



António Francisco Novais Moreno

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Modelos reológicos para caracterização de caldas hidráulicas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Luís Gonçalo Correia Baltazar, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientadora: Maria Teresa Varanda Cidade, Professora Auxiliar com Agregação, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra

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

Vogal: Prof. Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2018

Modelos reológicos para caracterização de caldas hidráulicas

Copyright © António Francisco Novais Moreno, 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

No início do 1.º semestre do presente ano letivo, no fim de uma aula da disciplina de Reabilitação de Edifícios, questionei o Prof.º Luís Baltazar pela sua disponibilidade para orientar a dissertação. Fiquei surpreendido pela pronta resposta positiva e pelas informações fornecidas sobre a sua área de estudo. Pela sugestão do tema e auxílio prestado durante a realização desta dissertação, quero mostrar aqui a minha gratidão ao professor.

Também quero deixar um agradecimento à minha co-orientadora Prof.ª Maria Teresa Cidade do Departamento de Ciência dos Materiais e ao CENIMAT por todo o apoio prestado e equipamento cujo acesso me foi facultado, com o qual foi possível realizar a campanha experimental.

Resumo

De entre as diversas técnicas de consolidação de alvenarias antigas a injeção de caldas surge como uma solução que promove o monolitismo da alvenaria sem comprometer o valor arquitetónico do edifício. As caldas são compostas preferencialmente por ligante hidráulico e adjuvantes que se adicionam na água originando uma suspensão que é injetada no núcleo da alvenaria de forma a preencher os vazios e aumentar a coesão dos seus elementos. Apesar dos estudos já realizados no âmbito da caracterização reológica de suspensões cimentícias, ainda não se encontrou um consenso em relação ao(s) modelo(s) reológico(s) que mais se adequa(m) ao escoamento de caldas para consolidação de alvenarias.

Assim, a presente dissertação investiga os desempenhos e adequabilidade dos modelos reológicos mais comuns para a previsão do comportamento reológico de caldas hidráulicas com pozolanas e adjuvantes em termos de tensões de corte, taxas de corte, viscosidade aparente e tensão de cedência. Também se ensaiam algumas propriedades físicas e mecânicas das caldas, tais como as resistências à flexão e compressão, a massa volúmica e a porosidade aberta, para estimar o seu comportamento no estado endurecido.

Após uma análise dos resultados dos ensaios e aplicação de modelos, são indicadas as caldas hidráulicas com melhores propriedades reológicas, com melhores propriedades físicas e os modelos com melhor adequabilidade às várias composições.

Palavras-chave: Alvenaria / Calda / Consolidação / Pozolana / Taxa de corte / Tensão de corte / Viscosidade aparente

Abstract

Among the several techniques for consolidating old masonry, the injection of grouts appears as a solution that promotes the monolithic masonry without compromising the architectural value of the building. The grouts are preferably composed of hydraulic binder and admixtures which are added in the water to create a suspension which is injected into the core of the masonry in order to fill the gaps and increase the cohesion of its elements. In spite of the studies already done in the field of rheological characterization of cement suspensions, a consensus has not yet been found regarding the rheological model that is most suitable to describe the flow behavior of grouts for the old stone masonry consolidation.

In this sense, the present dissertation investigates the performances and suitability of several rheological models for the prediction of rheological behavior of hydraulic grouts proportioned with pozzolans and admixtures in terms of shear stresses, shear rates, apparent viscosity and yield stress. Some physical and mechanical properties of the grouts, such as flexural and compression strength, density and open porosity, are also determined to analyze their performance in the hardened state.

After an analysis of the experimental results and application of rheological models, the hydraulic grouts with better rheological properties, with superior physical properties and the rheological models best fit the different grouts compositions are highlighted.

Keywords: Apparent viscosity / Consolidation / Grout / Masonry / Pozzolan / Shear rate / Shear stress

Índice de Texto

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação e objetivos	1
1.3. Organização da dissertação.....	2
2. Construções em alvenaria	3
2.1. Nota histórica da construção em alvenaria	3
2.2. Injeção de caldas como técnica de consolidação	7
2.3. Importância do estudo reológico das caldas hidráulicas	13
2.4. Estrutura da alvenaria	15
3. Caracterização reológica	21
3.1. Conceitos básicos de reologia	21
3.2. Tixotropia.....	24
3.3. Fatores que influenciam as propriedades reológicas.....	25
3.3.1. Efeito da composição da suspensão.....	25
3.3.2. Efeito da temperatura	26
3.3.3. Efeito dos aditivos	27
3.3.4. Efeito da pressão.....	27
3.4. Modelos reológicos mais comuns	28
3.4.1. Modelo de Bingham.....	28
3.4.2. Modelo de Herschel-Bulkley.....	29
3.4.3. Modelo de Sisko	30
3.4.4. Modelo de Cross	31
3.4.5. Modelo de Carreau.....	32
3.4.6. Modelo da lei da potência	33
3.4.7. Modelo de Casson.....	34
4. Características e constituintes das caldas hidráulicas	37
4.1. Cal hidráulica natural.....	37
4.2. Adições e adjuvantes	38
4.2.1. Cinzas volantes	40
4.2.2. Sílica de fumo.....	41
4.2.3. Pó de tijolo	42
4.2.4. Plastificantes e superplastificantes	42
5. Campanha experimental.....	43
5.1. Ensaio com reómetro rotacional.....	43
5.2. Preparação das amostras	45

5.3.	Determinação da resistência à flexão e compressão	49
5.4.	Determinação da massa volúmica e porosidade aberta	51
5.5.	Ensaio de termogravimetria	52
6.	Análise de resultados do ensaio com reómetro rotacional	55
6.1.	Curvas de fluxo da calda de referência	55
6.2.	Aplicação de modelos	56
6.2.1.	Aplicação do modelo de Bingham	57
6.2.2.	Aplicação do modelo de Herschel-Bulkley	59
6.2.3.	Aplicação do modelo de Sisko	61
6.2.4.	Aplicação do modelo de Cross	63
6.2.5.	Aplicação do modelo de Carreau	65
6.2.6.	Aplicação do modelo da lei da potência	67
6.2.7.	Aplicação do modelo de Casson	70
6.3.	Resultados das amostras com pozolanas	72
6.3.1.	Resultados das caldas com cinzas volantes	72
6.3.2.	Resultados das caldas com pó de tijolo	74
6.3.3.	Resultados das caldas com sílica de fumo	76
7.	Análise de resultados dos ensaios com provetes de calda endurecida	79
7.1.	Resultados do ensaio de resistência à flexão e compressão	79
7.2.	Resultados do ensaio de determinação de massa volúmica e porosidade aberta	81
7.3.	Resultados do ensaio de termogravimetria	83
8.	Conclusões	87
8.1.	Considerações finais	87
8.2.	Trabalhos futuros	89
9.	Bibliografia	91
10.	Anexos	95

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Ruínas das muralhas de Jericó	3
Figura 2.2 - Pártenon da Acrópole de Atenas	4
Figura 2.3 - Ponte do Gard, França	4
Figura 2.4 - Cúpula da Basílica de São Pedro, Roma (esq.) e Cúpula da Catedral de Santa Maria del Fiore, Florença (dir.)	5
Figura 2.5 - Abadia de Westminster, Londres	6
Figura 2.6 – Gaiola Pombalina, Lisboa	6
Figura 2.7 - Padrão geométrico de distribuição dos furos	7
Figura 2.8 - Injeção de caldas em alvenaria	8
Figura 2.9 - Injeção de caldas em ambas as faces.....	8
Figura 2.10 - Instalação do sistema de injeção.....	9
Figura 2.11 - Martelo para ensaio sónico.....	10
Figura 2.12 – Resultados de ensaios sónicas.....	10
Figura 2.13 – Ensaio de macacos planos duplo	11
Figura 2.14 - Ensaio com boroscópio.....	12
Figura 2.15 - Levantamento termográfico em parede de frontal pombalina	12
Figura 2.16 - Carote extraído	12
Figura 2.17 - Diferentes técnicas de injeção de caldas	14
Figura 2.18 – Abóbada de cave constituída por colunas, arcos e enchimento	15
Figura 2.19 - Paralelepípedo de esponja, perspectiva (esq.) e secção (dir.)	15
Figura 2.20 - Paralelepípedo de esponja reforçado com cartão (esq.) e com carga a atuar (dir.)	16
Figura 2.21 - Representação esquemática de alvenaria de pano múltiplo.....	16
Figura 2.22 - Representação esquemática de alvenaria de pano múltiplo com perpiano	17
Figura 2.23 – Parede de cantaria	18
Figura 2.24 – Paredes de cantaria de pano múltiplo.....	18
Figura 2.25 – Vários tipos de solução construtiva de alvenaria de pedra	19
Figura 2.26 – Parede de tijolo de aparelho flamengo a uma vez.....	19
Figura 2.27 – Parede de tijolo de aparelho flamengo a uma vez e meia.....	20
Figura 2.28 – Parede de tijolo de aparelho inglês a uma vez	20
Figura 2.29 - Parede de tijolo de aparelho inglês a uma vez e meia	20
Figura 3.1 – Escoamento de corte simples	21
Figura 3.2 – Curva de fluxo dos fluídos newtonianos	22
Figura 3.3 – Curvas de fluxo de fluidos reofluídificantes (esq.) e reoespessantes (dir.)	23
Figura 3.4 - Curvas que relacionam a viscosidade aparente com a taxa de corte	23
Figura 3.5 - Curva viscosidade-tempo de um fluido tixotrópico	24
Figura 3.6 - Curvas de fluxo de materiais tixotrópicos	24
Figura 3.7 – Evolução no tempo das tensões de cedência de pastas de cimento Portland, a diferentes temperaturas	27
Figura 3.8 - Efeito da pressão na tensão de cedência e na viscosidade para muito altas taxas de corte em caldas hidráulicas.....	28
Figura 3.9 - Curva de fluxo segundo o modelo de Bingham.....	29
Figura 3.10 – Curvas de fluxo segundo o modelo de Herschel-Bulkley	30
Figura 3.11 - Modelo de Sisko em ensaio experimental	30
Figura 3.12 - Curva viscosidade - tensão de corte para o modelo de Cross.....	31
Figura 3.13 - Curva de fluxo do modelo de Cross aplicado a uma mistura de água e caulinita	32
Figura 3.14 - Modelo de Carreau	32
Figura 3.15 – Curva de fluxo do modelo de Carreau aplicado a uma solução de colagénio reticulado com glutaraldeído	33

Figura 3.16 - Curva de fluxo do modelo da lei da potência.....	33
Figura 3.17 – Curvas de fluxo do modelo da Lei da Potência aplicado a caldas de injeção com diferentes dosagens de nano-sílica.....	34
Figura 3.18 - Exemplo de curva de fluxo do modelo de Casson	34
Figura 3.19 – Curvas de fluxo dos resultados experimentais de uma amostra de bentonite, do modelo de fluido Newtoniano e do modelo de Casson.....	35
Figura 4.1 - Ciclo da cal.....	38
Figura 4.2 - Tensões de cedência em pastas de cimento Portland sem pozolanas, com escória de alto forno, com cinzas volantes e com sílica de fumo.....	41
Figura 5.1 - Reómetro rotacional.....	43
Figura 5.2 - Geometria de pratos paralelos.....	44
Figura 5.3 - Efeito da temperatura na tensão de cedência e viscosidade a muito altas taxas de corte em caldas hidráulicas.....	44
Figura 5.4 - Valor de gap utilizado.....	45
Figura 5.5 - Cal Hidráulica Natural NHL 5.....	46
Figura 5.6 – Viscosidade plástica da calda em função do rácio água-ligante e da percentagem de superplastificante	47
Figura 5.7 – Curvas “tensão de corte - taxa de corte” para misturas de betão com e sem sílica de fumo.....	48
Figura 5.8 - Prensa dos ensaios de flexão e compressão	49
Figura 5.9 - Diagramas de corpo livre, esforço transversal e momento fletor do provete sujeito à carga de colapso no ensaio de flexão.....	50
Figura 5.10 - Diagrama de tensões na secção do provete durante o ensaio de flexão.....	50
Figura 5.11 – Amostras de provete de calda inseridas no exsiccador	51
Figura 5.12 - Pesagem hidrostática dos provetes de calda	52
Figura 5.13 - Várias fases da amostra durante a picagem e moagem para o ensaio de termogravimetria.....	53
Figura 5.14 - Equipamento de termogravimetria.....	53
Figura 5.15 – Análise termogravimétrica de caldas à base de cal hidráulica natural.....	54
Figura 6.1 - Curvas de fluxo da calda NHL5_0.8_ref.....	55
Figura 6.2 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Bingham e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8.....	57
Figura 6.3 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Bingham e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	58
Figura 6.4 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Herschel-Bulkley e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8.....	60
Figura 6.5 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Herschel-Bulkley e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	60
Figura 6.6 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Sisko e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8.....	62
Figura 6.7 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Sisko e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	62
Figura 6.8 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Cross e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8.....	64
Figura 6.9 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Cross e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	64
Figura 6.10 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Carreau e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8.....	66
Figura 6.11 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Carreau e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	66
Figura 6.12 - Curva “tensão de corte - taxa de corte” do modelo da Lei da Potência, aplicado a toda a gama de taxas de corte, e dos resultados experimentais para a composição NHL5_SF6_0.8.....	67

Figura 6.13 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo da Lei da Potência e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8	68
Figura 6.14 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo da Lei da Potência e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8	69
Figura 6.15 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Casson e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8.....	70
Figura 6.16 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Casson e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	71
Figura 6.17 - Tensões de cedência das caldas com cinzas volantes	72
Figura 6.18 – Viscosidades aparentes a muito baixas taxas de corte das caldas com cinzas volantes	73
Figura 6.19 - Viscosidades aparentes a muito altas taxas de corte das caldas com cinzas volantes	73
Figura 6.20 - Tensões de cedência das caldas com pó de tijolo	74
Figura 6.21 - Viscosidades aparentes a muito baixas taxas de corte das caldas com pó de tijolo	75
Figura 6.22 - Viscosidades aparentes a muito altas taxas de corte das caldas com pó de tijolo	75
Figura 6.23 - Tensões de cedência das caldas com sílica de fumo	76
Figura 6.24 - Viscosidades aparentes a muito baixas taxas de corte das caldas com sílica de fumo.....	77
Figura 6.25 – Viscosidades aparentes a muito altas taxas de corte das caldas com sílica de fumo.....	77
Figura 7.1 - Resistência à flexão das amostras ensaiadas.....	79
Figura 7.2 - Resistência à compressão das amostras ensaiadas.....	80
Figura 7.3 - Massa volúmica das amostras ensaiadas	82
Figura 7.4 - Porosidade aberta das amostras ensaiadas	82
Figura 7.5 - Resultados do ensaio de termogravimetria para as amostras com cinzas volantes	83
Figura 7.6 - Resultados do ensaio de termogravimetria para as amostras com pó de tijolo	84
Figura 7.7 - Resultados do ensaio de termogravimetria para as amostras com sílica de fumo	84
Figura 7.8 - Resultados do ensaio de termogravimetria para as amostras com as maiores dosagens de pozolanas	85
Figura 10.1 – Curvas de fluxo da calda NHL5_FA5_0.8.....	97
Figura 10.2 – Curvas de fluxo da calda NHL5_FA10_0.8.....	97
Figura 10.3 – Curvas de fluxo da calda NHL5_FA15_0.8.....	97
Figura 10.4 - Curvas de fluxo da calda NHL5_FA20_0.8	98
Figura 10.5 - Curvas de fluxo da calda NHL5_FA25_0.8	98
Figura 10.6 - Curvas de fluxo da calda NHL5_FA30_0.8	98
Figura 10.7 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT5_0.8	99
Figura 10.8 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT10_0.8	99
Figura 10.9 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT15_0.8	99
Figura 10.10 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT20_0.8	100
Figura 10.11 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT25_0.8	100
Figura 10.12 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT30_0.8	100
Figura 10.13 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF2_0.8	101
Figura 10.14 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF4_0.8	101
Figura 10.15 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF6_0.8	101
Figura 10.16 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF8_0.8	102
Figura 10.17 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF10_0.8	102
Figura 10.18 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF12_0.8	102

Índice de Quadros

Quadro 4.1 - Classificação das cais segundo a constituição da matéria-prima	37
Quadro 5.1 - Características químicas, física e mecânicas do produto NHL 5	46
Quadro 5.2 - Composição das caldas ensaiadas.....	48
Quadro 6.1 - Valores de tensão e viscosidade da calda de referência.....	56
Quadro 6.2 - Coeficientes do modelo de Bingham aplicado às amostras NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	57
Quadro 6.3 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Bingham aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	59
Quadro 6.4 - Coeficientes do modelo de Herschel-Bulkley aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8	59
Quadro 6.5 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Herschel-Bulkley aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	61
Quadro 6.6 - Coeficientes do modelo de Sisko aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	61
Quadro 6.7 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Sisko aplicado às amostras NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	63
Quadro 6.8 - Coeficientes do modelo de Cross aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	63
Quadro 6.9 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Cross aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	65
Quadro 6.10 - Coeficientes do modelo de Cross aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	65
Quadro 6.11 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Carreau aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	67
Quadro 6.12 - Coeficientes do modelo da Lei da Potência aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8	68
Quadro 6.13 - Valores de tensão de corte e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo da Lei da Potência aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	69
Quadro 6.14 - Coeficientes do modelo de Casson aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	70
Quadro 6.15 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Casson aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8.....	71
Quadro 6.16 - Resultados das caldas com cinzas volantes	72
Quadro 6.17 – Resultados das caldas com pó de tijolo	74
Quadro 6.18 - Resultados das caldas com sílica de fumo.....	76
Quadro 7.1 - Resultados do ensaio de flexão	79
Quadro 7.2 – Resultados do ensaio de compressão	80
Quadro 7.3 - Medições da massa M_1	81
Quadro 7.4 - Medições da massa M_2	81
Quadro 7.5 - Medições da massa M_3	81

Simbologia / Nomenclatura

A	Área
A/L	Rácio água/ligante
b	Largura do provete
CENIMAT	Centro de Investigação de Materiais
cm	centímetro
DCM	Departamento de Ciências dos Materiais
DEC	Departamento de Engenharia Civil
EN	Norma Europeia
F	Força tangencial
F _c	Força de rotura à compressão
F _f	Força de rotura à flexão
FA	Cinzas volantes
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
h	Altura
I	Momento de inércia de 2. ^a ordem
IPQ	Instituto Português de Qualidade
ISO	International Organization of Standardization
K	Índice de consistência
kg	quilograma
m	metro
M _v	Massa volúmica
M ₁	Massa seca
M ₂	Massa obtida por pesagem hidrostática
M ₃	Massa de provete saturado
n	Índice de comportamento
NHL	Cal hidráulica natural
NP	Norma Portuguesa

Pa	pascal
P _A	Porosidade aberta
PT	Pó de tijolo
R	Raio dos pratos
R _c	Resistência à compressão
R _f	Resistência à flexão
s	segundo
SF	Sílica de fumo
SP	Superplastificante
u	Deslocamento
UNL	Universidade Nova de Lisboa
v	Distância da fibra à linha neutra
W	Módulo de resistência à flexão
σ	Tensão
τ	Tensão de corte
ω	Velocidade angular
Γ	Binário medido pelo reómetro rotacional
γ	Deformação de corte
γ̇	Taxa de corte
η	Coeficiente de viscosidade
η ₀	Viscosidade aparente para muito baixas taxas de corte
η _∞	Viscosidade aparente para muito altas taxas de corte
η _p	Viscosidade plástica

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Com o advento do betão armado, na primeira metade do século XX, as entidades construtoras abandonaram as antigas artes da construção em estrutura de alvenaria e madeira. Estas tecnologias caíram no esquecimento ao longo das transições geracionais. Por motivos económicos, sociais e de falta de conhecimento já não se constroem edifícios e monumentos deste tipo de tecnologia, pelo que é de grande importância conservar o património edificado que chegou até ao nosso tempo, resistindo à ação das intempéries ao longo de vários séculos.

A Reabilitação e a Conservação são atividades que surgem como resposta à filosofia de “*demolir e reconstruir*”, de forma a preservar a herança das anteriores gerações e podendo, em alguns casos, justificar de forma económica a opção, otimizando os índices de utilização e conforto e conferindo uma paisagem rústica e harmoniosa aos centros históricos das cidades.

Os monumentos foram o primeiro grande tema de preocupação internacional, com a elaboração da Carta de Atenas em 1931 pelo Serviço Internacional de Museus da Sociedade das Nações. “*Caso o restauro seja indispensável, em consequência de degradação ou de destruição, a Conferência recomenda o respeito pela obra histórica ou artística do passado, sem eliminar o estilo de nenhuma época*” [1].

Em 1975, surge a Carta Europeia do Património Arquitetónico que chama à atenção para a importância da Conservação não só dos monumentos, como também da sua envolvente, englobando outros edifícios de importância mais modesta.

As caldas hidráulicas assumem-se como objeto de consolidação, procurando reverter o processo natural de erosão das construções, sem comprometer o aspeto arquitetónico e histórico do edificado. Para tal, é necessário um estudo das suas propriedades que justifique a utilização em técnicas de consolidação nas distintas obras de valor histórico e cultural.

A Carta de Veneza sobre a conservação e o restauro de monumentos e sítios, elaborada em 1964, refere no seu Artigo 10.º: “*Quando as técnicas tradicionais se revelarem inadequadas, a consolidação de um monumento pode ser efetuada através do recurso a outras técnicas modernas de conservação ou de construção, cuja eficácia tenha sido demonstrada cientificamente e garantida através da experiência de uso*” [2].

As propriedades reológicas assumem especial relevância, uma vez que o material em estudo alterna entre os estados líquido e sólido durante o processo de consolidação e cura. O comportamento da calda hidráulica, no momento da injeção e no interior das alvenarias antigas, depende de parâmetros reológicos tais como a tensão de corte, tensão de cedência, viscosidade e taxa de corte.

1.2. Motivação e objetivos

Atualmente existem vários modelos que descrevem o comportamento reológico dos fluidos, porém sabe-se que os vários autores propuseram esses modelos com base em estudos

empíricos, na sua maioria aplicados a polímeros e produtos de estrutura molecular muito diferente das misturas cimentícias.

Esta dissertação pretende abordar os modelos existentes e verificar, experimentalmente, a sua adequabilidade às caldas hidráulicas para contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre a reologia dos materiais de construção/consolidação. Com um modelo adequado e fiável, é possível prever o escoamento da calda hidráulica num meio poroso como é a alvenaria. Assim, é possível ajustar a composição das caldas que garanta a melhor taxa de consolidação.

Também serão abordados alguns tipos de pozolanas adicionadas ao ligante da calda hidráulica, de forma a verificar o seu efeito nas propriedades reológicas da suspensão.

Para além das reológicas, propriedades físicas e mecânicas também serão estudadas com o objetivo de complementar informação e verificar se as composições com melhor comportamento reológico também apresentam melhores propriedades físicas e mecânicas.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação segue o exemplo clássico de introdução, desenvolvimento e conclusão.

No primeiro capítulo, a Introdução, é feito um enquadramento do tema em estudo e são referidos os objetivos do mesmo.

Nos capítulos 2, 3 e 4 são apresentados conteúdos do estado atual do conhecimento ao nível das construções em alvenaria, caracterização reológica e constituintes das caldas hidráulicas, de forma a fornecer as informações necessárias para realizar uma boa abordagem e interpretação dos capítulos seguintes.

No capítulo 5, são referidos os métodos e procedimentos experimentais, tanto para as medições reológicas, que caracterizam as caldas hidráulicas no estado fresco, como para os ensaios com provetes de calda endurecida, para medição de outras propriedades físicas e mecânicas.

Nos capítulos 6 e 7 são apresentados os resultados experimentais e análises aos mesmos, para os ensaios nos estados fresco e endurecido.

O capítulo 8 apresenta todas as conclusões dos desenvolvimentos desta dissertação.

Por fim, apresenta-se a Bibliografia que serviu de base para este estudo e os Anexos com dados e resultados que não surgiram ao longo do texto.

2. Construções em alvenaria

2.1. Nota histórica da construção em alvenaria

Com o surgimento da agricultura e pecuária, o Homem do passado abandonou a sua condição de vida nómada e adotou um estilo de vida sedentário. Aprendeu a colonizar e dominar o espaço e a natureza que o rodeiam, transmitindo os ensinamentos aos seus descendentes para que estes continuassem a prosperar ao longo da História.

Esta importante mudança, que tardou muitas gerações, foi possível com o desenvolvimento da Construção e a evolução da sua tecnologia. O Homem deixou de chamar ao seu local de repouso “*abrigo*” para passar a chamar aquilo que tão familiarmente conhecemos como “*casa*”. A *casa* diferencia-se do *abrigo* pela sua durabilidade, conforto, resistência – quer mecânica quer contra as intempéries – e avançada tecnologia.

A construção em alvenaria representa a tecnologia que melhor prosperou, sobrevivendo durante séculos e gerações, constituindo a História não escrita, mas edificada do Homem.

Os primeiros vestígios da construção em alvenaria remetem para o Médio Oriente e a utilização do adobe - blocos de terra humedecida e cozida ao sol, podendo ser aditivados com palha ou outras fibras naturais. Este tipo de construção envolvia baixos custos e boa trabalhabilidade. Contudo, ainda não era o material ideal para resistir às intempéries e erosão, muito menos para construir em altura. Nos arredores de Jericó, próximo do rio Jordão, é possível visualizar as ruínas das muralhas de uma cidade com casas construídas em adobe, datada de 7.000 a.C., ilustradas na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Ruínas das muralhas de Jericó [3]

O tipo de construção mais nobre em alvenaria resistente prende-se com o emprego da pedra - material com resistência muito elevada à compressão, mas resistências muito baixas à tração e flexão. A solução construtiva por excelência envolvendo o uso da pedra corresponde às paredes de cantaria – pedra talhada com dimensões fixas e cuidadosamente aparelhada com juntas desconstradas entre fiadas. De forma mais modesta, mas também com grande qualidade construtiva em termos de resistência e durabilidade temos as alvenarias de pedra irregular, constituindo esta a solução mais difundida para a habitação das populações.

Modelos reológicos para caracterização de caldas hidráulicas

O primeiro ligante utilizado nas alvenarias de pedra foi a argila, a qual, secando, perde as suas propriedades ligantes [4], o que explica a pequena durabilidade das construções que empregam este ligante.

Ao dominar o Fogo, desde a simples fogueira até aos altos-fornos, o Homem verificou que ao cozer o pó de pedra calcária, hidratar e amassar posteriormente com água obtinha uma pasta trabalhável, que, depois de aplicada e carbonatada ao ar, endurecia e aderiu à pedra de construção com uma qualidade muito satisfatória. Estava então encontrado o ligante que, juntamente com a areia, saibro ou argila, disponibilizava a argamassa de cal aérea que foi a mais utilizada na construção até ao século XIX.

A Idade do Ferro chegou às civilizações em torno do Mediterrâneo, proporcionando o desenvolvimento da Escultura. Com o aparecimento de ferramentas mais apropriadas para extrair e talhar a pedra, foi possível edificar grandes monumentos com identidade própria segundo a sua ordem arquitetónica. Referindo um exemplo, temos o Pártenon, um templo da Grécia Antiga localizado na Acrópole de Atenas, isto é a parte mais alta e nobre da cidade, e que representa a arte da ordem dórica, como podemos observar na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Pártenon da Acrópole de Atenas [5]

Para a construção de grandes obras públicas, tais como pontes e aquedutos, os romanos utilizavam o arco de volta perfeita, onde cada pedra tinha de ser talhada à medida, pelos grandes mestres canteiros, para que a ligação entre todos os elementos esteja sempre assegurada de forma a possibilitar a transmissão de todas as tensões para o suporte. Na Figura 2.3 encontra-se ilustrada a Ponte do Gard, constituída por esta tecnologia.



Figura 2.3 - Ponte do Gard, França [6]

A pedra representava uma boa solução para as fundações e paredes de alvenaria pois estes elementos são solicitados à compressão. O mesmo não se verifica nos pavimentos elevados e coberturas, solicitados à flexão.

Em geral, nos edifícios de habitação, os pavimentos elevados eram de madeira, com vigas deste material a descarregar nas paredes de alvenaria resistentes na direção do menor vão. As coberturas, também de madeira, eram inclinadas e construídas com base em estruturas em asna. Para os edifícios de grande importância, como as catedrais ou palácios, os pavimentos elevados eram concebidos com recurso a abóbadas de alvenaria, de aresta ou também de berço (em algumas naves das igrejas), suportadas pelos seus arcos que transmitiam os esforços de compressão às paredes e colunas. A cobertura destas construções era habitualmente em madeira e telha cerâmica, porém existem exceções que constituem algumas das obras da maior importância histórica – a construção de cúpulas como solução de cobertura.

A cúpula de alvenaria é um elemento hemisférico sujeito a tensões de compressão na direção meridional – transmitidas do lanternim e cúpula para o tambor - e a tensões que podem ser de compressão ou tração na direção radial, dependendo da cota altimétrica – tensões de tração que diminuem em altura, dando lugar a tensões de compressão a partir de um certo nível. A cúpula da Basílica de São Pedro é de alvenaria de pedra, ao passo que a cúpula da Catedral de Santa Maria del Fiore é de alvenaria de tijolo maciço, como se observa na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Cúpula da Basílica de São Pedro, Roma (esq.) [7] e Cúpula da Catedral de Santa Maria del Fiore, Florença (dir.) [8]

No estilo arquitetónico românico predominava o arco de volta perfeita como elemento base das abóbadas, quer de berço quer de aresta. Já o estilo gótico adota o arco ogival como o seu elemento base, proporcionando grandes alturas às catedrais. Este arco tem uma mecânica diferente pois deve ser carregado no topo, ao contrário do arco de volta perfeita que deve ter solicitações ao longo do seu extradorso, resultantes de enchimentos de pedra irregular e argamassa ou terra, para manter a sua estabilidade. Nas catedrais góticas é comum observar a estrutura em asna de madeira da cobertura assente no topo da abóbada de berço ou das abóbadas de aresta da nave principal.

A construção em altura caracteriza o estilo gótico. As paredes são ligeiras com aberturas para entrada de luz e pinturas vitrais, sem capacidade resistente para suportar as abóbadas. Cabe aos arcos botantes e contrafortes então o papel de contraventamento aos impulsos horizontais. Os pináculos também contribuem para a estabilidade, aumentando o peso próprio resistente.

A Abadia de Westminster empregou esta tecnologia, como se pode ver na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Abadia de Westminster, Londres [9]

Como as fundações são responsáveis pela transição de tensões de um meio mais rígido (paredes) para outro mais deformável (solo), estas são constituídas por poços de alvenaria mais pobre apresentando sobrelargura em relação às paredes do edifício. Para um sistema de fundação mais profundo e económico, executavam-se colunas até atingir uma razoável profundidade do terreno, estando estas ligadas entre si por arcos que suportam as paredes-mestras. No caso da construção pombalina, é possível observar o recurso a estacas de madeira com o objetivo de transferir as cargas do edifício às camadas mais profundas e resistentes do terreno. As fundações de alvenaria assentam em toros e travessas, pregados ou samblados entre si e às estacas, após a sua cravação no terreno.

Após o terramoto de 1755 em Lisboa, foi promovida uma construção antissísmica no centro da cidade que, para além das fundações com estacas de madeira já citadas, adotou a construção doutro tipo de alvenarias resistentes, a *Gaiola Pombalina* – estrutura reticulada de madeira, embebida na alvenaria e responsável pelo contraventamento sísmico do edifício. Na Figura 2.6 está representada uma parede deste tipo.

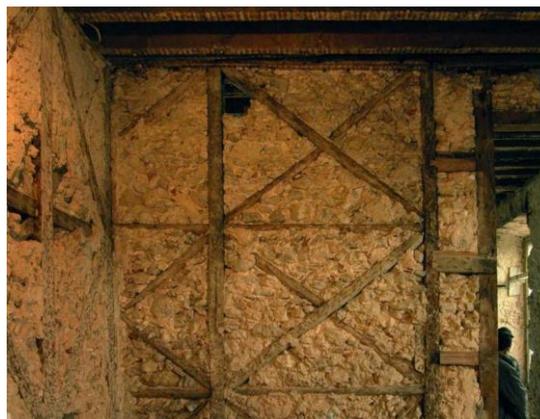


Figura 2.6 – Gaiola Pombalina, Lisboa [10]

As alvenarias, tal como todos os materiais, estão sujeitas à erosão e, quando se trata de construções seculares, ainda mais importância esta assume no perigo de colapso do edificado. Com esta introdução pretende destacar-se a importância da conservação do património histórico edificado, uma vez que é das poucas coisas tangíveis que recebemos dos nossos

antepassados. A consolidação de alvenarias procura restituir ao edificado as características o mais próximo possível da época original de construção, mantendo a sua autenticidade estética, histórica, dos materiais e do espaço envolvente.

2.2. Injeção de caldas como técnica de consolidação

A injeção de caldas é uma técnica de consolidação de alvenarias. Embora também utilizada noutras funções mais superficiais como o refecimento das juntas e a selagem de fendas, é na área da consolidação que a calda hidráulica se notabilizou por se tratar de um método pouco intrusivo que respeita a autenticidade da construção original.

A calda deve ser constituída preferencialmente por um ligante hidráulico, de forma a endurecer no interior da alvenaria em privação de CO_2 , água em dosagem adequada e eventuais pozolanas e adjuvantes que alteram as suas propriedades. Uma vez que a esmagadora maioria das construções antigas apresentam a cal aérea como ligante de referência, existe a preferência pela calda de cal hidráulica para garantir uma boa compatibilidade mecânica e química com os materiais existentes na alvenaria.

Devido à ação do tempo e erosão, cresce o volume de vazios na alvenaria, o que irá diminuir a sua compacidade e poderá comprometer o seu comportamento monolítico, aumentando o risco de ocorrência de escorregamento e abaulamento. Esta técnica tem o objetivo de colmatar esses vazios através da injeção, por pressão ou gravítica, de calda em furos executados na parede, com afastamento constante em cada nível para garantir a homogeneidade, distância e diâmetro que dependem das condições da alvenaria (permeabilidade à calda) e comprimento de pelo menos metade da espessura da parede.

Os furos só devem ser executados após a picagem e remoção do reboco existente. A distribuição deve ser alternada entre níveis de forma a melhor preencher a área da parede, como se observa na Figura 2.7.

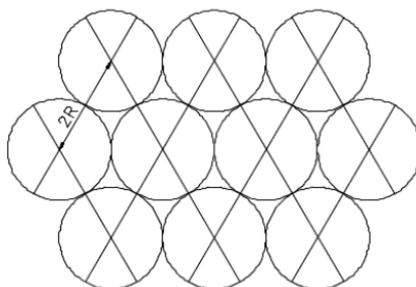


Figura 2.7 - Padrão geométrico de distribuição dos furos [11]

São colocados tubos de purga para remover a calda em excesso, através de furos executados que servirão posteriormente para injeção no nível seguinte. Para contrariar a ação da gravidade, as injeções devem ser realizadas de baixo para cima. Ao mesmo nível, a ordem deve ser preferencialmente dos extremos para o meio. Após a consolidação e cura, a alvenaria poderá ser revestida com argamassa compatível com a calda de injeção.

