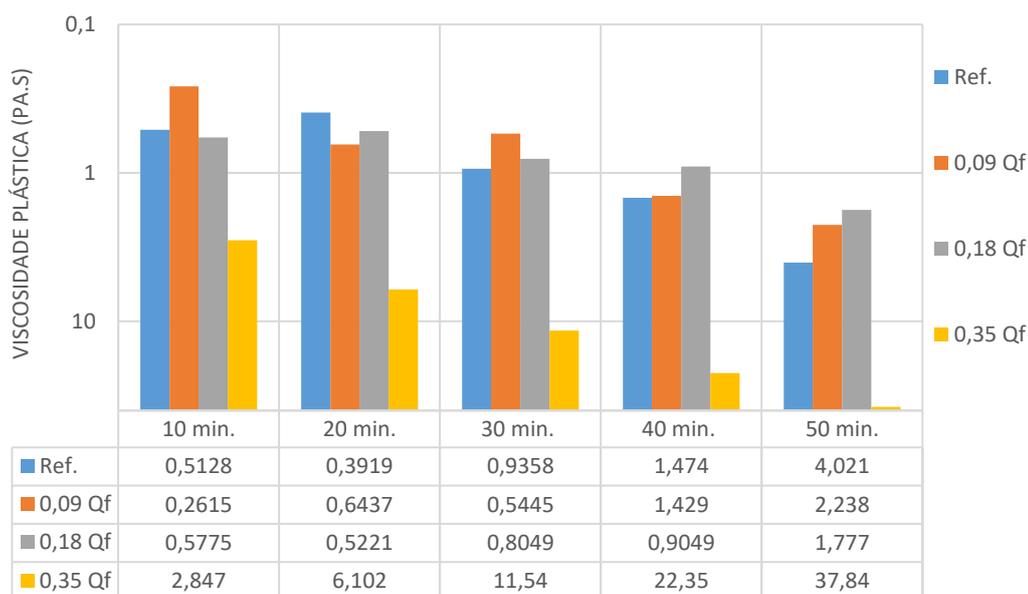


Figura 4.1 - Evolução da viscosidade plástica com o tempo e com as diferentes dosagens de fibras

Uma abordagem comum, para obter a tensão de cedência é pelo ajustamento do modelo Bingham aos valores experimentais. Tal é possível, se houver uma medição precisa a baixas taxas de corte, o que se pode tornar complicado, devido ao escorregamento entre a parede da geometria e a amostra.

Contudo neste estudo não ocorreu tal fenómeno, pois foi utilizada uma lixa colada na geometria, tal como referido no capítulo anterior, por forma a evitar o escorregamento através do aumento do atrito entre a geometria e as amostras analisadas. É observável também que, na calda com uma quantidade de fibras de PP de 0.09g ou seja 0.025%, tem-se um decréscimo de viscosidade plástica.

Pode-se afirmar, que quando analisado um gráfico tensão vs taxa de corte e que represente um aumento de tensão, seguido de um descarregamento, pode-se quantificar o quão tixotrópico é o material, quanto maior é a sua fase de histerese, como se constata na Figura 4.2. Isto prende-se com o facto de as fibras, que fazem parte desta calda, aumentarem as propriedades tixotrópicas. Estas propriedades tixotrópicas resultam numa recuperação da calda ao seu estado de repouso. O comportamento reofluidificante, consequentemente, faz com que, quando instauradas tensões de corte se diminua a viscosidade. A Figura 4.2 é o comportamento teoricamente expectável e a Figura 4.3 é um gráfico resultante da análise dos dados estudados.

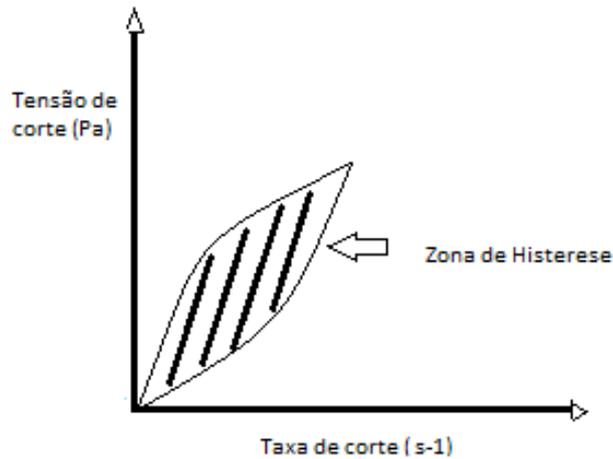


Figura 4.2 - Gráfico típico, tensão de corte *vs* taxa de corte

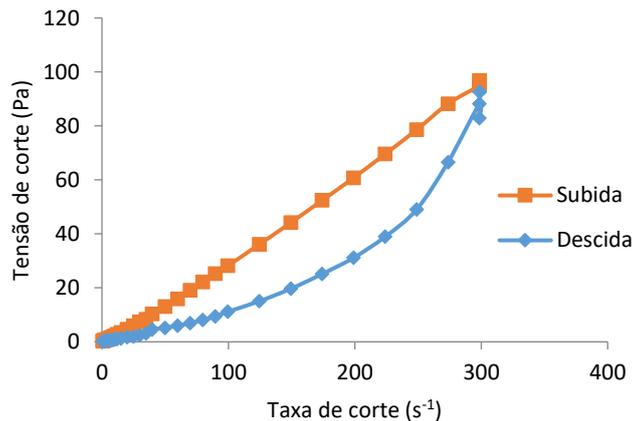


Figura 4.3 - Exemplo da curva de escoamento da calda 0.18g QF com controlo da tensão de corte

Na Figura 4.4 tem-se uma percepção do decréscimo da viscosidade plástica à medida que se vão introduzindo mais fibras de PP na composição, e segundo Matos [4], a tixotropia é decréscimo da viscosidade de forma contínua e sempre que aplicada uma tensão. Como tal na Figura 4.4 pode-se observar que viscosidade vai sempre diminuindo. Estes valores foram extraídos do ensaio CSS aos 20 minutos.

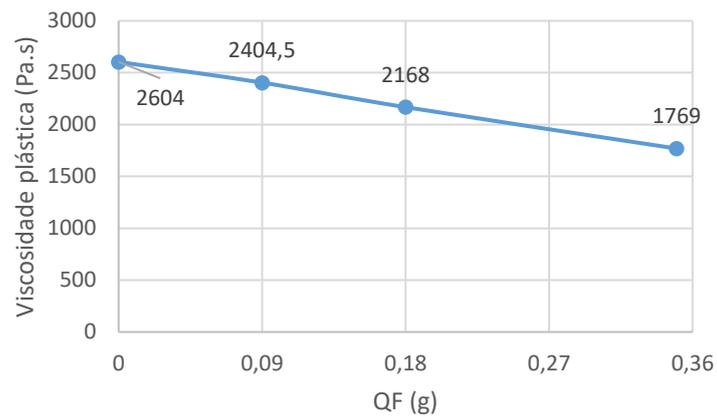


Figura 4.4 - Decréscimo da viscosidade plástica mediante QF de fibras de PP

Na Figura 4.5 pode observar-se que através da leitura da ordenada na origem das tangentes às curvas de carregamento (up – termo em Inglês) e descarregamento (down), chega-se ao valor da tensão de cedência estática e dinâmica respetivamente.

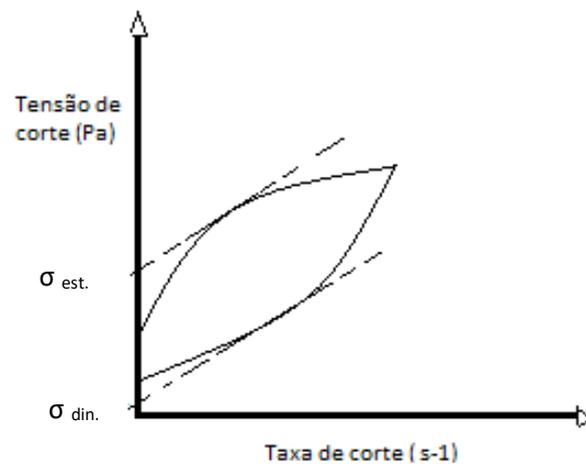


Figura 4.5 - Gráfico tensão de corte vs taxa de corte

Na Figura 4.6, estão apresentados os valores das tensões de cedência estática mediante o tempo, para as quatro composições de calda.

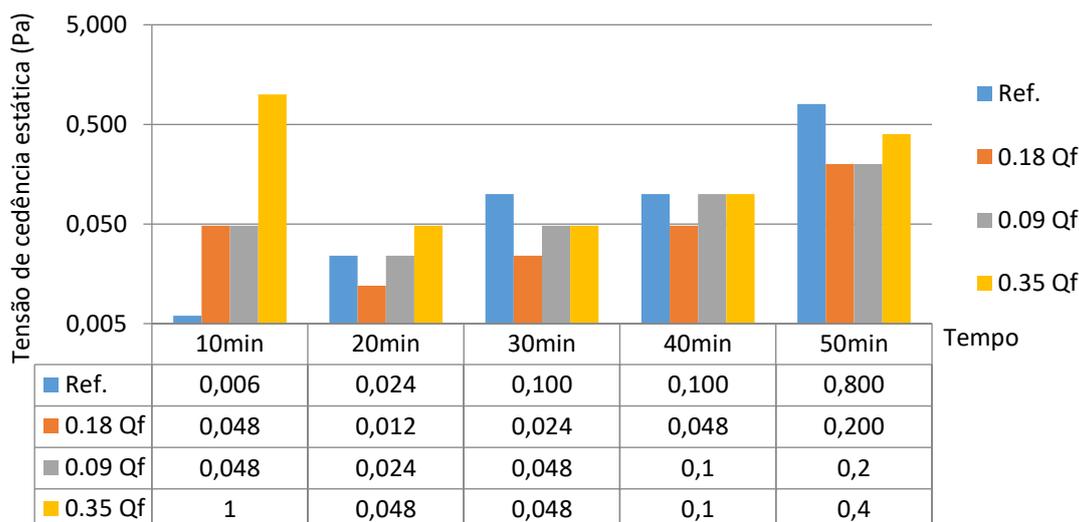


Figura 4.6 - Tensão de cedência estática (CSS) em função do tempo e da dosagem de fibras de PP

Conforme demonstrado na Figura 4.6 os valores da tensão de cedência estática têm uma dada concordância entre eles ao longo do tempo. Há ligeiras singularidades como o valor de 1 Pa, aos 10 minutos (primeira barra amarela), que sai da moda de valores característicos de tempo, após a amassadura da calda. Como a calda em causa é referente aos 0.35 g de quantidade de fibras, o valor pode ser um resultado de, aquando do transporte da calda, ter havido uma ligeira deposição de fibras, ainda que antes da colocação da amostra no reómetro tenha havido uma tentativa de homogeneização com uma colher, pode não ter sido suficiente, ligando-se e fazendo um pequeno aglomerado e que só ao valor de 1 Pa de tensão aplicada é que foi desfeito, havendo um novo reajustamento das fibras. Uma outra explicação e talvez mais plausível, é ter ocorrido uma aglomeração de fibras quando a amostra já se encontrava no prato do reómetro. Quanto ao valor de 0.8 Pa, obtido aos 50 minutos para a calda de referência, suspeita-se que advenha da coesão devido à hidratação. A partir da análise dos resultados, aferiu-se que após os 40 minutos já há um início de presa, contudo ainda não foi concluída. Daí o elevado valor explanado na figura 4.6.

Conforme também se pode observar na Figura 4.6, há aumentos da tensão de cedência estática quando se aumenta a dosagem de fibras PP, tal também acontece noutros estudos embora as adições sejam de óleos e não de fibras, contudo confirma o facto observado[7].

As medições reológicas com base no protocolo CSS também permite a determinação das tensões de cedência estáticas e dinâmicas, com base na evolução da viscosidade aparente na fase do carregamento e descarregamento em termos da tensão de corte. Como se evidencia na Figura 4.7 a) e b), a alteração na viscosidade aparente para a calda de referência na curva referente ao carregamento de tensões sobre a amostra antes da cedência e após a cedência é bastante repentina; isto é, a viscosidade aparente tende para infinito em baixas tensões de corte e há uma viscosidade aparente finita numa tensão de corte mais alta.