A Figura 2.8 ilustra os furos para injeção sob pressão, munidos por tubos plásticos para que a calda escoe até ao núcleo da alvenaria.



Figura 2.8 - Injeção de caldas em alvenaria [12]

Em paredes de grande espessura, a injeção de caldas pode ser realizada em ambas as faces. Neste caso, os furos das duas faces não devem estar ao mesmo nível, como mostra a Figura 2.9. A altura atingida pela água do terreno também deve ser um fator a ter em conta durante a consolidação.

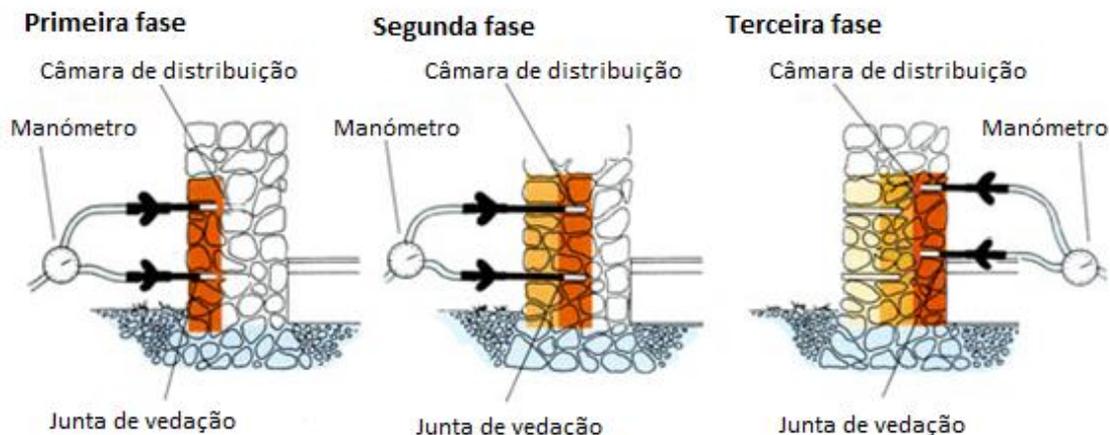


Figura 2.9 - Injeção de caldas em ambas as faces [13]

Numa parede de tijolo, as juntas encontram-se bem definidas, pelo que será mais fácil executar a distribuição dos furos, ao passo que nas paredes de alvenaria ordinária, as juntas de assentamento da pedra apresentam uma muito maior irregularidade, dificultando a precisão geométrica da distribuição.

Devido à idade e estado de alteração da construção, a pressão de injeção não deve exceder, conforme o caso, valores da ordem dos 0,05 – 0,1 MPa para garantir a estabilidade e segurança da alvenaria.

Em casos em que se observa grandes desagregações e destaques de material, a injeção de caldas deve ser realizada em conjunto com o encasque e reconstrução localizada de parede com materiais compatíveis aos da construção original (fragmentos de tijolo ou de pedra

semelhante, argamassa de cal). Utiliza-se assim uma técnica mais vocacionada para a colmatação de grandes lacunas e só depois serão realizadas as injeções que irão preencher os vazios de menor dimensão.

Na Figura 2.10 encontra-se representado, de forma esquemática, o equipamento responsável pela técnica de injeção de caldas sob pressão.

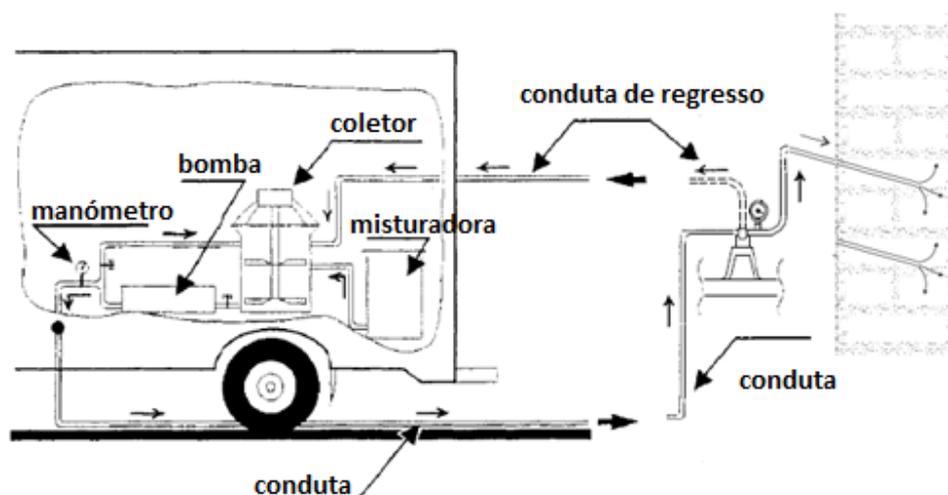


Figura 2.10 - Instalação do sistema de injeção [11]

O sistema de injeção é constituído por: (i) misturadora, onde se aplicam os materiais constituintes e ocorre a amassadura; (ii) coletor que armazena a calda hidráulica; (iii) bomba e manómetro que aplicam e registam a pressão de injeção da calda; (iv) conduta que conduz a calda para os furos de injeção na alvenaria; (v) conduta de regresso que conduz a calda em excesso, extraída da alvenaria, para o coletor, onde é depositada e poderá ser reutilizada [11].

As vantagens da injeção de caldas em relação às técnicas de reforço de alvenarias como as lâminas de betão, rebocos armados, pregagens de manga injetada, fibras de material compósito, tirantes passivos ou confinadores metálicos prendem-se com as seguintes: (i) a autenticidade, pois esta técnica de consolidação não altera o aspeto arquitetónico da alvenaria, mantendo a harmonia com a sua envolvente; (ii) a durabilidade, consolidando o núcleo e aumentando a compacidade está a reverter-se o processo de erosão natural do elemento; (iii) a compatibilidade, uma vez que o betão de cimento Portland poderá provocar tensões excessivas no suporte cuja argamassa de assentamento é a cal apagada, ocorrendo fissuração indesejada. A injeção de uma calda de cal hidráulica, para além de ser um ligante com módulo de elasticidade mais próximo da cal aérea, também garante uma melhor distribuição ao longo da espessura da parede.

A principal desvantagem desta técnica prende-se com a irreversibilidade. Uma vez aplicada, não é possível remover o material do interior da alvenaria.

Na fase de inspeção e diagnóstico do edifício ou monumento, são realizados ensaios sísmicos para conhecer a compacidade das paredes alvo de estudo. Estes ensaios consistem na emissão de ondas sonoras através de um martelo ligado a um registador de dados, como se observa na Figura 2.11. Quanto mais compacto é o meio de propagação, maior é a velocidade das ondas. Um acelerómetro, colocado do outro lado da alvenaria, recebe as ondas sonoras. O cálculo é realizado pressupondo que, num campo não uniforme de velocidades, os impulsos

sónicos não se propagam segundo linhas retas mas seguem linhas curvas, em resultado da refração [14].



Figura 2.11 - Martelo para ensaio sónico [15]

A análise de dados conduz a imagens tomográficas indicando o grau de compacidade, por intervalos de escala consoante a cor, nas diferentes zonas da alvenaria. Este tipo de ensaio, para além de não ser intrusivo, é o mais fiável para a decisão e dimensionamento da quantidade de calda a injetar. Após a consolidação e cura, é possível repetir este procedimento experimental para conhecer o valor e percentagem de melhoria da compacidade em toda a alvenaria.

A Figura 2.12 mostra exemplos de ensaios sónicos em a) secções internas e b) face exterior da alvenaria. A escala de cor varia entre o vermelho (zonas mais compactas) e o azul (zonas de maior porosidade).

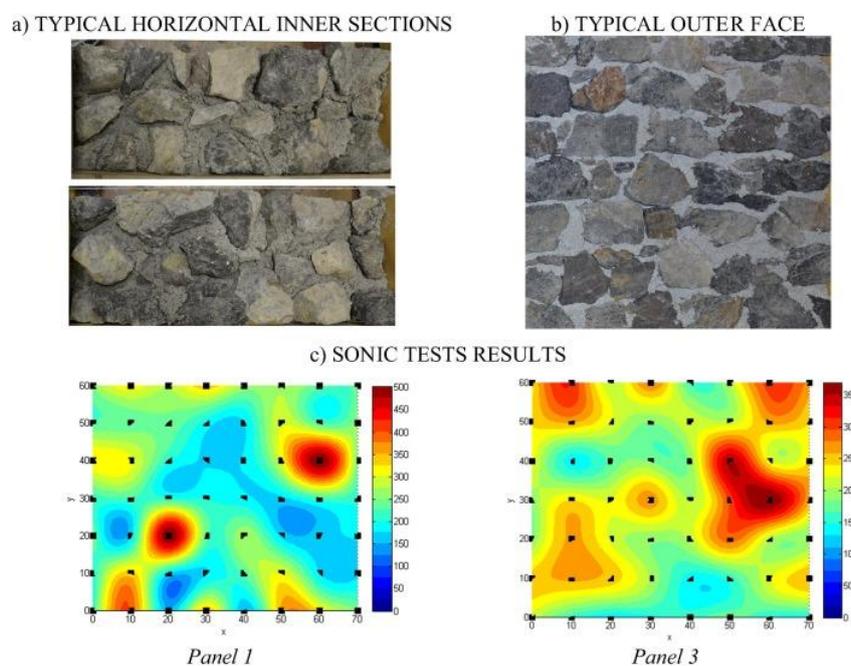


Figura 2.12 – Resultados de ensaios sónicas [16]

Em alguns casos, poderá ser realizado o ensaio dos macacos planos que apesar de ser um pouco mais intrusivo, envolvendo a realização de cortes e deformações na alvenaria, permite

conhecer parâmetros importantes tais como: (i) o estado de tensão a que está sujeita, dado pelo valor de tensão necessário aplicar pela bomba de pressão ao macaco plano para reverter a deformação resultante da realização do entalhe; (ii) o módulo de elasticidade, quando se realiza o ensaio com entalhes e macacos paralelos. Desta forma ficamos a saber quais as paredes do edifício que estão a suportar as maiores cargas e assim estabelecer prioridades das alvenarias a consolidar.

A Figura 2.13 ilustra o ensaio de macacos planos duplo: a amostra de parede entre os macacos está sujeita a uma tensão uniaxial. Para uma maior precisão dos resultados, são realizados vários ciclos de carga e descarga, com o aumento/diminuição gradual dos níveis de tensão [14]. Através de medições com o defletómetro para os vários valores de tensão aplicada, é possível construir o gráfico tensão-deformação e obter o módulo de elasticidade da alvenaria.



Figura 2.13 – Ensaio de macacos planos duplo [17]

As sondagens com boroscópio, inserido através de furos, cavidades ou fendas, também revelam utilidade para fornecer um diagnóstico visual do interior e detetar eventuais zonas de grande lacuna no núcleo da alvenaria, algo que também pode ser alcançado com a termografia, técnica essa muito utilizada também para saber se uma parede interior é de frontal ou tabique, pois revela facilmente se existe ou não gaiola pombalina, como podemos ver na Figura 2.15 que ilustra um exemplo de levantamento termográfico numa parede de frontal pombalina.

A Figura 2.14 mostra um exemplo da utilização do boroscópio, inserido através de um furo numa parede rebocada e pintada, evidenciando a reduzida intrusividade do método.



Figura 2.14 - Ensaio com boroscópio [18]

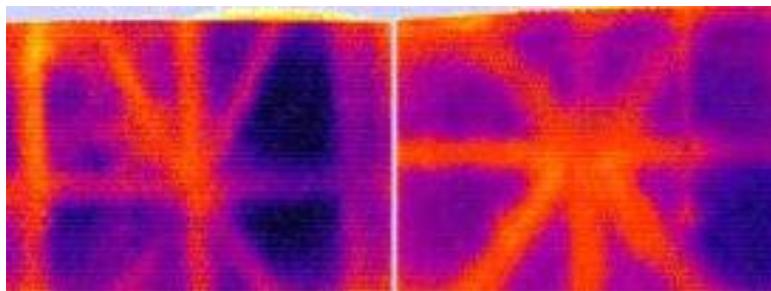


Figura 2.15 - Levantamento termográfico em parede de frontal pombalina [14]

A madeira emite uma radiação térmica de valor muito diferente da alvenaria na faixa do infravermelho, pelo que irá ter uma cor completamente diferente. Na alvenaria é possível notar zonas mais escuras e mais claras. O calor específico e a condutibilidade térmica dependem da porosidade/compacidade do elemento, assim é possível conhecer as zonas mais compactas/porosas.

O ensaio mais intrusivo é a extração de carotes. A vantagem desta técnica é a facilidade de, após a extração, ensaiar parâmetros importantes como a resistência à compressão uniaxial, permeabilidade, capilaridade ou porosidade, porém estas características referem-se apenas à respetiva zona da alvenaria, que como sabemos apresenta uma grande heterogeneidade.

Os carotes têm forma cilíndrica, como se pode ver na Figura 2.16.



Figura 2.16 - Carote extraído [19]

2.3. Importância do estudo reológico das caldas hidráulicas

O sucesso da técnica de consolidação através de injeções depende do comportamento reológico da calda hidráulica num meio poroso como é a alvenaria de pedra [11]. A capacidade da calda conseguir penetrar e preencher os vazios da parede está relacionada com a sua composição, que irá influenciar parâmetros reológicos tais como a viscosidade ou a taxa de corte. Assim, a calda deve ter elevada fluidez e injetabilidade para assegurar um bom escoamento, mesmo a baixas pressões de injeção. Verifica-se assim que as características da calda no estado fresco são tão importantes quanto aquelas no estado endurecido, pelo que o estudo reológico deste material assume uma preponderância chave na escolha do melhor produto para a consolidação de alvenarias.

Além das características reológicas, existe ainda uma série de outros requisitos para a calda de injeção: aderência à alvenaria, resistência a sais solúveis, baixa granulometria para preencher os vazios, baixa segregação e exsudação, baixo módulo de elasticidade e retração de forma a não transmitir tensões à alvenaria e evitar problemas de compatibilidade.

Atualmente, o estudo reológico é uma área em desenvolvimento, não existindo unanimidade na comunidade científica quanto ao modelo ideal que descreve a curva de fluxo para os diversos grupos de materiais de base cimentícia. O objetivo desta dissertação é o de experimentar várias composições de calda hidráulica e estudar diversos modelos de forma a verificar o desempenho e sua adequabilidade ao objeto ensaiado.

Para cada objeto de intervenção, seja ele uma alvenaria de pedra ordinária, parede de cantaria ou silharia ou até mesmo de tijolo maciço, existem características reológicas mais adequadas para as caldas de consolidação que dependem não só da natureza do meio poroso, como também do estado de degradação e grau de compacidade.

Os furos de injeção são executados na zona das juntas de assentamento. A calda deve ter os adequados parâmetros reológicos anteriormente citados para percorrer um caminho misto que pode ser de argamassa e pedra ou argamassa e tijolo. Até o tipo de pedra influencia as características da escolha da melhor calda, uma vez que existem pedras de diferentes capilaridades e higroscopiedades. A título de exemplo, o Lioz, pedra calcária da região de Lisboa, tem uma baixa capilaridade, tornando-a uma pedra muito boa para a construção em meios de nível freático pouco profundo.

Na fase de inspeção e diagnóstico, são estudadas as características da alvenaria. A caracterização reológica pretende qualificar as caldas, através de modelos adequados, de forma a facilitar a escolha do melhor produto e dosagem ao engenheiro responsável pelo projeto de reabilitação.

Também a técnica de consolidação influencia a escolha da calda com melhores propriedades reológicas, uma vez que a viscosidade varia com a pressão de injeção / tensões de corte, logo estamos em diferentes condições na injeção por gravidade, sob pressão ou por vácuo, que estão representadas na Figura 2.17.

Regra geral, a técnica por gravidade aplica-se em alvenarias muito degradadas estruturalmente, pelo que são necessárias caldas com maiores requisitos de fluidez para ocorrer um bom escoamento sem qualquer sobrepressão mecânica.

O mecanismo da injeção por vácuo consiste na sucção pelo tubo superior da calda inserida no tubo inferior. A calda teve ter uma boa fluidez para escoar sobre efeito de aspiração.

A injeção sob pressão é o método mais eficaz e utilizado, mesmo com menores requisitos de fluidez da calda de injeção.

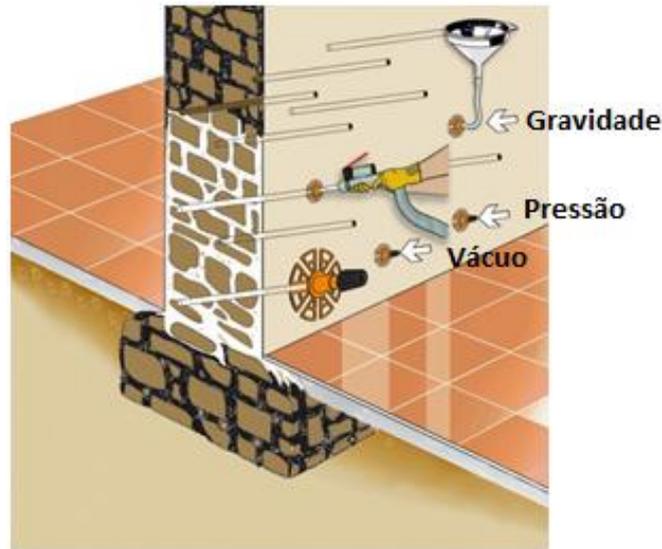


Figura 2.17 - Diferentes técnicas de injeção de caldas [20]

No caso das fundações, a alvenaria a consolidar encontra-se em contacto com o terreno. Por vezes, por razões de ordem económica e logística, não é possível realizar a escavação em toda a envoltura do elemento. Este problema ocorre principalmente nos casos em que as fundações são contínuas, com sobrelargura em relação à parede suportada. Durante a consolidação, alguma calda irá escapar para o solo envolvente, pelo que o volume perdido deve ser controlado durante a realização das injeções. Nesta situação, as características reológicas do fluido atingem uma importância ainda maior, influenciando as quantidades de calda perdida por metro linear de parede de fundação.

Quando o sistema de fundação consiste em colunas e arcos, a área de escavação para expor as colunas é muito menor do que no caso anterior. Por outro lado, sabemos que estas fundações são mais profundas, pelo que terão de ser escavados poços até à base da coluna para realizar a injeção, pois esta deve ser realizada de baixo para cima para garantir a melhor uniformidade possível de distribuição de calda.

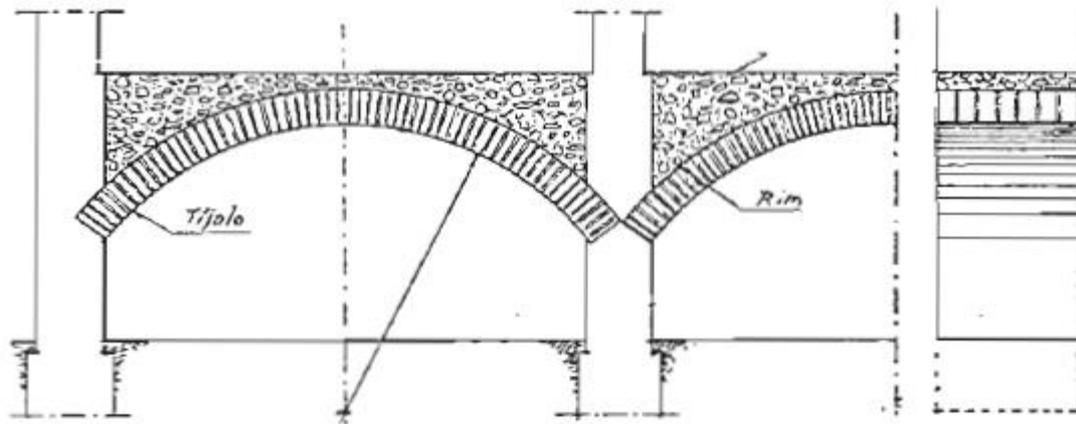


Fig. 33 — ABÓBADA DE CAVE

Figura 2.18 – Abóbada de cave constituída por colunas, arcos e enchimento [21]

Tal como as colunas, também é possível realizar a consolidação dos arcos e dos enchimentos das abóbadas. Nesta situação, a fuga de calda pode ocorrer pelo intradorso, sendo mais fácil de controlar em pavimentos do que em fundações onde este está em contacto com o terreno. A Figura 2.18 mostra um corte de uma abóbada de cave.

O engenheiro conhecendo dados relevantes como a espessura e compacidade da fundação, as características dos materiais tanto da alvenaria como do solo e o nível freático, deve ponderar sobre estes fatores para selecionar a calda com os parâmetros reológicos mais adequados para a injeção.

2.4. Estrutura da alvenaria

De forma a compreender melhor a mecânica de alvenarias, considere um paralelepípedo de esponja com as dimensões 13,7 x 9,0 x 1,5 cm, como se mostra na Figura 2.19.

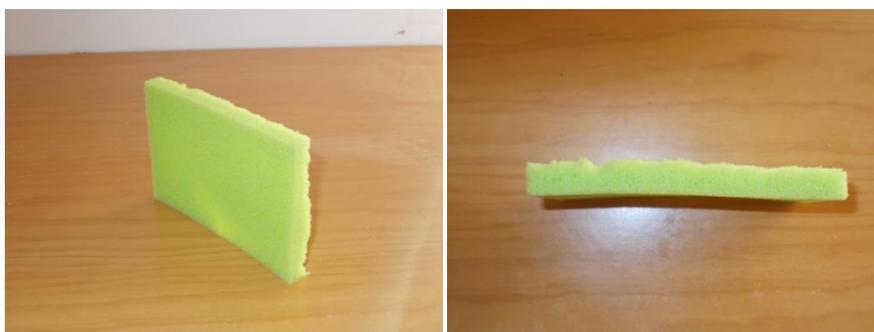


Figura 2.19 - Paralelepípedo de esponja, perspectiva (esq.) e secção (dir.)

Este elemento não possui qualquer rigidez – quando se coloca sobre ele uma pequena carga, não resiste e cai instantaneamente.

Modelos reológicos para caracterização de caldas hidráulicas

Confinando o elemento com cartão na sua periferia, ainda que de forma muito tosca, obtemos um elemento muito mais rígido, capaz de resistir a cargas consideráveis para o seu volume, como podemos observar na Figura 2.20:

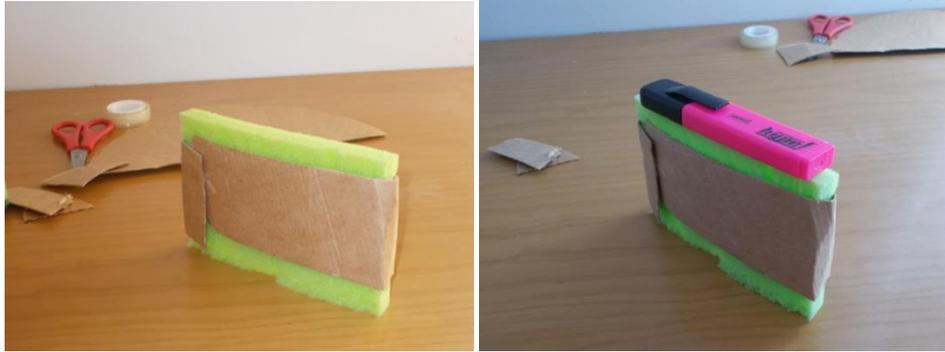


Figura 2.20 - Paralelepípedo de esponja reforçado com cartão (esq.) e com carga a atuar (dir.)

O mesmo princípio físico se aplica para as alvenarias – junto às faces temos blocos de pedra resistente e de grande dimensão, ao passo que no núcleo encontramos alvenaria mais pobre, pedras irregulares, de menor dimensão e possivelmente, dependendo da zona e tipo de construção, argila, palha ou outros materiais mais pobres. Estas alvenarias são frequentemente denominadas de “alvenarias de pano múltiplo” e podemos observar um exemplo, de forma esquemática, na Figura 2.21.

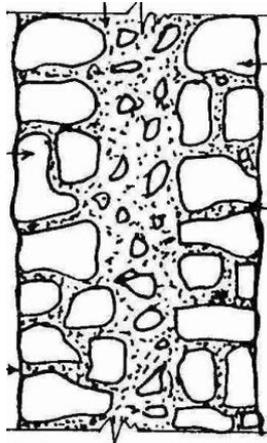


Figura 2.21 - Representação esquemática de alvenaria de pano múltiplo [22]

Por norma, estas alvenarias são rebocadas e a própria irregularidade do suporte revela-se importante na aderência da argamassa de revestimento. Esta possui composição semelhante à de assentamento, na maioria dos casos.

Esta é a solução construtiva mais frágil, onde o aumento da porosidade produz sérios riscos de deformação e colapso. O elemento mais fraco, o reboco, é o primeiro a ceder e fissurar constituindo um indicador nos casos em que existem tensões que se estão a tornar excessivas para a capacidade resistente da alvenaria. O método de aparelhar a pedra era fundamental para assegurar a estabilidade da alvenaria, evitando grandes desenvolvimentos de comprimento de juntas na vertical, travando-as e desencontrando-as sabiamente.

Os motivos que levaram à adoção desta tecnologia foram essencialmente económicos. Na época de construção, os custos de transporte eram muito elevados. Os blocos de pedra eram transportados da pedreira para a obra através de veículos de tração animal (carros de bois ou cavalos). Não existiam máquinas para perfuração, extração e britagem da pedra, sendo estas realizadas com auxílio de explosivos e de forma manual com as ferramentas de ataque pontual existentes na época.

Para a construção em altura eram necessárias paredes de grande espessura, o que justifica que a pedra de pedreira, mais cara e de melhor qualidade não se encontra em toda a secção da alvenaria. Em obra, o transporte vertical dependia da forma e peso das pedras: as mais leves eram transportadas com pau e corda e as mais pesadas através de cordas e roldanas [23].

A alvenaria mais pobre, pedra de menor dimensão e maior irregularidade, servia para formar o núcleo. O aparelho era descuidado, sem qualquer critério, ao contrário dos panos exteriores onde se observava uma orientação de assentamento e se utilizavam pedras de menor dimensão de forma a preencher, da melhor forma possível, os espaços entre as pedras de maior dimensão.

A argamassa utilizada era também de cal aérea, com traço semelhante à dos panos exteriores, porém para além da função de assentamento, existia ainda a necessidade de ocupar um maior volume de vazios no núcleo por unidade de área de alvenaria – essa segunda função designa-se por “*enchimento*” e pode ser comprometida pela erosão da argamassa.

Para prevenir o abaulamento e deformação excessiva, utilizavam-se perpianhos – grandes blocos de pedra, com comprimento igual à espessura total da parede, com a função de solidarizar e ligar mecanicamente os vários panos, contribuindo para o comportamento monolítico da alvenaria. Os perpianhos eram colocados com algum espaçamento entre si, como se verifica na Figura 2.22, contribuindo também de forma significativa para a resistência do edifício ao sismo.

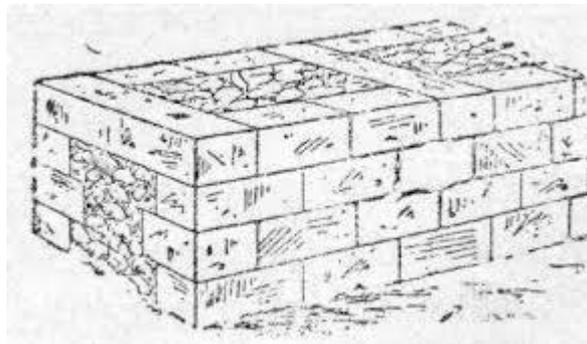


Figura 2.22 - Representação esquemática de alvenaria de pano múltiplo com perpianho [24]

De acordo com a importância da construção - edifícios de habitação, palácios, fortificações militares ou templos religiosos - iremos ter diferentes soluções construtivas, sendo as mais comuns, para o primeiro caso, as paredes de alvenaria ordinária. Já para a construção monárquica e religiosa observa-se com frequência a existência de paredes de cantaria. As paredes de enxilharia ou silharia, pedra com forma prismática mas de dimensão variável, foram muito utilizadas em castelos, muralhas e torres, podendo ainda encontrar-se em edifícios de habitação, dependendo da riqueza geológica da região.

Modelos reológicos para caracterização de caldas hidráulicas

É muito frequente notar a ausência de reboco nas paredes de cantaria. Os próprios canteiros, que na maioria das vezes talhavam a pedra junto à obra, exerciam influência para deixar o seu trabalho final à vista, conferindo nobreza aos elementos e, a nível estético, uma harmonia da construção com o espaço envolvente.

Dependendo das possibilidades, geográficas e económicas, nos grandes monumentos era possível realizar cantarias homogêneas, sem núcleo de natureza mais deformável, à imagem das paredes de tijolo maciço, como se observa na Figura 2.23. Os blocos de pedra podiam ser assentes a seco, com argamassa ou ligados entre si por cavidades com grampos metálicos.

No caso dos edifícios de habitação, com possibilidades económicas mais modestas, a pedra de cantaria era utilizada, de forma astuciosa, apenas nos elementos mais importantes – cunhais, pilastras, arcos e nervuras de abóbada, guarnecimento de vãos, varandas, cimalkas e cachorros para apoio de varandas, frechais e asnas de madeira.

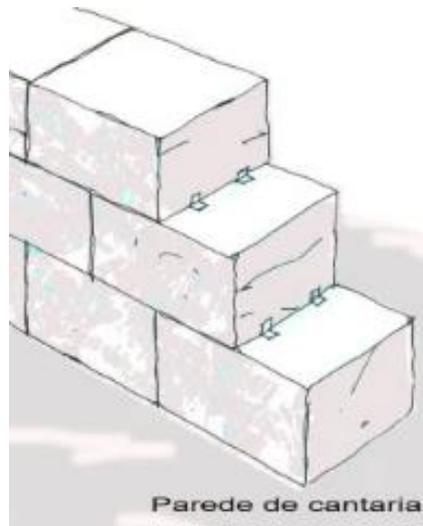


Figura 2.23 – Parede de cantaria [25]

Por outro lado, tal como vimos na Figura 2.21 e por razões económicas já citadas, temos a situação de cantarias de pano múltiplo, como se observa na Figura 2.24, com núcleo de enchimento deformável, mas mantendo a nobreza nos panos exteriores, não rebocados, do qual é exemplo o Mosteiro dos Jerónimos, o Aqueduto das Águas Livres e muitas outras construções de grande importância.

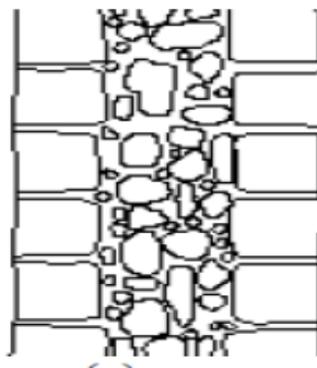


Figura 2.24 – Paredes de cantaria de pano múltiplo [11]

Com os elementos de pano de alvenaria resistente, pano de alvenaria mais pobre e deformável e perpianho, é possível encontrar vários tipos de solução construtiva, como ilustra a Figura 2.25.

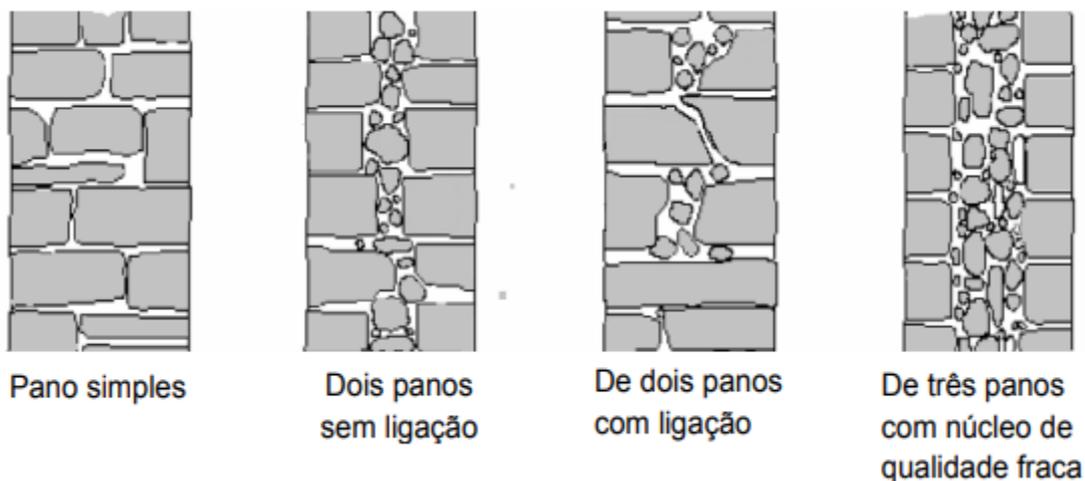


Figura 2.25 – Vários tipos de solução construtiva de alvenaria de pedra [11]

As paredes de tijolo maciço, bloco prismático de cerâmica com dimensões 22 x 11 x 7 [cm], são de secção resistente homogênea, variando apenas a disposição dos tijolos conforme o método de aparelho adotado. A espessura é dada pelo número de vezes a dimensão máxima do tijolo, 22 cm, mais a argamassa de assentamento e, caso exista, o reboco.

A título de exemplo, as Figuras 2.26, 2.27, 2.28 e 2.29 ilustram de forma esquemática paredes de tijolo de aparelho flamenco e inglês a uma vez e a uma vez e meia.