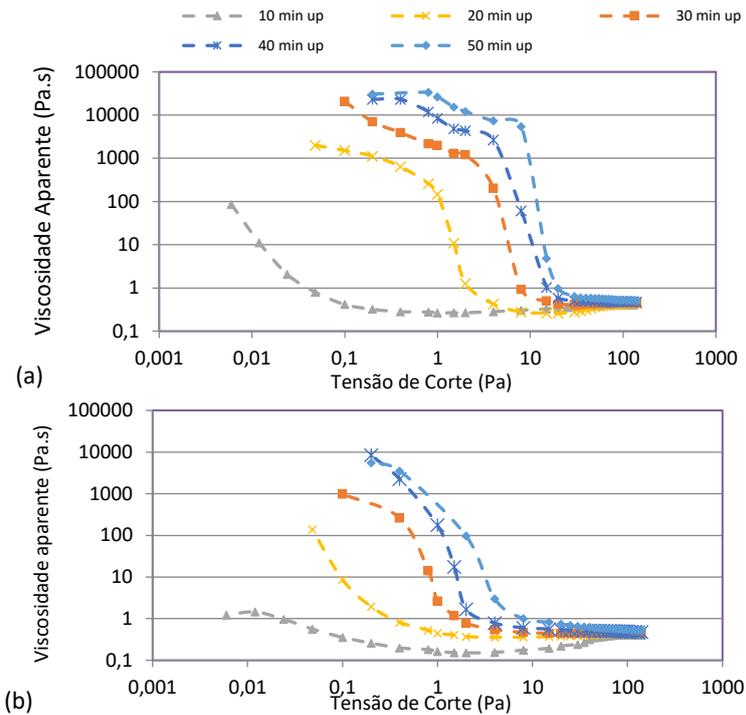


Figura 4.7 - Viscosidade vs taxa de corte do ensaio CSS a) curvas do carregamento b) curvas do descarregamento

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.7, pode-se observar que a curva do carregamento (“up”- em Inglês) apresentou maiores valores de viscosidade aparente e tensão de corte do que a curva de descarregamento (“down”) devido à tixotropia. As tensões de corte aumentam, com o intervalo de tempo, de 0.006 a 8 Pa. A tensão de cedência estática aumenta para 1 Pa após 20 minutos e entre 20 e 40 minutos aumenta o valor da tensão de corte, de 2 para 4 Pa. Em relação à curva que diz respeito ao descarregamento, a tensão de cedência dinâmica aumenta com o tempo ainda que com uma menor significância. A tensão de cedência dinâmica é superior a 1 Pa após 30 minutos. Entre os 30 e os 50 minutos o valor da tensão de corte aumenta de 2 Pa para 8 Pa. Na Figura 4.8, que se segue consegue-se ver a relação tensão de cedência dinâmica vs quantidade de fibras de PP.

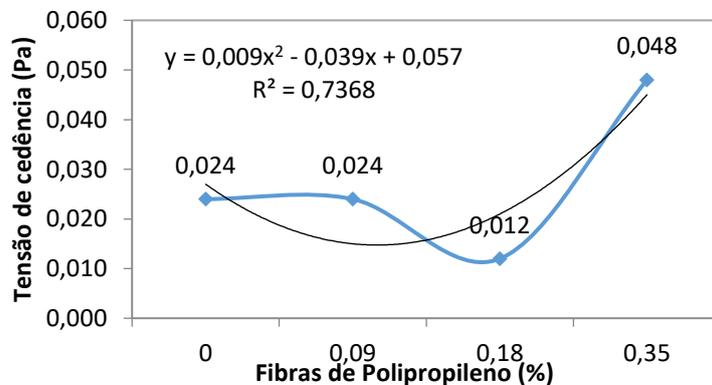


Figura 4.8 - Relação tensão de cedência dinâmica vs quantidades de fibras de polipropileno (20min.)

Na Figura 4.8, consegue-se perceber que o valor da tensão de cedência diminui à medida que se aumenta a percentagem de fibras de polipropileno na mistura.. Este fenómeno deve-se ao facto, de que com as fibras PP a continuidade do escoamento é facilitada, pois as fibras orientam-se no sentido do escoamento, porém se houver um aumento grande, a junção das fibras manifesta-se como um fator prejudicial numa injeção.

4.2.2. Medições com controlo de taxa de corte (CSR)

As caldas igualmente ensaiadas com controlo da taxa de corte tendo-se obtido uma curva de fluxo (tensões vs taxa de corte) tanto de carregamento como de descarregamento.

Na Figura 4.9 pode observar-se o notório efeito de hidratação da NHL, quando analisada a evolução das curvas de fluxo conclui-se que a tensão de corte aumenta com o tempo enquanto também há um acompanhamento consistente da taxa de corte.

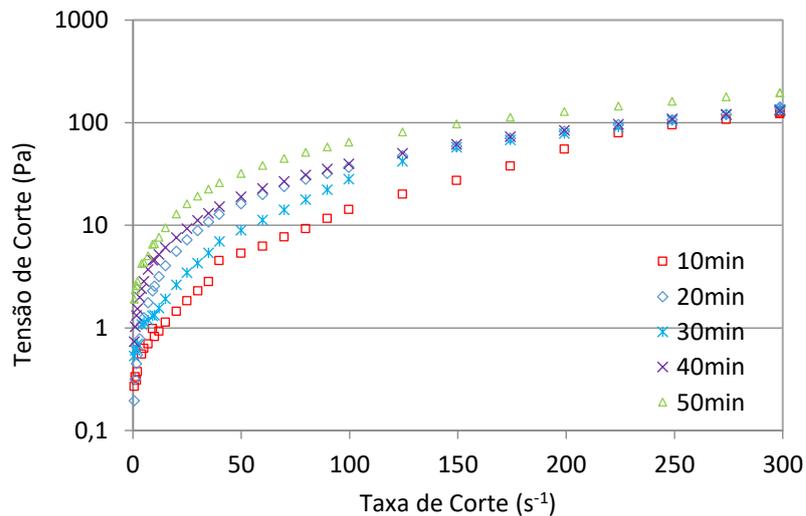


Figura 4.9 - Reograma do ensaio CSR para a calda ref.

Devido ao facto, de se tratar de material com propriedades tixotrópicas, é visível na Figura 4.10 que a curva ascendente, apresente maiores tensões de corte do que a curva descendente. Contudo a tixotropia é menos pronunciada com o passar do tempo, isto pode ser devido aos produtos resultantes das reações de hidratação que não são destruídas, pois as ligações não se conseguem quebrar com as taxas de corte aplicadas.

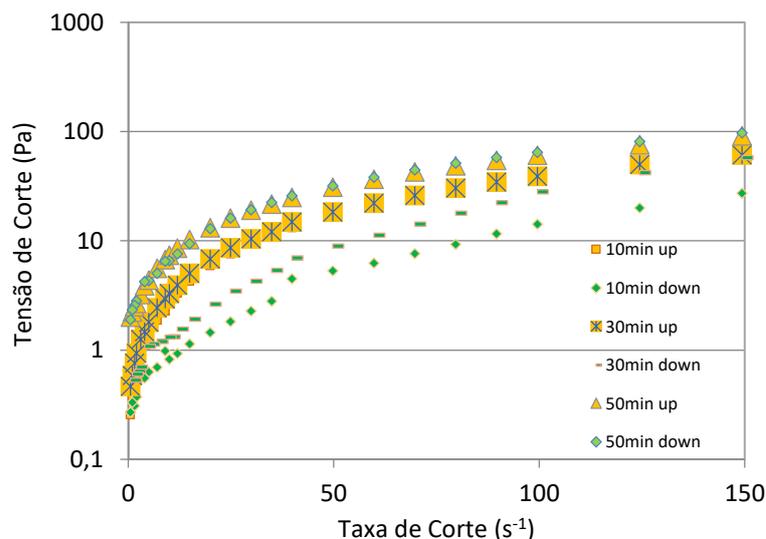


Figura 4.10 - Comparação entre o comportamento nos diversos tempos de ensaio para a calda ref.

Na Figura 4.11, estão apresentados os valores das tensões de cedência estática mediante o tempo, para as quatro composições de calda.

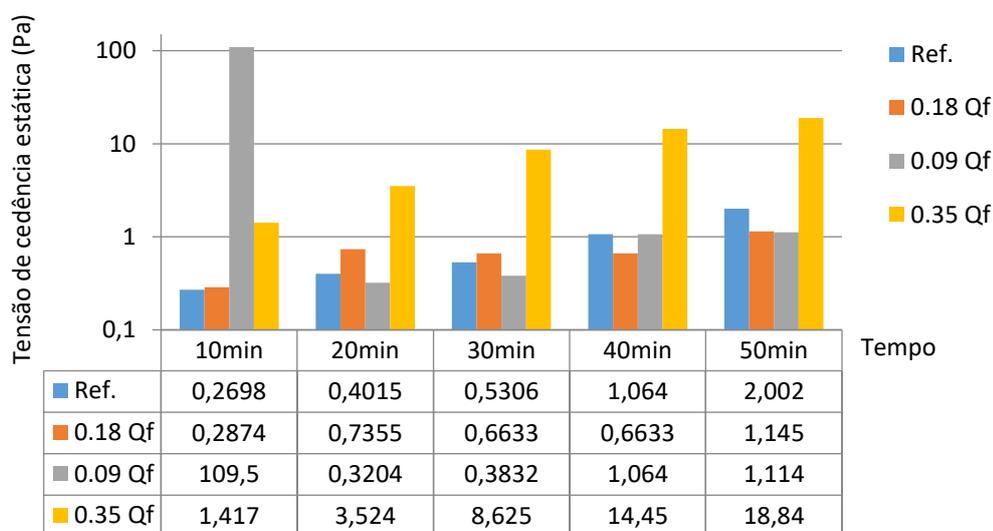


Figura 4.11 - Tensão de cedência estática (CSR) em função do tempo para as dosagens de fibras de PP

Tal como se observa na figura 4.11, neste ensaio há uma maior disparidade de valores. Têm-se diferenças de resultados significativas, mesmo perante os mesmos tempos nas diversas caldas. Há, contudo, um valor que se revela maior do que os restantes em todos os tempos analisados, é este valor, o referente à calda com o 0.35 g de quantidade de fibras de polipropileno. Como neste ensaio há um controlo da taxa de corte e há uma elevada

concentração de fibras (na concentração de 0.35g QF), quando se ensaia a amostra há um rearranjo das fibras, aumentando a tensão de corte e conseqüente tensão de cedência estática e também a tensão de cedência dinâmica, como se pode corroborar quando observada a Figura 4.12.

Os valores da Figura 4.12 são referentes à tensão de cedência dinâmica.

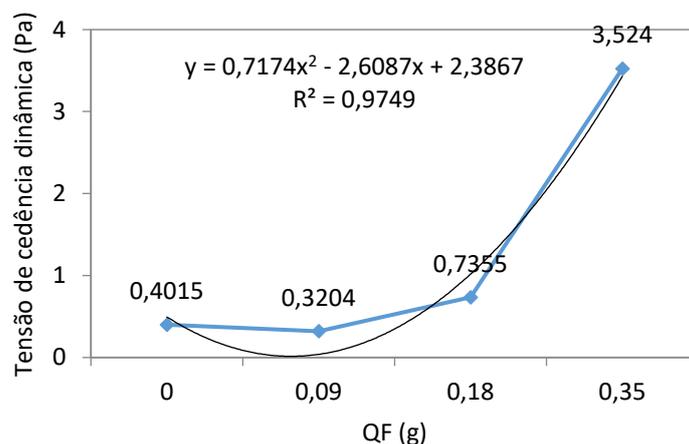


Figura 4.12 - Tensão de cedência dinâmica em função da dosagem de fibras de PP (20min.)

O valor referente à amostra com 0.35 g tem um valor mais alto do que o de 0.18 g, pois houve um aumento da quantidade de fibras na área de ensaio, o que neste caso dificultou o escoamento e conseqüente aumento da tensão dinâmica, pois há um aumento da densidade de fibras por mm^2 . Embora possa haver um rearranjo das fibras, como se comentou para a tensão de cedência estática, a concentração de 0.35g manifesta-se uma desvantagem devido à quantidade exagerada de fibras por unidade de área.

4.2.3. Ensaio de fluência a tensão de corte constante

A tensão de cedência pode ser determinada através do teste de fluência, como se pode constatar na Figura 4.13. Através da evolução dos valores de viscosidade aparente para determinadas tensões aplicadas é possível determinar para que tensão instalada o escoamento se inicia.

Para as duas tensões de valores mais baixos, a viscosidade aparente aumenta com o tempo. Uma explicação é porque os valores de 0.006 e 0.06 Pa, são tensões muito baixas e por isso não são suficiente para quebrar as ligações coloidais entre partículas da calda. Contudo quando a tensão imposta é de 0.6Pa, já se nota quando se solicita a calda uma diminuição ou mesmo um manter dos valores de viscosidade aparente.

Se se comparar a tensão de cedência dinâmica da calda de ref. com os valores de tensão aplicados neste teste, verifica-se que tanto o valor de 0.006 Pa, como o valor de 0.06 Pa, estão abaixo do valor de tensão de cedência dinâmica de 0.402 Pa, o que quer dizer que os dois primeiros valores impostas neste ensaio, nem chegam para garantir que haja continuação do escoamento da calda. No entanto o valor de 0.06 Pa já é suficiente para se inicie o escoamento se o compararmos com o valor de 0.024 Pa observado na calda de ref. ao fim de 20 minutos, valor que está explanado na Figura 4.6.

Com um comportamento em tudo díspar dos anteriores, a tensão de 0.6 Pa, que por sua vez diminui a viscosidade aparente ao longo do tempo. Para a tensão de 6 Pa, verifica-se que a viscosidade aparente permanece constante à medida que ensaio foi decorrendo. Os factos comentados vêm de encontro ao que foi explicado no parágrafo anterior.