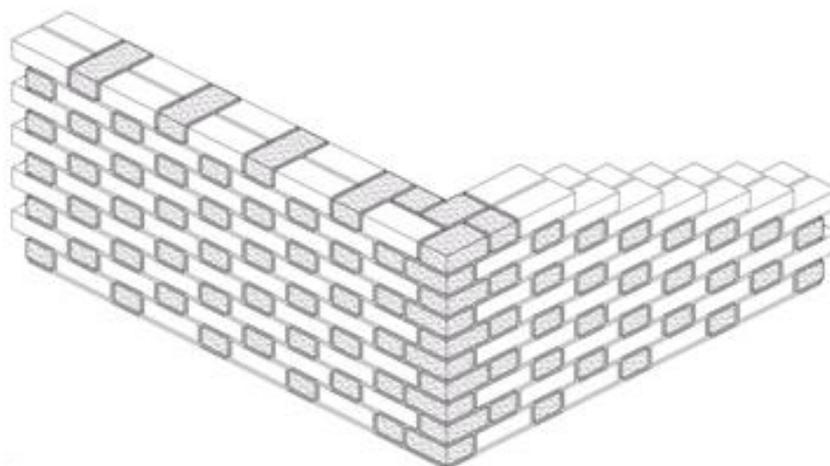


Figura 2.26 – Parede de tijolo de aparelho flamenco a uma vez [26]

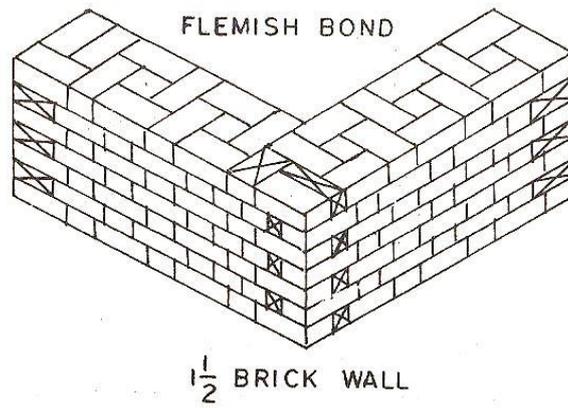


Figura 2.27 – Parede de tijolo de aparelho flamengo a uma vez e meia [27]

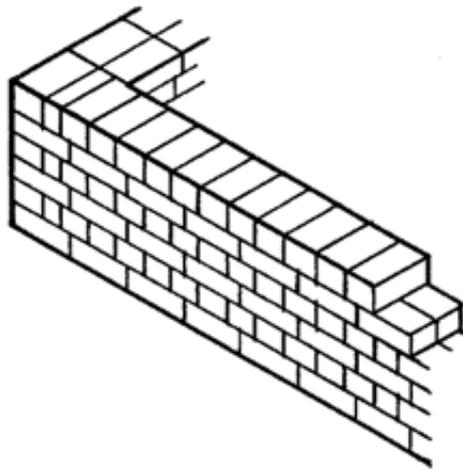


Figura 2.28 – Parede de tijolo de aparelho inglês a uma vez [28]

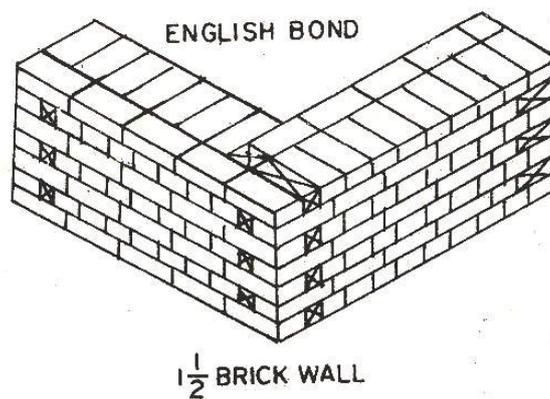


Figura 2.29 - Parede de tijolo de aparelho inglês a uma vez e meia [29]

3. Caracterização reológica

3.1. Conceitos básicos de reologia

A reologia define-se como a ciência que estuda o escoamento e deformação da matéria. Os principais objetos de estudo são os materiais com comportamento intermédio entre o sólido e o líquido. Desta forma é possível explicar que esta ciência empregue não só conceitos da mecânica dos sólidos, como também da mecânica dos fluidos.

Devido ao elevado crescimento do setor secundário e advento dos polímeros na primeira metade do século XX, houve a necessidade de estudar o comportamento reológico de uma série de materiais, quer sejam de cariz industrial como os óleos, as pastas ou as espumas, de cariz alimentar como por exemplo o mel, o ketchup ou a pasta de dentes ou ainda os materiais de construção, de entre os quais se destacam as tintas, os betumes e o betão de cimento Portland, cuja produção teve um crescimento exponencial neste mesmo período.

O estudo aprofundado da comunidade científica permitiu o surgimento de diversos modelos que descrevem o comportamento reológico dos materiais. Embora, à primeira vista, os modelos aparentem diferir muito entre si, existem alguns casos em que os autores refletem as influências que receberam dos seus pares.

Considere-se um volume de matéria elementar de altura h em que, devido à ação de uma força F tangencial à área A , uma das camadas sofre um descolamento u em relação à outra, como se pode observar na Figura 3.1.

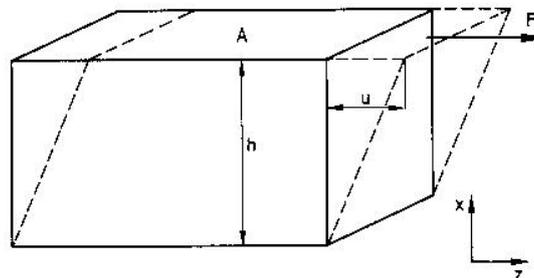


Figura 3.1 – Escoamento de corte simples [30]

A tensão de corte, τ [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$], é dada pela expressão (3.1):

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

A deformação de corte, γ , é dada pela expressão (3.2):

$$\gamma = \frac{u}{h} \quad (3.2)$$

Considerando a velocidade, v , como a derivada numérica do deslocamento, u , em ordem ao tempo, podemos definir a taxa de corte, $\dot{\gamma}$ [s^{-1}], obtida pela expressão (3.3):

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad (3.3)$$

A viscosidade, η [Pa.s], é dada pela expressão (3.4):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.4)$$

A viscosidade é um parâmetro que representa a resistência de um material ao escoamento.

Isaac Newton definiu a viscosidade como “a resistência que aparece devido à falta de deslizamento das partes de um líquido, sendo as restantes coisas iguais, e proporcional à velocidade com que as partes do líquido são separadas uma da outra”.

Os fluidos que cumprem sempre esta lei são designados por “fluidos newtonianos” e o gráfico que relaciona as tensões de corte com a taxa de corte é obtido pela reta $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$, em que a viscosidade é constante e é dada pelo declive, como se observa na Figura 3.2.

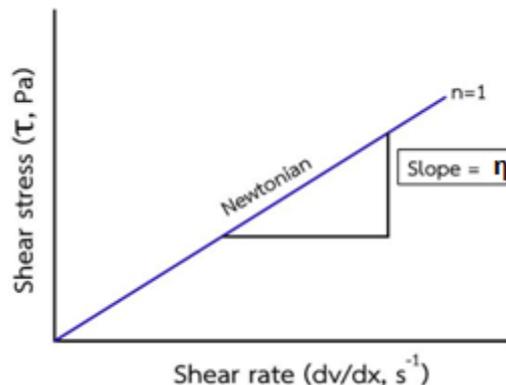


Figura 3.2 – Curva de fluxo dos fluidos newtonianos [31]

Por sua vez, os fluidos cuja viscosidade varia com a taxa de corte designam-se por “fluidos não-newtonianos” e existem vários modelos que descrevem a curva de fluxo, caracterizando o comportamento reológico.

A água é um exemplo de um fluido newtoniano, porém as caldas de ligante hidráulico definem-se como não-newtonianos.

Os fluidos cuja viscosidade decresce com o aumento da taxa de corte designam-se por “fluidos reofluídificantes” ou “pseudoplásticos” e a curva de fluxo “tensão de corte – taxa de corte” tem concavidade virada para baixo.

Os fluidos cuja viscosidade cresce com o aumento da taxa de corte designam-se por “fluidos reoespessantes” ou “dilatantes” e a curva de fluxo “tensão de corte – taxa de corte” tem concavidade virada para cima.

Na Figura 3.3 é possível observar ambas as curvas de fluxo.

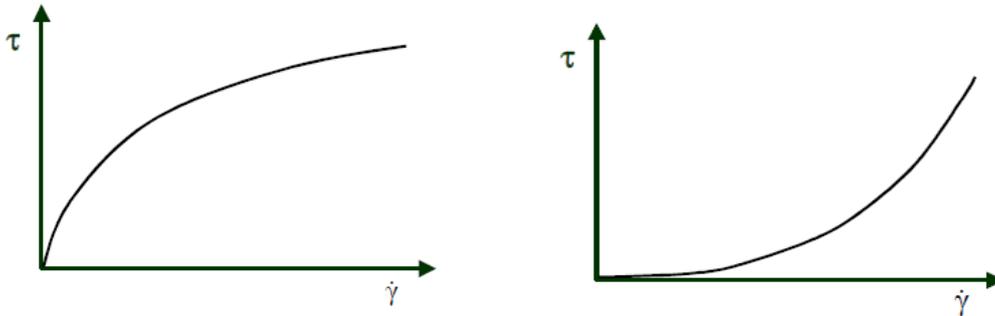


Figura 3.3 – Curvas de fluxo de fluidos reofluidificantes (esq.) e reoespessantes (dir.) [32]

Foram observadas as curvas de fluxo em gráficos $\tau-\dot{\gamma}$, onde a viscosidade, η , em qualquer ponto é dada pelo declive da curva nesse mesmo ponto.

Definindo gráficos do tipo $\eta-\dot{\gamma}$, podemos verificar que a viscosidade decresce com a taxa de corte, no caso dos fluidos reofluidificantes e que cresce no caso dos fluidos reoespessantes. É possível observar este comportamento na Figura 3.4.

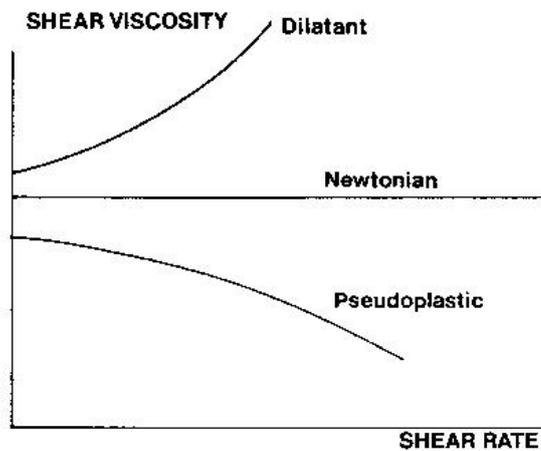


Figura 3.4 - Curvas que relacionam a viscosidade aparente com a taxa de corte [30]

Nota: é importante considerar os termos na língua inglesa para viscosidade aparente (*apparent viscosity*), tensão de corte (*shear stress*) e taxa de corte (*shear rate*). Ao longo desta dissertação, poderá ser possível encontrar estes termos nas mais diversas fontes.

Shear viscosity é a viscosidade de corte cuja designação resulta do método de medição.

3.2. Tixotropia

Tixotropia é uma propriedade de alguns fluidos não-newtonianos, que se traduz na capacidade destes recuperarem a sua pseudo estrutura tridimensional com a ocorrência de um tempo finito após a tensão de corte cessar.

A calda hidráulica é uma suspensão tixotrópica: no momento da injeção são aplicadas tensões de corte que excedem a tensão de cedência, isto é, o valor de tensão que é necessária aplicar ao fluido para se dar ao início do escoamento. Sabendo que é um fluido reofluidificante, numa primeira fase a viscosidade decresce, o que promove o escoamento e a capacidade de penetrar pelos poros da alvenaria. Quando as tensões de corte cessam, a viscosidade irá aumentar e irá tender para o seu valor inicial.

Este comportamento encontra-se representado na Figura 3.5.

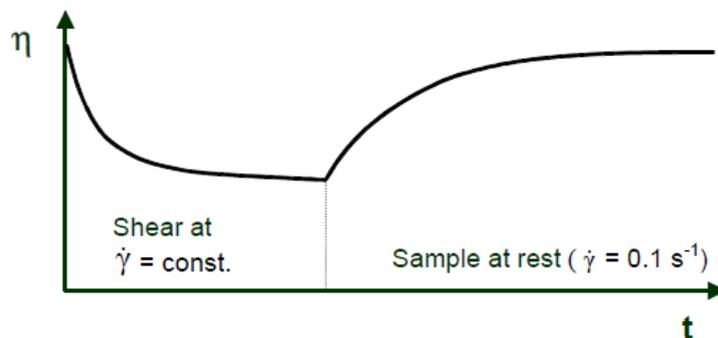


Figura 3.5 - Curva viscosidade-tempo de um fluido tixotrópico [32]

São possíveis de observar as duas fases da curva “viscosidade aparente – tempo” sob taxa de corte constante. Quando a tensão de corte, não representada no gráfico, cessa, irá seguir-se um período de descanso em que as estruturas de ligação do fluido são restabelecidas e o material regressa ao seu estado inicial, com o valor inicial de viscosidade aparente.

Para a generalidade das alvenarias, de porometrias mais diminutas, interessam caldas de injeção mais fluidas, de baixas viscosidade aparente e tensão de cedência.

Na Figura 3.6 é possível observar as curvas de fluxo de materiais tixotrópicos.

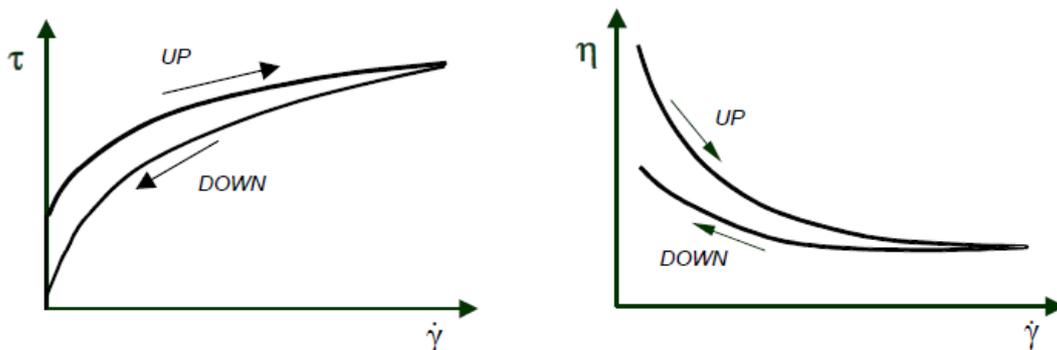


Figura 3.6 - Curvas de fluxo de materiais tixotrópicos [32]

No gráfico do lado esquerdo, na curva de baixo, é de notar a taxa de corte a cessar, representando o fim do escoamento e o regresso ao estado de repouso. Na curva de cima, é possível verificar o valor da tensão de cedência, correspondente à ordenada quando a taxa de corte parte do valor nulo. Nos gráficos observa-se o comportamento reofluidificante - a viscosidade decresce com o aumento da taxa de corte.

No capítulo 5, será possível observar que nas medições reológicas realizadas no âmbito desta dissertação também se analisam ambas as fases destes gráficos: inicia com baixos valores de taxa de corte que crescem progressivamente até um valor máximo e, posteriormente, decresce por ordem inversa esses mesmos valores ensaiados até ao valor inicial.

Será de particular interesse a comparação dos traçados dos ensaios experimentais com estes gráficos teóricos de curvas de fluxo de materiais tixotrópicos. Além disso, irá ser realizada uma análise com auxílio de modelos reológicos que serão divulgados num próximo subcapítulo.

Para além de tixotrópica, a calda hidráulica pode também apresentar comportamento viscoelástico. Propriedades elásticas foram observadas em caldas hidráulicas que continham na sua composição polímeros (PDMS) [33]. Deformações viscosas são deformações contínuas e irreversíveis provocadas pelas tensões de corte. Estas deformações traduzem-se no escoamento do material.

Viscoelasticidade é a característica reológica pela qual os materiais sofrem simultaneamente deformações elásticas e viscosas. Da mecânica dos sólidos, elasticidade é a capacidade do material regressar à sua forma e volume iniciais após a tensão que provocou a deformação cessar.

3.3. Fatores que influenciam as propriedades reológicas

Existem fatores químicos, físicos e mecânicos dos quais depende a viscosidade. Certos parâmetros têm maior preponderância sob certas condições, nomeadamente ambientais e em determinadas gamas de taxa de corte.

Para além dos mais importantes, que se enunciam em seguida, existem outros fatores que influenciam a viscosidade, dos quais são exemplo o valor de pH e as forças electroestáticas da partícula.

3.3.1. Efeito da composição da suspensão

As propriedades física e químicas do material determinam a sua viscosidade, pois esta resulta da interação e atrito entre as diferentes moléculas do fluido, isto é, quanto maior é o atrito interno, maior é a energia necessária para ocorrer o escoamento do fluido.

Geralmente, os polímeros com moléculas mais complexas e de maior massa apresentam maior viscosidade. Estas moléculas apresentam cadeia longa e tendem a entrelaçar-se entre si, então as forças aplicadas a uma cadeia são transmitidas às outras cadeias, arrastando-as, o que aumenta a rigidez global e dificulta o escoamento. Este fenómeno não ocorre em moléculas de pequena massa, das quais são exemplo as moléculas da calda hidráulica.

Em reologia, o valor que separa as macromoléculas grandes das pequenas é chamado de “massa crítica”. Acima deste valor, os entrelaçamentos entre macromoléculas tornam-se importantes e assumem uma grande influência na viscosidade do fluido.

Por outro lado, os compostos polares também tendem a conferir altas viscosidades ao material, uma vez que formam ligações de hidrogénio entre moléculas separadas, agrupando-as e aumentando a resistência global ao movimento.

No caso da calda hidráulica, quanto menores forem as partículas do ligante, maior número delas haverá por unidade de volume, o que se irá traduzir numa maior superfície específica e em maior número de contactos entre as partículas e as moléculas de água. Também a forma das partículas influencia o comportamento reológico da calda – a cal hidráulica natural tem partículas cujo formato é lamelar enquanto algumas pozolanas são mais esféricas, do qual é exemplo a sílica de fumo.

3.3.2. Efeito da temperatura

A temperatura também influencia o fluido a nível molecular, já que produz uma alteração de energia cinética. No caso das suspensões, o aumento da temperatura provoca uma excitação das moléculas, fazendo moverem-se mais depressa, aumentando o volume livre e diminuindo o atrito interno, uma vez que contactam menos entre si, provocando a diminuição da viscosidade.

Porém, no caso dos gases observa-se o efeito oposto – com o aumento da velocidade, ocorrem mais colisões entre as moléculas, o que provoca o aumento da viscosidade.

Outro aspeto que se deve ter em conta são as taxas de corte. O aumento da temperatura provoca maiores vibrações e número de contactos moleculares, ocorrendo um maior número de interações coloidais e da velocidade de agregação e dispersão de partículas. Em taxas de corte elevadas, o efeito dos contactos moleculares tende a sobrepor-se ao da temperatura, pelo que esta tem muito mais influência na viscosidade para taxas de corte mais reduzidas [30].

A título de exemplo, a Figura 3.7 representa as tensões de cedência em pastas de cimento Portland a diferentes temperaturas.

Em misturas cimentícias, o aumento da temperatura tem um efeito negativo na tensão de cedência da suspensão. O gráfico demonstra que as pastas a menores temperaturas, apresentam menores tensões de cedência. Concluimos portanto, que para baixas taxas de corte, o efeito das colisões entre partículas sobrepõem-se ao efeito da diminuição de atrito interno devido à excitação molecular.

Como seria de esperar, o aumento do tempo de presa aumenta a tensão de cedência e a viscosidade a muito baixas taxas de corte.

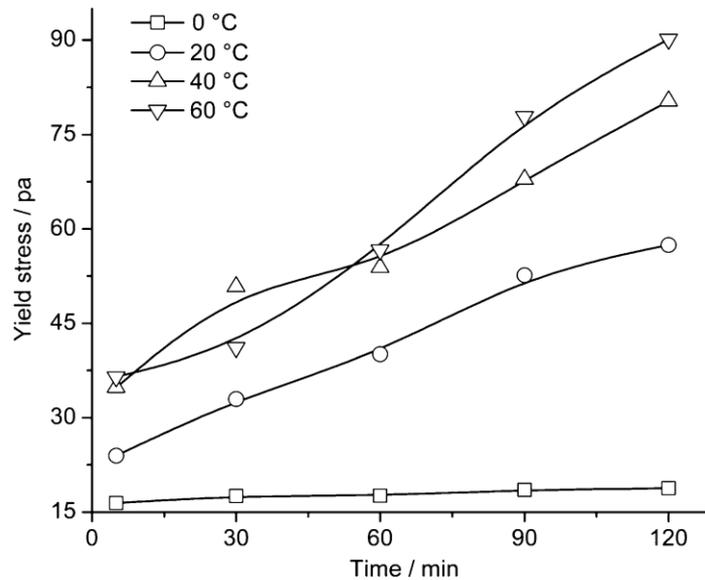


Figura 3.7 – Evolução no tempo das tensões de cedência de pastas de cimento Portland, a diferentes temperaturas [34]

3.3.3. Efeito dos aditivos

Existem três grupos de aditivos: cargas, plastificantes e lubrificantes.

As cargas, muito utilizadas em tintas, são substâncias sólidas, pós, granulados ou fibras incorporadas no polímero para lhe conferir melhores propriedades mecânicas. As cargas aumentam a resistência ao alongamento, reduzindo a capacidade viscoelástica do fluido e aumentam a viscosidade.

Ao contrário destas últimas, os plastificantes, muito utilizados em betões e argamassas, diminuem a viscosidade. São incorporados para aumentar a ductilidade e flexibilidade do sistema, o que é conseguido através da substituição das interações moleculares do polímero por interações plastificante/polímero [30].

Os lubrificantes também reduzem a viscosidade do fluido. São aplicados por um processo de extrusão ou moldação por injeção, provocando a redução das interações intermoleculares e a diminuição do atrito entre o material e as paredes metálicas do equipamento de transformação [30].

3.3.4. Efeito da pressão

O aumento da pressão provoca a diminuição do volume livre entre moléculas, pelo que irá aumentar o número de contactos entre elas, aumentando a viscosidade.

Estudos de investigação anteriores concluíram que o efeito da pressão só é significativo para valores muito altos, na ordem dos 1500 a 2000 MPa. No caso da calda hidráulica, esteja ela no interior da alvenaria ou sujeita à pressão atmosférica, podemos considerar desprezável o efeito da pressão na viscosidade do fluido [30].

Contudo, existe um estudo com caldas hidráulicas que demonstra que para muito altas taxas de corte e para a tensão de cedência, o efeito da pressão é relevante, com valores até aos 1,5 bar acima da pressão atmosférica, conforme mostra a Figura 3.8. A viscosidade e a tensão de cedência aumentam com pequenos incrementos de pressão (0,5 bar).

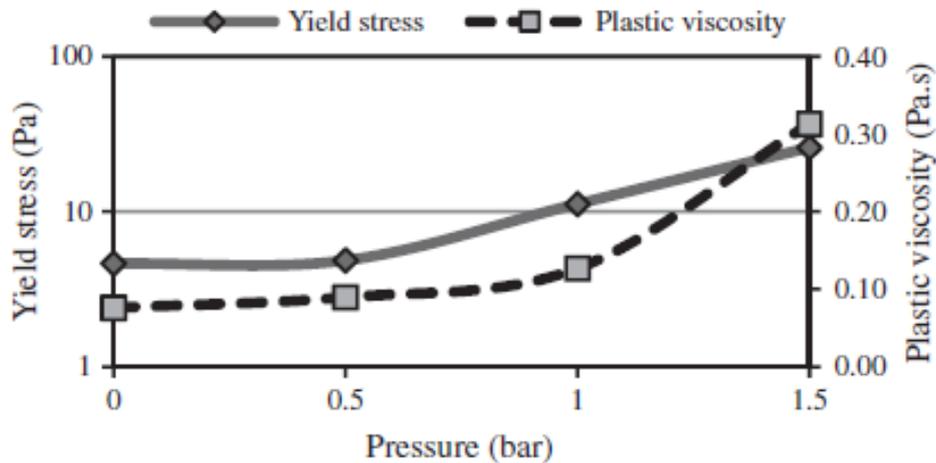


Figura 3.8 - Efeito da pressão (acima da pressão atmosférica) na tensão de cedência e na viscosidade para muito altas taxas de corte em caldas hidráulicas [35]

3.4. Modelos reológicos mais comuns

Um modelo reológico traduz-se por uma expressão matemática, obtida de forma empírica, que descreve o comportamento reológico dos fluidos. Os modelos relacionam grandezas reológicas, como a tensão de corte, viscosidade e taxa de corte, podem relacionar grandezas práticas, como a concentração, temperatura, pH ou índice de maturação e outros parâmetros e constantes.

Ao longo da História da Reologia, foram vários os modelos propostos. Os mais utilizados são aqueles que tiveram maior taxa de sucesso em análises empíricas em diferentes materiais. Um modelo reológico permite prever o escoamento do fluido e controlar as tensões a aplicar, sabendo como este irá reagir.

3.4.1. Modelo de Bingham

Segundo Bingham, após a ocorrência de uma tensão de cedência, τ_0 , a tensão de corte varia linearmente com a taxa de corte a uma viscosidade plástica, η_p constante. Esta relação está expressa na equação (3.5):

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad (3.5)$$

Na Figura 3.9 encontra-se representado graficamente o comportamento reológico de um fluido segundo o modelo de Bingham.

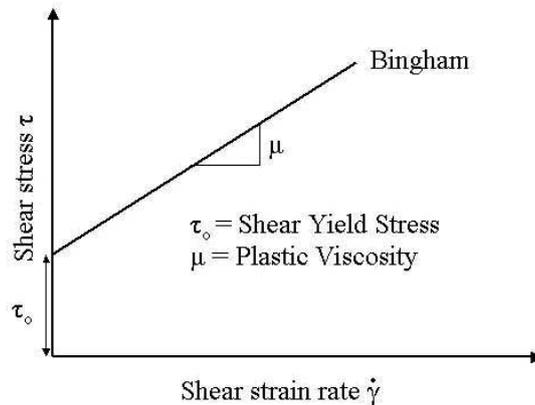


Figura 3.9 - Curva de fluxo segundo o modelo de Bingham [36]

Os fluidos com desempenho condizente com este modelo designam-se por "plásticos de Bingham". São materiais que se comportam como sólidos para baixas tensões de corte e como fluidos newtonianos para tensões de corte mais elevadas, superiores ao valor da tensão de cedência.

3.4.2. Modelo de Herschel-Bulkley

Este modelo representa uma evolução do modelo de Bingham. Mantém o princípio da tensão de cedência para a qual valores de tensão inferiores não produzem qualquer escoamento no material. A diferença entre modelos surge após valores superiores à tensão de cedência: Herschel-Bulkley faz a distinção entre os fluidos reofluídificantes (ou pseudoplásticos) e reoespessantes (ou dilatantes). É introduzido então o índice de comportamento " n ". $n > 1$ representa um comportamento plástico dilatante, enquanto $n < 1$ traduz um comportamento plástico pseudoplástico. Em substituição da viscosidade plástica de Bingham, η_p , temos o índice de consistência, K . Ambos os índices variam conforme o fluido estudado.

A equação (3.6) expressa o modelo de Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3.6)$$

Para o caso particular em que $n=1$, temos $K=\eta_p$ e então este modelo é equivalente ao de Bingham.

A Figura 3.10 representa graficamente o modelo de Herschel-Bulkley.

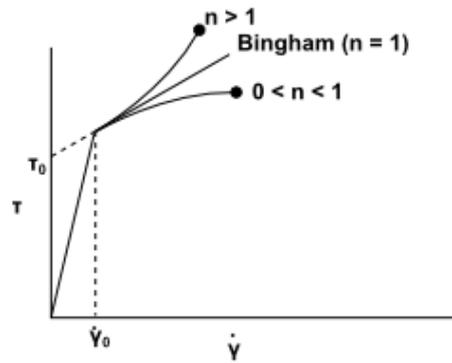


Figura 3.10 – Curvas de fluxo segundo o modelo de Herschel-Bulkley [37]

3.4.3. Modelo de Sisko

Em 1958, Sisko propôs o seguinte modelo que expressa a viscosidade em função do seu valor a muito altas taxas de corte, como se pode ver na equação (3.7):

$$\eta = \eta_{\infty} + K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3.7)$$

Onde, como vimos anteriormente, n , representa o índice de comportamento ou índice de pseudoplasticidade e, K , o índice de consistência do material. η_{∞} , traduz o valor da viscosidade a taxas de corte a tender para o infinito.

O modelo de Sisko foi utilizado com sucesso num estudo sobre as propriedades reológicas de emulsões de óleo em água, contendo isolados de proteínas de sésamo, conforme mostra a Figura 3.11 que apresenta três amostras e o modelo de Sisko ajustado às mesmas.

O modelo de Sisko é usado em muitos outros materiais / produtos, incluindo polímeros fundidos e soluções poliméricas, e pode ser usado com materiais que apresentando a primeira região newtoniana só a apresentem a taxas de corte muito baixas, que não interessem no processo em causa.

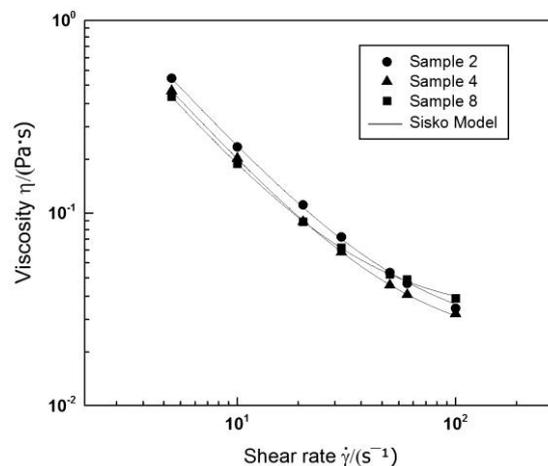


Figura 3.11 - Modelo de Sisko em ensaio experimental [38]

3.4.4. Modelo de Cross

Por sua vez, em 1965, Cross propõe um modelo que relaciona a viscosidade, η , com os seus valores para muito baixas taxas de corte, η_0 , e a para muito altas taxas de corte, η_∞ . O valor, K , é expresso em unidades de tempo enquanto que o fator, m , adimensional, descreve o grau de pseudoplasticidade do fluido.

Valores de m a tender para a unidade traduzem um comportamento pseudoplástico do material, enquanto valores de m muito próximos de zero significam que estamos na presença de um fluido newtoniano.

A equação (3.8) descreve este modelo:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (K \cdot \dot{\gamma})^m} \quad (3.8)$$

A Figura 3.12 representa com linha contínua o modelo de Cross e faz a comparação com o modelo de Sisko, cuja diferença se encontra para baixas taxas de corte.

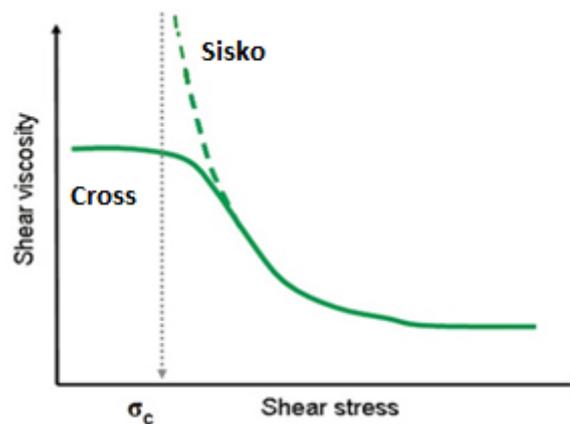


Figura 3.12 - Curva viscosidade - tensão de corte para o modelo de Cross [39]

Um estudo sobre as propriedades reológicas de misturas de água com diferentes concentrações de caulinita, mostraram um bom ajuste do modelo de Cross aos resultados experimentais, como se pode observar na Figura 3.13, num exemplo com concentração de volume sólido de 15 %.

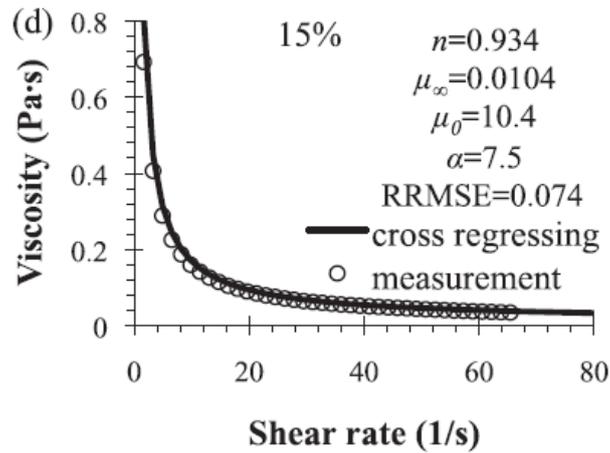


Figura 3.13 - Curva de fluxo do modelo de Cross aplicado a uma mistura de água e caulinita [40]

3.4.5. Modelo de Carreau

Em 1972, Carreau apresenta uma alternativa ao modelo de Cross com as mesmas grandezas envolvidas na sua expressão, (3.9).

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{(1 + (K \cdot \dot{\gamma})^2)^{(n-1)/2}} \quad (3.9)$$

Este modelo encontra-se representado a linha contínua na Figura 3.14. É possível observar duas assíntotas horizontais que traduzem os valores de viscosidade para muito baixas e muito elevadas taxas de corte, utilizados na equação do modelo.

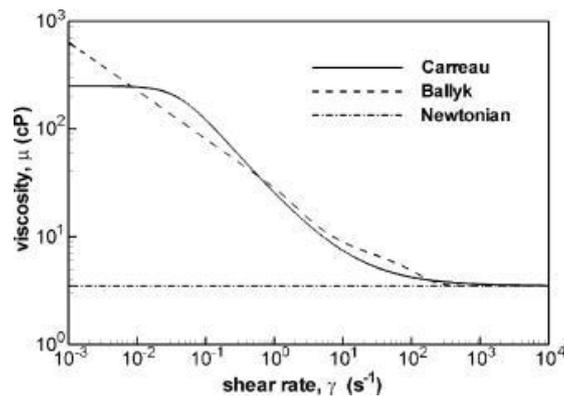


Figura 3.14 - Modelo de Carreau [41]

O modelo de Carreau registou um bom desempenho num estudo sobre as propriedades reológicas de soluções de colagénio reticulado com glutaraldeído, como se observa na Figura 3.15.

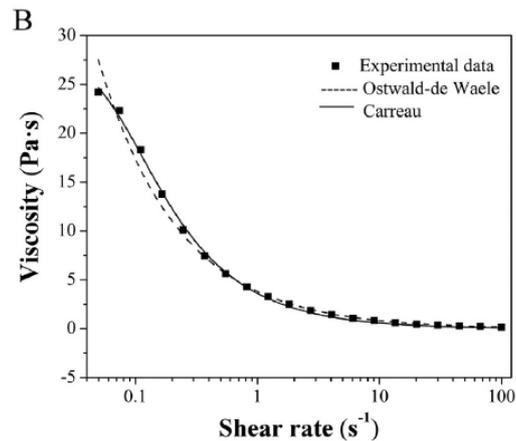


Figura 3.15 – Curva de fluxo do modelo de Carreau aplicado a uma solução de colagénio reticulado com glutaraldeído [42]

3.4.6. Modelo da Lei da Potência

O Modelo da Lei da Potência, ou do inglês “Power-law model”, é bastante útil devido à sua simplicidade, contudo apenas descreve de forma aproximada o comportamento de um fluido não-newtoniano. Se o índice de comportamento, n , for inferior ao valor unitário, este modelo prevê que a viscosidade irá decrescer indefinidamente com o aumento da taxa de corte, chegando a valor zero quando esta última tende para infinito. Também prevê viscosidade a tender para o infinito quando o material está em repouso. Como sabemos, um fluido real tem um valor mínimo e um máximo de viscosidade efetiva que depende da sua química e estrutura molecular.

As equações (3.10) e (3.11) descrevem o modelo da lei da potência.

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3.10)$$

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3.11)$$

A Figura 3.16 ilustra a curva “tensão de corte – taxa de corte” do “Power Law model”.