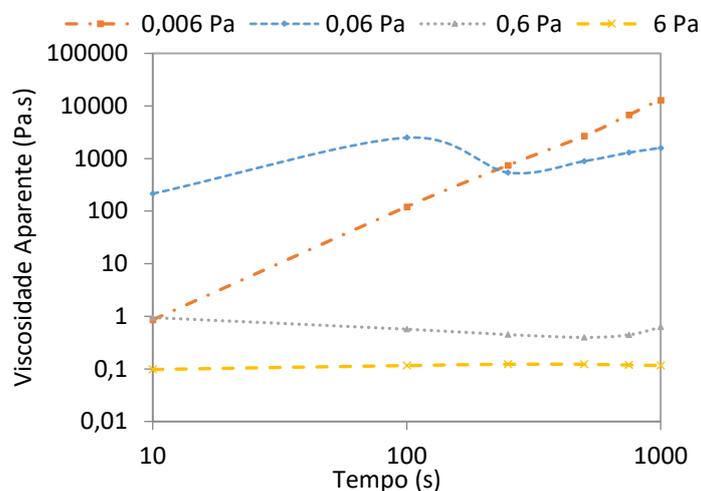


Figura 4.13 - Evolução da viscosidade aparente em função do tempo e da tensão no ensaio de fluência para a calda ref.

De notar que quanto às curvas de 0.06 Pa e de 0.006 Pa que se esperavam valores de viscosidade aparente mais baixa na curva de 0.06 Pa, em toda a sua existência, acaba por não ser o que se obtém, fenómeno este, que pode ser explicado por algum deslizamento entre os pratos, quando são aplicadas baixas tensão de corte.

No final da curva de 0.6 Pa de tensão de corte, pode-se verificar, um aumento da viscosidade aparente, pode ser o resultado de uma relação entre reações de destruição e de hidratação na estrutura microscópica.

Com o passar do tempo a amostra apresenta aumentos da viscosidade aparente, como é observável na Figura 4.13 e confirmado num outro trabalho[45].

4.2.4. Comparação dos diversos métodos de ensaio

Como clarificado pela Figura 4.14, pode constatar-se que a curva referente ao ensaio CSS apresentou maior viscosidade aparente no intervalo de taxa de corte $[10,100] \text{ s}^{-1}$ e maior tensão de corte para que se dê o escoamento do que a curva referente ao ensaio CSR, deve-se à fixação das taxas de corte.

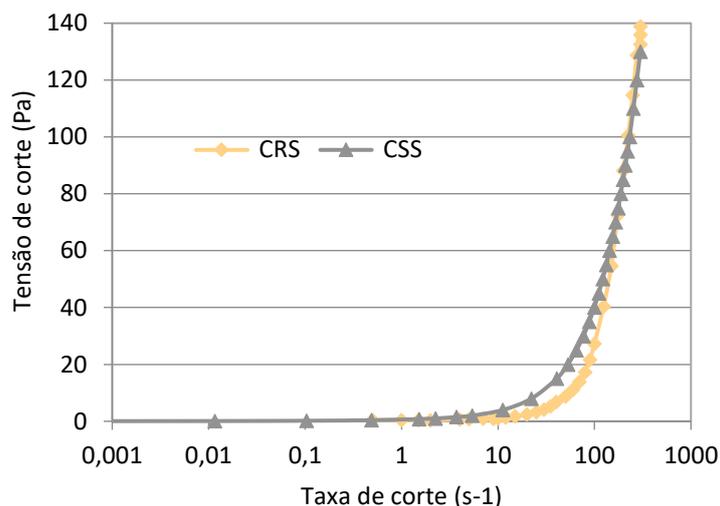


Figura 4.14 - Comparação entre o ensaio CSR e CSS aos 20 minutos

Os resultados apresentados na figura 4.14 são referentes aos ensaios de CSS e CRS, 20 minutos após a calda de ref. ser executada. As restantes formulações e períodos de medição têm resultados similares. Contudo, foi selecionado este período temporal (20min) pois a literatura [45, 46] refere como sendo o limiar de tempo após amassadura para se proceder a uma adequada injeção. É de reparar que independentemente do tipo de protocolo de ensaio as curvas de fluxo têm um comportamento próximo.

Até ao valor de 1 s^{-1} constata-se que há um ligeiro aumento linear na tensão de corte. De reparar também no aumento, algo acentuado, da tensão de corte para valores acima de 10 s^{-1} , que pode estar ligado ao facto explicado na Figura 4.13, referente à mudança de viscosidade aparente. A faixa entre os valores 1 e 10 s^{-1} , pode ser considerada uma zona de transição entre duas tensões de cedência (Figura 4.15). Isto é, considera-se a zona até ao valor de 1 s^{-1} de taxa de corte, como uma zona de tensão de cedência estática, enquanto que por outro lado a zona de taxa de corte superior a 10 s^{-1} forneceria a tensão cedência dinâmica. Na prática, aquando da injeção, a calda ao atingir o núcleo da alvenaria (nos primeiros momentos da injeção), esta está num estado de mais desagregação (i.e. desfloculada), contudo quando se afasta significativamente do local de injeção, a tensão de cedência dinâmica pode ser alcançada devido à redução das tensões de corte instaladas.

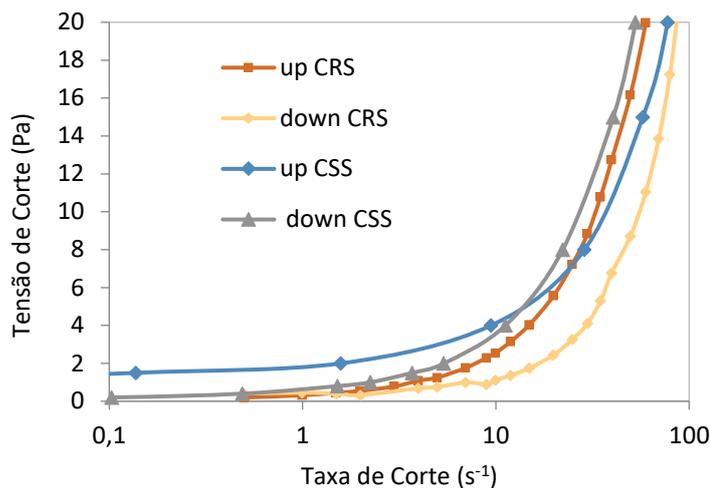


Figura 4.15 - Comparação dos ensaios CSS e CSR quanto às curvas de carregamento e descarregamento

Quando feita a análise anterior, consegue-se retirar conclusões quanto à tensão de cedência proveniente das várias metodologias de ensaio.

A diferença entre as duas curvas referentes aos ensaios CSS deve-se ao facto explicado pela Figura 4.5.

Quando comparados os protocolos de ensaio CSS e CSR, conforme se pode observar na Figura 4.16 os vários valores de tensão de cedência para as quantidades de fibras estudadas.

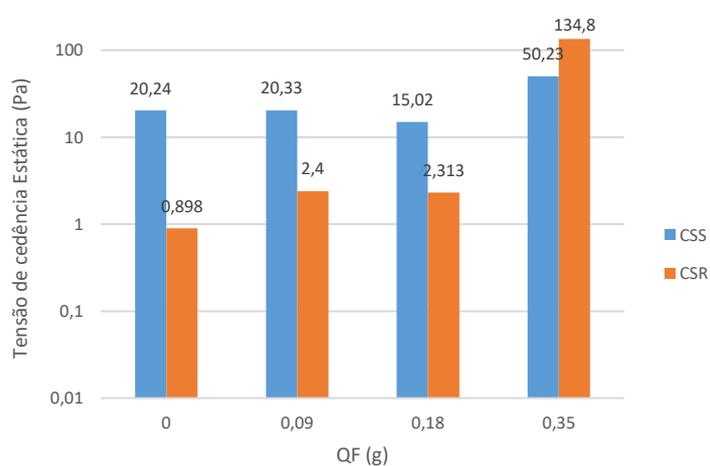


Figura 4.16 - Relação CSR e CSS quanto à tensão de cedência estática

Na figura 4.16 apresenta-se a tensão de cedência estática, em que como referido anteriormente, tem-se um máximo de 134.8 Pa para a quantidade de fibras de 0.35 g. Deve-se ao facto, como mencionado antes, ser necessário combater a inercia que as fibras oferecem à

tensão colocada pela geometria do reómetro. De notar também, que em todas as amostras, se têm valores superiores no ensaio CSS do que no CSR, com exceção do valor de QF de 0.35g. Pode-se constatar então, que o valor real da tensão de cedência para as quatro suspensões será balizado pelos valores apresentados nas diversas barras da figura.

A análise da tensão de cedência dinâmica ao fim de 20 minutos é feita através da Figura 4.17.

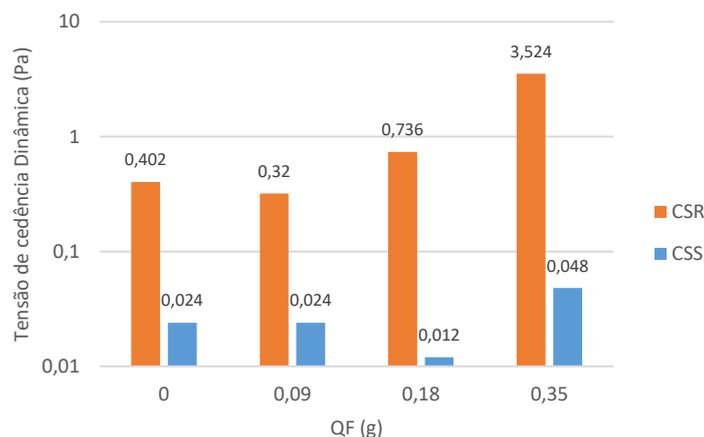


Figura 4.17 - Relação CSR e CSS quanto à tensão de cedência dinâmica

Nesta análise os valores são mais baixos, pois pode-se referir que já se está perante um escoamento, pois a inércia já foi vencida. Daí os valores serem mais idênticos entre si. Há apenas discrepância nos valores retirados da medição feita no ensaio CSS, porque é suscetível de haver maior flutuação, pois como a calda é a mesma então o problema está no procedimento, pelo que o protocolo CSR fornece valores mais coerentes do que o CSS.

Se se reparar a tensão de cedência dinâmica tem valores mais elevados no método de ensaio CSR do que no CSS e a tensão de cedência estática tem valores mais elevados no método de ensaio CSS do que no CSR, uma justificação pode ser devido à fixação de num método ser com controlo de tensões de corte e noutra de taxas de corte, repercutindo-se assim em valores de tensão muito mais elevados no ensaio CSR. Contudo esta explicação tem falácias porque assim seria de esperar que tanto para a tensão de cedência estática como dinâmica os valores mais altos observados seriam no ensaio CSR e tal não se observa. Como não se conseguiu chegar a nenhuma conclusão acerca deste assunto em tempo útil, remete-se para desenvolvimentos futuros.

Uma singularidade é observada na composição com QF de 0.35 g, visto ser um valor que sai da ordem de grandeza dos restantes valores. Tal fenómeno pode ser devido ao ensaio. Para garantir a taxa de corte, o equipamento teve de aplicar uma tensão superior para garantir o escoamento (tensão de cedência dinâmica).

Então tem-se como conclusão da comparação dos métodos, o que tem maior eficácia para se aferir a tensão de cedência dinâmica, que é o método de ensaio CSR pois varia-se a taxa de corte controladamente, fazendo com que se obtenham valores que mais aproximam o verdadeiro valor da tensão de cedência dinâmica. É também o ensaio que coaduna os valores das tensões de cedência com o ensaio da fluência (valores 0.6-6Pa). Enquanto o método de ensaio de tensão de corte controlada, resulta em valores de tensão de corte com maior incoerência, clarificando melhor a influência do mesmo no valor da tensão de cedência dinâmica, pois os valores que se retiraram deste ensaio são de uma ordem de grandeza muito baixa.

Por último o ensaio de fluência com a taxa de corte controlada, como já foi referido, devido à disparidade e irregularidades físicas que se verificaram, impediu que se tivessem em atenção os dados que dele resultam dificultando a análise do tema.

4.3. Ensaio estado endurecido

4.3.1. Resistência mecânica

4.3.1.1. Resistência mecânica à flexão

Regra geral, os gráficos (resistência à flexão vs QF) têm um comportamento típico, que consiste num aumento de tensão até ao valor da tensão de rotura da calda, retornando de seguida, para o valor de 0 N ou próximo deste. Observa-se este comportamento nas caldas de referência. Após se misturarem as fibras, observa-se um comportamento similar, mas com uma singularidade, que se verifica após atingida a tensão de rotura. Os gráficos destas composições, agora, não saem da tensão de rotura diretamente para o 0 N, mas sim para uma nova curva. Esta curva é devido às fibras, pois acabam por ser estas a resistir à tração e não a calda a resistir à compressão, contudo o comportamento continua a ser frágil. Isto acontece, porque quando se ensaiam os provetes à flexão, há uma parte superior que está sujeita a forças de compressão, mas a inferior está sujeita a trações. Como tal, quando se está na presença de um provete que tem na sua constituição fibras, o que acontece é que há uma rutura da peça, tendo as fibras um ligeiro contributo, que se consegue ter noção, porque as tensões são impostas com acréscimos pequenos e lentos da mesma. Se o incremento da tensão fosse mais rápido, havia rutura total e nem havia perceção desta singularidade.

Apresentam-se valores na ordem dos 500/600 N de força máxima, que já são valores de resistência, ligeiramente mais altos do que os valores a que outros autores chegaram para uma calda [7]. Tendo ainda alguma resistência após a rotura, o que nos indica que há mais-valias mecânicas, quando se reforça a calda com fibras de polipropileno.