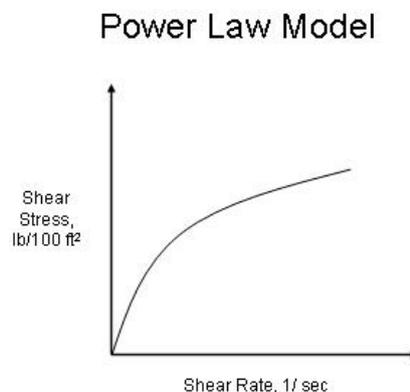


Figura 3.16 - Curva de fluxo do modelo da lei da potência [43]

O modelo da Lei da Potência foi utilizado num estudo sobre as propriedades reológicas de caldas de injeção incorporando nano-sílica. A Figura 3.17 ilustra as curvas do modelo para diferentes dosagens deste composto.

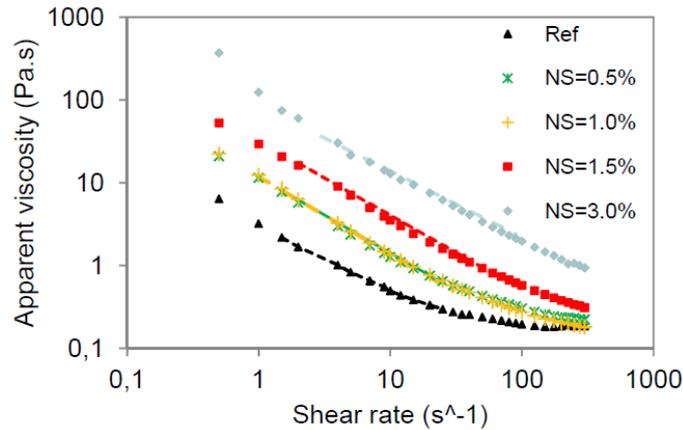


Figura 3.17 – Curvas de fluxo do modelo da Lei da Potência aplicado a caldas de injeção com diferentes dosagens de nano-sílica [44]

3.4.7. Modelo de Casson

A equação (3.12) descreve o modelo de Casson. A diferença para Bingham reside no valor do expoente dos termos da expressão, em que Casson utiliza 1/2 ou raiz quadrada do termo.

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (K \cdot \dot{\gamma})^{1/2} \quad (3.12)$$

A Figura 3.18 ilustra um exemplo do modelo de Casson, em comparação com o modelo de Bingham. Observa-se a diferença nas mais baixas taxas de corte, onde o modelo de Casson apresenta maiores valores de viscosidade aparente que decrescem com o aumento das taxas de corte, ao passo que Bingham apresenta viscosidade aparente constante.

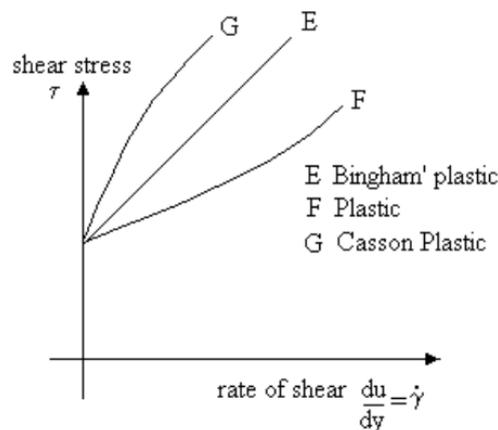


Figura 3.18 - Exemplo de curva de fluxo do modelo de Casson [45]

Num estudo sobre o comportamento reológico de suspensões de bentonite, o modelo de Casson registou boa adequabilidade para várias composições. Podemos ver os resultados de uma amostra nos gráficos da Figura 3.19.

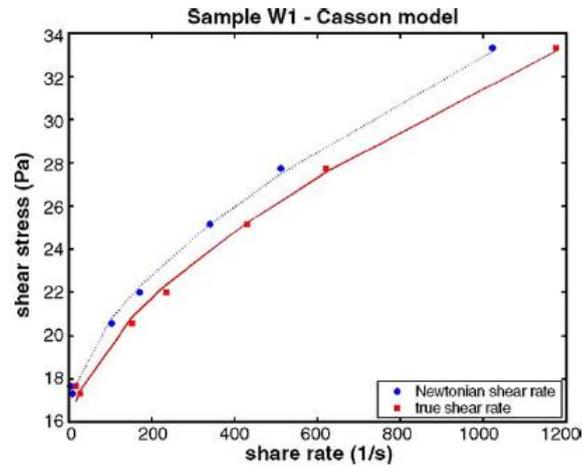


Figura 3.19 – Curvas de fluxo dos resultados experimentais de uma amostra de bentonite, do modelo de fluido Newtoniano e do modelo de Casson [46]

4. Características e constituintes das caldas hidráulicas

4.1. Cal hidráulica natural

A cal hidráulica é o ligante, de origem calcária, apresentando um comportamento mecânico intermédio entre o cimento e a cal aérea. O teor de argila é a propriedade que define as características do ligante, como se observa no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Classificação das cals segundo a constituição da matéria-prima [47]

Designação	Teor de argila (%)	Índice de hidráulicidade	Tempo de presa (dias)
Cal aérea, gorda	< 1,0	-	-
Cal aérea, magra	1,0 - 5,0	-	-
Cal fracamente hidráulica	5,3 - 8,2	0,1 - 0,16	16 - 30
Cal mediamente hidráulica	8,3 - 14,8	0,16 - 0,32	10 - 15
Cal hidráulica	14,8 - 19,1	0,32 - 0,42	5 - 9
Cal eminentemente hidráulica	19,1 - 21,8	0,42 - 0,50	2 - 4
Cal limite	21,8 - 26,7	0,50 - 0,67	1
Cimento	21,8 - 40,0	0,67 - 1,25	-

Tal como a cal aérea, a cal hidráulica resulta da cozedura de rochas calcárias. Os dois fatores mais importantes que distinguem o fabrico destes ligantes são a matéria-prima – para a cal hidráulica é necessária rocha calcária argilosa, com teor de argila superior a 5 %, enquanto para a cal aérea é utilizada rocha calcária mais pura com o carbonato de cálcio (CaCO_3) a representar pelo menos 95 % da sua composição (ou carbonato de cálcio mais carbonato de magnésio no caso do fabrico de cal aérea magnésiana ou dolomítica) – e a temperatura de cozedura nos altos fornos – enquanto na cal aérea é realizada entre os 850 e os 1100 °C, de forma a ocorrer a descarbonatação da matéria-prima e formação de cal viva (CaO), para a cal hidráulica as temperaturas podem chegar aos 1250 °C para garantir a formação de silicatos e aluminatos de cálcio, compostos possíveis de obter graças à considerável presença de argila e que conferem hidráulicidade à cal, isto é, capacidade para formar presa em contacto com a água.

O silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) confere à cal hidráulica maiores resistências mecânicas do que aquelas que observamos na cal aérea. Além disso e em conjunto com os aluminatos, permite à cal hidráulica ter uma velocidade de endurecimento maior.

A temperatura de cozedura também distingue a cal hidráulica do cimento. Para este último são necessárias temperaturas superiores a 1400 °C para formar o clínquer. No fabrico do cimento, forma-se uma quantidade significativa de silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) que providencia resistências mecânicas a curto prazo (28 dias) muito superiores às do silicato bicálcico. Embora a longo prazo (superior a 1 ano), a diferença de resistências entre estes dois compostos tende a diminuir bastante, o cimento apresenta sempre resistência mecânica superior à cal hidráulica, pois também apresenta grande quantidade de silicato bicálcico na sua composição.

A Figura 4.1 ilustra, de forma esquemática, o ciclo da cal.

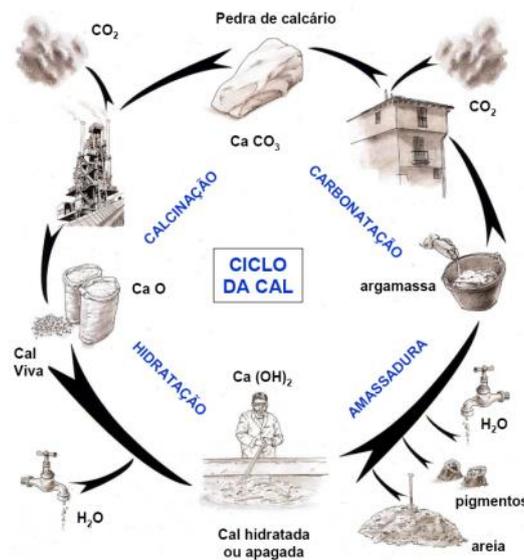


Figura 4.1 - Ciclo da cal [47]

Após a britagem e cozedura, procede-se à hidratação da cal viva com recurso à adição de água. A quantidade de água determina o produto final: cal hidráulica em pó, em pasta ou leite de cal. Deve haver o especial cuidado de não adicionar água em excesso que poderia reagir com os silicatos e aluminatos de cálcio, provocando a sua hidratação prematura e inutilizando a cal [47].

Ao juntar água à cal hidráulica, inicia-se a presa com a evaporação da água e carbonatação da cal através da reação com o CO_2 do ar. No caso das caldas hidráulicas que utilizam este ligante, é frequente o recurso a superplastificantes de forma a retardar o processo de endurecimento e aumentar a fluidez e trabalhabilidade.

A cal hidráulica natural (NHL) distingue-se da cal hidráulica (HL) e da cal formulada (FL) por apresentar propriedades hidráulicas que resultam exclusivamente da composição química da matéria-prima natural. São permitidos agentes de moagem até 0,1 %. A cal hidráulica natural não contém quaisquer outros aditivos [47].

4.2. Adições e adjuvantes

As adições são substâncias que substituem parte da composição do ligante e que podem ter vários objetivos, sejam eles químicos, físicos, económicos ou ambientais.

No processo de fabrico dos ligantes calcários, estão envolvidos altos custos económicos e energéticos devido às altas temperaturas de combustão que a cozedura requer, de forma a ocorrerem as reações químicas que permitem a formação dos mais importantes compostos, responsáveis pelas características ligantes e resistentes do produto. Também existem outros custos indiretos, associados à extração e transporte da matéria-prima – rocha calcária ou calcária margosa.

4. Características e constituintes das caldas hidráulicas

Ao introduzir o aditivo na composição, está-se a diminuir a percentagem de ligante original, já não representando 100 %, e com isso diminuem-se os custos financeiros e ambientais do produto. A quantidade de aditivo a adotar deve ser estudada, de forma a não comprometer as características mecânicas e consistência do ligante.

Os benefícios da utilização do aditivo devem ser ponderados juntamente com os inconvenientes, por exemplo: uma determinada quantidade diminui consideravelmente os custos e diminui apenas uma pequena percentagem da resistência mecânica a curto prazo, justifica-se então a sua utilização. Os aditivos devem ser selecionados consoante os requisitos e circunstâncias da aplicação do ligante.

Os aditivos permitem também aumentar a resistência química do ligante aos cloretos, nitratos e sulfatos, que possui algumas fraquezas devido à elevada concentração de hidróxido de cálcio. As adições modificam o equilíbrio químico no interior do ligante, promovendo a fixação do hidróxido de cálcio, combinando-se com ele, dando origem a componentes menos ricos em cálcio do que os provenientes da hidratação do ligante calcário [4].

O primeiro aditivo utilizado nos ligantes foi a pozolana natural – cinzas de rocha de origem vulcânica da região italiana de Pozzuoli. Este material tem na sua composição uma mistura de argilas, siltes e areias que resultaram da alteração pelos agentes atmosféricos de materiais vulcânicos ricos em sílica não cristalina. Atribui-se aos romanos o início da utilização da pozolana natural em cais hidráulicas, permitindo o fabrico de argamassas resistentes e duráveis.

A designação de pozolanas também foi adotada pelos aditivos, subprodutos e resíduos de processos industriais e que produzem semelhantes efeitos no ligante. Estes aditivos designam-se por “*pozolanas artificiais*”. O grande desenvolvimento industrial na Europa, no início do século XX, levantou a preocupação com outro aspeto ambiental: o aproveitamento dos produtos do despoeiramento dos fumos que vão poluir a atmosfera. Verificou-se que resíduos industriais como sílica de fumo, cinzas volantes e escória de alto-forno possuem propriedades pozolânicas e a sua utilização contribui para a sustentabilidade da indústria da construção.

As pozolanas são essencialmente constituídas por sílica e alumina e, apesar de serem insolúveis e comportarem-se como um agregado com a água, quando reagem com o hidróxido de cálcio do ligante também elas originam compostos com propriedades ligantes. À capacidade do aditivo conseguir esta reação dá-se o nome de “*reatividade pozolânica*” e é muito frequente encontrar esta característica expressa em valor percentual. Para que o aditivo tenha reatividade pozolânica, é necessário que a sílica e a alumina estejam no estado amorfo, ou seja, com uma estrutura atômica desordenada, mais propícia à ocorrência de reações com o hidróxido de cálcio.

Para Sousa Coutinho, “*o efeito da pozolana é poder substituir parte do cimento portland, baixando o calor de hidratação numa dada proporção sem que a tensão de rotura desça na mesma proporção*” [4].

Num outro domínio de aplicação temos o adjuvante, a substância adicionada durante a amassadura de forma a modificar determinadas propriedades do ligante, tanto no estado líquido como no sólido. Ao contrário dos aditivos que substituem em parte a composição do ligante, os adjuvantes não têm função pozolânica e utilizam-se em percentagens muito inferiores.

Os adjuvantes são empregados em diversas circunstâncias, em clima húmido ou seco, a temperaturas altas ou baixas e com diferentes fins consoante as exigências: melhorar a trabalhabilidade, acelerar ou retardar a presa, acelerar o endurecimento e aumentar as resistências mecânicas nas primeiras idades, diminuir a permeabilidade à água, diminuir a

segregação e exsudação, aumentar a aderência, pigmentação e resistência aos fungos e insetos.

Os adjuvantes são classificados conforme a sua função: reológica, teor de ar, presa e endurecimento, expansão, resistência a ações física, química e biológicas e cor [4].

Os superplastificantes são adjuvantes que permitem reduzir a água de amassadura e aumentar a trabalhabilidade. Como consequências indiretas, ainda aumentam a tensão de rotura e diminuem a permeabilidade ao vapor de água.

4.2.1. Cinzas volantes

As cinzas volantes são o resíduo, finamente dividido da queima do carvão pulverizado ou moído, que é arrastado nos gases de combustão [4].

A parte não combustível do carvão, constituída por xistos e argilas, não sofre combustão mas entra parcialmente em fusão. As maiores partículas destes materiais depositam-se no fundo do forno, dando origem à jorra. As de menor dimensão são arrastadas pelos gases de combustão e devem ser captadas antes de escaparem para a atmosfera. Existem vários equipamentos para captação das cinzas volantes: os coletores mecânicos, os precipitadores eletrostáticos e os filtros de saco.

A composição das cinzas volantes é determinada pelo tipo de carvão e pelas condições de combustão. A sílica, a alumina e o óxido de ferro são os seus principais constituintes, embora em alguns casos também seja possível existir uma quantidade significativa de cálcio.

Para além de questões económicas, os efeitos das cinzas volantes são muito benéficos para o ligante, nomeadamente, diminui o calor de hidratação, diminui a exsudação, funciona como um corretor da granulometria, facilita a bombagem, retarda o início de presa, aumenta a trabalhabilidade e aumenta a resistência química.

Embora as cinzas volantes possam reduzir a resistência mecânica do ligante a curto prazo, a diferença de resistências tende a diminuir com o tempo, tendo como referência períodos superiores a 1 ano. Outra consequência da utilização deste aditivo é a diminuição da permeabilidade ao valor de água.

A opção pela utilização deste tipo de pozolana, prende-se com os excelentes resultados reológicos em termos de influência na diminuição da tensão de cedência em pastas de cimento Portland, ASTM tipo 1, substituindo 25 % do ligante num estudo anteriormente realizado, para diferentes modelos, como mostra a Figura 4.2. Pretende-se verificar se em caldas de cal hidráulica natural, irá ocorrer o mesmo efeito positivo.

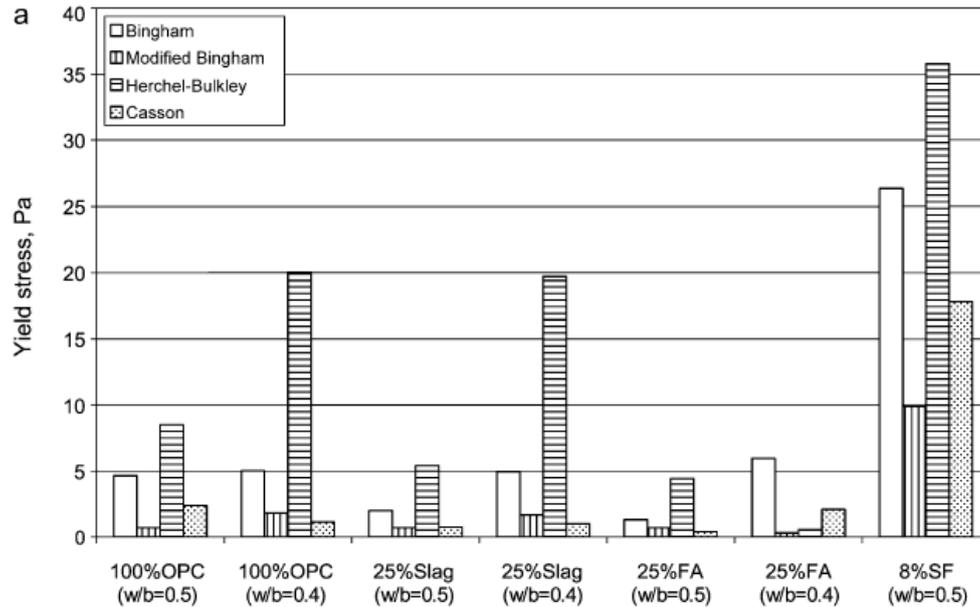


Figura 4.2 - Tensões de cedência em pastas de cimento Portland sem pozolanas, com escória de alto forno, com cinzas volantes e com sílica de fumo [48]

4.2.2. Sílica de fumo

A sílica de fumo é um subproduto da preparação do silício ou de ligas de silício, especialmente de ferro-silício, em fornos elétricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão a elevadas temperaturas [4].

Com a combustão do quartzo, carvão e partículas de madeira, ocorrem várias reações químicas, de entre as quais a formação do monóxido de silício (SiO), que se oxida e condensa em pequenas esferas de sílica amorfa. É necessária a sua captação com filtros de saco antes da evasão para a atmosfera. O produto deste processo é a sílica de fumo.

O dióxido de silício (SiO_2) é o principal constituinte da sílica de fumo com percentagens superiores a 90 %. Em quantidades muito reduzidas, é possível encontrar óxidos de alumínio, ferro, cálcio e magnésio.

O grande inconveniente da sílica de fumo é a diminuição da trabalhabilidade e da fluidez do ligante, requerendo o aumento da água de amassadura ou, em alternativa, a utilização de plastificantes ou superplastificantes.

Entre as vantagens da utilização da sílica de fumo, destacam-se o aumento de resistência mecânica e a diminuição da porosidade e como consequência desta, também a diminuição da permeabilidade. A sílica de fumo de baixa granulometria ocupa os vazios entre as partículas do ligante, diminuindo o diâmetro dos poros de maiores dimensões.

4.2.3. Pó de tijolo

A matéria-prima de qualquer produto cerâmico é a argila, a qual provém da decomposição das rochas feldspáticas e cujo elemento essencial da sua composição é o silicato de alumina hidratado, constituído por sílica, alumina e água.

Também o pó de tijolo, quando apresenta granulometria muito fina, tem reatividade pozolânica, devido à grande quantidade de sílica e alumina presentes na sua composição. A adição deste material provoca o aumento da porosidade e da hidraulicidade do ligante, acelerando a presa.

4.2.4. Plastificantes e superplastificantes

Os plastificantes ou redutores da água de amassadura são substâncias que reagem com o ligante, permitindo aumentar a trabalhabilidade sem aumentar a dosagem de água.

O plastificante é constituído por moléculas tensoativas que compreendem uma parte hidrófila, cujo efeito é baixar a tensão superficial da água na intersuperfície em que está adsorvida. Quando as partículas do ligante entram em contacto com a água na qual se dissolveu um plastificante, estas são mais bem molhadas pelo líquido.

Devido à camada das moléculas de água orientadas à roda das partículas, o atrito entre estas é muito reduzido, não sendo já necessária para a sua redução a existência de camadas muito espessas de água, o que permite aproximá-las umas das outras sem que aumente o atrito. As distâncias entre as partículas reduzem-se e a água em excesso pode ser dispensada [4].

Os produtos mais utilizados como plastificantes são os linhossulfonatos, os polihidroxicarboxílicos e as resinas abiéticas alcalinas.

Os superplastificantes atuam de modo idêntico, diferindo dos plastificantes apenas por serem substâncias fabricadas especialmente para esse fim e não subprodutos industriais. Além disso, permitem muito maior redução do rácio água-ligante, valores da ordem dos 20 a 30 %, para trabalhabilidades iguais sem influência no processo de hidratação. O mecanismo de ação é idêntico ao dos plastificantes, mas é muito mais intenso, porém menos durável, ao fim de 30 a 60 minutos o seu efeito desaparece.

Os superplastificantes podem classificar-se em quatro categorias: condensado de melamina formaldeído sulfonatado, condensados de naftaleno formaldeído sulfonatado, linhossulfonatos modificados e outros, incluindo ésteres de ácido sulfónico, ésteres de carboidratos, etc [4].

5. Campanha experimental

5.1. Ensaio com reómetro rotacional

O reómetro rotacional permite medir vários parâmetros reológicos, tais como a viscosidade e as tensões de corte em função da taxa de corte, para diferentes temperaturas. Também é possível quantificar o módulo complexo e viscosidade complexa em função da frequência, igualmente para diferentes temperaturas.

Os ensaios decorreram no CENIMAT (Centro de Investigação de Materiais) do Departamento de Ciência dos Materiais da FCT-UNL.

O reómetro utilizado, que se pode observar na Figura 5.1, tem a capacidade de realizar as medições tanto em regime estacionário como em regime oscilatório. Face à natureza dos materiais em estudo nesta dissertação apenas se realizaram medições em regime estacionário.



Figura 5.1 - Reómetro rotacional

Para além dos sistemas de aquecimento e arrefecimento, este aparelho também está dotado de um motor que trabalha a ar comprimido e aplica um binário de força, provocando a rotação de um dos componentes da geometria relativamente ao outro que se encontra fixo. Esta rotação relativa provoca o escoamento da amostra para várias taxas de corte. Os sensores registam os valores de tensão normal e de binário, que está relacionado com a tensão de corte, e velocidade de rotação, que está relacionada com a taxa de corte. A divisão de um valor pelo outro dá-nos a viscosidade aparente.

A geometria seleccionada foi a de pratos paralelos, onde existe um “gap” (entreferro ou distância entre pratos) como podemos observar, de forma esquemática, na Figura 5.2.

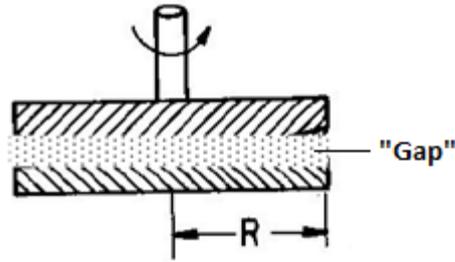


Figura 5.2 - Geometria de pratos paralelos [30]

O prato superior utilizado tem um diâmetro de 40 mm. O *gap* também pode tomar um valor variável: quanto menor a distância entre pratos, maiores serão os valores de tensão de corte possíveis de medir.

Tendo como referência artigos e trabalhos anteriores onde se concluiu que a temperatura ideal para este tipo de ensaio corresponde a valores próximos dos 20 °C, optou-se por este valor de referência.

A Figura 5.3 demonstra que a temperatura ótima que minimiza a viscosidade plástica corresponde aos 20 °C. Tendo como base os fundamentos teóricos do Capítulo 3, podemos concluir que no início da curva o efeito da excitação das moléculas e a diminuição de atrito interno se sobrepõe, diminuindo a viscosidade plástica com o aumento de temperatura, enquanto após os 20 °C, o efeito das colisões entre partículas torna-se relevante, invertendo a tendência inicial, conduzindo ao aumento da viscosidade plástica com o aumento da temperatura.

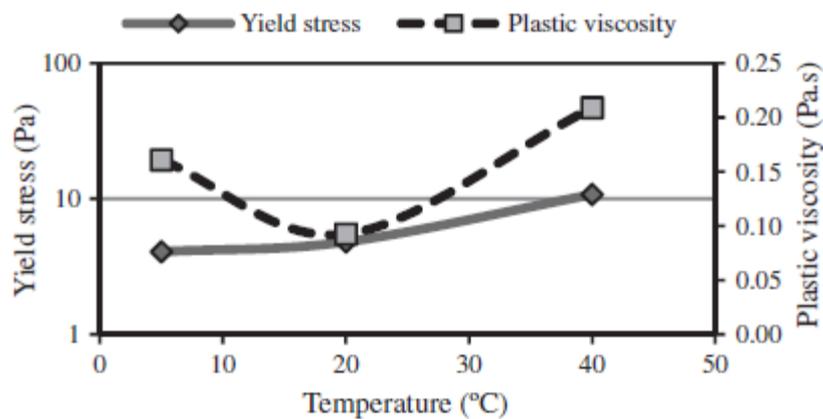


Figura 5.3 - Efeito da temperatura na tensão de cedência e viscosidade a muito altas taxas de corte em caldas hidráulicas [35]

Conforme consta na Figura 5.4, neste estudo foi utilizado um *gap* de 2000 μm , ou seja, 2 mm, correspondendo a cerca de dez vezes a máxima dimensão da partícula da cal hidráulica natural.



Figura 5.4 - Valor de gap utilizado

Considerando o raio dos pratos, R , o gap, h , a velocidade angular, ω e o binário medido pelo equipamento, Γ , é possível obter a taxa de corte medida a $3/4$ do raio dos pratos, $\dot{\gamma}_R$, (o equipamento utilizado realiza as medições a $3/4$ do raio dos pratos) e a viscosidade aparente da amostra. As equações (5.1) e (5.2) expressam as relações entre as várias componentes físicas, mecânicas e geométricas:

$$\dot{\gamma}_R = \frac{3}{4} \cdot R \cdot \frac{\omega}{h} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (5.1)$$

$$\eta(\dot{\gamma}_R) = \frac{\Gamma}{2\pi \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot R\right)^3 \cdot \dot{\gamma}_R} \cdot \left[3 + \frac{\partial \ln\left(\frac{\Gamma}{2\pi \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot R\right)^3}\right)}{\partial \ln(\dot{\gamma}_R)} \right] \quad [\text{Pa.s}] \quad (5.2)$$

De forma a minimizar o erro nas medições a baixas taxas de corte, devido ao escorregamento da calda entre pratos lisos, houve o cuidado de revestir o prato superior com lixa de forma a aumentar o atrito. A lixa utilizada é catalogada como de “*marca de água 500*”, tratando-se de uma lixa pouco rugosa, o suficiente para mitigar o escorregamento neste ensaio.

5.2. Preparação das amostras

O ligante que se utilizou na formulação da calda é a cal hidráulica natural NHL 5, constituída por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio, obtida por cozedura de calcário margoso, seguida de moagem. A designação numérica resulta da resistência à compressão que, aos 28 dias após a presa, deve ser superior a 5 MPa e inferior a 15 MPa. Para conter propriedades hidráulicas, o teor de argila deve ser superior a 5 % e inferior a 20 %. Este ligante é classificado de acordo com a norma de requisitos *NP EN 459-1* [49].

Apresenta-se, na Figura 5.5, a embalagem do produto NHL 5 utilizado na composição da calda.



Figura 5.5 - Cal Hidráulica Natural NHL 5

No Quadro 5.1 é possível consultar as características químicas, física e mecânicas, segundo a ficha técnica do produto.

Quadro 5.1 - Características químicas, física e mecânicas do produto NHL 5 [50]

Características Químicas	Valor	Norma
Cal disponível Ca(OH)_2	$\geq 15,0 \%$	EN 459-1
Sulfato	$\leq 2,0 \%$	EN 459-1
Características Físicas	Valor	Norma
Cor	Bege	-
Água livre	$\leq 2,0 \%$	EN 459-1
Baridade	$0,65 \pm 0,05 \text{ kg/dm}^3$	-
Densidade	$2,7 \text{ g/cm}^3$	-
Finura	$90 \mu\text{m} \leq 15,0 \%$ $200 \mu\text{m} \leq 2,0 \%$	EN 459-1
Expansibilidade	$\leq 2,0 \text{ mm}$	EN 459-1
Penetração	$> 10 \text{ mm e } < 50 \text{ mm}$	EN 459-1
Teor de ar	$\leq 5,0 \%$	EN 459-1
Tempo de início de presa	$> 1 \text{ h}$	EN 459-1
Tempo de fim de presa	$\leq 15 \text{ h}$	EN 459-1
Características Mecânicas	Valor	Norma
Resistência à compressão (28 dias)	$\geq 5,0 \text{ e } \leq 15,0 \text{ MPa}$	EN 459-1

Foi considerada uma relação de referência água-ligante de 0,5 e um teor de superplastificante de 0,8 % relativamente à massa total de ligante que, geralmente, fixou-se nos 200 g. O superplastificante foi diluído e aplicado em cerca de 20% do total de água utilizada. Recorreu-se à sua utilização de forma a reduzir a água de amassadura e aumentar a trabalhabilidade da calda.

As dosagens adotadas para a água e superplastificante justificam-se com base em estudos de investigação anteriores, que apontam para valores ótimos próximos dos adotados, como ilustra um exemplo de estudo que relaciona a viscosidade plástica com as dosagens de água e superplastificante, conforme mostra a Figura 5.6.

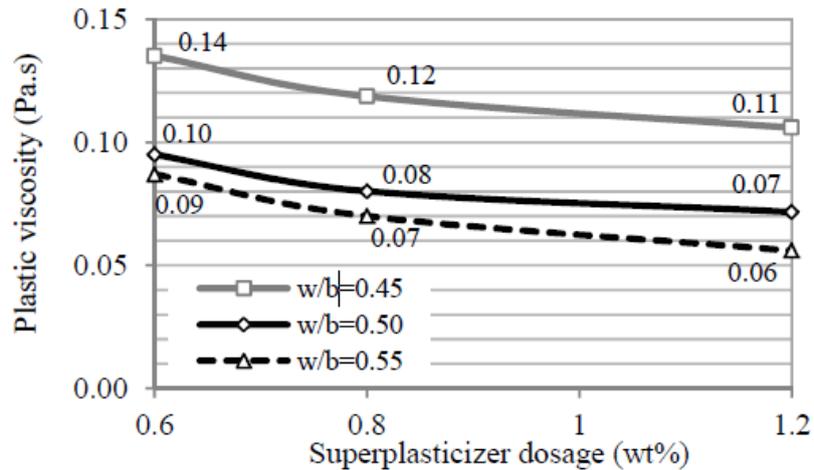


Figura 5.6 – Viscosidade plástica da calda em função do rácio água-ligante e da percentagem de superplastificante [51]

Como se observa, a viscosidade plástica diminui bastante quando se altera o rácio água-ligante dos 0,45 para os 0,50. Contudo, essa diminuição será residual quando se passa dos 0,50 para os 0,55. Não se justifica aumentar para os 0,55 e correr o risco de ocorrer na calda o fenómeno de exsudação, apenas para conseguir uma ligeira diminuição da viscosidade. Assim, adota-se o valor de 0,50.

Com uma análise semelhante, observa-se que a viscosidade plástica diminui consideravelmente até aos 0,8 % de superplastificante porém, após este valor, a curva diminui a inclinação, descrevendo quase uma linha horizontal, o que significa que após os 0,8 %, a diminuição de viscosidade plástica é muito reduzida, pelo que não se justificam dosagens maiores de superplastificante.

A cal hidráulica natural, NHL 5, constitui o ligante predominante e a quantidade de aditivos varia consoante a amostra. As pozolanas utilizadas foram a sílica de fumo, as cinzas volantes e o pó de tijolo.

A mistura e amassadura das amostras decorreram no laboratório de materiais de construção do DEC da FCT-UNL.

A amassadura da calda foi realizada de forma mecânica com auxílio de berbequim com peça em hélice. Houve o cuidado de adotar o mesmo tempo de amassadura de 10 minutos, para todas as amostras ensaiadas.

No fim deste processo, foi captada uma quantidade razoável de amostra com auxílio de um pequeno recipiente. Posteriormente, procedeu-se ao transporte e ensaio no reómetro rotacional.

No Quadro 5.2 apresenta-se a lista das amostras ensaiadas e a respetiva composição.

Quadro 5.2 - Composição das caldas ensaiadas

Composição	Abreviatura	NHL 5 (%)	FA (%)	PT (%)	SF (%)	A/L	SP (%)
NHL5_0.8_ref	REF	100	-	-	-	0,5	0,8
NHL5_FA5_0.8	FA5	95	5	-	-		
NHL5_FA10_0.8	FA10	90	10	-	-		
NHL5_FA15_0.8	FA15	85	15	-	-		
NHL5_FA20_0.8	FA20	80	20	-	-		
NHL5_FA25_0.8	FA25	75	25	-	-		
NHL5_FA30_0.8	FA30	70	30	-	-		
NHL5_PT5_0.8	PT5	95	-	5	-		
NHL5_PT10_0.8	PT10	90	-	10	-		
NHL5_PT15_0.8	PT15	85	-	15	-		
NHL5_PT20_0.8	PT20	80	-	20	-		
NHL5_PT25_0.8	PT25	75	-	25	-		
NHL5_PT30_0.8	PT30	70	-	30	-		
NHL5_SF2_0.8	SF2	98	-	-	2		
NHL5_SF4_0.8	SF4	96	-	-	4		
NHL5_SF6_0.8	SF6	94	-	-	6		
NHL5_SF8_0.8	SF8	92	-	-	8		
NHL5_SF10_0.8	SF10	90	-	-	10		
NHL5_SF12_0.8	SF12	88	-	-	12		

Um estudo sobre o comportamento tixotrópico de betões com adições minerais justifica a diferença de dosagens para a sílica de fumo. A Figura 5.7 demonstra que as misturas com sílica de fumo apresentam aumento das tensões de corte com o aumento das taxas de corte, relativamente à amostra de referência (betão de cimento sem adições).

Conhecendo o efeito negativo da sílica de fumo e comprovado posteriormente em testes experimentais, decidiu-se adotar dosagens mais reduzidas, com incrementos de apenas 2 %.