Tem-se então, em termos de flexão alguns benefícios em juntar fibras à suspensão. Tanto em termos de flexão, como atribuição de alguma segurança, pois as fibras podem aumentar a

resistência à flexão pelo incremento de resistência à tração, visto que neste estudo chegou-se a resultados mais satisfatórios do que se observou noutros estudos [7, 8]. Como se pode observar na Figura 4.18 há um crescimento da linha de tendência, o que quer dizer que à medida que se vai aumentando a percentagem de fibras de polipropileno, vai-se tendo uma resistência à flexão maior. Pode-se afirmar, pois uma das principais características das fibras conforme já referido anteriormente, é a resistência à tração. E foi explicado no capítulo 3, que a rotura devido à flexão, não é mais do que uma cedência da peça à tração, pois num provete a parte inferior está sujeita a forças de tração e a superior a forças de compressão.

Portanto a Figura 4.18, mostra que embora haja uns valores mais altos e outros mais baixos de resistência à flexão, devido a vários fatores não controláveis, a linha de tendência tem um declive positivo, o que quer dizer que há ganhos de resistência quando se juntam fibras à composição.

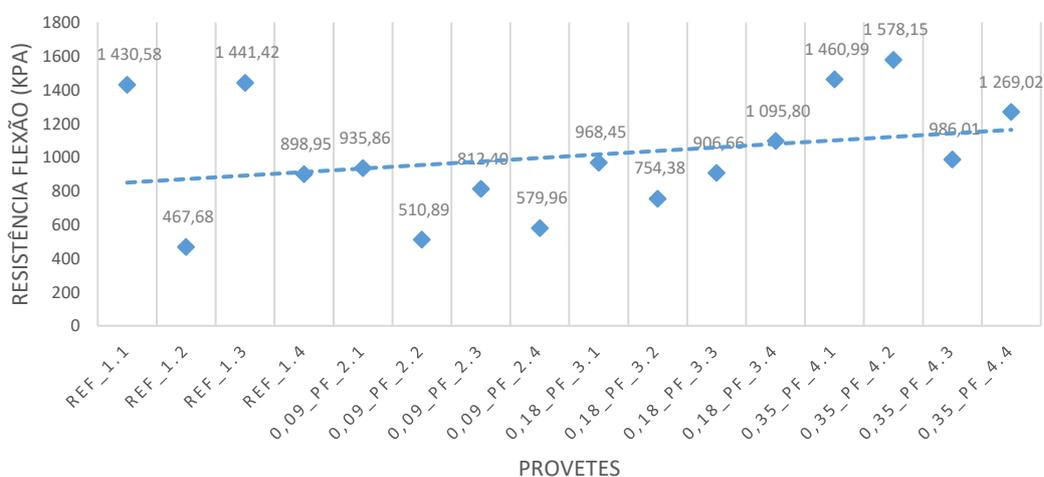


Figura 4.18 - Valores de resistência à flexão (kPa) dos vários provetes

Na Figura 4.19 podem-se observar os valores da resistência à flexão para as quatro dosagens de quantidade de fibras presentes nas caldas.

Como é explanado na Figura 4.19, os valores em termos de resistência à flexão, melhoram o comportamento, com a adição de fibras. Observa-se que o valor mais alto é referente aos provetes com 0.35g de fibras na sua constituição, que se julga que devido à maior quantidade de fibras tenha tido um arranjo e distribuição mais homogéneo, fator positivo aquando da injeção da calda em elementos de alvenaria.

Num outro extremo da análise estão os provetes com 0.09 g de fibras, que devido ao fato de terem uma baixa quantidade, pode ter-se executado uma calda mais heterogénea o que não é de todo benéfico para a resistência à flexão.

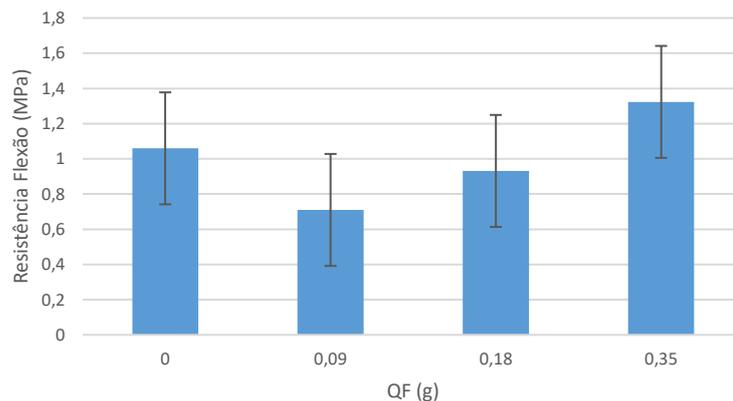


Figura 4.19 - Resistência à flexão mediante as quantidades de fibras de PP

Como se consegue observar na Figura 4.19 há um valor completamente díspar dos restantes, quanto aos valores máximos de flexão. Trata-se de um valor abaixo do valor esperado de resistência, se se comparar com os restantes valores apresentados no mesmo gráfico, cerca de 250 MPa abaixo do valor da amostra com 0.18 g de QF. A fratura da peça em vez de se ter observado a meio vão, como esperado, explanou-se perto de um dos locais onde o provete estava apoiado. Pode haver muitas justificações para tal ter ocorrido, mas uma das mais plausíveis é o facto de quando se colocou a calda nos moldes, terem-se criado bolhas de ar, o que faz com que o provete não seja homogéneo e apresente uma fragilidade nesse local. Há fortes probabilidades de acontecer, pois como se está perante o estudo de uma calda, não se vibra a suspensão. Se se fizesse, estar-se-ia a incorrer num erro, pois não é o que acontece na realidade, quando se injeta a calda nos elementos que se quer reforçar.

Para os restantes valores há semelhanças, embora haja por vezes diferenças de 200/300N. Deve-se à presença das fibras nalguns dos casos. Os provetes que têm mais fibras apresentam muito maior resistência, pois estas incrementam algum atrito às partículas, acabando por ajudar na resistência à compressão.

Nos provetes 0.35_qf_4.3 e 0.35_qf_4.4 observam-se valores mais baixos do que nos 0.35_qf_4.1 e 0.35_qf_4.2, pois pode ter havido alguma influência do superplastificante ou má distribuição de fibras, fazendo com que tenha havido uma grande concentração num local e dificultando a ligação das partículas de cal. Tal como se pode visualizar com o desvio padrão indicado na Figura 4.18, junto aos valores de resistência à flexão das diversas amostras.

Conforme se pode observar no Anexo I nas colunas das medidas, consegue-se aferir, após uma breve análise que, quando não se está na presença de provetes com fibras, estes sofrem menos alterações nas suas dimensões.

Conforme é sabido, na área de engenharia civil, todos os materiais à base de ligantes hidráulicos e aéreos alteram as suas dimensões devido a fenómenos de retração, fenómeno este que é bem visível na calda de referência. Este facto pode atribuir-se às perdas de água nas diversas dimensões. Nas outras composições não se observa com tanta facilidade este facto, o que quer dizer que se pode atribuir às fibras a qualidade de controlo da fendilhação. O comportamento descrito anteriormente, já era esperado, pois as fibras acabam por ter uma função similar à do aço, quando combinado com o betão, ou das redes de fibras com as argamassas. O controlo da fendilhação faz-se devido à retração dos outros materiais que fazem parte da combinação[7]. Noutro estudo foi também aferido o comportamento de diversas fibras, entre elas, fibras poliméricas e se prova que há benefícios em utilizar as mesmas para controlo de fendilhações [47].

4.3.1.2. Resistência mecânica à compressão

Através de uma análise dos valores apresentados em anexo, chega-se à conclusão que toda a panóplia de valores está balizada entre os 5 600,95 e os 8 965,54 kPa de resistência à compressão, isto quer dizer que a alteração da quantidade de fibras de polipropileno não tem uma repercussão significativa.

Como é sabido quando se ensaia um provete à compressão, este acaba por ceder devido às forças de tração que se geram no plano oblíquo, daí se poder justificar o valor mais alto de 8 965,54 kPa (que como pertence a um provete que tem grande concentração de fibras) com a ajuda das fibras, pois através das suas características de resistência a fenómenos de tração, ajudam na resistência do bloco de calda. Porém é um incremento limitado, pois não é um valor que saia muito da moda de valores obtidos (ver Anexo II).

Na Figura 4.20 podem observar-se os valores de resistência à compressão das diversas composições de QF.

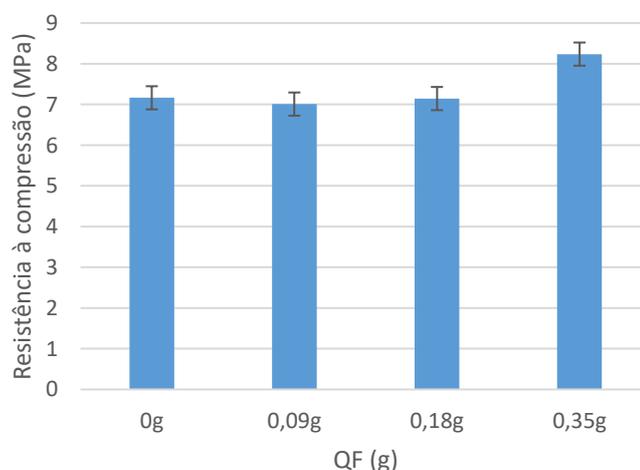


Figura 4.20 - Resistência à compressão mediante as quantidades de fibras de PP

De notar que os valores não têm grande flutuação, são idênticos. Apenas o valor que diz respeito à composição com 0.35g de fibras de PP, tem um valor um pouco mais elevado.

4.3.2. Aderência

No que diz respeito aos resultados dos ensaios de aderência estão apresentados na figura 4.21. Decidiu-se fazer dois provetes das misturas de referência e de quantidades de fibra de 0.35g, pois ambas correspondem aos extremos de percentagens de fibra presentes na suspensão. Sendo que das restantes apenas se tem um provete de cada. Fez-se esta distinção, pois sabendo o comportamento dos extremos consegue-se compreender o que se passa nas dosagens intermédias.

Na figura 4.21 e no Anexo III apresentam-se os valores de resistência ao corte para as várias composições de calda.

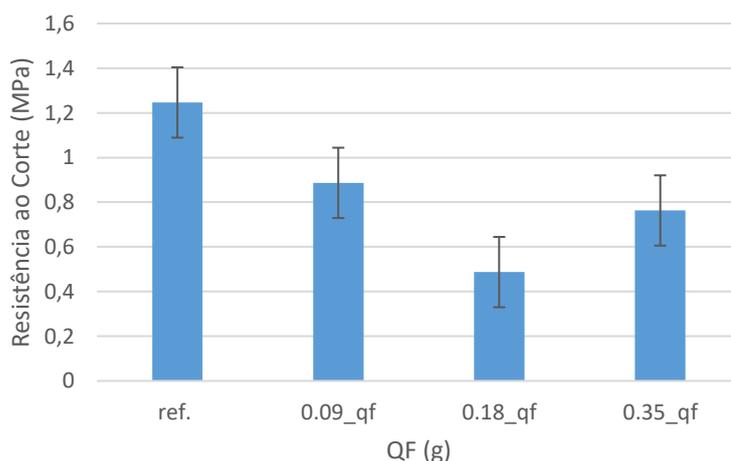


Figura 4.21 - Resistência ao corte mediante a quantidade de PP

Observou-se que em todos os provetes (Figura 4.22) houve um dos lados que cedeu, sem que outro fendilhasse, o que se depreende, que houve uma das zonas da calda que ficou mais resistente do que a outra. A ocorrência deste fenómeno pode dever-se ao facto de os bocados de tijolo não terem todos a mesma rugosidade e/ou porosidade o que conduz a alteração de aderência na interface calda-tijolo ou por um melhor arranjo quando se colocou a calda nos moldes entre os prismas cerâmicos.



Figura 4.22 - Provetes após ensaio de aderência, os provetes aqui representados são o de ref.(esq.) e o 0.35g (dir.) de QF

4.3.3. Termogravimetria

Neste ensaio, tiveram de se escolher 4 amostras, cada uma o mais representativa possível da amassadura. Foram as amostras dos provetes ref_1.1, 0.09_qf_2.1, 0.18_qf_3.1 e 0.35_qf_4.4. A escolha não foi complexa, apenas se tinha de garantir que havia uma sobra de provete suficientemente grande para garantir que se conseguia recolher uma amostra de pó (após se moer) que ainda não tivesse entrado em contacto com o ar ambiente.

Os gráficos relativos à análise termogravimétrica (TGA) estão apresentados na Figura 4.23.

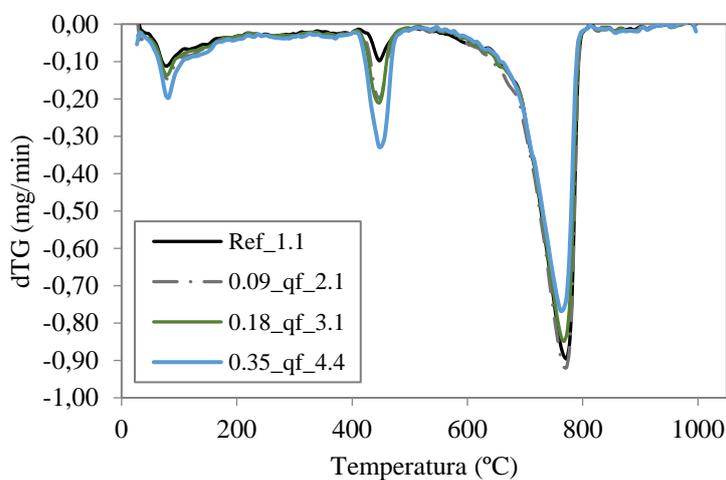


Figura 4.23 - Análise termogravimétrica : comparação entre as caldas seleccionadas

Como se pode depreender da Figura 4.23, há três picos, que representam fenómenos de perda de massa cruciais em todas as amostras.

O primeiro pico aparece quando no eixo das abscissas o valor está entre os 100 °C e o 150 °C, correspondendo então à evaporação da água combinada com produtos de hidratação, que

neste caso corresponde à água quimicamente interligada aos produtos de reação, silicatos e os aluminatos, que sofrem evaporação.

Dos 450 °C aos 550 °C, há uma nova perda de massa, mas agora provocada pela reação de desidroxilação do hidróxido de cálcio, que origina o óxido de cálcio.

Por último dos 800 °C aos 950 °C tem-se o último pico e mais significativo, associado à reação de descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3).

Após a identificação das diversas fases de perdas de massa que as amostras manifestaram com o ensaio TGA, é possível realizar uma análise comparativa com o trabalho de outros autores, bem como avaliar o comportamento, quando introduzidas diversas quantidades de fibras nas composições.

De realçar que a amostra que perde maiores quantidades de massa é o provete que tem maior quantidade de fibras (0.35 g), podendo afirmar-se que a presença de fibras de PP reduz a quantidade de CaCO_3 nas caldas, que significa uma redução no processo de carbonatação da NHL. Tal poderá dever-se a uma redução da porosidade aberta na presença das fibras o que conduz a uma maior dificuldade na difusão do CO_2 na microestrutura da calda [7, 8].

4.4. Sumário de Resultados

Pode-se concluir que as fibras efetivamente, atribuem características tixotrópicas às caldas. De destacar também, que mediante as quantidades de fibras, assim se tem comportamento melhorado ou não em termos reológicos. Pode ser vantajoso, pois como já referido, o estudo reológico tem como cerne da discussão, a boa aplicabilidade em termos de injectibilidade.

Os provetes ref_1.1, ref_1.2, ref_1.3 e ref_1.4, têm comportamentos em termos de tensão de cedência dinâmica, como os provetes 0.09_qf_2.1, 0.09_qf_2.2, 0.09_qf_2.3, 0.09_qf_2.4, o que quer dizer que a quantidade de fibras presentes nas caldas com 0.09g de QF, não tem grandes efeitos em termos reológicos e já pode ter uma contribuição positiva em termos resistência mecânica.

Quanto à tensão de cedência estática, os provetes referentes à quantidade de fibras de 0.09 g e 0.18g é idêntica, o que remete para a dúvida da relevância deste aumento da quantidade de fibras no que diz respeito a este parâmetro. Uma vez que a resistência à flexão tem ganhos pouco representativos para uma calda. Contudo pode haver outra leitura, uma vez que não se altera muito o valor de tensão de cedência, mas há um incremento de resistência. O estudo da sua aplicabilidade neste caso passa pelo enquadramento económico e deixa de ser tão técnico e físico.

Nos procedimentos de ensaio confirma-se a ideia defendida por Nehdi e Rahman quando dizem que os resultados não dependem só da composição da calda mas de todo o material utilizado e dos vários processos de medições reológicas[27].

Quanto aos protocolos que se realizaram para aferir as tensões de cedência e conforme Wang et al. [42] o protocolo com controlo da tensão de corte, CSS, fornece valores mais elevados nas tensões de cedência estática, pode dever-se ao fato de embora a amostra esteja a ser continuamente solicitada, a evolução é lenta em termos de imposição de tensões, então pode ser mais lenta do que a velocidade de agregação das partículas de maneira a que se criem ligações, repercutindo assim em valores mais elevados de tensão de cedência. Enquanto, que no ensaio com a taxa de corte controlada, a tensão ronda valores mais altos de tensão, podendo destruir as ligações que se formam primeiro e omitindo a efetiva tensão de cedência através da brusca solicitação imposta.

Em termos de ensaios endurecidos os melhores provetes foram os que têm a quantidade de fibras fixadas nos 0.35g, sendo especificamente o provete 0.35_qf_4.2 o que apresenta melhor comportamento em termos de resistência à flexão [Anexo I].

O incremento da resistência mecânica à compressão poderá dever-se à maior compacidade da microestrutura das caldas com fibras de PP.

Nos ensaios à compressão tal como referidos as caldas com maior resistência mecânica são as que têm maiores quantidades de fibras, pois a presença das fibras também reduz a retração o que poderá ter minimizados alguma microfissuração (que enfraquece a calda) e assim melhorar a resistência à compressão[14]. Especificamente o provete que apresenta o melhor valor foi o provete 0.35_qf_4.4.

Ensaio de aderência, constata-se que os melhores resultados foram correspondem às caldas com a composição de referência, visto que as fibras neste caso não trazem benefícios à calda.

Finalmente, na análise do gráfico de DTG, verifica-se que as caldas com fibras apresentam maior perda de massa associada à desidroxilação do hidróxido de cálcio e menores perdas de massa na descarbonatação do CaCO_3 , o que permite concluir que as fibras de PP afetam o processo de carbonatação da NHL.

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Conclusões

5.1.1. Considerações Iniciais

Com a conclusão dos ensaios, permitiu a avaliação do comportamento da calda de injeção tanto em termos reológicos como no estado endurecido. Com o acompanhamento das várias formulações ensaiadas, ficou-se com uma abrangência razoável, podendo aferir-se algumas características até então não confirmadas. Serão apresentadas de seguida, em duas partes estas conclusões, pois fez-se um tratamento em separado, tendo como base no estudo caldas de injeção à base de cal hidráulica natural (NHL5), com a incorporação de fibras e superplastificante.

A partir da base descrita, pretendem-se otimizar e avaliar novas formulações de caldas de injeção, por forma a melhorar a eficácia desta técnica de consolidação e conservação de alvenarias danificadas. No desenrolar deste capítulo propõem-se desenvolvimentos futuros, que foram surgindo ao longo do estudo, com o intuito de aprofundar e ampliar o conhecimento da área em questão. Sendo as premissas variação de quantidade de fibras de polipropileno, dosagens de água e superplastificante, com o intuito de resultar em tensões de cedência mais perto das reais melhorando as características da calda [45].

De salientar que deste estudo resultou uma comunicação científica sob a forma de “*short paper*” intitulado “*Yield Stress in Injection Grouts for Strengthening of Stone Masonry Walls*” no âmbito do Encontro Ibérico de Reologia “IBEREO” (“Iberian Meeting on Rheology”) Porto, 2019. Este documento pode ser consultado no ANEXO IV.

5.1.2. Avaliação das Propriedades no Estado Fresco das caldas

A influência que a incorporação de fibras de PP tem nas propriedades reológicas e mecânicas da calda de injeção à base de cal hidráulica natural para a consolidação de alvenaria foi estudada e analisada.

Os resultados que se obtiveram e que permitem obter os parâmetros reológicos fundamentais nos vários ensaios executados, clarificam, que através do modelo de Bingham tem-se uma melhor dedução e adaptação às características das várias composições do presente estudo.

Após os ensaios, fica-se com a ideia clara, que a junção de fibras de PP às caldas traz alguns benefícios quanto à tixotropia, mas pode dificultar nalguns casos (em que há uma grande concentração de fibras) o escoamento da calda. Nas duas composições com a quantidade de

fibras intermédias (0.09g e 0.18g), apresentam em ambos os casos os melhores valores (mais baixos) de tensão de cedência dinâmica, embora seja prejudicial para a tensão de cedência estática sempre que se juntam fibras. Há, porém, uma ocasião em que tal não aconteceu, mas trata-se dum caso em que, provavelmente, ocorreu um reajustamento em camadas de fibras e que permitiu que houvesse um escorregamento entre as mesmas, baixando o valor da tensão de cedência estática (Figura 4.15) em relação à calda de referência, que relembre-se não tem fibras na sua composição. Como o estudo visa contribuir para o desenvolvimento da técnica de injeção de maneira a ser no futuro um avanço prático [46].

Como já referido, uma concentração perto dos 0.35g de fibras na composição da calda é prejudicial, pois devido às suas dimensões e à quantidade, estas, acabam por se ligar entre si, criando heterogeneidades na calda fresca e um comportamento não característico de uma calda de injeção, como se comparou ao longo do capítulo anterior com o trabalho dos diversos autores citados[8, 18, 48]. Contudo a composição com maior quantidade de fibras, 0.35g, incrementa qualidades à calda, mas em geral, não em termos reológicos [49].

Com uma concentração de 0.18g de fibras, observa-se um comportamento melhorado em termos de tensão de cedência e viscosidade relativamente à maior concentração das mesmas (0.35g). Há um melhor comportamento reológico, pois há espaço para um reajustamento, sem que se alteram demasiado as características reológicas, isto é, há um melhoramento da tensão de cedência genericamente, sem que se note uma diminuição de fluidez muito acentuada. As fibras mais uma vez resultam em valores de tensão de cedência dinâmica mais interessantes para uma fluidez facilitada da calda aquando da sua injeção. Com esta composição, consegue-se colmatar as falhas reológicas com as melhorias mecânicas resultantes da junção deste aditivo.

A concentração de 0.09g, é a que apresenta melhores valores (mais baixos) quanto à tensões de cedência dinâmica. O termo de comparação é feito com a calda de referência, pois esse seria o valor obtido se não houvesse adição de fibras à calda. Os valores comparados são 0.320 Pa que corresponde à composição de 0.09g, enquanto que o valor respetivo à calda de referência é 0.402 Pa. O mesmo não se observa quando analisada a tensão de cedência estática, que aumenta de 20.24 Pa (calda de referência) para 20.33 Pa na composição de 0.09g de QF. O facto relatado devido à tensão de cedência dinâmica pode dever-se à liberdade, como já mencionado para as fibras se orientarem segundo o sentido do escoamento, não comprometendo o seu escoamento e trabalhabilidade. Os valores comentados são referentes à tensão de cedência dinâmica no ensaio CSR e tensão de cedência estática de CSS, devido ao facto de se ter chegado à conclusão que o ensaio de CSR estima melhor a tensão de cedência dinâmica e o ensaio de CSS a tensão de cedência estática.

A tixotropia desta combinação com a quantidade de fibra em valores próximos de 0.18g por 350 de cal hidráulica é o mais interessante do ponto de vista reológico em que o valor da

tixotropia desce de um valor inicial de 0.87 Pa.s para um valor final de 0.42 Pa.s, com a imposição de tensão constante de 6 Pa durante 20 minutos.

Por último no que diz respeito aos comentários das quantidades de fibras presentes na calda tem-se a combinação de referência que não tem fibras na sua constituição. Daí ter um comportamento idêntico com o das caldas típicas de uso prático na área da construção civil. A calda tem um comportamento tixotrópico ainda que não tão acentuado como as caldas que têm fibras de PP na sua composição. Esta composição apresenta o melhor valor da tensão de cedência estática, pois devido à inexistência de fibras não há atrito causado pela ligação fibra-fibra ou fibra-partículas de NHL.

Concluindo, tanto os valores reais da tensão de cedência estática, como os valores reais da tensão de cedência dinâmica, estão num intervalo entre os valores dos ensaios CSS e CSR, pois os resultados do ensaio CSS são valores mais elevados na tensão de cedência estática do que os valores da mesma tensão de cedência no ensaio CSR. Para os valores de tensão de cedência dinâmica verifica-se o inverso, sendo os valores mais elevados do ensaio de CSR em relação aos valores de CSS. Os melhores métodos de aferição da tensão de cedência dinâmica e estática os ensaios CSR e CSS, respetivamente. Podendo ainda haver uma confirmação dos valores de tensão de cedência estática com o ensaio de fluência, pois os testes foram realizados com pequenos incrementos de tensão [51].

5.1.3. Avaliação das Propriedades no Estado Endurecido

Os ensaios que se utilizaram para complementar o estudo do estado endurecido dos provetes das várias composições de caldas de injeção permitiram constatar que há benefícios na utilização de fibras. Assim, percebe-se que os resultados da resistência à flexão, compressão e aderência, bem como os ensaios de termogravimetria, têm importância no modo de entender e aferir a performance da adição das fibras às caldas para consolidação de alvenarias.

De um modo geral, a introdução de fibras na composição da calda afeta positivamente o seu comportamento mecânico, embora para os valores específicos de resistência ao corte no ensaio de aderência de 0.18 g e 0.35 g os valores da resistência sejam inferiores aos valores que resultaram do ensaio nas caldas com 0 g (ref) e 0.09 g de QF.

No que diz respeito aos valores da resistência à compressão, a junção de fibras teve incrementos na ordem dos 15%, embora se revele benéfica esta junção, não se poder afirmar que os incrementos de resistência à compressão obtidos justifiquem as desvantagens em termos de fluidez que a presença das fibras acarreta.

No ensaio de flexão há maiores incrementos de resistência (na ordem dos 25%) do que nos ensaios de compressão, pois na flexão vai existir uma superfície do provete que vai estar sujeito a forças de tração em que as fibras têm um contributo importante.

Quanto ao ensaio de aderência não se verificaram melhorias de resistência ao corte relativamente à calda de referência, pode aferir-se que nas composições onde há maior concentração de fibras de PP, o valor de resistência ao corte é menor do que as composições de referência e de 0.09 g de QF, daí concluir-se que a presença de fibras de PP não contribui para uma melhor aderência na interfase da calda com um suporte poroso.