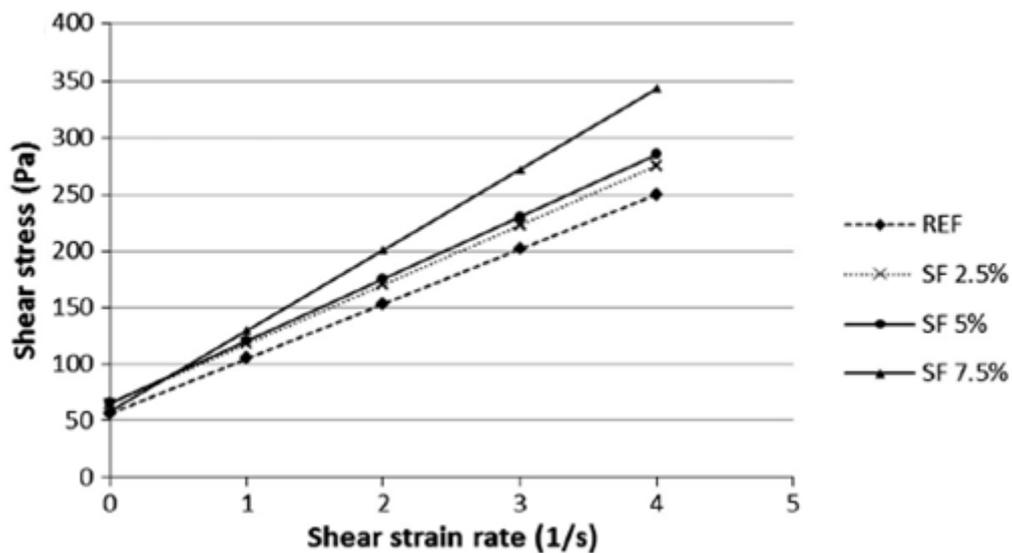


Figura 5.7 – Curvas “tensão de corte - taxa de corte” para misturas de betão com e sem sílica de fumo [52]

5.3. Determinação da resistência à flexão e compressão

Embora não seja o tema principal desta dissertação, realizaram-se alguns ensaios mecânicos e físicos para obter informações complementares para as composições de caldas estudadas.

Por cada composição de calda foram realizados três provetes. Após a amassadura, a calda foi escoada para uma cofragem de molde metálico, pincelado previamente com óleo descofrante e selado nas juntas com silicone para não deixar escapar material fresco. Cerca de uma semana depois, os provetes foram descofrados e colocados numa sala de ambiente condicionado onde continuaram a cura até aos 28 dias de idade.

Segundo a norma *NP EN 196-1:1990* [53], os ensaios devem ser realizados aos 28 dias após a presa com provetes de dimensões $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ e condicionados a uma temperatura de $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa de $60 \pm 5 \%$.

Na Figura 5.8, podemos ver o equipamento de prensa utilizado e o computador que regista o gráfico de força-tempo, onde se poderá ler a força de rotura.



Figura 5.8 - Prensa dos ensaios de flexão e compressão

Para determinar a força de rotura de flexão, F_f , colocam-se os provetes sobre o suporte, cujos pontos de apoio devem estar a uma distância, L , de 100 mm. A carga deve ser aplicada a meio vão, a uma velocidade de 5,1 mm/min ($50 \pm 10 \text{ N/s}$) até à rotura.

Sabendo que a secção do provete é quadrada e considerando a largura, b , o momento de inércia de 2.^a ordem é dado pela expressão (5.3):

$$I = \frac{b^4}{12} \quad [\text{cm}^4] \quad (5.3)$$

Os diagramas de corpo livre, esforço transversal e momento fletor encontram-se representados na Figura 5.9.

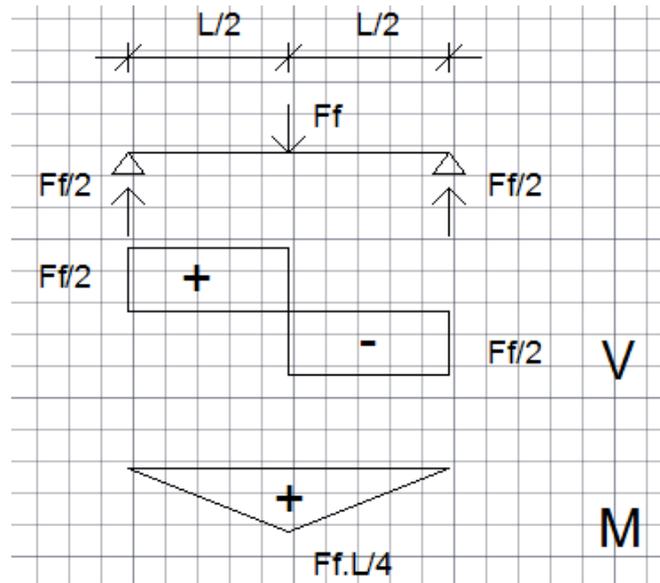


Figura 5.9 - Diagramas de corpo livre, esforço transverso e momento fletor do provete sujeito à carga de colapso no ensaio de flexão

A Figura 5.10 mostra o diagrama de tensões na secção durante a flexão e a distância das extremidades à linha neutra, $b/2$.

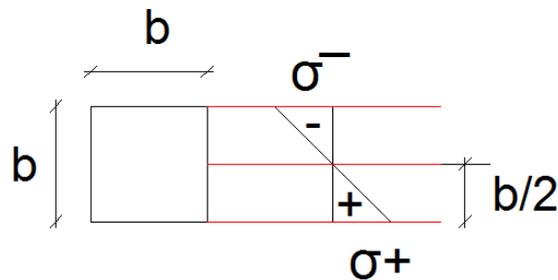


Figura 5.10 - Diagrama de tensões na secção do provete durante o ensaio de flexão

O módulo de resistência à flexão é dado pelo quociente entre o momento de inércia e a distância da fibra à linha neutra, como mostra a expressão (5.4):

$$W = \frac{I}{v} = \frac{b^4/12}{b/2} = \frac{b^3}{6} \quad (5.4)$$

A tensão na fibra inferior, quando é aplicada a força de rotura de flexão, é dada pelo quociente entre o momento fletor positivo e o módulo de resistência à flexão, como mostra a expressão (5.5):

$$\sigma^+ = \frac{M}{W} = \frac{F_f \cdot L/4}{b^3/6} = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{b^3} = R_f \quad [\text{MPa}] \quad (5.5)$$

Esta expressão dá a resistência à flexão, R_f , para a aplicação da força de rotura de flexão, F_f .

Após a rotura do provete, uma das metades resultantes é colocado num dispositivo de compressão que assegure uma área de contacto de 1600 mm². A carga deve aumentar uniformemente à velocidade de 5,25 mm/min (100±10 N/s) até à rotura. Determina-se a força de rotura de compressão, F_c . A resistência à compressão, R_c , é dada pela expressão (5.6):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad [\text{MPa}] \quad (5.6)$$

5.4. Determinação da massa volúmica e porosidade aberta

Seguindo os procedimentos da norma *NP EN 1936:2008* [54], após os ensaios de resistência mecânica, foram recolhidas amostras de provete quebrado, seleccionando-se os fragmentos de, aparentemente, maior consistência. As amostras foram colocadas a secar em estufa a uma temperatura de 60±5 °C, durante 24 horas. No dia seguinte, efetuaram-se as pesagens para obter a massa seca, M_1 .

Recorreu-se ao exsicador, ligado a uma bomba de vácuo, para regular a pressão a que irão ser submetidas as amostras, como se observa na Figura 5.11.



Figura 5.11 – Amostras de provete de calda inseridas no exsicador

A pressão é gradualmente reduzida até aos 2667 Pa (equivalente a 20 mm de mercúrio), mantendo-se durante 24 horas. Em seguida faz-se penetrar lentamente água a uma temperatura entre 15 e 20 °C até à imersão total dos provetes.

As amostras são mantidas em imersão total durante 24 horas à pressão de 2667 Pa e 24 horas à pressão atmosférica normal.

Após estes procedimentos, efetua-se a pesagem hidrostática, M_2 , com auxílio de um gancho que se encontra equipado na balança, de uma plataforma de arame para suspender o provete e de um balde cheio de água, onde a amostra estará imersa durante a pesagem, conforme ilustra a Figura 5.12.



Figura 5.12 - Pesagem hidrostática dos provetes de calda

Retiram-se os provetes de água, enxugam-se com um pano húmido e determina-se a massa, M_3 , dos provetes saturados.

A massa volúmica e a porosidade aberta são dadas pelas expressões (5.7) e (5.8), respetivamente:

$$M_V = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \cdot 1000 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (5.7)$$

$$P_A = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.8)$$

5.5. Ensaio de termogravimetria

Uma vez que, com exceção da calda de referência, todas as composições apresentam pozolanas, foi realizado o ensaio de termogravimetria, seguindo a norma *ASTM E1131-08* [55], com o objetivo de verificar e comparar a reatividade pozolânica das diferentes amostras.

Como se viu no Capítulo 4, a reatividade pozolânica é diretamente proporcional à capacidade dos constituintes, às temperaturas ordinárias e em presença da água, reagirem com o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , formando compostos de grande estabilidade na água e com propriedades ligantes.

A Figura 5.13 ilustra as várias fases a que o provete é submetido até alcançar pequenas amostras com a massa pretendida. Com auxílio de um cinzel, pica-se um grande fragmento de provete até obter fragmentos de muito menor dimensão. Em seguida, realiza-se a moagem manual com a utilização de um almofariz até obter uma granulometria reduzida e relativamente

constante. Coloca-se a amostra no cadinho de platina, previamente tarado na balança do equipamento, que será pesada e ajustada para a realização do ensaio.



Figura 5.13 - Várias fases da amostra durante a picagem e moagem para o ensaio de termogravimetria

Durante o ensaio de termogravimetria, uma amostra com cerca de 25 mg é submetida a temperaturas que vão desde os 25 aos 1000 °C, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min e uma atmosfera inerte de azoto. São registadas as perdas de massa. Na Figura 5.14, podemos ver a colocação do cadinho com a amostra no interior do equipamento de termogravimetria e o posterior encerramento para realização do ensaio.



Figura 5.14 - Equipamento de termogravimetria

Irão ocorrer três picos de perda de massa (Fig. 5.15), associados às reações endotérmicas que ocorrem nos compostos da amostra, para os respetivos intervalos de temperaturas. A Figura 5.15 ilustra uma análise termogravimétrica de duas caldas hidráulicas. As linhas a traço contínuo representam a percentagem de massa da amostra em função da temperatura, relativamente à massa inicial. As linhas a traço interrompido representam as variações de perda de massa em função da temperatura.

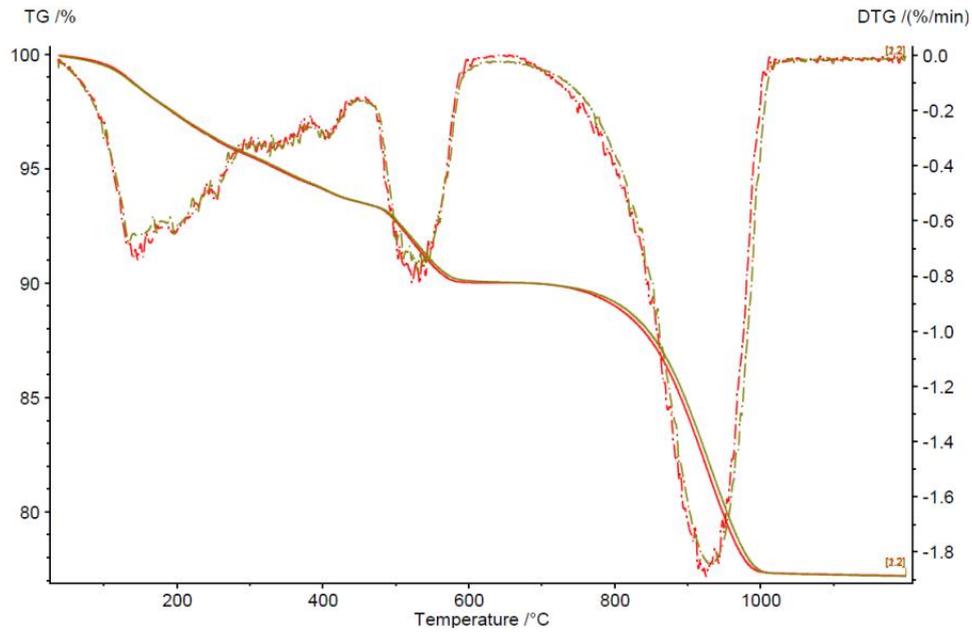
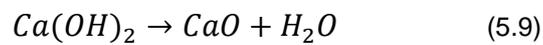


Figura 5.15 – Análise termogravimétrica de caldas à base de cal hidráulica natural [56]

O segundo pico de perda de massa corresponde à evaporação da água na reação da decomposição do hidróxido de cálcio em óxido de cálcio e água, como se pode ver pela expressão (5.9). Esta reação ocorre geralmente entre os 520 e os 580 °C.



Uma grande perda de massa no segundo pico do gráfico, indica uma forte presença de hidróxido de cálcio na amostra, logo houve pouco consumo deste composto na reação com a pozolana, o que indicia uma pequena reatividade pozolânica. As composições que apresentarem menores perdas de massa no segundo pico, são as que registam maior reatividade pozolânica, pois a menor quantidade de hidróxido de cálcio na amostra significa que grande parte deste reagiu com a pozolana durante a amassadura e hidratação da calda.

6. Análise de resultados do ensaio com reómetro rotacional

6.1. Curvas de fluxo da calda de referência

Com auxílio do software *Bohlin R6.51.0.3*, foram traçadas as curvas de fluxo “tensão de corte - taxa de corte” e “viscosidade aparente - taxa de corte”.

Nestes gráficos, é possível observar duas curvas, designadas na gíria como “a curva de ida” e “a curva de volta”. O reómetro aplica taxas de corte progressivamente crescentes até um valor máximo próximo dos 300 s⁻¹. Posteriormente, a fase inversa, taxas de corte progressivamente decrescentes até um valor mínimo semelhante à primeira taxa de corte aplicada ao fluido.

Na generalidade das amostras, “a curva de volta” acabou por resultar ligeiramente acima da “curva de ida”, para pequenas taxas de corte. Para elevadas taxas de corte, ambas as curvas tendem a convergir.

Na Figura 6.1, apresentam-se as curvas de fluxo para a calda de referência, NHL5_0.8_ref.

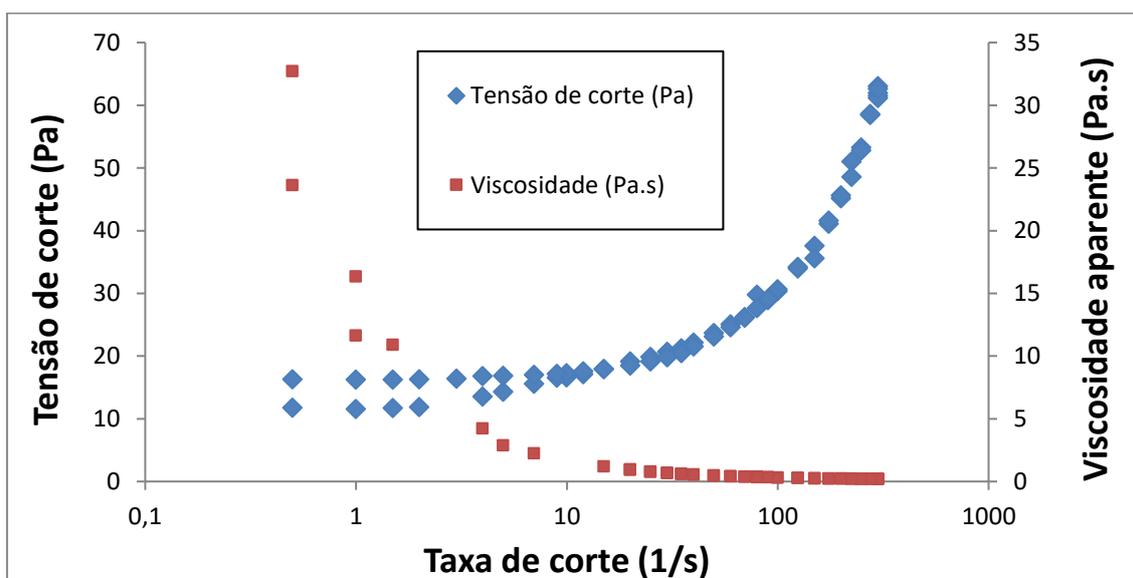


Figura 6.1 - Curvas de fluxo da calda NHL5_0.8_ref

A ordenada do primeiro ponto da curva “tensão de corte - taxa de corte” expressa o valor da tensão de cedência, τ_0 - tensão para a qual se dá início ao escoamento da amostra, uma vez que se obtém um patamar para as baixas taxas de corte.

Do gráfico da curva “viscosidade aparente - taxa de corte” podemos registar os valores das ordenadas, η_0 e η_∞ - viscosidade aparente para muito baixas e muito altas taxas de corte, respetivamente.

Para a taxa de corte, representada pelo eixo horizontal, optou-se pela escala logarítmica. Quanto às variáveis, a viscosidade aparente, quantificada pelo eixo vertical da direita, e a tensão de corte, medida pelo eixo vertical da esquerda, optou-se pela escala linear, de forma a

ser possível observar melhor a diferença entre a “curva de ida” e a “a curva de volta”. Em escala logarítmica, as curvas quase se sobrepõem.

Uma vez que se trata da amostra de referência, é importante registrar o respetivo valor de tensão de cedência e de viscosidade aparente para muito baixas e muito altas taxas de corte, constituindo estes a referência pela qual todas as outras amostras irão ser comparadas. No Quadro 6.1 podemos observar esses dados.

As curvas de fluxo dos resultados experimentais para todas as outras composições ensaiadas encontram-se no Capítulo 10 dos Anexos.

Quadro 6.1 - Valores de tensão e viscosidade da calda de referência

Calda	$\tau_{0,5,ref}$ (Pa)	$\eta_{0,5,ref}$ (Pa.s)	$\eta_{\infty,ref}$ (Pa.s)
NHL5_0.8_ref	11,77	23,64	0,205
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	0,5	0,5	300

6.2. Aplicação de modelos

Após o ensaio e obtenção dos resultados, é possível ajustar matematicamente aos valores experimentais a equação característica do modelo adotado. O software realiza cálculos auxiliares, com constantes intermédias, para chegar ao valor das constantes representativas do respetivo modelo.

Quanto mais próximo os pontos do modelo estiverem dos reais, mais adequado este é para caracterizar o comportamento reológico da composição ensaiada. O software também calcula a percentagem de variação do valor real para o do modelo.

Como referido anteriormente, alguns modelos baseiam-se numa equação que expressa as tensões de corte ao passo que outros expressam a viscosidade aparente. Porém, como a viscosidade aparente varia com as tensões, um modelo como, por exemplo, o de Bingham ao alterar os valores de tensão de corte, implicitamente também irá traçar uma nova curva “viscosidade aparente - taxa de corte”, pois os novos valores de viscosidade são dados pelos declives da nova curva “tensão de corte - taxa de corte” obtida pela equação do modelo.

Uma vez que a “curva de ida” representa de forma mais realista o escoamento da calda hidráulica, que parte do repouso após a aplicação da tensão de cedência e que a “curva de volta” apresenta resultados que sofreram maior influência do processo de hidratação da calda, pois foram obtidos posteriormente e a maiores intervalos de tempo após a amassadura, optou-se por ajustar os modelos apenas à “curva de ida” dos resultados experimentais.

Nota: na leitura dos quadros e gráficos ter em especial atenção a nomenclatura das abreviaturas das composições das amostras que constam no Quadro 5.2.

Optou-se por apresentar as curvas da calda de referência, da calda com 15 % de cinzas volantes, da calda com 15 % de pó de tijolo e da calda com 6 % de sílica de fumo na sua composição. Desta forma observa-se a adequabilidade do modelo para composições com diferentes pozolanas.

6.2.1. Aplicação do modelo de Bingham

Tal como mencionado no Capítulo 3, a equação de Bingham, (2.10), é dada por uma reta com declive constante, cujo valor representa a viscosidade plástica. O software designa esse valor como uma constante, K , e realiza cálculos auxiliares e regressões lineares até obter a equação de Bingham adaptada aos resultados experimentais.

O Quadro 6.2 apresenta a equação do modelo e os coeficientes que foram necessário calcular para obter a curva de Bingham aplicada às diferentes composições de calda estudadas.

Quadro 6.2 - Coeficientes do modelo de Bingham aplicado às amostras NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	NHL5_0.8_REF	NHL5_FA15_0.8	NHL5_PT15_0.8	NHL5_SF6_0.8
Coeficientes	Valor	Valor	Valor	Valor
r^2	0,996	0,997	0,998	0,999
χ^2	67,37	41,80	44,64	90,03
σ_0	14,36	6,89	10,27	25,02
K	0,159	0,143	0,191	0,356
Equação	$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \dot{\gamma}$			

Sobreposto ao gráfico de cada amostra, apresenta-se a correspondente curva de Bingham aplicada aos respetivos resultados experimentais. As Figuras 6.2 e 6.3 ilustram estas curvas.

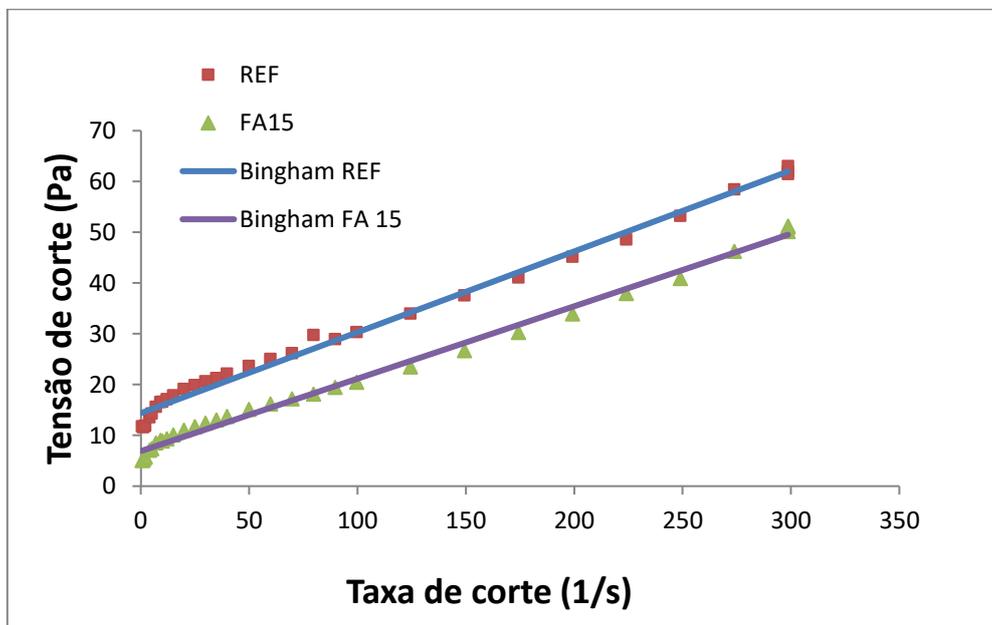


Figura 6.2 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Bingham e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8

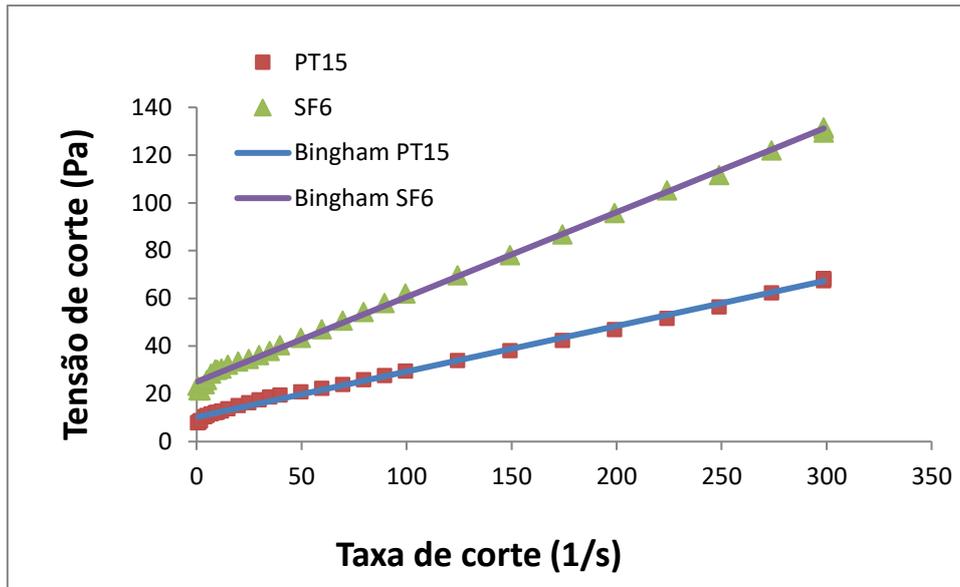


Figura 6.3 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Bingham e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Para muito baixas taxas de corte, a “curva de ida” regista valores de tensão de corte significativamente mais baixos do que os valores do modelo. Este traçado inicial do gráfico dos resultados experimentais ilustra o comportamento reofluidificante da composição de calda hidráulica, onde as viscosidades aparentes assumem valores muito elevados no início do escoamento que se refletem na curva “tensão de corte – taxa de corte” com um declive inicial muito acentuado.

Com o crescimento das taxas de corte, para valores superiores aos 5 a 10 s⁻¹, as curvas dos resultados experimentais e de Bingham tendem a convergir, demonstrando uma boa adequabilidade do modelo às caldas hidráulicas para essa gama abrangente de valores de taxa de corte.

Por fim, apresenta-se o Quadro 6.3 que permite comparar os valores de tensão de cedência e viscosidade para muito altas e muito baixas taxas de corte do modelo de Bingham com os valores dos ensaios experimentais. Para os resultados experimentais, consideram-se os valores da “curva de ida”, uma vez que refletem um comportamento mais aproximado de situações reais, quando a calda hidráulica parte do repouso e inicia o escoamento. Tal como os gráficos, o quadro demonstra que o modelo de Bingham não é adequado para caracterizar as várias composições nas muito baixas taxas de corte, com estimativas com erro significativo para tensão de cedência e viscosidade aparente para muito baixas taxas de corte.

6. Análise de resultados do ensaio com reômetro rotacional

Quadro 6.3 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Bingham aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)
NHL5_0.8_ref	11,77	23,64	0,205
Bingham REF	14,44	29,01	0,207
NHL5_FA15_0.8	5,07	10,18	0,168
Bingham FA15	6,96	13,99	0,166
NHL5_PT15_0.8	7,88	15,83	0,225
Bingham PT15	10,37	20,82	0,225
NHL5_SF6_0.8	23,44	47,09	0,434
Bingham SF6	25,20	50,62	0,439
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	0,5	0,5	300

6.2.2. Aplicação do modelo de Herschel-Bulkley

Realizou-se o mesmo procedimento para a aplicação do modelo de Herschel-Bulkley às mesmas composições, obtendo-se os coeficientes característicos do modelo, conforme expressa o Quadro 6.4. Para a composição com 15 % de cinzas volante no teor de ligante, obteve-se um índice de comportamento, n , igual a 1, o que será um indício que o fluido tende a comportar-se como “quasi-newtoniano”, sendo a sua curva de fluxo definida por uma reta, segundo a estimativa do modelo.

Quadro 6.4 - Coeficientes do modelo de Herschel-Bulkley aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	NHL5_0.8_REF	NHL5_FA15_0.8	NHL5_PT15_0.8	NHL5_SF6_0.8
Coefficientes	Valor	Valor	Valor	Valor
r^2	0,999	0,999	0,998	0,999
χ^2	51,77	41,82	39,03	61,68
σ_0	13,11	6,90	9,61	23,33
K	0,324	0,143	0,267	0,560
n	0,88	1,00	0,94	0,92
Equação	$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$			

O modelo de Herschel-Bulkley surge como uma boa alternativa ao de Bingham para caracterizar caldas com características mais reofluidificantes, uma vez que introduz o índice de comportamento, n , responsável por conferir um traçado de maior concavidade para baixo da curva “tensão de corte – taxa de corte” do modelo, principalmente para a composição com 6 % de sílica de fumo no teor de ligante que possui o índice n com o valor mais distante de 1.

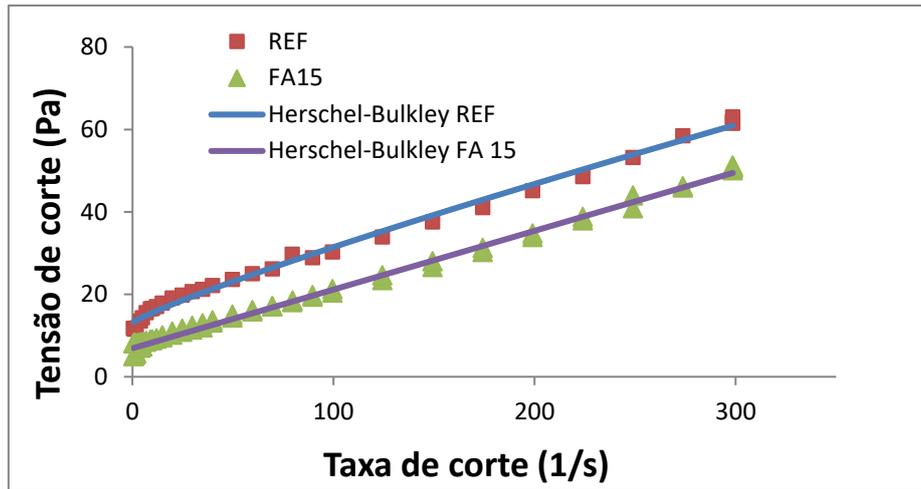


Figura 6.4 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Herschel-Bulkley e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8

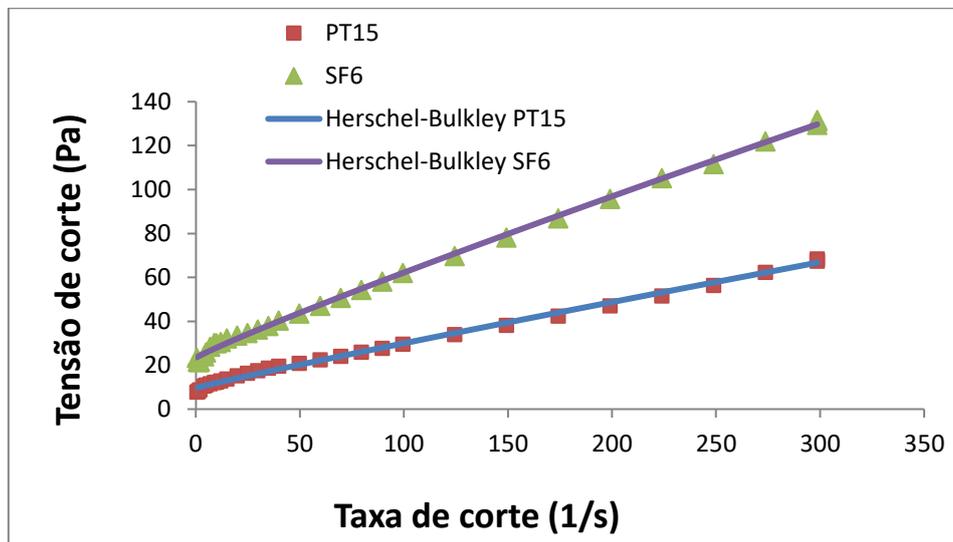


Figura 6.5 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Herschel-Bulkley e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

As Figuras 6.4 e 6.5 demonstram que o modelo de Herschel-Bulkley representa uma evolução relativamente a Bingham, com um traçado de concavidade a tender para baixo, à imagem dos pontos dos resultados experimentais, principalmente para as mais baixas taxas de corte. Por outro lado, tal como Bingham, verifica-se que o modelo de Herschel-Bulkley sobrestima consideravelmente as tensões de corte para muito baixas taxas de corte, apesar de registar uma ligeira melhoria. É de salientar que para as composições de menor fluidez, como as que empregam a sílica de fumo na sua constituição, o modelo apresenta uma excelente adequabilidade, descrevendo de forma fiável a curva de fluxo.

Apresenta-se o Quadro 6.5 que permite comparar os valores de tensão de cedência e viscosidade aparente para muito altas e muito baixas taxas de corte do modelo de Herschel-Bulkley com os valores experimentais.

6. Análise de resultados do ensaio com reômetro rotacional

Quadro 6.5 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Herschel-Bulkley aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)
NHL5_0.8_ref	11,77	23,64	0,205
Herschel-Bulkley REF	13,29	26,69	0,204
NHL5_FA15_0.8	5,07	10,18	0,168
Herschel-Bulkley FA15	6,97	13,99	0,166
NHL5_PT15_0.8	7,88	15,83	0,225
Herschel-Bulkley PT15	9,75	19,59	0,223
NHL5_SF6_0.8	23,44	47,09	0,434
Herschel-Bulkley SF6	23,62	47,46	0,434
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	0,5	0,5	300

6.2.3. Aplicação do modelo de Sisko

O Quadro 6.6 mostra os coeficientes e a equação do modelo de Sisko aplicada às composições em estudo.

Quadro 6.6 - Coeficientes do modelo de Sisko aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	NHL5_0.8_REF	NHL5_FA15_0.8	NHL5_PT15_0.8	NHL5_SF6_0.8
Coeficientes	Valor	Valor	Valor	Valor
r^2	1,000	0,999	1,000	0,999
χ^2	0,67	0,22	0,25	3,91
η_{∞}	0,253	0,162	0,220	0,609
k	11,65	5,24	8,08	21,88
n	0,99	0,91	0,93	1,07
Equação	$\eta = \eta_{\infty} + k.(1/\dot{\gamma})^n$			

Uma vez que a equação do modelo se baseia em variável e coeficientes relacionados com a viscosidade aparente, apresentam-se os gráficos das Figuras 6.6 e 6.7 que ilustram as curvas “viscosidade aparente – taxa de corte” das composições em estudo.