As maiores perdas de massa observadas na análise TG, está associada à amostra com maiores quantidades de fibras (0.35 g) na sua composição, tendo picos com diferenças de 0.10 mg/min a mais do que a composição com a concentração anterior (0.18 g), aos 800 °C. Podendo então dizer-se que a adição de fibras influencia o processo de carbonatação da NHL. Tal poderá dever-se a uma redução da porosidade e ou porometria na presença das fibras de PP.

5.2. Desenvolvimentos Futuros

A análise dos diversos resultados que advém da presente dissertação representam um ponto inicial para o desenvolvimento de trabalhos similares nesta área, particularmente no que diz respeito às dimensões das fibras estudadas.

A introdução das fibras traz benefícios em termos de trabalhabilidade e fluidez na fase de injeção, por forma a melhorar-se a compreensão de determinados fenómenos, pode ser um ponto de partida a preocupação com as dimensões das mesmas. Podendo evoluir posteriormente para a realização de testes de injectibilidade das caldas em modelos que reproduzam as propriedades do núcleo dum elemento de alvenaria. Concluindo com um estudo que relacione a injectibilidade com as propriedades reológicas.

Ficando como sugestão efetivamente a análise se outro tipo de superplastificante e a junção de fibras com dimensões mais pequenas, com a finalidade de se resolver o inconveniente da junção no que respeita à tensão de cedência estática.

Propõe-se ainda a realização do ensaio de fluência com incrementos mais reduzidos de tensão de corte, de maneira a que se tenha mais sensibilidade quando analisados os resultados.

Por último e de forma a resolver uma incoerência de resultados que não se conseguiu resolver em tempo útil neste trabalho, estudar-se no seguimento da sugestão anterior a tensão de cedência estático com recurso ao ensaio de fluência, mas com incrementos mais reduzidos, visto ser um ensaio que tipicamente faz boas análises desta tensão de cedência.

Bibliografia

- [1] P. Roca, M. Cervera, G. Gariup, and L. Pela, "Structural Analysis of Masonry Historical Constructions" . Classical and Advanced Approaches," Archives of Computational Methods in Engineering vol 17 pp. 299–325, 2010.
- [2] K. Callebaut, J. Elsen, K. Van Balen, and W. Viaene, "Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael ' s Church (Leuven , Belgium)" Cement and Concrete Research vol. 31, pp. 397–403, 2001.
- [3] J.A. Blanco, M. Peinado, "Study on Serpentinites and the Consequence of the Misuse of Natural Stone in Buildings for Construction" - Journal of Materials in Civil Engineers vol.25, Issue 10, pp. 55-62, 2013.
- [4] J. P. B. Matos, "Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de poliacrilato," *Diss. para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Lisboa, 2013.*
- [5] E. Pereira, R.A.Silva, O.D.Matínez, D.V.Oliveira, E.Soaes, "Hydraulic Lime repair of rammed earth with mud and hydraulic lime based grouts,"10ºCongresso Nacional de Mecânica Experimental, pp. 1–13, 2016.
- [6] G.Pereira,"Reologia de Fluidos Complexos Gonçalo José dos Reis Pereira," *Diss. para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Lisboa, 2010.*
- [7] D. Miguel, "Influência do tipo e dosagem de hidrófugo na reologia de caldas de injeção", *Diss. para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Lisboa, 2017.*
- [8] J. Botas, "Grouts de cal hidráulica natural incorporando fibras de polipropileno e microesferas de vidro : caracterização física e mecânica," *Diss. para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Lisboa, 2019.*
- [9] *NP EN 459-1:2011.Norma Portuguesa Cal de construção. Parte 1 – Definições, especificações e critérios de conformidade. pp. 1–3 Monte da Caparica .*
- [10] M.P. F. Rodrigues, "Argamassas de revestimento para alvenarias antigas, Contribuição para o estudo da influência dos ligantes", *Diss. para obtenção do grau Doutor em Eng.Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Lisboa, 2004.*
- [11] P. Faria, V. Silva, and J. Grilo, "Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural," in *Clrea2012 - International Conference Rehabilitation of Old Masonries, Universidade Nova de Lisboa, 2012, pp. 29–38.*
- [12] M. A. Bello, J. I. A. Galindo, J. Lanás, and J. L. Pe, "Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars," *Science Direct vol. 34, pp. 2191–2201, 2004.*
- [13] M. T. Cidade, "Reologia de polímeros - Texto de apoio," *Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nova de Lisboa, 2005.*
- [14] J.S. Coutinho, *Materiais de Construção 2 - Ligantes e Caldas.* Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.

- [15] N. Roussel, G. Ovarlez, S. Garrault, and C. Brumaud, "Cement and Concrete Research The origins of thixotropy of fresh cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 1, pp. 148–157, 2012.
- [16] S. C. Moreira, "Comportamento Mecânico do Betão Reforçado com Fibras." Rel. Estágio para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil , ISEP Porto, Porto, 2018.
- [17] M. Mamun and V. Bindiganavile, "Fractal Nature of Cementitious Systems Exposed to Sustained Elevated Temperatures," *Procedia Eng.*, vol. 210, pp. 557–564, 2017.
- [18] M. Teixeira, "Estudo reológico de caldas hidráulicas para utilização na reabilitação do edificado." Diss. para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Lisboa, 2013
- [19] H. A. Barnes, "A handbook of elementary rheology", First Published (2000), Printed by Cambrian Printers, Llanbadarn Road, Aberystwyth SY23 3TN, ISBN:0-9538032-0-1.
- [20] H.A. Barnes, J.E Hutton, "An Introduction to Rheology, First Published" , vol. 1. Advisory Editor: K. Walters, Department of Mathematics, University College of Wales, Aberystwyth, U.K, 1989.
- [21] L. G. Baltazar, F.M.A. Henriques, F. Jorne and M. T. Cidade, "The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls," *Rheologica Acta.*, vol. 52, no. 2, pp. 127–138, 2013.
- [22] S. Hanehara and K. Yamada, "Rheology and early age properties of cement systems," *Cement and Concrete Research* vol. 21, pp. 175–195, 2008.
- [23] M. Bala, R. Zentar, and P. Boustingorry, "Comparative study of the yield stress determination of cement pastes by different methods," *Mater. Struct.*, vol. 4, pp. 102, 2019.
- [24] C. F. Ferraris, "Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete : State of the Art Report," vol. 104, no. 5, 1999.
- [25] P. F. G. Banfill, "The Rheology of Fresh Cement and Concrete – A Review," no. May, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Paper accepted for publication in Proc 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, May 2003
- [26] P. Banfill, "Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 2955–2960, Jun. 2011.
- [27] P. A. Claisse , Omari M H and Lorimer P, "Workability of Cement Pastes" *ACI materials Journal*, Vol 98, No 6 December 2001 pp.476-482, Coventry U.K.
- [28] M. Nehdi and M. Rahman, "Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry , gap and surface friction," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1993–2007, 2004.
- [29] H. Vikan "Rheology and reactivity of cementitious binders with plasticizers" D. Theses Norwegian Univ. of Scien. And Tec. Fac, Nat. Scien. Tec., Dep. Mat. Scien. and Eng. 2005.
- [30] A. Miltiadou-Fezans, T. Tassios, "Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening," *Mater. Struct.*, vol. 46, pp. 1631-1652, 2013.
- [31] A. Bras and F. M. A. Henriques, "Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no.

- 1, pp. 135–144, 2012.
- [32] X. Kong and E. Cao, “Effects of chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer in cementitious systems,” *Journal of the Chinese Ceramic Society*, Vol. 38, No.9, pp. 1699-1701 , 2010.
- [33] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, and M. T. Cidade, “Rheology of Natural Hydraulic Lime Grouts for Conservation of Stone Masonry – Influence of Compositional and Processing Parameters.”, *Journal Fluids*, pp. 1–19, 2019.
- [34] A. Yahia, K. Khayat, “Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout”, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 731-738, 2001.
- [35] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, F. Jorne, and M. T. Cidade, “Performance improvement of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation : an experimental study,” *Wit press vol. 131*, pp. 417–430, 2013.
- [36] F. Jorne, F. M. A. Henriques, and L. G. Baltazar, “Grout injection in porous media with different internal structures,” in *Proceedings of the 14th International Conference - Structural Faults & Repair*, 2012.
- [37] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, and M. T. Cidade, “Contribution to the design of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 21, no. 6, pp. 698–709, 2015.
- [38] J. C. A. Roque, “Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria.”, Diss. obt. grau de Mestre em Eng. Civil, Esc. Eng. Univ. do Minho, 2002.
- [39] T. F. A. Cardoso, “Influência da exsudação e da perda de água nas propriedades reológicas de grouts.”, Diss. obt. grau de Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Lisboa, 2015.
- [40] B. Silva, “Diagnosis and strengthening of historical masonry structures : numerical and experimental.”, PhD Program in Structural Rehabilitation of Historical and Modern Buildings, Uni. Degli Studi di Brescia, 2012
- [41] E. Ulrix, “State of the art – “Betões com fibras em aplicações,” 1ª Jornada de Materiais na Construção, Com. de Congresso, pp. 15–44, Porto, 2011.
- [42] B. Silva, M. Dalla Benetta, F. da Porto, and C. Modena, “Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 149–161, 2014.
- [43] EN 1015-11 - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, IPQ, 1999.
- [44] P. J. Haines, G. R. Heal, P. G. Laye, D. M. Price, S. B. Warrington, and R. J. Wilson, “Thermogravimetry and derivative thermogravimetry,” *Princ. Therm. Anal. Calorim.*, ISBN: 0-85404-610-0, 2002.
- [45] V. Fernandez - Altable, Casanova, I. Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, Vol.36, págs. 1222-1230. Elsevier, 2006.
- [46] A. Papo, *Rheological models for cement pastes. Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol.21, págs. 41-46. Springer, 1988.

- [47] M. Fourmentin *et al.*, “Rheology of lime paste—a comparison with cement paste,” *Rheol. Acta*, vol. 54, no. 7, pp. 647–656, 2015.
- [48] L. G. Baltazar and F. M. A. Henriques, “Rheology of Grouts for Masonry Injection,” *Key Eng. Mater.*, vol. 624, pp. 283–290, 2014.
- [49] Y. Wang, A. Wu, L. Zhang, F. Jin, and X. Liu, “Investigating the Effect of Solid Components on Yield Stress for Cemented Paste Backfill via Uniform Design,” *Advances in materials science and engineering* vol. 2018, 2018.
- [50] A.S. Coutinho, *Fabrico e Propriedades do Betão*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997.
- [51] U. Håkansson, *Rheology of Fresh Cement Based Grouts (PhD Thesis)*. Royal Institute of Technology, Stockholm (1993)

Anexos

Anexo I

Provetes	Medidas			Flexão (N)	Resistência à Flexão (kN)
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)		
Ref_1.1	161,10	36,69	38,01	505,55	1430,58 ± 318,07
Ref_1.2	161,00	39,63	37,58	174,50	467,68* ± 318,07
Ref_1.3	163,00	40,00	38,34	565,02	1441,42 ± 318,07
Ref_1.4	158,40	39,80	36,81	323,19	898,95 ± 318,07
0.09_qf_2.1	159,20	39,81	38,29	364,15	935,86 ± 318,07
0.09_qf_2.2	158,90	39,71	38,78	203,40	510,89 ± 318,07
0.09_qf_2.3	159,20	39,73	38,23	314,49	812,40 ± 318,07
0.09_qf_2.4	159,00	39,82	37,58	217,43	579,96 ± 318,07
0.18_qf_3.1	158,40	39,68	38,35	376,78	968,45 ± 318,07
0.18_qf_3.2	158,50	39,99	38,85	303,55	754,38 ± 318,07
0.18_qf_3.3	158,00	40,00	39,27	372,85	906,66 ± 318,07
0.18_qf_3.4	157,90	39,70	39,83	460,10	1095,80 ± 318,07
0.35_qf_4.1	157,50	39,58	39,73	608,51	1460,99 ± 318,07
0.35_qf_4.2	158,20	39,97	39,57	658,45	1578,15 ± 318,07
0.35_qf_4.3	158,00	39,55	39,72	410,16	986,01 ± 318,07
0.35_qf_4.4	158,90	39,99	39,31	522,80	1269,02 ± 318,07

*o valor sai da tendência de valores, especula-se que a rotura tenha sido por corte e não por tração, devido à flexão.