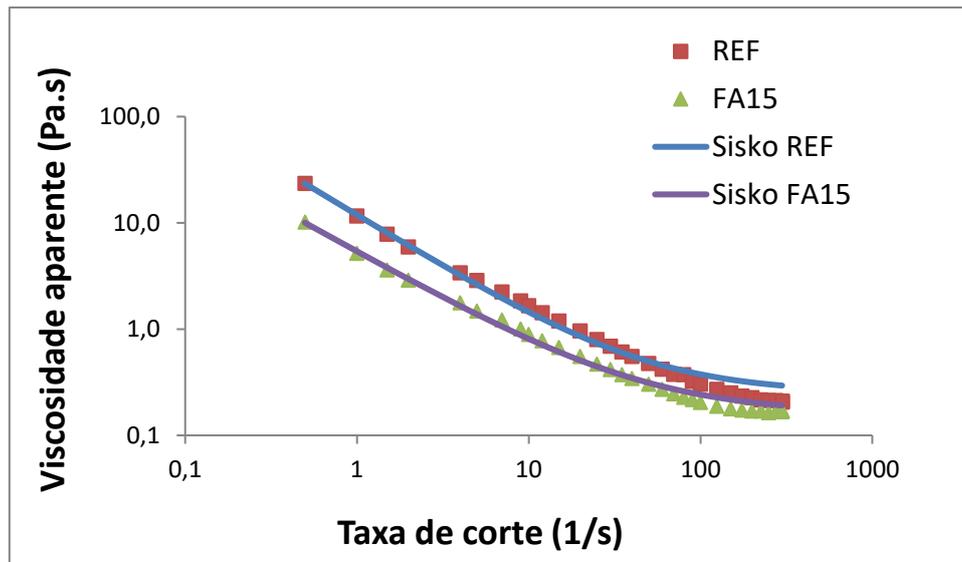


Figura 6.6 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Sisko e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8

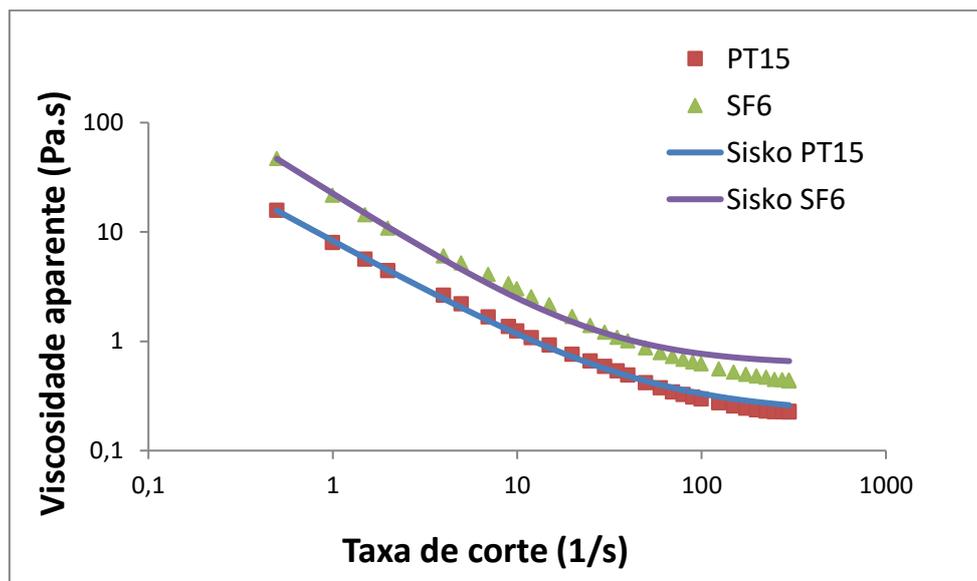


Figura 6.7 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Sisko e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

O modelo de Sisko revela-se adequado para caracterizar todas as composições de calda hidráulica a baixas taxas de corte, fornecendo estimativas muito boas para os valores de tensão de cedência e viscosidade para muito baixas taxas de corte. Porém, para taxas de corte de valor superior aos 50 a 80 s⁻¹, o modelo sobrestima consideravelmente a viscosidade aparente relativamente aos resultados experimentais, ocorrendo uma divergência de traçado entre o gráfico do modelo e o dos resultados experimentais com o aumento da taxa de corte.

O Quadro 6.7 permite comparar os valores de tensão de cedência e viscosidade para muito altas e muito baixas taxas de corte do modelo de Sisko com os valores dos resultados experimentais.

6. Análise de resultados do ensaio com reômetro rotacional

Quadro 6.7 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Sisko aplicado às amostras NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)
NHL5_0.8_ref	11,77	23,64	0,205
Sisko REF	11,68	23,47	0,294
NHL5_FA15_0.8	5,07	10,18	0,168
Sisko FA15	4,99	10,03	0,191
NHL5_PT15_0.8	7,88	15,83	0,225
Sisko PT15	7,81	15,68	0,261
NHL5_SF6_0.8	23,44	47,09	0,434
Sisko SF6	23,25	46,70	0,659
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	0,5	0,5	300

6.2.4. Aplicação do modelo de Cross

O Quadro 6.8 mostra os coeficientes e a equação do modelo de Cross aplicado às amostras em estudo.

Quadro 6.8 - Coeficientes do modelo de Cross aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	NHL5_0.8_REF	NHL5_FA15_0.8	NHL5_PT15_0.8	NHL5_SF6_0.8
Coeficientes	Valor	Valor	Valor	Valor
r^2	0,979	0,951	0,981	0,979
χ^2	56,04	22,45	24,43	216,50
η_{∞}	0,150	0,140	0,183	0,350
η_0	32,26	7,31	19,97	72,38
k	1,99	0,70	1,69	2,52
n	1,00	1,06	1,00	1,02
Equação	$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / (1 + k \cdot \dot{\gamma}^n)$			

As Figura 6.8 e 6.9 demonstram que o modelo de Cross não é adequado para representar o comportamento reológico das caldas hidráulicas para muito baixas taxas de corte pois apresenta valores de viscosidade aparente significativamente mais reduzidos do que os valores do ensaio. Esta diferença é anulada logo quando as taxas de corte começam a crescer, para valores superiores aos 1 a 2 s⁻¹, devido ao típico comportamento de Cross, como se vê na Figura 3.12, com um ponto de inflexão na curva “tensão de corte – taxa de corte”, estando esta relacionada com a curva “viscosidade aparente – taxa de corte” que aqui se apresenta.

A eficiência deste modelo fica a perder para Sisko pois, ao contrário do traçado gráfico da expressão de Cross, as caldas hidráulicas não apresentam região newtoniana para baixas taxas de corte, observando-se um comportamento mais próximo do traçado gráfico da expressão de Sisko. Contudo, para altas taxas de corte, este modelo apresenta melhor adequabilidade do que o modelo de Sisko.

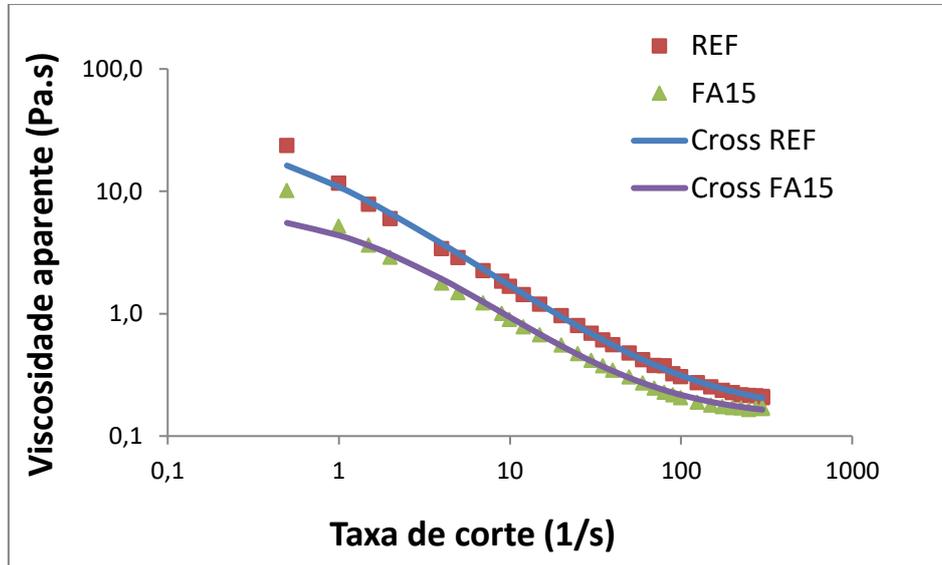


Figura 6.8 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Cross e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8

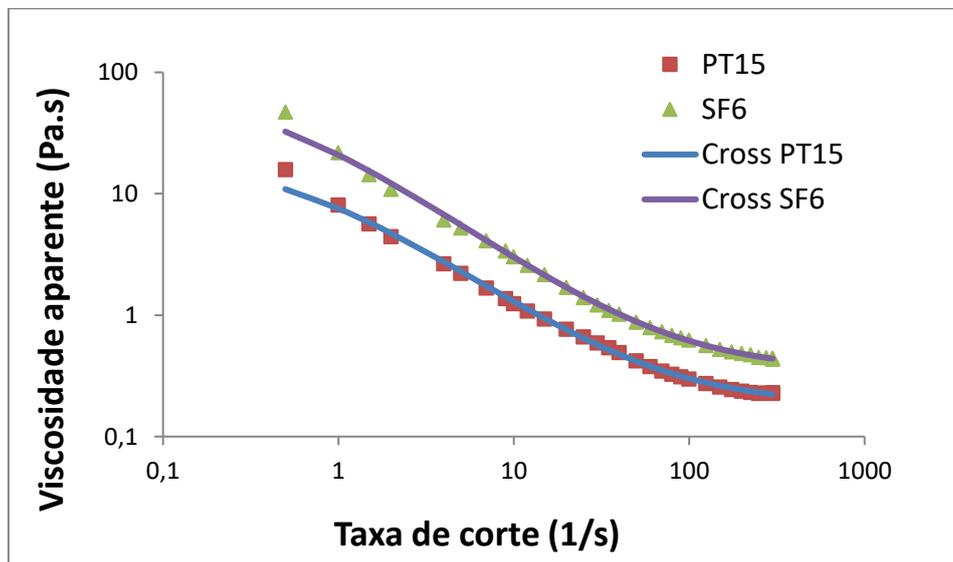


Figura 6.9 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Cross e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

O Quadro 6.9 permite comparar os valores de tensão de cedência e viscosidade aparente para muito altas e muito baixas taxas de corte do modelo de Cross com os valores dos ensaios experimentais.

6. Análise de resultados do ensaio com reômetro rotacional

Quadro 6.9 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Cross aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)
NHL5_0.8_ref	11,77	23,64	0,205
Cross REF	8,09	16,25	0,205
NHL5_FA15_0.8	5,07	10,18	0,168
Cross FA15	2,75	5,52	0,164
NHL5_PT15_0.8	7,88	15,83	0,225
Cross PT15	5,44	10,92	0,223
NHL5_SF6_0.8	23,44	47,09	0,434
Cross SF6	16,19	32,52	0,438
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	0,5	0,5	300

6.2.5. Aplicação do modelo de Carreau

O Quadro 6.10 mostra os coeficientes e a equação do modelo de Carreau aplicado às amostras em estudo.

Quadro 6.10 - Coeficientes do modelo de Cross aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	NHL5_0.8_REF	NHL5_FA15_0.8	NHL5_PT15_0.8	NHL5_SF6_0.8
Coeficientes	Valor	Valor	Valor	Valor
r^2	1,000	0,969	1,000	0,970
χ^2	8,84	24,70	0,52	490,5
η_{∞}	0,251	0,202	0,221	0,538
η_0	$5,48 \cdot 10^7$	$6,43 \cdot 10^{10}$	$3,21 \cdot 10^7$	644,9
k	$6,36 \cdot 10^6$	$3,00 \cdot 10^9$	$1,19 \cdot 10^7$	16,19
n	0,49	0,53	0,47	0,57
Equação	$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / (1 + (k \cdot \dot{\gamma})^2)^n$			

As Figuras 6.10 e 6.11 demonstram que o modelo de Carreau não é adequado para caracterizar o comportamento reológico das caldas hidráulicas para taxas de corte de valor superior aos 30 a 50 s⁻¹, à semelhança do que ocorre na aplicação do modelo de Sisko. Também em Carreau, ocorre uma divergência de traçado entre os gráficos do modelo e dos resultados experimentais.

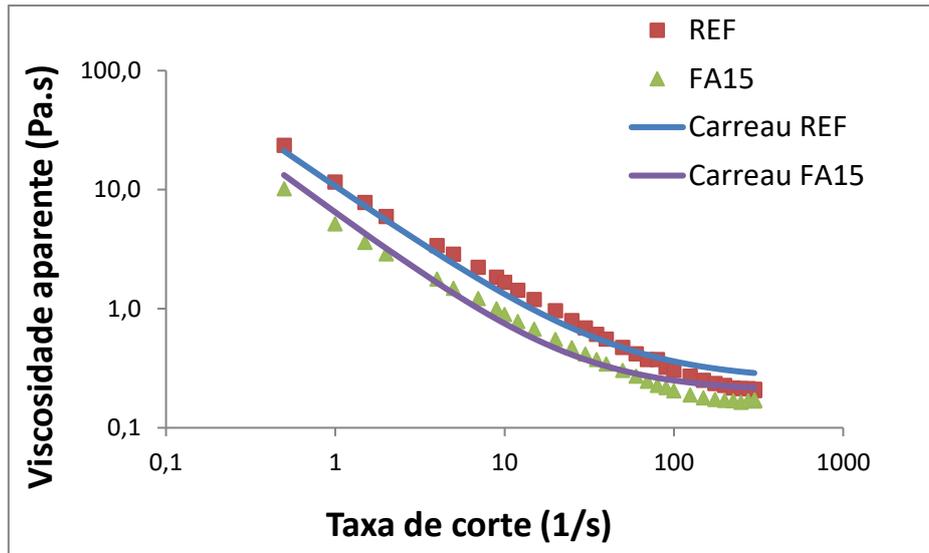


Figura 6.10 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Carreau e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8

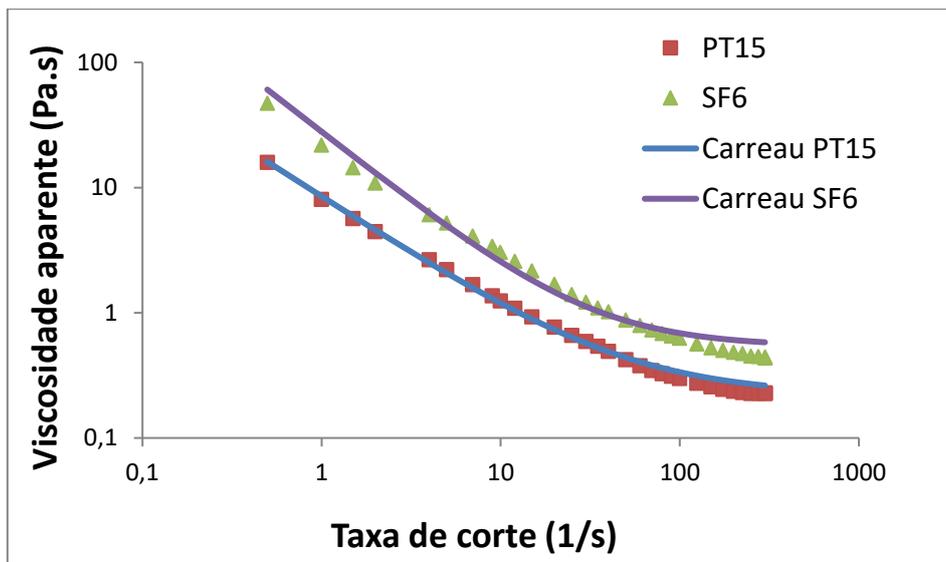


Figura 6.11 - Curvas “viscosidade aparente - taxa de corte” do modelo de Carreau e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Ainda assim, é possível observar, no Quadro 6.11, que o modelo de Carreau fornece razoáveis estimativas para a tensão de cedência das composições de maior fluidez, porém para as composições de maior viscosidade, como as que possuem sílica de fumo na sua composição, essa estimativa registra uma diferença de erro significativa.

6. Análise de resultados do ensaio com reómetro rotacional

Quadro 6.11 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Carreau aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)
NHL5_0.8_ref	11,77	23,64	0,205
Carreau REF	10,51	21,11	0,288
NHL5_FA15_0.8	5,07	10,18	0,168
Carreau FA15	6,61	13,28	0,217
NHL5_PT15_0.8	7,88	15,83	0,225
Carreau PT15	8,02	16,10	0,262
NHL5_SF6_0.8	24,44	47,09	0,434
Carreau SF6	30,16	60,62	0,581
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	0,5	0,5	300

6.2.6. Aplicação do modelo da Lei da Potência

Face a Herschel-Bulkley, o modelo da Lei da Potência apresenta a mesma expressão com a diferença de haver a ausência da grandeza “tensão de cedência, σ_0 ”. Uma vez que este tem uma natureza mais simplista do que a generalidade dos outros modelos, os fundamentos teóricos advertem que o modelo não é adequado para toda a gama de taxas de corte, existindo uma vincada inadequabilidade em altas taxas de corte. Tal facto foi verificado analiticamente, quando se ajustou o modelo a toda a gama dos resultados experimentais, obtendo-se uma expressão que descreve um gráfico que não se adequa minimamente ao gráfico dos resultados experimentais, como se observa na Figura 6.12.

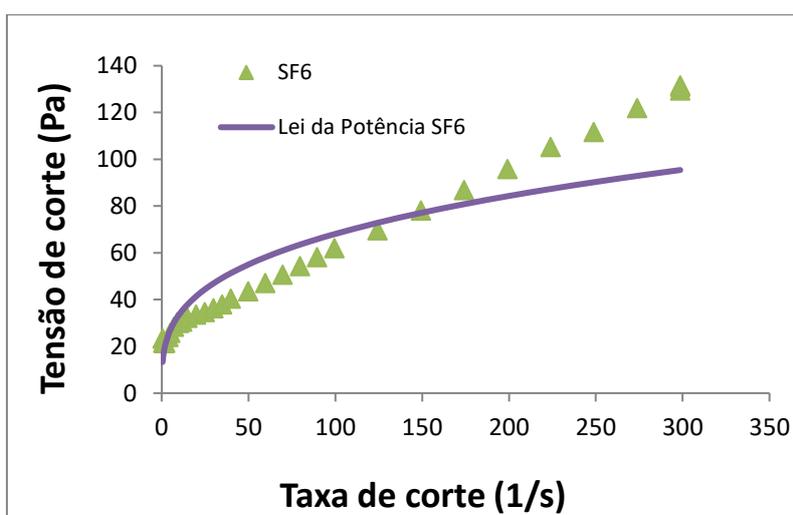


Figura 6.12 - Curva “tensão de corte - taxa de corte” do modelo da Lei da Potência, aplicado a toda a gama de taxas de corte, e dos resultados experimentais para a composição NHL5_SF6_0.8

Realizou-se um novo ajuste do modelo da Lei da Potência, apenas aplicado a uma restrita gama de valores de taxa de corte dos resultados experimentais, até cerca dos 60 s⁻¹. O Quadro 6.12 mostra os coeficientes e a equação do modelo da Lei da Potência aplicado às várias composições.

Quadro 6.12 - Coeficientes do modelo da Lei da Potência aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	NHL5_0.8_REF	NHL5_FA15_0.8	NHL5_PT15_0.8	NHL5_SF6_0.8
Coefficientes	Valor	Valor	Valor	Valor
r ²	0,984	0,991	0,983	0,959
χ ²	10,75	4,41	14,80	87,10
η	11,35	5,12	7,82	21,14
n	0,18	0,26	0,23	0,16
Equação	$\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma}^n$			

As Figura 6.13 e 6.14 demonstram que o modelo da Lei da Potência é adequado para caracterizar as caldas hidráulicas numa restrita gama de taxas de corte (0-60 s⁻¹), registrando uma melhoria significativa relativamente a Bingham e Herschel-Bulkley no que toca a representar o comportamento caracteristicamente reofluidificante nas mais baixas taxas de corte, descrevendo uma curva de concavidade virada para baixo, resultante da rápida diminuição de viscosidade aparente com o crescimento das taxas de corte.

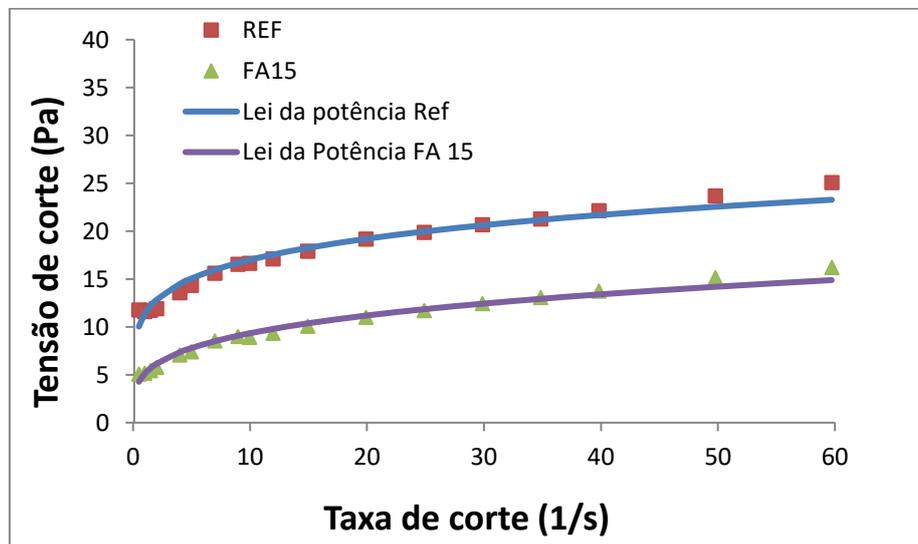


Figura 6.13 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo da Lei da Potência e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8

6. Análise de resultados do ensaio com reômetro rotacional

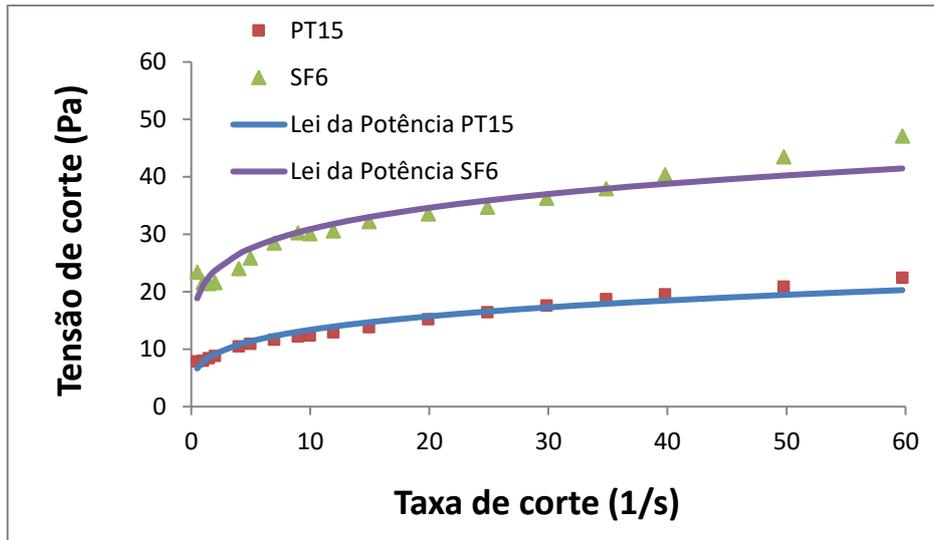


Figura 6.14 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo da Lei da Potência e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

O Quadro 6.13 ilustra que, aplicando o modelo da Lei da Potência às composições de calda hidráulica, é possível obter estimativas razoáveis para a tensão de cedência e viscosidade aparente para muito baixas taxas de corte, exceto para as caldas menos fluidas, que possuem sílica de fumo na sua composição, às quais surgem estimativas com intervalos de erro significativo. Para efeitos de comparação, apresenta-se o valor de viscosidade aparente das composições ensaiadas e do modelo ajustado a um valor intermédio, cerca de 30 s^{-1} , da gama de taxas de corte adotada (entre os $0,5$ e os 60 s^{-1}).

Quadro 6.13 - Valores de tensão de corte e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo da Lei da Potência aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{30} (Pa.s)
NHL5_0.8_ref	11,72	23,64	0,690
Lei da potência REF	10,04	20,17	0,690
NHL5_FA15_0.8	5,07	10,18	0,416
Lei da potência FA15	4,27	8,58	0,416
NHL5_PT15_0.8	7,88	15,83	0,589
Lei da potência PT15	6,65	13,36	0,589
NHL5_SF6_0.8	23,44	47,09	1,20
Lei da potência SF6	18,85	37,86	1,24
$\dot{\gamma}$ (s^{-1})	0,5	0,5	30

6.2.7. Aplicação do modelo de Casson

O Quadro 6.14 mostra os coeficientes e a equação do modelo de Casson.

Quadro 6.14 - Coeficientes do modelo de Casson aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	NHL5_0.8_REF	NHL5_FA15_0.8	NHL5_PT15_0.8	NHL5_SF6_0.8
Coefficientes	Valor	Valor	Valor	Valor
r^2	0,994	0,994	0,996	0,995
χ^2	71,88	65,52	83,08	346,3
σ_0	9,96	4,14	6,21	16,54
k	0,07	0,07	0,10	0,16
Equação	$\sigma^{1/2} = \sigma_0^{1/2} + (k \cdot \dot{\gamma})^{1/2}$			

As Figuras 6.15 e 6.16 demonstram a excelente adequabilidade do modelo de Casson às várias composições de calda hidráulica. É de destacar que este modelo apresenta o menor somatório de erro absoluto global - dado pelo somatório dos módulos das diferenças entre o valor do modelo e o valor medido no ensaio para todos os pontos - e isso reflete-se no traçado dos gráficos sendo este muito semelhante ao dos resultados experimentais.

O traçado do modelo de Casson evidencia uma grande evolução relativamente a Bingham e Herschel-Bulkley, fazendo uma caracterização reológica mais realista das caldas hidráulicas, descrevendo um comportamento mais reofluídificante nas mais baixas taxas de corte, tal como acontece na “curva de ida” dos resultados experimentais. A concavidade virada para baixo é facilmente observável no gráfico do modelo. O modelo de Casson assume-se assim como o modelo de eleição para caracterizar todas as composições de calda hidráulica.

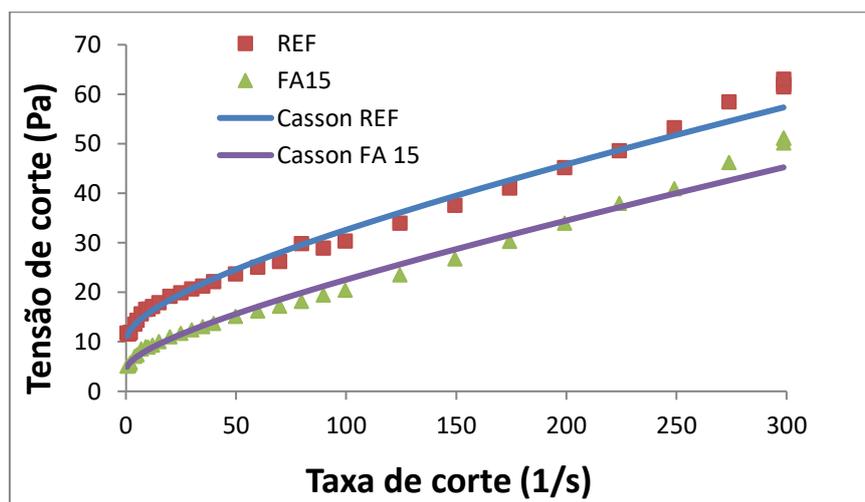


Figura 6.15 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Casson e dos resultados experimentais para as composições de referência e NHL5_FA15_0.8

6. Análise de resultados do ensaio com reômetro rotacional

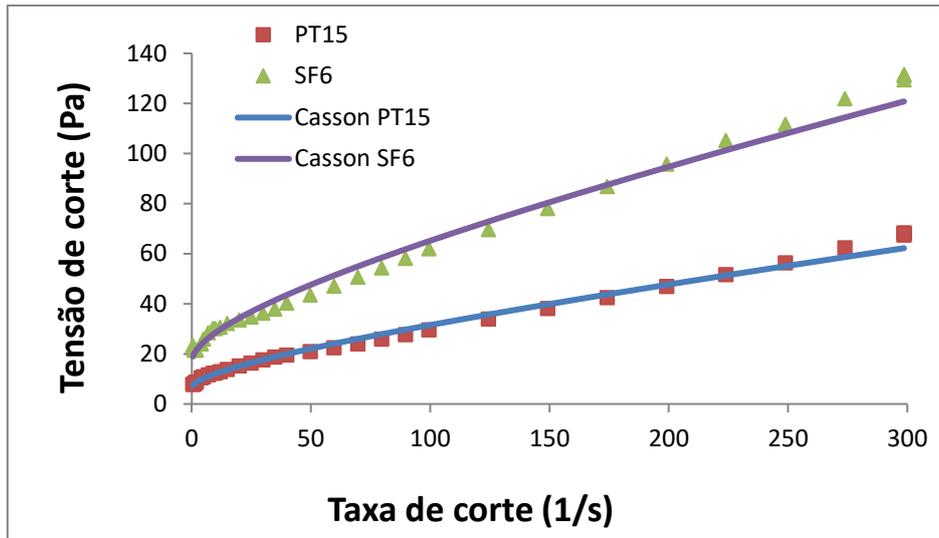


Figura 6.16 - Curvas “tensão de corte - taxa de corte” do modelo de Casson e dos resultados experimentais para as composições NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

O Quadro 6.15 permite comparar os valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes do modelo de Casson com os valores das amostras estudadas. Verifica-se que este modelo fornece ainda melhores estimativas do que o modelo da Lei da Potência, para a tensão de cedência e viscosidade aparente para muito baixas taxas de corte das várias composições de calda hidráulica.

Quadro 6.15 - Valores de tensão de cedência e viscosidades aparentes dos resultados experimentais e do modelo de Casson aplicado às composições NHL5_0.8_REF, NHL5_FA15_0.8, NHL5_PT15_0.8 e NHL5_SF6_0.8

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)
NHL5_0.8_ref	11,77	23,64	0,205
Casson REF	11,13	22,37	0,192
NHL5_FA15_0.8	5,07	10,18	0,168
Casson FA15	4,96	9,96	0,151
NHL5_PT15_0.8	7,88	15,83	0,225
Casson PT15	7,35	14,77	0,208
NHL5_SF6_0.8	23,44	47,09	0,434
Casson SF6	18,92	38,01	0,404
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	0,5	0,5	300

6.3. Resultados das amostras com pozolanas

O mesmo procedimento experimental que decorreu para as composições de calda hidráulica cujos resultados foram apresentados no Subcapítulo 6.2, também foi utilizado para todas as outras composições.

Na aplicação de modelos observou-se o mesmo desempenho descrito em 6.2, em que os modelos que não são adequados para caldas mais viscosas, registaram uma inadequabilidade para caracterizar as caldas com sílica de fumo na sua composição. Na generalidade das composições, observou-se o traçado típico de cada modelo, tal como foi descrito em 6.2.

Seguidamente, irá ser apresentada a análise de resultados para cada tipo de pozolana com o objetivo de conhecer a sua influência nas propriedades reológicas da calda.

6.3.1. Resultados das caldas com cinzas volantes

O Quadro 6.16 ilustra os resultados das amostras com cinzas volantes ao nível das tensões de cedência e viscosidades aparentes para muito baixas e muito altas taxas de corte. A Figura 6.17 ilustra, de forma gráfica, os valores da tensão de cedência em função do teor de cinzas volantes de cada amostra.

Quadro 6.16 - Resultados das caldas com cinzas volantes

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)
NHL5_0.8_REF	11,77	23,64	0,206
NHL5_FA5_0.8	8,96	18,01	0,178
NHL5_FA10_0.8	5,98	12,01	0,173
NHL5_FA15_0.8	5,07	10,18	0,168
NHL5_FA20_0.8	2,96	5,95	0,152
NHL5_FA25_0.8	3,89	7,81	0,206
NHL5_FA30_0.8	2,83	5,68	0,184

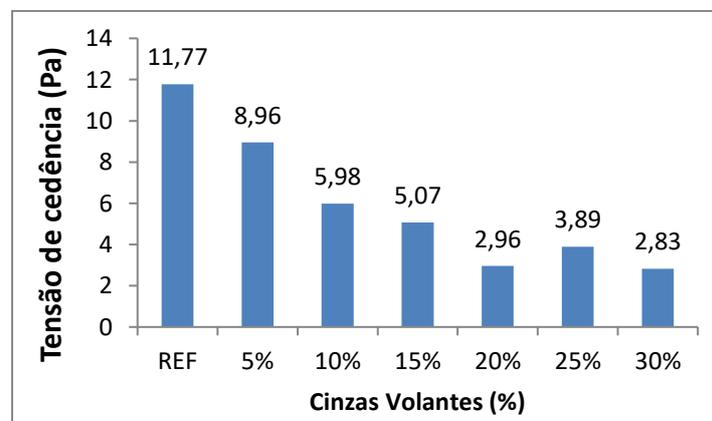


Figura 6.17 - Tensões de cedência das caldas com cinzas volantes

6. Análise de resultados do ensaio com reômetro rotacional

É possível observar uma influência muito positiva da utilização de cinzas volantes como adição na calda, ao nível da diminuição da tensão de cedência.

As Figuras 6.18 e 6.19 ilustram as viscosidades para muito baixas e muito altas taxas de corte, respetivamente, em função do teor de cinzas volantes de cada amostra. Tal como acontece para as tensões, para as viscosidades também ocorre a diminuição dos valores devido ao efeito das cinzas volantes. Essa melhoria é muito mais evidente para muito baixas taxas de corte, quando as viscosidades são máximas e se dá início ao escoamento.

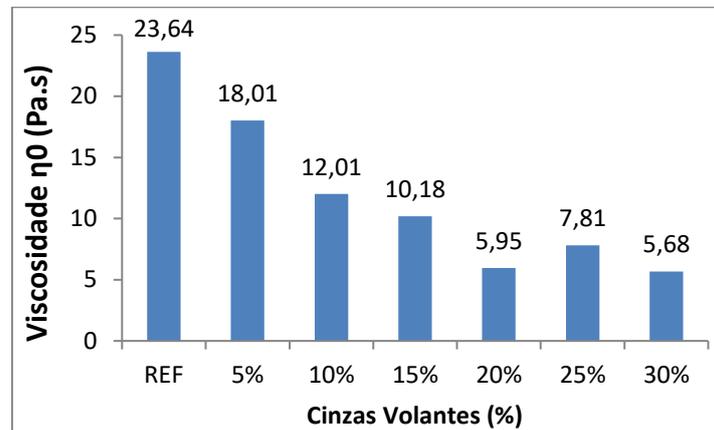


Figura 6.18 – Viscosidades aparentes a muito baixas taxas de corte das caldas com cinzas volantes

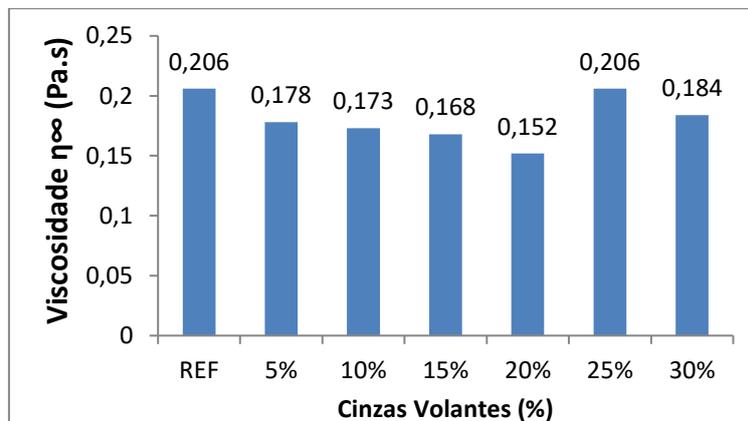


Figura 6.19 - Viscosidades aparentes a muito altas taxas de corte das caldas com cinzas volantes

6.3.2. Resultados das caldas com pó de tijolo

O Quadro 6.17 ilustra os resultados das amostras com pó de tijolo ao nível das tensões de cedência e viscosidades aparentes para muito baixas e muito altas taxas de corte.

Quadro 6.17 – Resultados das caldas com pó de tijolo

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)
NHL5_0.8_REF	11,77	23,64	0,206
NHL5_PT5_0.8	10,71	21,53	0,223
NHL5_PT10_0.8	7,29	14,65	0,199
NHL5_PT15_0.8	7,88	15,83	0,225
NHL5_PT20_0.8	6,74	13,55	0,207
NHL5_PT25_0.8	5,97	12,00	0,217
NHL5_PT30_0.8	5,47	10,98	0,214

A Figura 6.20 ilustra, de forma gráfica, os valores da tensão de cedência em função do teor de pó de tijolo de cada amostra.