Anexo II

Provetes	Compressão			Resistência à Compressão (kN)
	1	2	valor comp.	
Ref_1.1	9 997,94	14 208,22	12 103,08	8 678,61 ± 808,53
Ref_1.2	11 267,25	9 799,86	10 533,56	7 072,84 ± 808,53
Ref_1.3	9 182,04	7 997,18	8 589,61	5 600,95 ± 808,53
Ref_1.4	10 843,87	10 560,30	10 702,09	7 304,99 ± 808,53
0.09_qf_2.1	9 690,15	11 658,93	10 674,54	7 002,80 ± 808,53
0.09_qf_2.2	11 824,75	10 788,60	11 306,68	7 342,22 ± 808,53
0.09_qf_2.3	9 421,93	10 369,98	9 895,96	6 515,31 ± 808,53
0.09_qf_2.4	10 013,09	11 479,09	10 746,09	7 181,12 ± 808,53
0.18_qf_3.1	11 939,79	10 303,21	11 121,50	7 308,47 ± 808,53
0.18_qf_3.2	9 742,34	12 137,31	10 939,83	7 041,54 ± 808,53
0.18_qf_3.3	10 596,40	12 589,32	11 592,86	7 380,23 ± 808,53
0.18_qf_3.4	10 517,28	11 153,90	10 835,59	6 852,54 ± 808,53
0.35_qf_4.1	12 196,23	12 315,76	12 256,00	7 793,89 ± 808,53
0.35_qf_4.2	11 953,54	12 117,39	12 035,47	7 609,61 ± 808,53
0.35_qf_4.3	12 550,04	14 410,52	13 480,28	8 581,10 ± 808,53
0.35_qf_4.4	13 591,24	14 596,54	14 093,89	8 965,54 ± 808,53

Anexo III

Provetes	Corte (N)	Área (cm ²)	Média	D. padrão	Resistência (Pa)	Resistência ao Corte (Pa)
ref_1	1124,83	16	1246,46	121,63	779 037,50	779 037,50 ± 121,3
ref_2	1368,09					
0.09_pf	886,62		-	-	-	-
0.18_pf	487,36		-	-	-	-
0.35_pf_1	702,28		763,025	60,745	476 890,63	476 890,63 ± 60,75
0.35_pf_2	823,77					

Anexo IV

Cite this paper as:

Baltazar L.G., Henriques F.M.A., Reis D., Cidade M.T. Yield Stress in Injection Grouts for Strengthening of Stone Masonry Walls. In: Galindo-Rosales F., Campo-Deaño L., Afonso A., Alves M., Pinho F. (eds) Proceedings of the Iberian Meeting on Rheology (IBEREO 2019). IBEREO 2019. Springer Proceedings in Materials. pp. 170-174, 2020

Yield Stress in Injection Grouts for Strengthening of Stone Masonry Walls

Luis G. Baltazar, Fernando M.A. Henriques, Diogo Reis, Maria Teresa Cidade

Abstract Stone masonry is a simple and durable constructive technique that was exhaustively used until the mid 20th century. However, stone masonry has particular weaknesses which, associated with the absence of maintenance, increase the vulnerability of its structural integrity. For this reason, masonry walls often need consolidation to improve mechanical performance, such as adhesion between elements and load bearing capacity. Grout injection is a frequently used technique for the consolidation and strengthening of old stone masonry walls. The grout can be seen as suspension of binder particles in aqueous media that has a considerable fluidity in order to be pumped into voids and cracks within the masonry. For this reason, the rheology appears as a very useful tool in the design and quality control of the injection grout. The rheological behavior of hydraulic grouts for masonry consolidation is complex and some rheological properties (such as yield stress) are problematic to determine because of the combined effect of the hydration reactions of the binder and the interactions between the particles, present in the suspension. Despite the relevance of yield stress for injection grouts, no standard protocols are available and, therefore, the yield stress is often determined as an isolated parameter without taking into account phenomena such as thixotropy and hydration. In this study, the determination of yield stress of natural hydraulic lime-based grouts was performed with different measurements techniques using a rotational rheometer. The change in yield stress with time due to hydration was determined. Two yield stress, static and dynamic, and the critical shear rate were also measured, which can be used in the grouts design in order to achieve better grouting operation.

1 Introduction

Stone masonry is a simple constructive technique that has particular weaknesses which, associated with the absence of maintenance, increase the vulnerability of its structural integrity. Grout injection technique (or grouting) is often used as solution to overcome the structural problems of these old stone masonry walls by restoring the bonds between the masonry elements and, therefore, improving the load bearing capacity. Grouting consists of a suspension of binder particles in an aqueous medium that has a considerable fluidity in order to be pumped into voids within masonry. For this reason, the rheology appears as a very useful tool in the design and quality control of the injection grout [1]. Cementitious-based grouts are known as having a complex rheology. The yield stress of a grout will affect the relationship between injection pressure and flow. Håkansson [2] proposed two types of yield stress; the static yield stress that can be seen as the yield stress after the material leaves the rest, and the dynamic yield stress that has been defined as the yield stress when the material is under shearing i.e. in a broken-down state. The purpose of this study is to measure the yield stress of natural hydraulic lime-based grout, including the effect of thixotropy and hydration, by means of different measurement protocols.

2 Material and methods

2.1 Materials

Natural hydraulic lime (NHL5) was chosen because it is the hydraulic binder that presents properties closer to those of pre-existing materials in old masonries. A commercially available powder high range water reducer (HRWR), namely a polycarboxylate ether was used. All the tests in this work were based on NHL grout with a water to NHL ratio (w/b) of 0.4 and with 0.2wt% of HRWR. The grout mixtures were prepared in laboratory in batches of 300 ml and the components mixed using a mechanical shear mixer.

2.2 Rheological measurements

The rheological measurements were performed with a Bohlin Gemini HR^{nano} rotational rheometer (Malvern, UK). The parallel-plate geometry was used to perform all the measurements. The diameter of the geometry was 40 mm and the gap was 2 mm. The surface roughness of the upper plate was modified by means of an emery paper (grid 600) to minimize the slippage during the measurements. Controlled shear stress (CSS) was used to perform the stress ramp tests. A ramp of 0.3 Pa/s was applied and the stress was increased from 0.006 to 140 Pa; this was followed by a down ramp where the applied stress was decreased from 140 to 0.006 Pa. The corresponding shear rate and apparent viscosity were measured. The change with time of the static and dynamic yield stress was measured for 50 min. Moreover, creep tests were performed to examine the critical shear stress. To do so, four different stresses 0.006, 0.06, 0.6 and 6 Pa, were applied during 20 min. In addition, controlled shear rate (CSR) was also performed. The measurements were made in the shear rate range of 0.5-300 s⁻¹ followed by a downwards curve in order to evaluate the existence of thixotropy. The change in the shear stress with time was also measured for 50 min.

3 Results and discussion

3.1 Thixotropy and hydration by CSR

A simple yield stress fluid typically does not depend on the shear history, which means that when solicited with a shear rate ramp the shear stresses overlap for the up and down curves. In contrast, for the case of NHL-based grouts, the yield stress will depend on the shear history, hydration process and, therefore, the measuring protocol. In this context, a series of controlled shear rate measurements were performed on the same sample during 50 min with 10 min interval between each measurement, as shown in Fig. 1.

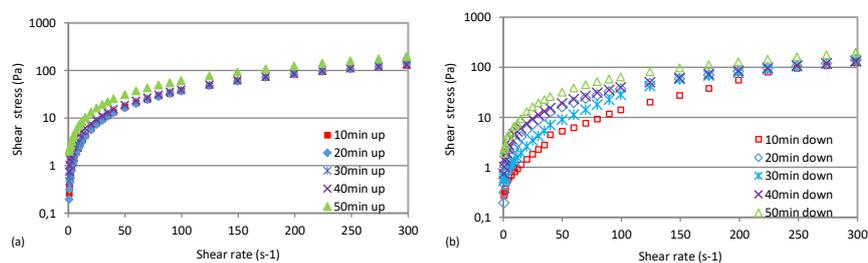


Fig. 1. Thixotropic behavior of NHL grout determined by controlled shear rate (a) up curves; (b) down curves

The effect of NHL hydration can be seen in Fig 1, where the shear stress consistently increases with time. Moreover, it can also be seen that the up curve presents higher shear stresses than the down curve, which is a characteristic of thixotropic material. It should be highlighted the fact that thixotropy is less pronounced with time; this may be due to the hydration reactions that form bonds that are not destroyed by the application of the shear rate.

3.2 Yield stress obtained through CSS

To determine the static and dynamic yield stresses of NHL grout, CSS measurements were performed because of their wide-ranging suitability for the determination of yield stress. As

previously mentioned the grout samples were subjected to a CSS from 0.006 to 140 Pa for up curve and down curve. As shown in Fig. 2, the change in the apparent viscosity in the up curve before yielding and after yielding is rather sudden; i.e., the apparent viscosity tends to infinity at low shear stresses and there is a finite apparent viscosity at higher shear stresses.

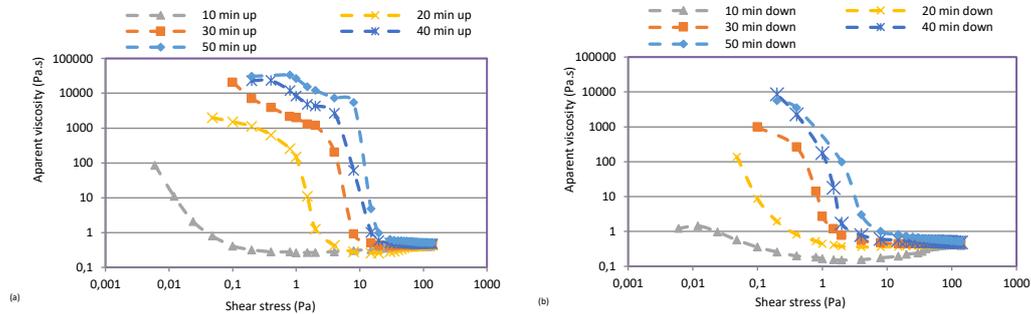


Fig. 2. Curves obtained from shear stress ramp: (a) up curves; (b) down curves

Based on the results presented in Fig. 2, it can be noted that the up curve showed a higher apparent viscosity and yield stress than the down curve due to the thixotropy. The yield stresses increase with time from 0.006 to 8 Pa. The yield stress increased to 1 Pa after 20 min and between 20 and 40 min the yield value increase from 2 to 4 Pa. Concerning the down curve, the yield stress increased with time, although with a slightly lower significance.

3.3 Yield stress obtained by creep test

The yield stress of colloidal suspensions can be determined through the creep test by detecting an abrupt change of apparent viscosity, i.e. the so-called viscosity bifurcation behavior. The variation in apparent viscosity for some applied stresses can be seen in Fig. 3. For an imposed stress of 0.006 Pa and 0.06 Pa, the apparent viscosity increased with time. The apparent viscosity below the yield stress would be infinite. In contrast, for the stress of 0.6 Pa the apparent viscosity decreases slightly and for the stress of 6 Pa the viscosity remains practically constant. Considering the results obtained, there remains a critical stress between 0.06 Pa and 0.6 Pa values that settles whether the grout would no flow due to build up or starts to flow due to the breakdown of the inter-particle bonds. It should be noted, however, that lower apparent viscosity values were obtained for the stress of 0.006 Pa than for the 0.06 Pa which can be explained by some slipping when such low shear stresses are imposed. Moreover, for the shear stress of 0.6 Pa a slight increase in viscosity at the end can be seen, such behavior can indicate that there is a competition between the micro-structure destruction and hydration reactions.

3.4 Static and dynamic yield stress

The results of CSS and CSR measurements at 20 min are shown in Fig. 4 (the other measurement periods presented similar behavior). It can be observed that regardless of the measurement performed the flow curves have a close behavior.

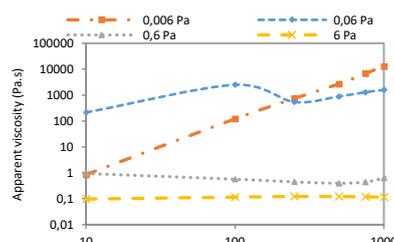


Fig. 3. Evolution of apparent viscosity as function of time and stress determined by creep test

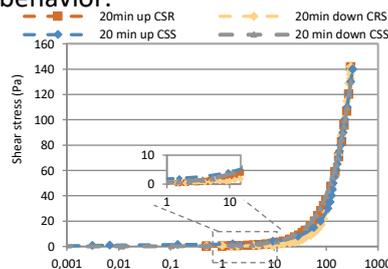


Fig. 4. Flow curves obtained by CSS and CSR measurement

A slight linear increase in shear stress can be observed until 1 s^{-1} , for both up and down curves. A substantial increase in shear stress was seen for shear rates above 10 s^{-1} , which can justify the change of apparent viscosity observed in Fig. 2. This shear rate range between $1\text{--}10 \text{ s}^{-1}$ can be considered as the transition zone between two yield stresses, which means that a shear rate until 1 s^{-1} would lead the static yield stress while shear rate higher than 10 s^{-1} would provide the dynamic yield stress. From a practical point of view, the yield stress must be chosen based on the typical shear rate range that the grout is subjected to. Moreover, the dynamic yield stress should be considered at the beginning of grouting when the grout is in a fully broken-down state. On the other hand, the static yield stress should be used as design parameter just for lower shear rates (i.e. at later stages of grouting operation) when the bonds between NHL particles starts to take place.

4. Conclusions

This study showed that the yielding values depend on the thixotropic behavior of NHL grouts and that two ranges of yield stress, static and dynamic, can be measured. The static yield stress was found to be in the range of $0.06\text{--}8 \text{ Pa}$ and the dynamic yield stress in the range of $0.06\text{--}0.2 \text{ Pa}$. From the creep test, the grout showed a bifurcation behavior, and the critical shear stress was found to be between 0.06 Pa and 0.6 Pa . Moreover, it appears as the critical shear rate range, below which there is a transition from the dynamic to the static yield stress is in the shear rate range of $10\text{--}1 \text{ s}^{-1}$. These results indicate that at an early stage of the injection process the dynamic yield stress should be considered as design input whereas at a later stage, when the shear rate is slowing down, the static yield stress should be used.