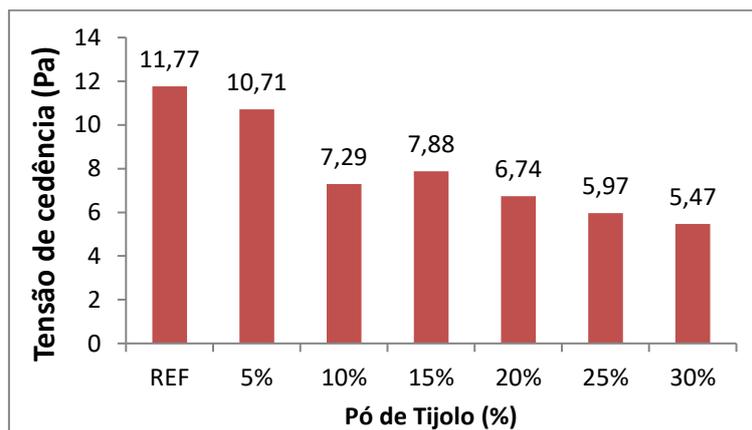


Figura 6.20 - Tensões de cedência das caldas com pó de tijolo

Tal como acontece com as cinzas volantes, é evidente a melhoria do comportamento reológico das caldas, ao nível da diminuição das tensões de cedência, com as adições de pó de tijolo. Com exceção da composição com 15 %, que teve um ligeiro aumento de tensão de cedência relativamente à de 10 %, verifica-se sempre a diminuição dos valores até 30%, sendo que a diferença dos 25 % para os 30 % já não é tão significativa, pelo que o teor ótimo deve estar entre estes valores e dependerá de outros fatores que se considerem relevantes para a calda de injeção, nomeadamente ao nível da massa volúmica e resistências mecânicas que iremos ver mais à frente nesta dissertação.

As Figuras 6.21 e 6.22 ilustram as viscosidades para muito baixas e muito altas taxas de corte, respetivamente, em função do teor de pó de tijolo de cada amostra.

6. Análise de resultados do ensaio com reómetro rotacional

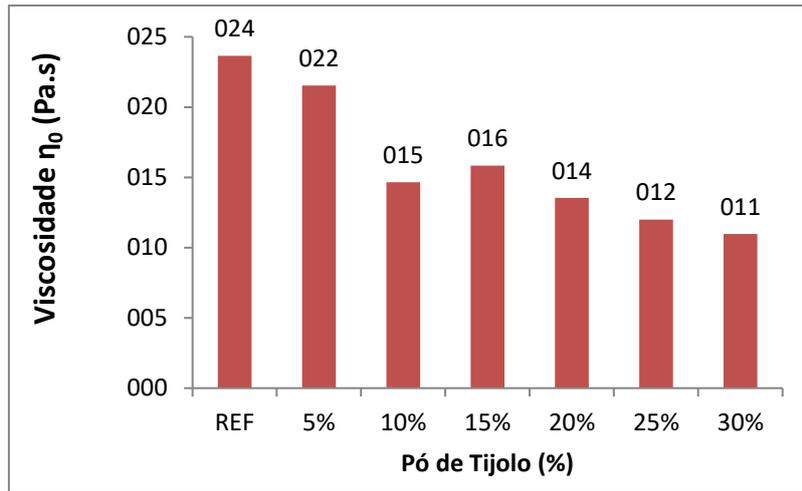


Figura 6.21 - Viscosidades aparentes a muito baixas taxas de corte das caldas com pó de tijolo

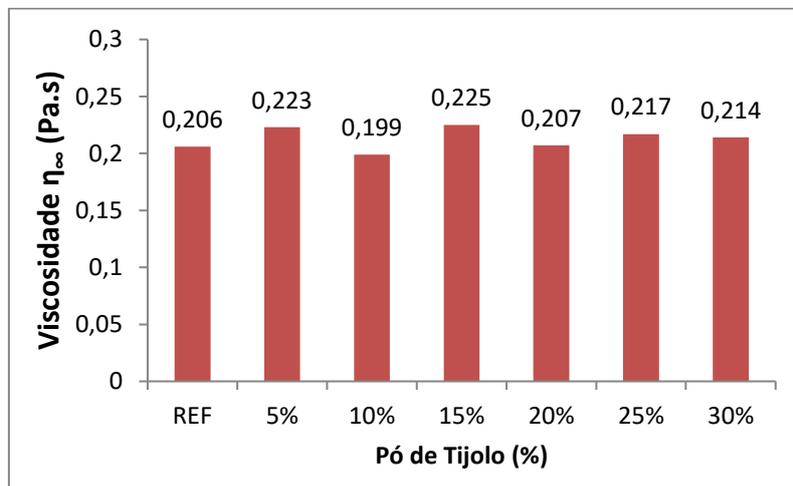


Figura 6.22 - Viscosidades aparentes a muito altas taxas de corte das caldas com pó de tijolo

Tal como acontece para as tensões, para as viscosidades a muito baixas taxas de corte também ocorre a diminuição dos valores devido ao efeito do pó de tijolo. As viscosidades a muito altas taxas de corte não registam variações significativas com a variação da dosagem de pó de tijolo.

6.3.3. Resultados das caldas com sílica de fumo

O Quadro 6.18 ilustra os resultados das amostras com sílica de fumo ao nível das tensões de cedência e viscosidades aparentes para muito baixas e muito altas taxas de corte.

Quadro 6.18 - Resultados das caldas com sílica de fumo

Composição	$\tau_{0,5}$ (Pa)	$\eta_{0,5}$ (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)
NHL5_0.8_REF	11,77	23,64	0,206
NHL5_SF2_0.8	13,46	27,05	0,263
NHL5_SF4_0.8	20,58	41,35	0,294
NHL5_SF6_0.8	23,44	47,09	0,434
NHL5_SF8_0.8	24,15	48,52	0,529
NHL5_SF10_0.8	35,59	71,48	0,448
NHL5_SF12_0.8	32,91	66,14	0,531

A Figura 6.23 ilustra, de forma gráfica, os valores da tensão de cedência em função do teor de sílica de fumo de cada amostra.

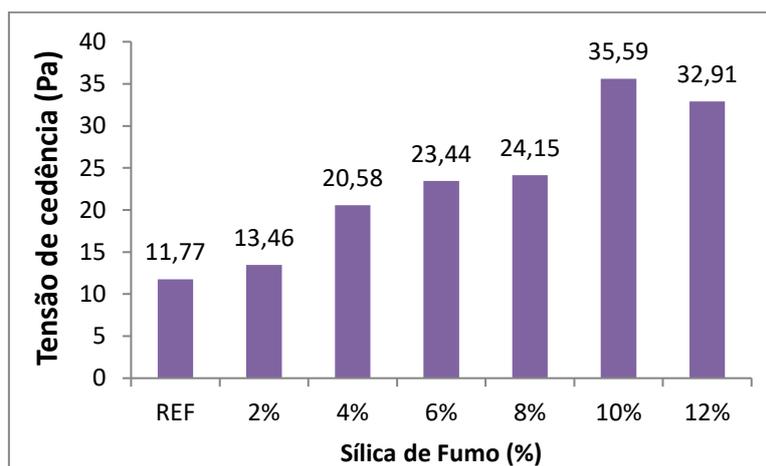


Figura 6.23 - Tensões de cedência das caldas com sílica de fumo

Os resultados experimentais permitem concluir que a sílica de fumo tem o efeito contrário das outras pozolanas testadas, conduzindo ao aumento drástico das tensões de cedência, mesmo para pequenas dosagens, com incrementos de apenas 2 %. Não foram utilizadas dosagens superiores aos 12 %, precisamente pela dificuldade da amassadura e ausência de fluidez que permitisse uma trabalhabilidade para pelo menos assegurar o escoamento por gravidade, ou com auxílio de colher, do balde para o recipiente de transporte para a sala de reómetro rotacional.

6. Análise de resultados do ensaio com reómetro rotacional

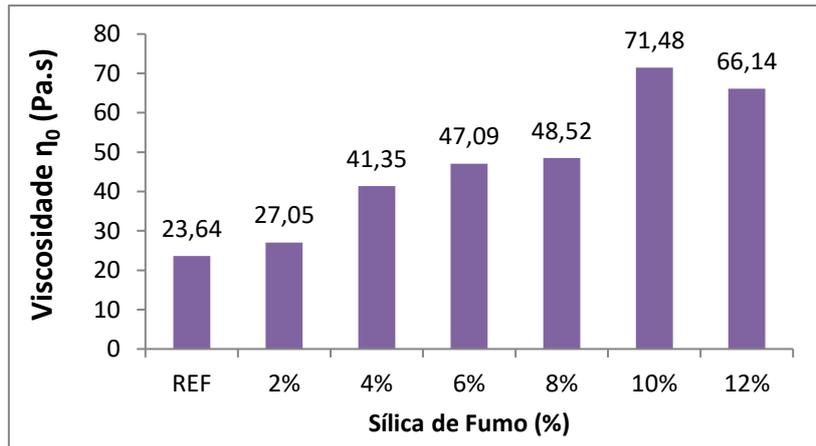


Figura 6.24 - Viscosidades aparentes a muito baixas taxas de corte das caldas com sílica de fumo

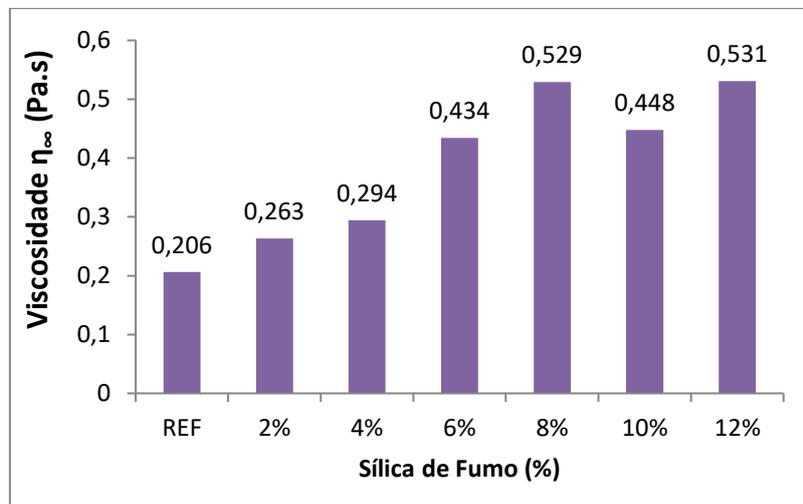


Figura 6.25 – Viscosidades aparentes a muito altas taxas de corte das caldas com sílica de fumo

As Figuras 6.24 e 6.25 ilustram as viscosidades aparentes para muito baixas e muito altas taxas de corte, respetivamente, em função do teor de sílica de fumo de cada amostra.

Uma vez mais, é visível o prejuízo das propriedades reológicas das caldas que utilizam sílica de fumo na sua composição. Tanto as viscosidades para muito baixas como para muito altas taxas de corte, aumentam drasticamente com o crescimento do teor em sílica de fumo. Apenas a amostra com 2 % apresenta um aumento ligeiro, pelo que a sua utilização apenas será justificável se trouxer melhorias significativas noutras propriedades da calda, nomeadamente ao nível das resistências mecânicas.

7. Análise de resultados dos ensaios com provetes de calda endurecida

7.1. Resultados do ensaio de resistência à flexão e compressão

O Quadro 7.1 apresenta os valores de força de flexão aos 28 dias, F_f , medidos em cada uma das amostras e a média de cada composição estudada. Para cada pozolana foram ensaiadas duas composições, com as dosagens média e máxima, de forma a observar a influência em cada parâmetro físico ensaiado.

Quadro 7.1 - Resultados do ensaio de flexão

Amostra	F_f (N)			Média
	A	B	C	
NHL5_0.8_REF	1507,0	1081,3	979,1	1189,1
NHL5_SF6_0.8	803,2	417,8	670,6	630,5
NHL5_SF12_0.8	-	207,9	505,7	356,8
NHL5_FA15_0.8	433,2	601,0	746,2	593,5
NHL5_FA30_0.8	713,6	423,1	257,9	464,9
NHL5_PT15_0.8	527,6	381,8	922,3	610,6
NHL5_PT30_0.8	308,8	308,8	562,7	393,4

Aplicando a expressão (5.5), iremos obter as resistências à flexão aos 28 dias após a presa, R_f , que se podem observar na Figura 7.1.

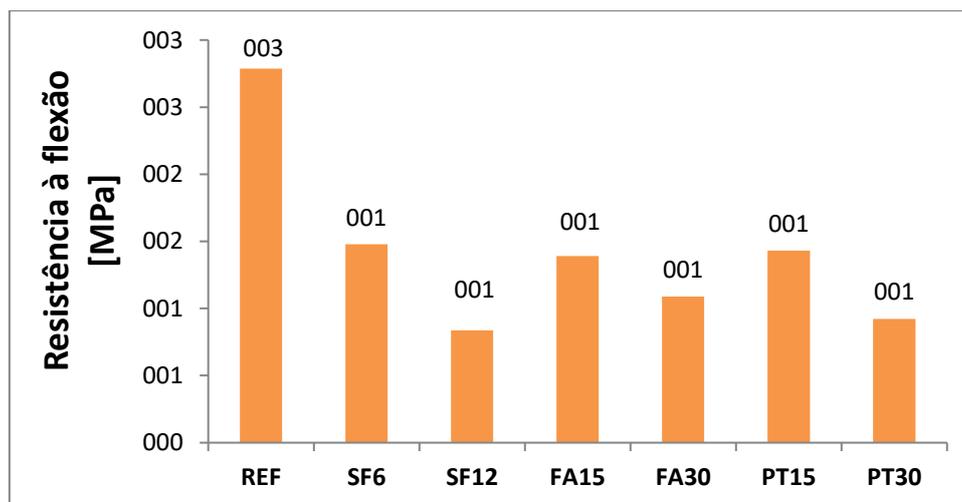


Figura 7.1 - Resistência à flexão das amostras ensaiadas

Modelos reológicos para caracterização de caldas hidráulicas

Os resultados demonstram que a calda de referência tem a maior resistência à flexão e que esta decresce com o aumento das adições de qualquer pozolana. A calda NHL5_SF6_0.8 apresenta a segunda maior resistência à flexão das amostras testadas, contudo não possui uma diferença considerável para as outras amostras que justificasse a sua utilização, compensando a flagrante desvantagem em termos reológicos da sílica de fumo.

O Quadro 7.2 apresenta os valores de força de compressão aos 28 dias, F_c , medidos em cada uma das amostras e a média de cada composição estudada.

Quadro 7.2 – Resultados do ensaio de compressão

Amostra	F _c (N)			
	A	B	C	Média
NHL5_0.8_REF	12126	9357	13235	11573
NHL5_SF6_0.8	11600	10048	9643	10430
NHL5_SF12_0.8	13258	11056	10558	11624
NHL5_FA15_0.8	7836	7935	9002	8258
NHL5_FA30_0.8	10380	9823	10748	10317
NHL5_PT15_0.8	6834	8136	10405	8458
NHL5_PT30_0.8	8219	6601	9185	8002

Aplicando a expressão (5.6), iremos obter as resistências à compressão aos 28 dias após a presa, R_c , que se podem observar na Figura 7.2.

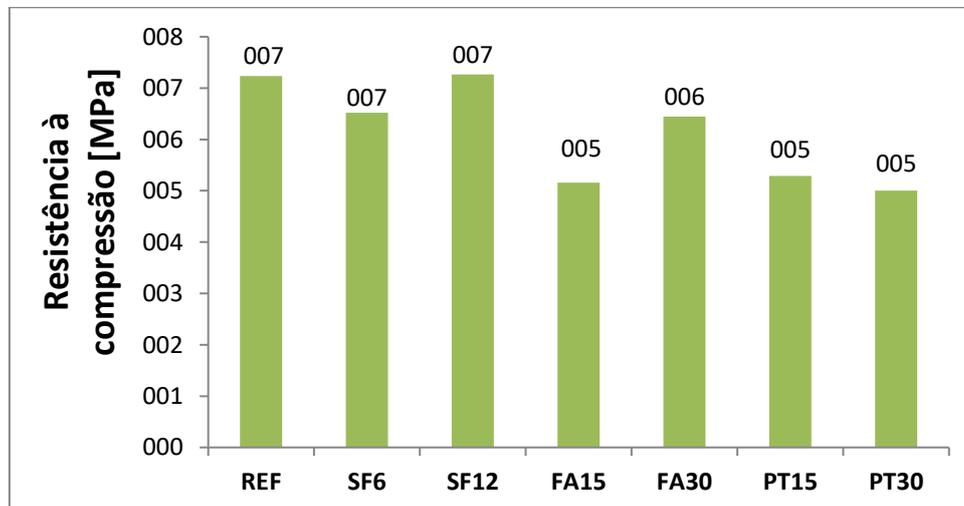


Figura 7.2 - Resistência à compressão das amostras ensaiadas

As amostras com cinzas volantes e pó de tijolo registam maior decréscimo de resistência à compressão, relativamente à calda de referência, do que as amostras com sílica de fumo. Porém, uma vez mais, essas diferenças não são tão elevadas que justifiquem a opção pelas caldas com sílica de fumo e façam esquecer o grande inconveniente em termos de fluidez e viscosidade deste tipo de pozolana.

7.2. Resultados do ensaio de determinação de massa volúmica e porosidade aberta

Os Quadros 7.3, 7.4 e 7.5 apresentam as medições da massa após condicionamento referido no subcapítulo 5.4, M_1 , da massa de pesagem em imersão, M_2 , e da massa de provete saturado, M_3 .

Quadro 7.3 - Medições da massa M_1

Amostra	M1 (g)			
	A	B	C	Média
NHL5_0.8_REF	42,94	43,45	41,77	42,72
NHL5_SF6_0.8	36,28	39,90	42,95	39,71
NHL5_SF12_0.8	58,96	30,34	28,11	39,14
NHL5_FA15_0.8	55,54	41,08	30,57	42,40
NHL5_FA30_0.8	46,49	35,75	48,21	43,48
NHL5_PT15_0.8	42,00	54,60	40,90	45,83
NHL5_PT30_0.8	41,95	43,04	44,15	43,05

Quadro 7.4 - Medições da massa M_2

Amostra	M2 (g)			
	A	B	C	Média
NHL5_0.8_REF	26,01	26,27	25,25	25,84
NHL5_SF6_0.8	21,29	23,40	25,21	23,30
NHL5_SF12_0.8	32,95	17,35	16,30	22,20
NHL5_FA15_0.8	32,92	24,25	18,09	25,09
NHL5_FA30_0.8	27,33	20,92	28,30	25,52
NHL5_PT15_0.8	25,01	31,63	24,52	27,05
NHL5_PT30_0.8	24,98	25,17	26,23	25,46

Quadro 7.5 - Medições da massa M_3

Amostra	M3 (g)			
	A	B	C	Média
NHL5_0.8_REF	58,66	60,22	57,05	58,64
NHL5_SF6_0.8	49,45	54,21	58,44	54,03
NHL5_SF12_0.8	77,88	40,92	38,51	52,44
NHL5_FA15_0.8	77,75	57,10	42,44	59,10
NHL5_FA30_0.8	63,29	48,85	65,99	59,38
NHL5_PT15_0.8	58,02	73,54	56,53	62,70
NHL5_PT30_0.8	58,46	58,74	61,04	59,41

Após a aplicação das expressões (5.7) e (5.8) obtiveram-se os valores de massa volúmica e porosidade aberta para todas as amostras, como mostram as Figuras 7.3 e 7.4.

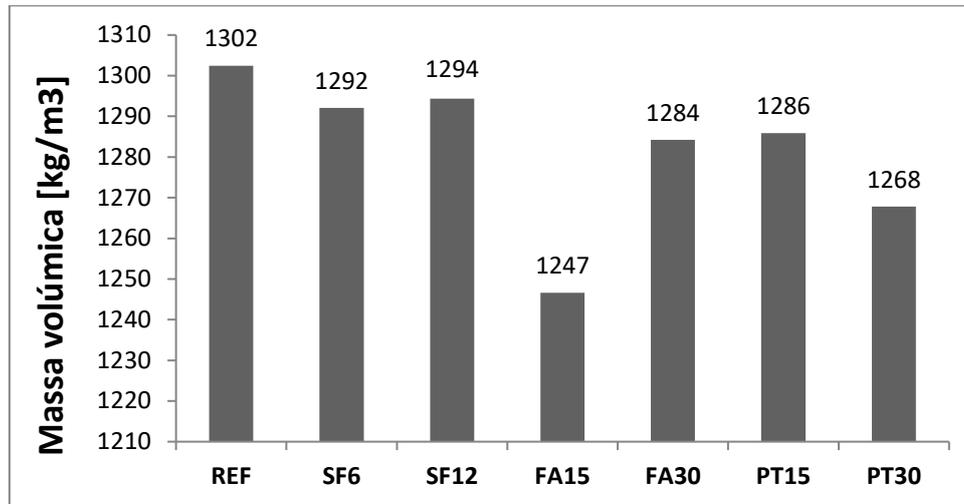


Figura 7.3 - Massa volúmica das amostras ensaiadas

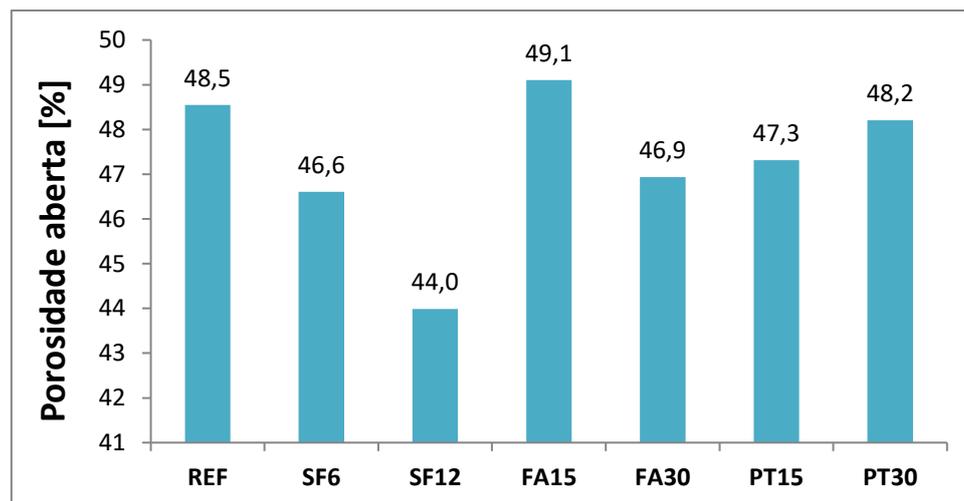


Figura 7.4 - Porosidade aberta das amostras ensaiadas

Os resultados obtidos não registam grandes variações de massa volúmica e porosidade aberta. Tal como acontece para as resistências mecânicas, a calda de referência apresenta a maior massa volúmica, propriedades que estão diretamente relacionadas. Entre as composições com pozolanas, as com sílica de fumo registam os maiores valores, porém não são diferenças que justifiquem a opção por esta pozolana, não compensando de todo o inconveniente em termos de fluidez e propriedades reológicas.

Quanto à porosidade aberta, as caldas com sílica de fumo registam os menores valores, embora a sua utilização seja descartada pelos motivos já referidos.

A calda NHL5_FA30_0.8, com 30 % de cinzas volantes na composição do ligante, ou a calda NHL5_PT15_0.8, com 15 % de pó de tijolo na composição do ligante, essas sim podem justificar a sua utilização, se um dos principais requisitos for a baixa capilaridade, uma vez que

7. Análise de resultados dos ensaios com provetes de calda endurecida

registram significativas diminuições de porosidade aberta em relação à calda de referência, para além da diminuição de custos associada à substituição parcial de pozolana por ligante.

Porém, deve ter-se em conta que a capilaridade depende não só da porosidade aberta, como também da forma e dimensão dos poros e da tortuosidade - a estrutura porosa da calda hidráulica - sendo necessários outros ensaios complementares de porometria.

Se um dos requisitos principais da calda de injeção for a elevada permeabilidade ao vapor de água, a calda de referência e as caldas NHL5_FA15_0.8 e NHL5_PT30_0.8 podem ser composições a considerar, uma vez que registam os maiores valores de porosidade aberta.

Também neste caso se chama à atenção que a permeabilidade ao vapor de água pode não crescer diretamente com a porosidade aberta, pois também depende da estrutura dos poros no interior do material.

7.3. Resultados do ensaio de termogravimetria

Os resultados do ensaio de termogravimetria refletem o que era esperado: a amostra de referência, que contém apenas cal hidráulica natural NHL 5 (sem pozolanas) na sua constituição, apresenta a maior perda de massa no pico do meio (localizado no intervalo entre os 400 e os 600 °C), o que corresponde ao maior teor de hidróxido de cálcio, justificado pela ausência de pozolanas a reagir com este composto.

Quanto às amostras com pozolanas, a maiores dosagens de cinzas volantes ou pó de tijolo, correspondem menores perdas de massa no segundo pico e consequentemente maiores reatividades pozolânicas, como mostram os gráficos das Figuras 7.5 e 7.6.

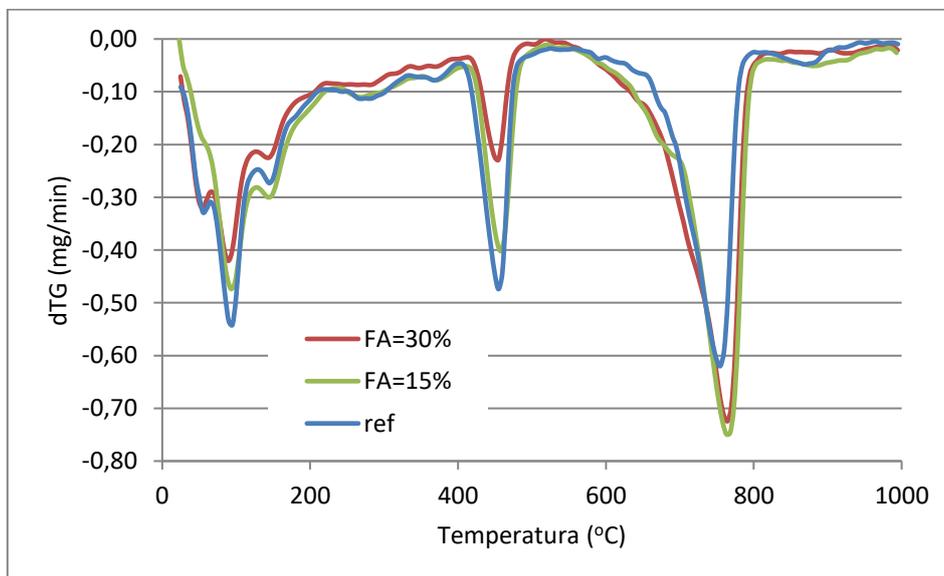


Figura 7.5 - Resultados do ensaio de termogravimetria para as amostras com cinzas volantes

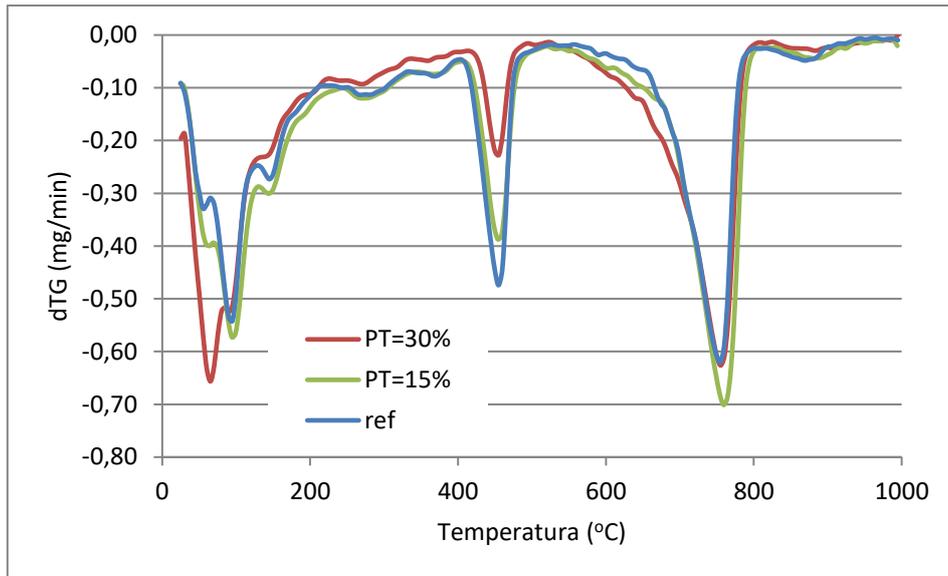


Figura 7.6 - Resultados do ensaio de termogravimetria para as amostras com pó de tijolo

Nos gráficos, o eixo vertical expressa a derivada da perda de massa, em mg, em ordem ao tempo, em minutos. Quanto maior é o valor da derivada, maior será a velocidade de perda de massa para o correspondente valor de temperatura.

No caso das amostras com sílica de fumo, não ocorre diferença significativa no pico do meio entre as composições com 6 % e com 12 % desta pozolana. Aumentando a dosagem de sílica de fumo, não aumentamos significativamente a reatividade pozolânica, como mostra o gráfico da Figura 7.7.

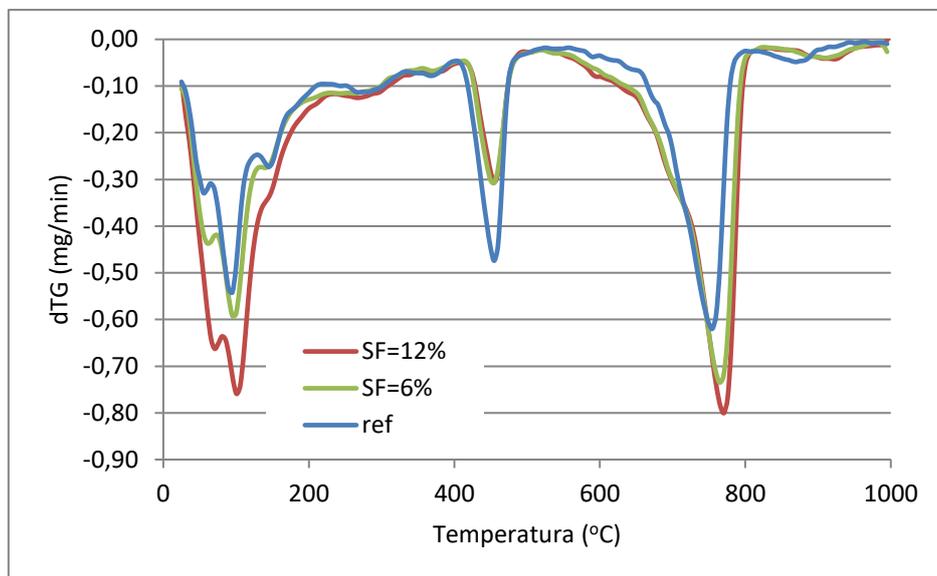


Figura 7.7 - Resultados do ensaio de termogravimetria para as amostras com sílica de fumo

Sobrepondo os resultados para as maiores dosagens de todas as pozolanas, concluímos que as cinzas volantes e o pó de tijolo apresentam reatividades pozolânicas semelhantes e

7. Análise de resultados dos ensaios com provetes de calda endurecida

superiores à amostra com 12 % de sílica de fumo na sua composição de ligante, como se observa na Figura 7.8.

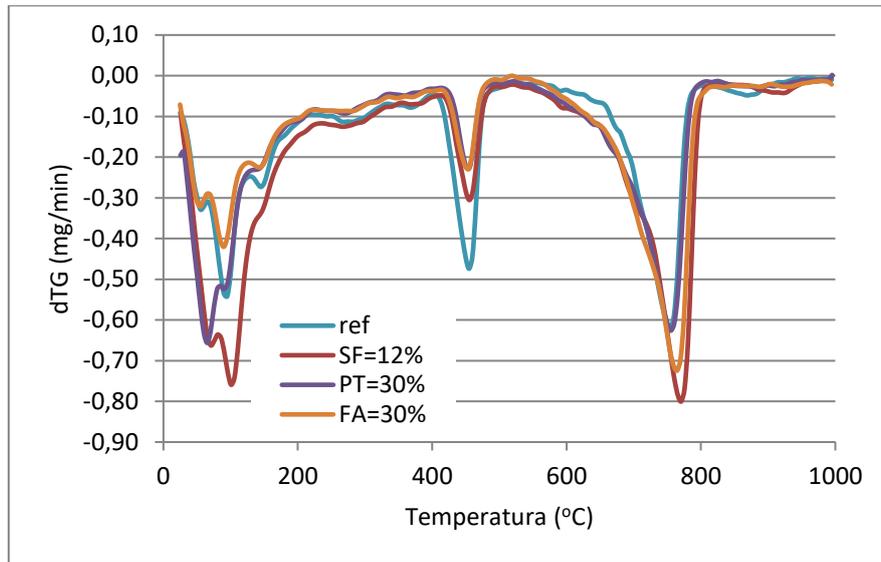


Figura 7.8 - Resultados do ensaio de termogravimetria para as amostras com as maiores dosagens de pozolanas

8. Conclusões

8.1. Considerações finais

O crescente interesse em preservar o património edificado leva à otimização de técnicas de consolidação de soluções construtivas que atualmente já não são utilizadas, mas que estão associadas à maioria dos edifícios antigos presentes nos centros urbanos em Portugal e na Europa. A caracterização reológica de caldas de injeção para consolidação de paredes antigas em alvenaria de pedra é determinante para que sejam criadas as metodologias e desenvolvidas as formulações mais adequadas para a conservação e consolidação destas soluções construtivas.

Neste contexto, na presente dissertação foram selecionados sete modelos reológicos que tinham demonstrado uma boa adequabilidade em estudos de escoamento de outros materiais, nomeadamente polímeros viscosos com o fim de comprovar o seu desempenho em caldas hidráulicas para consolidação de alvenarias.

No cômputo geral, os modelos reológicos apresentaram uma adequabilidade que varia de níveis satisfatórios a muito bons às diversas composições de calda hidráulica ensaiadas, sendo viável a sua utilização para estimar o escoamento no estado fresco e, com base nos dados fornecidos pelo modelo, definir a pressão de injeção a adotar de modo a obter o melhor grau de consolidação possível sem descuidar a segurança estrutural das construções.

Dos modelos que expressam os valores de tensão de corte em função da taxa de corte, os de Bingham e Herschel-Bulkley apresentam a lacuna de não reproduzir de modo fiável o comportamento caracteristicamente reofluidificante das caldas hidráulicas, durante a aplicação das menores taxas de corte quando esta inicia o escoamento, obtendo-se gráficos dos modelos com traçado a tender para retas, ao passo que o dos resultados experimentais descreve uma curva de concavidade virada para baixo, ilustrando a diminuição acentuada das viscosidades aparentes na primeira fase de aplicação de taxas de corte pelo reómetro rotacional. Assim, os valores de tensão de cedência e viscosidade aparente para muito baixas taxas de corte das várias composições são sempre sobrestimados com a utilização destes modelos. Após o crescimento inicial das taxas de corte, a partir de valores entre os 5 e 10 s⁻¹, os gráficos dos modelos de Bingham e Herschel-Bulkley tendem a convergir com os dos resultados experimentais, evidenciando uma boa adequabilidade para médias e altas taxas de corte.