References

1. Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Cidade, M.T. Rheology of Natural Hydraulic Lime Grouts for Conservation of Stone Masonry—Influence of Compositional and Processing Parameters *Fluids* 4 (1) 13 (2019)
2. Håkansson, U. Rheology of Fresh Cement Based Grouts (PhD Thesis). Royal Institute of Technology, Stockholm (1993)



Apresentação

VimaFiber

Fibras Cortadas em Polipropileno

VimaFiber são fibras cortadas em polipropileno multifilamento para misturar com o betão e betonilha de forma a aumentar a resistência ao choque e reduzir a fissuração na fase de secagem (ou fase de deformação plástica). As fibras são introduzidas no betão no processo de mistura e espalham-se homogeneamente por todo o volume, criando um reforço efectivo em todos os sentidos e direcções.

Fibras produzidas com Certificação CE.

Campos de Aplicação

- Pavimentos Industriais;
- Betões e Betonilhas;
- Betão Projectado;
- Argamassas;
- Pré-Fabricação;
- Pavimentação de passeios;
- Esculturas;
- Tubos;
- Fachadas.

Vantagens

- Boa resistência química, apresentando uma resistência alcalina elevada;
- Boa maleabilidade, já que são fibras de fácil dispersão com o betão. Separam-se facilmente em filamentos individuais sem formar ninhas;
- Boa adesão à mistura, sendo produzidas de forma a permitirem uma sólida ligação com o betão;
- Fibras hidrofóbicas, uma vez que não absorvem a humidade e reduzem a permeabilidade do betão;
- Boa resistência mecânica (boa resistência à tracção)
- Não acarreta riscos para a saúde;
- Baixo custo.

Aplicação

Normalmente a dosagem inicia-se a 0,6 kg/m³, mas quantidade de fibras a adicionar varia consoante o campo de aplicação e, devido a uma grande diversidade de aplicações, que poderão ir do gesso, argamassas, betonilhas, pavimentos industriais, estruturas pré-fabricadas a betão projectado e outros, não é possível definir um valor preciso da quantidade de fibras a adicionar.

Fornecimento

Referência	Tipo de Fibra	Compr. das Fibras	Embal. (saco)	Caixas
VimaFiber 512 – 75	Multifilamento	12 mm	0,075 kg	220 sacos
VimaFiber 512 – 600	Multifilamento	12 mm	0,600 kg	37 sacos
VimaFiber 512 – 3600	Multifilamento	12 mm	3,600 kg	8 sacos
VimaFiber 506	Multifilamento	6 mm	Embalagem mediante consulta.	
VimaFiber SF 310	Split-Film	10 mm	1,000 kg	13 sacos
VimaFiber SF 320	Split-Film	20 mm	1,000 kg	13 sacos

Secil NATURAL LIME NHL 5

NHL 5 – CAL HIDRÁULICA NATURAL

T.C.E.077.5

1. DESCRIÇÃO

A *Secil NATURAL LIME NHL 5* é uma cal hidráulica natural, ligante hidráulico constituído por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio, obtida por cozedura de calcário margoso, seguida de moagem. A *Secil NATURAL LIME NHL 5* é classificada como NHL 5 segundo a NP EN 459-1.

A *Secil NATURAL LIME NHL 5* é um ligante singular, pois além da presa hidráulica, apresenta também presa por aérea, obtida por carbonatação com CO₂ atmosférico.

2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

Na fabricação de argamassas, como único ligante ou em mistura com outros ligantes hidráulicos ou aéreos, conferindo-lhes trabalhabilidade e flexibilidade, reduzindo significativamente a retração das argamassas hidráulicas (p.ex. argamassas de alvenaria, argamassa de reboco e argamassa de pavimentos).

Na fabricação de argamassas de reabilitação, como único ligante, em execução de rebocos exteriores e interiores sobre suportes antigos. Em diferentes utilizações de engenharia civil, tais como, tratamento de solos.

3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	VALOR	NORMA
Cal disponível Ca(OH) ₂	≥ 15,0 %	EN 459-1
Sulfato	≤ 2,0 %	EN 459-1
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	VALOR	NORMA
Cor	Beje	-
Água livre	≤ 2,0 %	EN 459-1
Baridade	0,65 ± 0,05 kg/dm ³	-
Densidade	2,7 g/cm ³	-
Finura	90 µm ≤ 15,0 % 200 µm ≤ 2,0 %	EN 459-1
Expansibilidade	≤ 2,0 mm	EN 459-1
Penetração	> 10 mm e < 50 mm	EN 459-1
Teor de ar	≤ 5,0 %	EN 459-1
Tempo de presa	Início > 1 h Fim ≤ 15 h	EN 459-1
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	VALOR	NORMA
Resistência à compressão (28dias)	≥ 5,0 e ≤ 15,0 MPa	EN 459-1

4. APLICAÇÃO

FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS

A dosagem de *Secil NATURAL LIME NHL 5* numa argamassa deve adequar-se ao fim a que se destina, ver exemplos no ponto 5.

Misturar previamente a *Secil NATURAL LIME NHL 5* com o agregado e posteriormente adicionar água na quantidade adequada de forma a obter uma boa trabalhabilidade.

Restrições

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

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

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

Conselhos complementares

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

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

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

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



1/3

www.secilargamassas.pt

Product Data Sheet
Edition 01.22.2017
Sika® ViscoCrete®-225 Powder

Sika® ViscoCrete®-225 Powder

High Range Water Reducing Powdered Superplasticizer

Description	Sika® ViscoCrete®-225 Powder is a third generation high range water reducing and superplasticizing powder admixture for use in concrete and mortar. It is based on Sika's patented "ViscoCrete" polycarboxylate polymer technology.
Applications	<p>Sika® ViscoCrete®-225 Powder may be used in a variety of concrete applications but is especially suited for the production of mortar and concrete dry mix. Sika® ViscoCrete®-225 Powder facilitates extreme water reduction, excellent flowability, optimal cohesion, and promotes excellent self compacting behavior.</p> <p>Sika® ViscoCrete®-225 Powder is recommended for the following applications:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Grouts in general ■ Non Shrink Grouts ■ Screeds in general ■ Self leveling Screeds ■ Gypsum and Anhydrite Screeds <p>Sika® ViscoCrete®-225 Powder has been formulated to provide maximum water reduction however is suitable and may be utilized for all levels of water reduction. Can be combined with other Sika® ViscoCrete® powders to attain maximum effects such as flowability and retardation.</p>
Benefits	<p>Sika® ViscoCrete®-225 Powder is a unique, specially formulated polycarboxylate powder that combines different mechanisms and is compatible with a variety of cement chemistries. Through surface adsorption and steric separation effect on the binder particles, in parallel to the hydration process, the following advantages may be observed:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Effective when utilized with cements that have high C3A, sulphate and alkali content. ■ Effective when utilized with ordinary portland cements (OPC) and blends of OPC and aluminate cements. ■ Compatible with other additives (i.e. citric acid). ■ Extremely high water reduction (resulting in high density and strengths). ■ Excellent flowability (resulting in greatly reduced placing and compacting efforts). ■ Increased high early strength development. ■ Improved shrinkage and creep behavior. ■ Low absorption time, "wets out" faster than competitive materials. ■ Medium retardation. ■ Ideal for use in self-leveling, self-compacting applications.

Concrete



PRIOR TO EACH USE OF ANY SIKA PRODUCT, THE USER MUST ALWAYS READ AND FOLLOW THE WARNINGS AND INSTRUCTIONS ON THE PRODUCT'S MOST CURRENT PRODUCT DATA SHEET, PRODUCT LABEL AND SAFETY DATA SHEET WHICH ARE AVAILABLE ONLINE AT [HTTP://USA.SIKA.COM/](http://usa.sika.com/) OR BY CALLING SIKA'S TECHNICAL SERVICE DEPARTMENT AT 800-933-7452. NOTHING CONTAINED IN ANY SIKA MATERIALS RELIEVES THE USER OF THE OBLIGATION TO READ AND FOLLOW THE WARNINGS AND INSTRUCTION FOR EACH SIKA PRODUCT AS SET FORTH IN THE CURRENT PRODUCT DATA SHEET, PRODUCT LABEL AND SAFETY DATA SHEET PRIOR TO PRODUCT USE.

Concrete

How to Use

Dosage	Depending on the application, the dosage of Sika® ViscoCrete®-225 Powder varies from 0.05 to 0.5% of the powder weight. At high dosage Sika® ViscoCrete®-225 Powder can cause retardation as well as at low temperatures.
Mixing	Sika® ViscoCrete®-225 Powder is added to the dry mix at the beginning of batching cycle. For optimum utilization of the high water reduction it is recommended to allow a minimal wet mixing time of 30 seconds. Sika® ViscoCrete®-225 Powder is highly effective as single added admixture or in combination with other Sika Admixtures. If used in combination with certain Sika® water reducing admixtures plastic properties can be affected. Please contact your local sales representative or technical service department at 1-800-833-7452 for further information.
Packaging	Sika® ViscoCrete® - 225 Powder is available in 44 lb. (20 kg) bags, 40 bags/pallet.
Storage and Shelf Life	Protect from direct sunlight and frost. Store in dry warehouse conditions between 45°F and 80°F (7°C - 27°C). Shelf life when stored properly in undamaged, unopened, original sealed packaging in dry warehouse conditions between 45°F and 80°F (7°C - 27°C) is 1 year.
Typical Data	
Appearance	White Powder
Density	Bulk Density - 0.8 ± 0.1 g/cm ³

KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN • NOT FOR INTERNAL CONSUMPTION • FOR INDUSTRIAL USE ONLY

All information provided by this Corporation ("Sika") concerning this product, including but not limited to, any recommendations and advice relating to the application and use of this product, is given in good faith based on Sika's current experience and knowledge of its products when properly used, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's instructions. In practice, the differences in materials, substrates, storage and handling conditions, actual site conditions and other factors outside of Sika's control are such that the accuracy or liability for the provision of such information, advice, recommendations or instructions related to its products, nor that any legal responsibility be created by or arise from the provision of such information, advice, recommendations or instructions related to its products. The user of this Sika product must meet the conditions for suitability for the intended application and purpose before proceeding with the full application of the product. Sika reserves the right to change the purposes of its products without notice. All uses of this product are subject to its current terms and conditions of sale which are available at <http://www.sika.com> or by calling 800-833-7452.

We warrant this product for one year from date of installation to be free from manufacturing defects and to meet the technical properties on the current Product Data Sheet if used as directed within that time. Our determination of liability of product for intended use and manner of this Sika's use hereby shall be limited to the product sales or replacement of product materials of like or not of like.

NO OTHER WARRANTIES EXPRESS OR IMPLIED SHALL APPLY TO THIS PRODUCT OR ANY PART THEREOF. SIKAS LIABILITY FOR DAMAGES FOR A PARTICULAR PROJECT SHALL BE LIMITED TO THE EXTENT OF THE CONTRACT PRICE FOR THE PRODUCT. SIKAS SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR DAMAGES OF ANY KIND, INCLUDING CONSEQUENTIAL DAMAGES, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, LOSS OF PROFITS OR BUSINESS INTERRUPTION, ARISING OUT OF THE USE OF THIS PRODUCT OR ANY PART THEREOF. THE USER OF THIS PRODUCT SHALL BE RESPONSIBLE FOR THE DESIGN OF ANY STRUCTURE AND FOR THE PROPER USE OF THIS PRODUCT.

Sika Corporation 223 Potters Avenue Lyndhurst, NJ 07037 Phone: (201) 955-8880 Fax: (201) 955-8225 Web: www.sika.com	Sika Canada Inc. 661, DeSoto Avenue Peterborough, ON K9B 4A9 Phone: (541) 897-2610 Fax: (541) 874-0800 1-800-387-2948
---	---

Regional Information and Sales Offices. For the location of your nearest Sika representative, contact your regional office.

USA:	Chicago: Park Lane Plaza, IL, Phone: (312) 293-6888	San Diego: San Diego, CA, Phone: (619) 441-3488
	South Florida: Cypress, FL, Phone: (772) 740-3388	South Carolina: Columbia, SC, Phone: (803) 732-8888
	Washington Region: Seattle, WA, Phone: (206) 228-8888	
Canada:	Canada: Mississauga, ON, Phone: (905) 708-8177	Atlanta: Marietta, GA, Phone: (770) 484-8111

Quality Solutions. Maximum Uptime. www.sika.com, 1-800-833-7452, 800-387-2948, 800-387-2948, 800-387-2948, 800-387-2948



BEFORE EACH USE OF ANY SIKA PRODUCT, THE USER MUST ALWAYS READ AND FOLLOW THE WARNINGS AND INSTRUCTIONS ON THE PRODUCT'S MOST CURRENT PRODUCT DATA SHEET, PRODUCT LABEL AND SAFETY DATA SHEET WHICH ARE AVAILABLE ONLINE AT [HTTP://WWW.SIKA.COM](http://www.sika.com) OR BY CALLING SIKAS TECHNICAL SERVICE DEPARTMENT AT 800-833-7452. NOTE: NOT ALL INFORMATION CONTAINED IN ANY SIKA MATERIALS RELIEVE THE USER OF THE OBLIGATION TO READ AND FOLLOW THE WARNINGS AND INSTRUCTIONS FOR EACH SIKA PRODUCT AS SET FORTH IN THE CURRENT PRODUCT DATA SHEET, PRODUCT LABEL AND SAFETY DATA SHEET PRIOR TO PRODUCT USE.