O modelo da Lei da Potência, devido à sua natureza mais simplicista, relativamente a Herschel-Bulkley e Bingham, em que não considera a grandeza “*tensão de cedência, σ_0* ” na sua expressão, apresenta claras limitações na sua aplicação. Assim, este modelo foi aplicado a uma gama de taxas de corte mais restrita, com valores entre os 0,5 e os 60 s⁻¹, registando uma boa adequabilidade dentro deste domínio, ilustrando o comportamento caracteristicamente reofluidificante das caldas hidráulicas. Uma vez que os valores de tensão de cedência e viscosidade aparente para muito baixas taxas de corte são parâmetros essenciais para seleccionar a calda de injeção em consolidação de alvenarias, o modelo da Lei da Potência é uma boa opção uma vez que fornece estimativas muito boas para esses valores para todas as composições, como se observa no Quadro 6.13.

Entre o grupo de modelos utilizado que expressa o valor de tensão de corte em função da taxa de corte, destaca-se o de Casson que apresenta as melhores estimativas de tensão de cedência e viscosidade aparente para muito baixas taxas de corte, $\eta_{0,5}$. Além disso, este modelo descreve o traçado mais realista do desempenho reológico da calda hidráulica, com um comportamento vincadamente reofluidificante para baixas taxas de corte, que ocorrem após o fluido partir do repouso e iniciar o escoamento. Numa análise estatística, este modelo regista o menor erro absoluto global, dado pelo somatório dos módulos das diferenças entre o valor do modelo e o valor medido no ensaio para todos os pontos. Quanto à distribuição de erro, esta é regular e equilibrada como se observa no traçado dos gráficos, que pouco divergem do gráfico dos resultados experimentais, sem descontinuidades e desvios significativos.

Os modelos de Sisko e Carreau apresentam uma boa adequabilidade em todas as composições para baixas taxas de corte, fornecendo razoáveis estimativas de tensão de cedência e viscosidade aparente para muito baixas taxas de corte. Para altas taxas de corte, superiores aos 50 a 80 s^{-1} , estes modelos sobrestimam consideravelmente os valores de viscosidade aparente, não apresentando convergência dos traçados dos gráficos do modelo e dos resultados experimentais com o aumento das taxas de corte, ao contrário do que acontece na aplicação de outros modelos.

O modelo de Cross devido à natureza da sua expressão matemática, que define um ponto de inflexão onde ocorre inversão de concavidade, não é adequado para estimar os parâmetros reológicos das caldas nas mais baixas taxas de corte, até cerca dos 2 ou 3 s^{-1} . Após esse valor, o modelo regista uma boa adequabilidade com traçado semelhante ao gráfico dos resultados experimentais e diferenças de erro reduzidas. Exceto para estimar a tensão de cedência e a viscosidade aparente para muito baixas taxas de corte, podemos considerar o modelo de Cross bom e adequado para descrever o comportamento reológico das várias composições estudadas.

É de salientar que estes ajustes e resultados dizem respeito à gama de taxas de corte estudada (até valores próximos dos 300 s^{-1}), sendo esta adequada para os fins a que se destinam as caldas hidráulicas de consolidação, sendo estas sujeitas a taxas de corte de valores compreendidos nessa gama durante o processo de injeção de caldas. O estudo de uma gama de taxas de corte diferente poderá conduzir a conclusões diferentes.

Outro aspeto que esta dissertação abordou foi a influência das adições nas propriedades reológicas das caldas hidráulicas, realizando-se o estudo e ensaios experimentais de três diferentes pozolanas: cinzas volantes, pó de tijolo e sílica de fumo.

Tal como afirmavam estudos anteriores, verificou-se experimentalmente que o aumento das dosagens de cinzas volantes e de pó de tijolo melhora o comportamento reológico da calda hidráulica, diminuindo a viscosidade aparente e tensão de cedência. As resistências à flexão e compressão sofrem uma significativa diminuição com o aumento da quantidade de pozolana na composição. Assim, os requisitos mecânicos da calda de consolidação podem ditar o limite da dosagem de pozolana.

Para as amostras com sílica de fumo, os resultados experimentais corroboraram uma vez mais os estudos anteriores, comprovando a influência negativa desta pozolana nos parâmetros reológicos da calda hidráulica, diminuindo a fluidez e aumentando a viscosidade aparente. Apenas a composição com 2 % de sílica de fumo no teor de ligante é viável como calda de consolidação, para as dosagens de água e superplastificante adotadas no âmbito deste estudo e devidamente justificadas e otimizadas, registando um ligeiro aumento de viscosidade e tensão de cedência relativamente à amostra de referência.

As propriedades físicas massa volúmica e porosidade aberta, que podem ter influência em fenómenos como a capilaridade e a migração de vapor de água, não apresentam diferenças significativas, apesar de a massa volúmica ter tendência a diminuir com a utilização de cinzas volantes e pó de tijolo como adições do teor de ligante.

As composições com sílica de fumo, por esta representar apenas 2 a 12 % do teor de ligante, mantendo maiores dosagens de cal hidráulica natural, apresentam melhores resistências mecânicas do que as amostras com cinzas volantes e pó de tijolo, representando estas 5 a 30 % do teor de ligante, logo as suas composições possuem menores quantidades de cal hidráulica natural. Contudo, não são melhorias significativas que justifiquem a preferência pelas amostras com sílica de fumo, dado o grande inconveniente reológico em termos de reduzida fluidez e elevada viscosidade.

Como seria de esperar, a reatividade pozolânica, dada pela capacidade da pozolana reagir com o hidróxido de cálcio do ligante e formar compostos com propriedades ligantes, aumenta com a quantidade de pozolana na composição da calda. As amostras com cinzas volantes e pó de tijolo apresentam maior reatividade pozolânica do que as composições com sílica de fumo, pois também possuem maiores dosagens da respetiva pozolana.

8.2. Trabalhos futuros

Esta dissertação pretende contribuir para um consenso no que respeita à utilização dos modelos reológicos existentes na caracterização reológica de caldas hidráulicas para consolidação de alvenarias antigas. Estudos anteriores sobre a reologia das caldas hidráulicas, efeito das dosagens de pozolanas, água e superplastificantes serviram de base para formular as composições para ensaio reológico com reómetro rotacional e posterior aplicação de modelos aos resultados experimentais. Assim, também este estudo pretende servir de base a futuros projetos, apresentando-se um conjunto de sugestões:

- Utilização das composições com melhores resultados reológicos e variar as dosagens de água e/ou superplastificante para o ensaio com o reómetro rotacional. Registrar os resultados experimentais e aplicar os modelos reológicos visados neste estudo e/ou outros e verificar se para as novas composições os modelos mais adequados voltam a demonstrar o mesmo desempenho;
- Aferição de outras propriedades das caldas hidráulicas no estado endurecido, nomeadamente a aderência, a permeabilidade ao vapor de água, a capilaridade, a resistência aos sais, a retração, a dilatação térmica e a porometria.
- Ensaio de injetabilidade das melhores composições num meio poroso que simule as condições de alvenaria;
- Ensaio com reómetro rotacional e aplicação dos melhores modelos a caldas hidráulicas com outro tipo de ligante para além da cal hidráulica natural ou até mesmo para betões e argamassas.

9. Bibliografia

- [1] Carta de Atenas sobre o restauro de monumentos históricos; Serviço Internacional de Museus da Sociedade das Nações; Atenas, Grécia, 1931. ASTM E1131-08, Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.
- [2] Carta de Veneza sobre a conservação e o restauro de monumentos e sítios; ICOMOS; Veneza, Itália, 1964.
- [3] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Jericó> (Consultado em 04-02-2018)
- [4] Coutinho, A. de Sousa. (2006). *Fabrico e Propriedades do Betão (4.ª Edição)* Edição LNEC, Lisboa.
- [5] <https://www.grecotour.com/> (Consultado em 04-02-2018)
- [6] <http://www.avignon-et-provence.com/> (Consultado em 04-02-2018)
- [7] <http://pt.wahooart.com/> (Consultado em 07-02-2018)
- [8] <http://soitaliano.com.br/> (Consultado em 07-02-2018)
- [9] <https://efemeridesdoefemello.com/> (Consultado em 07-02-2018)
- [10] <http://anavedobomgosto.blogspot.com/> (Consultado em 07-02-2018)
- [11] Baltazar, L.G. (2014). *Rheology of natural hydraulic lime grouts for masonry consolidation*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [12] <http://www.resinproget.it/> (Consultado em 11-02-2018)
- [13] <http://www.edilezanola.it/> (Consultado em 11-02-2018)
- [14] Córias, V. (2009). *Inspeções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios (2.ª Edição)*. IST PRESS, Lisboa.
- [15] <http://www.ncrep.pt/section.php?id=1440> (Consultado em 11-02-2018)
- [16] <https://www.sciencedirect.com/> (Consultado em 11-02-2018)
- [17] <https://www.masoncontractors.org/> (Consultado em 11-02-2018)
- [18] <https://www.wonkeedonkeetools.co.uk/> (Consultado em 15-02-2018)
- [19] <http://nbmcw.com/> (Consultado em 15-02-2018)
- [20] <http://www.tecnored.it/en/consolidamento-murature/> (Consultado em 15-02-2018)
- [21] Da Costa, F.P. (1955). *Enciclopédia Prática da Construção Civil*. Portugalia Editora, Lisboa
- [22] <http://db.world-housing.net/> (Consultado em 12-03-2018)

- [23] Pinho, F.F.S. (2008). *Paredes de Edifícios Antigos em Portugal* (2.^a Edição) Edição LNEC, Lisboa.
- [24] <https://paginas.fe.up.pt/> (Consultado em 12-03-2018)
- [25] <https://coisasdaarquitectura.wordpress.com/> (Consultado em 12-03-2018)
- [26] <https://clipartxtras.com/> (Consultado em 12-03-2018)
- [27] <http://www.theconstructioncivil.org/wp-content/uploads/2013/04/4-Flemish-Bond.jpg> (Consultado em 12-03-2018)
- [28] <http://civilconstructiontips.blogspot.com/> (Consultado em 12-03-2018)
- [29] <http://www.theconstructioncivil.org/wp-content/uploads/2013/04/3-English-bond.jpg> (Consultado em 12-03-2018)
- [30] Cidade, M.T.V. (2005). *Reologia de Polímeros. Texto de Apoio*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [31] <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0914/newtonian-fluid/> (Consultado em 24-03-2018)
- [32] Barnes, H.A. 2000. "A Handbook of Elementary Rheology." Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, University of Wales.
- [33] Miguel, D.. (2017). *Influência do tipo e dosagem de hidrófugo na reologia de caldas de injeção*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [34] Kong, X.; Zhang, Y.; Hou, S.; (2013) *Study on the rheological properties of Portland cement pastes with polycarboxylate superplasticizers*. *Rheol Acta*. 52, pp. 707-718.
- [35] Baltazar, L.G.; Jorne, F.; Cidade, M.T.; Henriques, F.M.A. (2013). *The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls*. *Rheol Acta*, 52(2), pp. 127-138.
- [36] <http://theconcreteportal.com/> (Consultado em 24-03-2018)
- [37] <http://sharcnet.ca/> (Consultado em 24-03-2018)
- [38] Brewer, D.R.; Franco, J.M.; Garcia-Zapateiro, L.A. (2016). *Rheological properties of oil-in-water emulsions prepared with oil and protein isolates from sesame (Sesamum Indicum)*. *Food Sci. Technol, Campinas*, 36(1): pp. 64-69.
- [39] <http://azom.com/> (Consultado em 02-04-2018)
- [40] Xie, J.; Jin, Y. (2016). *Parameter determination for the Cross rheology equation and its application to modeling non-Newtonian flow using the WC-MPS method*. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 1, pp. 111-129.
- [41] <https://www.asme.org/> (Consultado em 02-04-2018)
- [42] Tian, Z.; Duan, L.; Wu, L.; Shen, L.; Li, G. (2016). *Rheological properties of glutaraldehyde-crosslinked collagen solutions analysed quantitatively using mechanical models*. *Materials Science and Engineering, C* 63, pp. 10-17.

- [43] <http://drilling-mud.org/> (Consultado em 03-04-2018)
- [44] Baltazar, L.G.; Henriques, F.M.A.; Gouveia, T.; Cidade, M.T. (2018). *Rheological properties of injection grouts incorporating nano-silica. Annual European Rheological Conference (AERC 2018). Sorrento, 17- 20 de Abril.*
- [45] <http://www.freestudy.co.uk/> (Consultado em 03-04-2018)
- [46] Kelessidis, V.C.; Maglione, R. (2006). *Modeling rheological behavior of bentonite suspensions as Casson and Robertson-Stiff fluids using Newtonian and true shear rates in Couette viscometry. Powder Technology, 168, pp. 134-147.*
- [47] Gomes, A. (2013). *Gesso e Cal de Construção. Apontamentos de Materiais de Construção I. IST, Lisboa*
- [48] Nehdi, M.; Rahman, M.-A. (2004). *Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. Cement and Concrete Research, 34, pp. 1993-2007.*
- [49] IPQ. NP EN 459-1:2011. *Cal de construção. Parte 1 - Definições, especificações e critérios de conformidade. Monte da Caparica, IPQ, 2011.*
- [50] https://www.secilargamassas.pt/uploads/documentos/Ficha_Tecnica_NHL_5.pdf
(Consultado em 08-04-2018)
- [51] Baltazar, L.G.; Henriques, F.M.A. (2015). *Rheology of grouts for masonry injection. Key Engineering Materials; Vol.624, pp. 283-290. Trans Tech Publications, Switzerland.*
- [52] Rahman, M.K.; Baluch, M.H.; Malik, M.A.; (2014). *Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. . Construction and Building Materials 50, pp. 710-717.*
- [53] IPQ. NP EN 196-1:1990. *Métodos de ensaio de cimentos. Lisboa, IPQ, 1990.*
- [54] IPQ. NP EN 1936:2008. *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Monte da Caparica, IPQ, 2008.*
- [55] ASTM E1131-08, *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.*
- [56] Matos, J. (2013). *Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de poliacarboxilato. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa*

10. Anexos

Anexo I – Resultados das medições reológicas das caldas com pozolanas

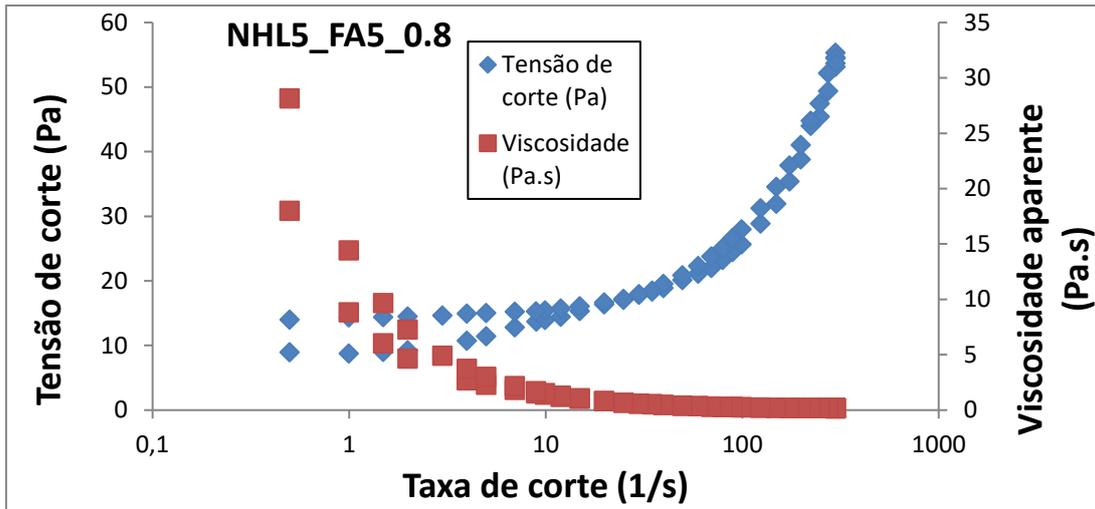


Figura 10.1 – Curvas de fluxo da calda NHL5_FA5_0.8

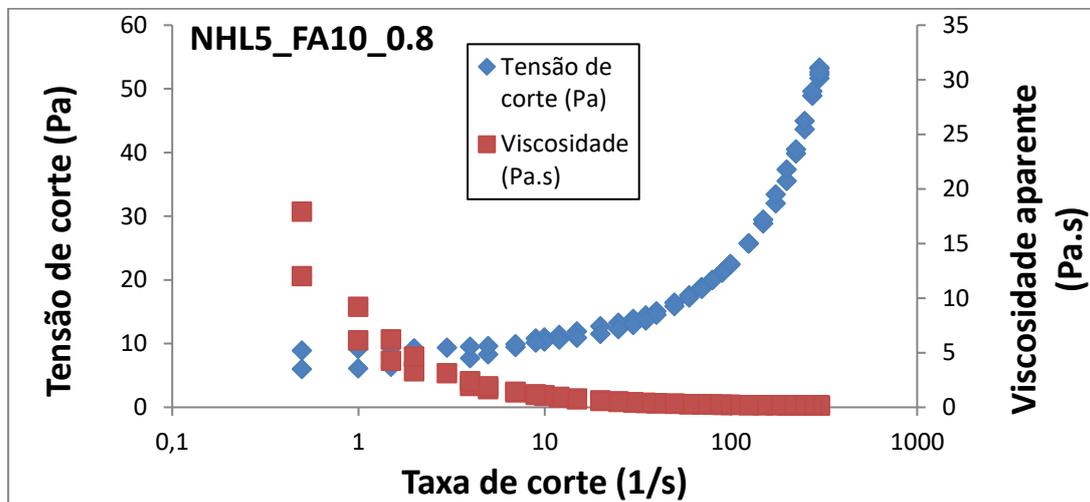


Figura 10.2 – Curvas de fluxo da calda NHL5_FA10_0.8

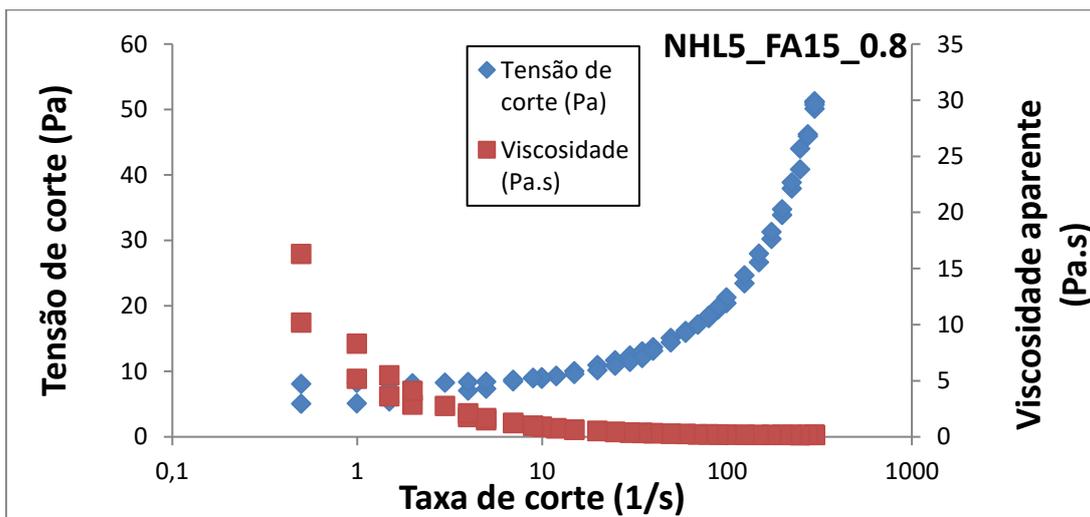


Figura 10.3 – Curvas de fluxo da calda NHL5_FA15_0.8

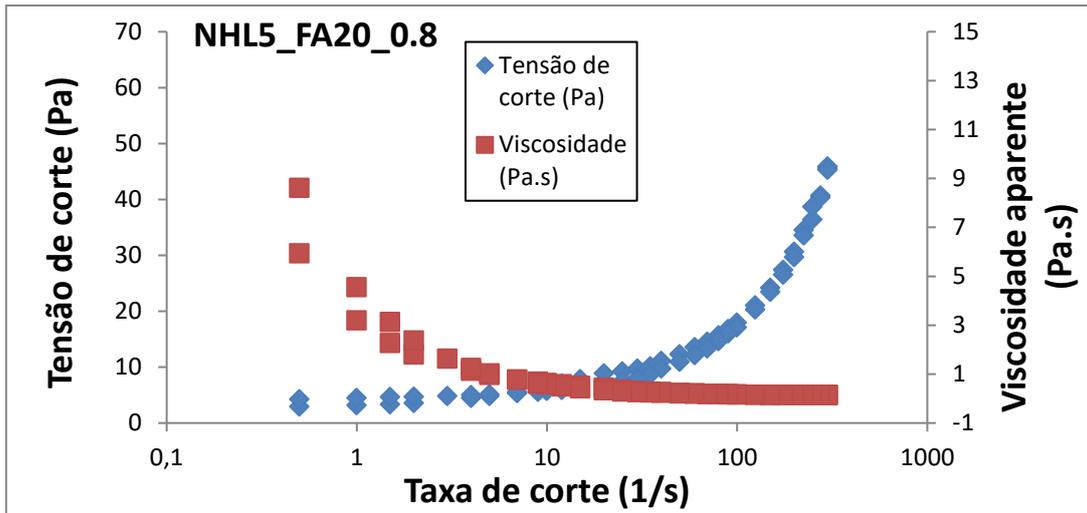


Figura 10.4 - Curvas de fluxo da calda NHL5_FA20_0.8

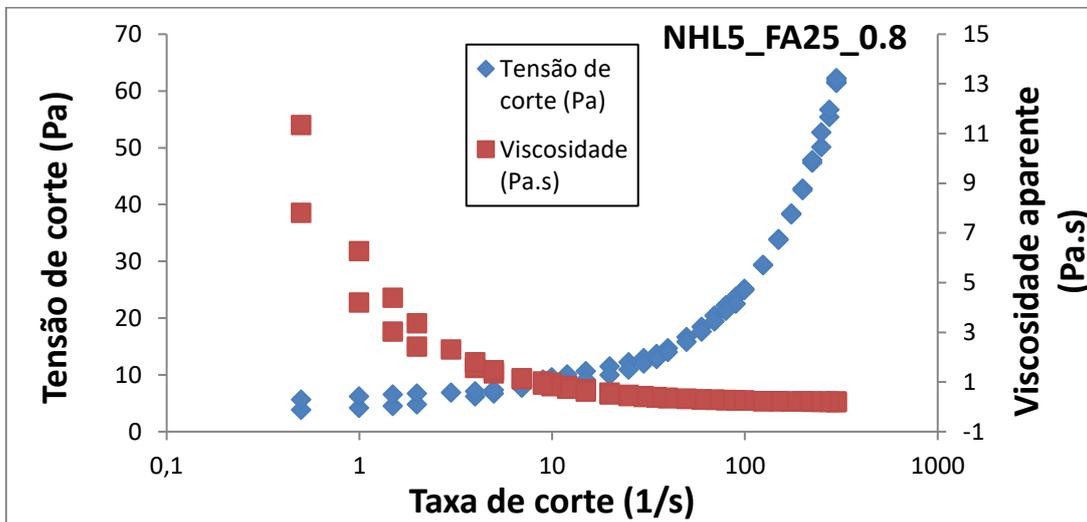


Figura 10.5 - Curvas de fluxo da calda NHL5_FA25_0.8

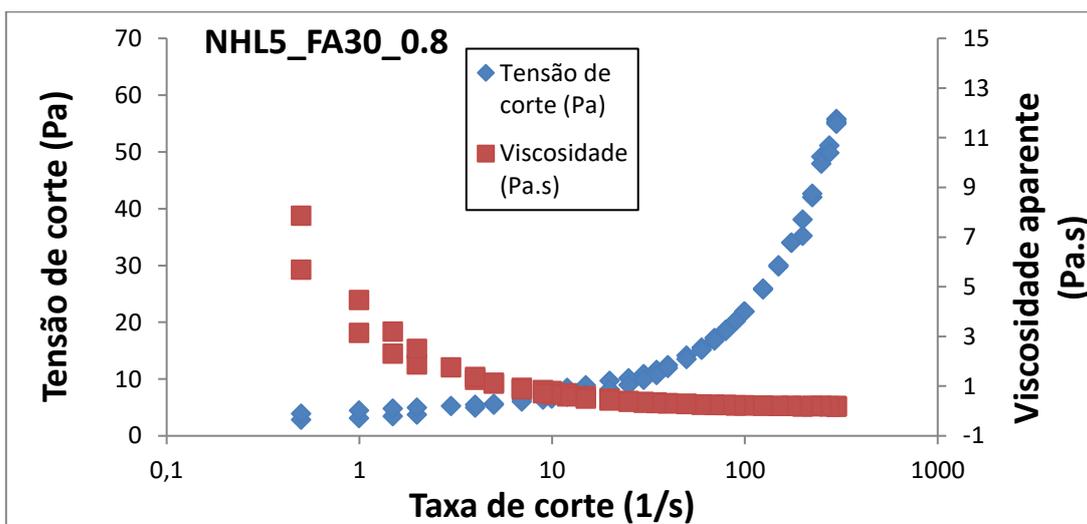


Figura 10.6 - Curvas de fluxo da calda NHL5_FA30_0.8

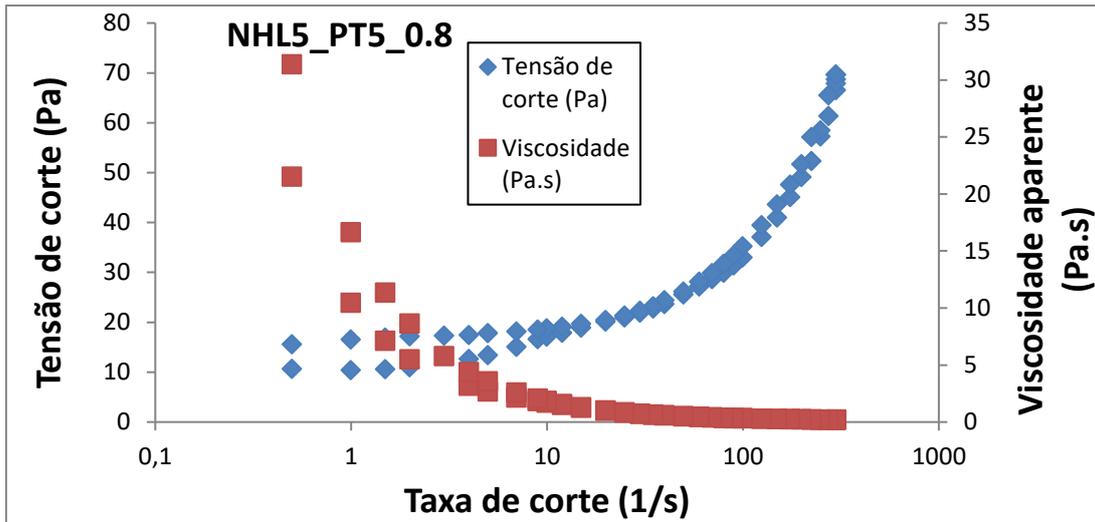


Figura 10.7 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT5_0.8

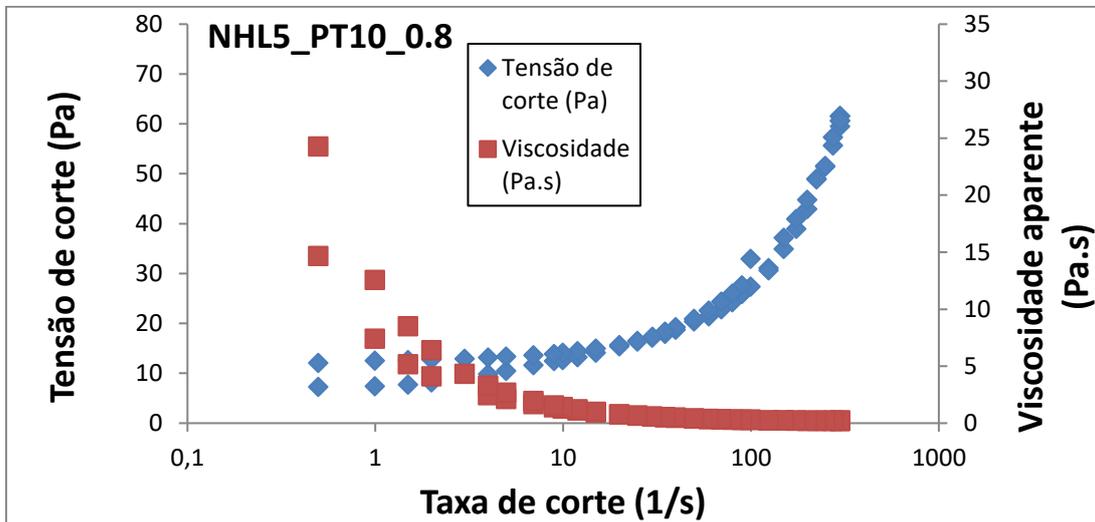


Figura 10.8 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT10_0.8

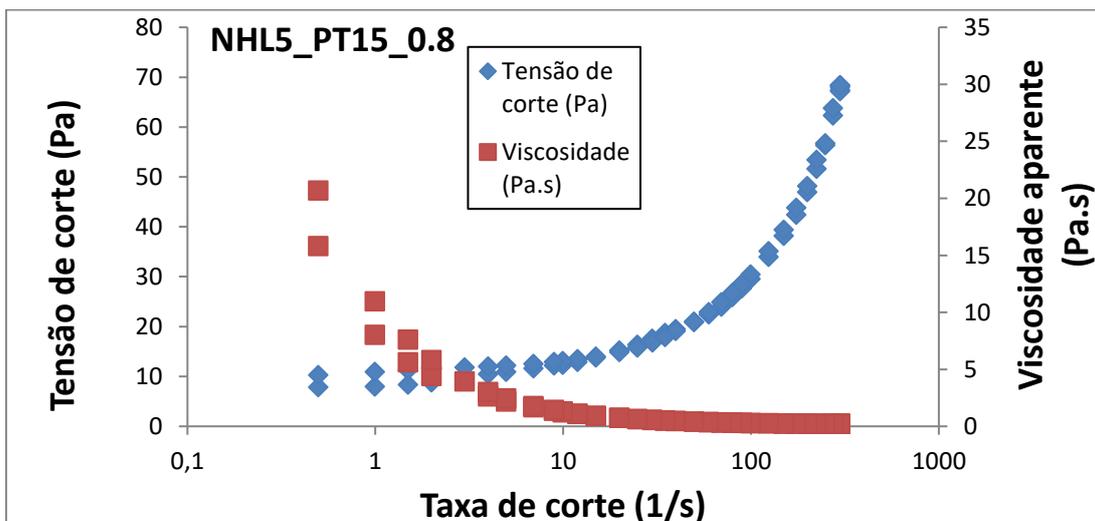


Figura 10.9 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT15_0.8

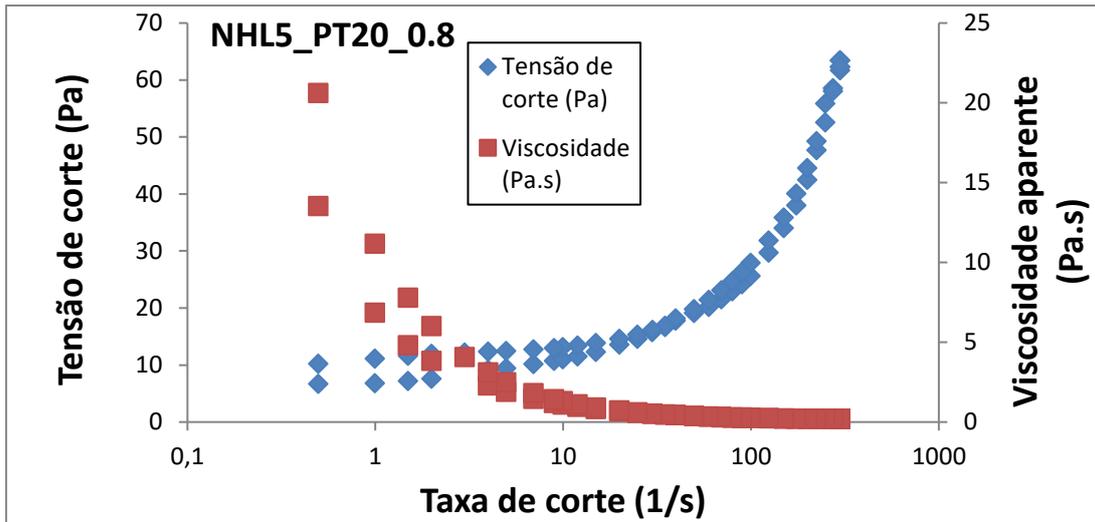


Figura 10.10 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT20_0.8

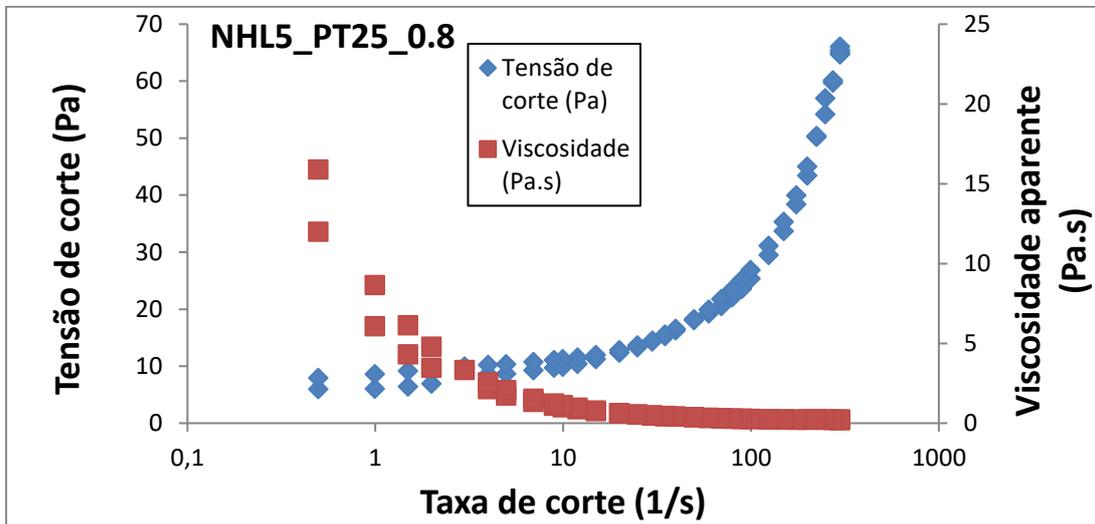


Figura 10.11 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT25_0.8

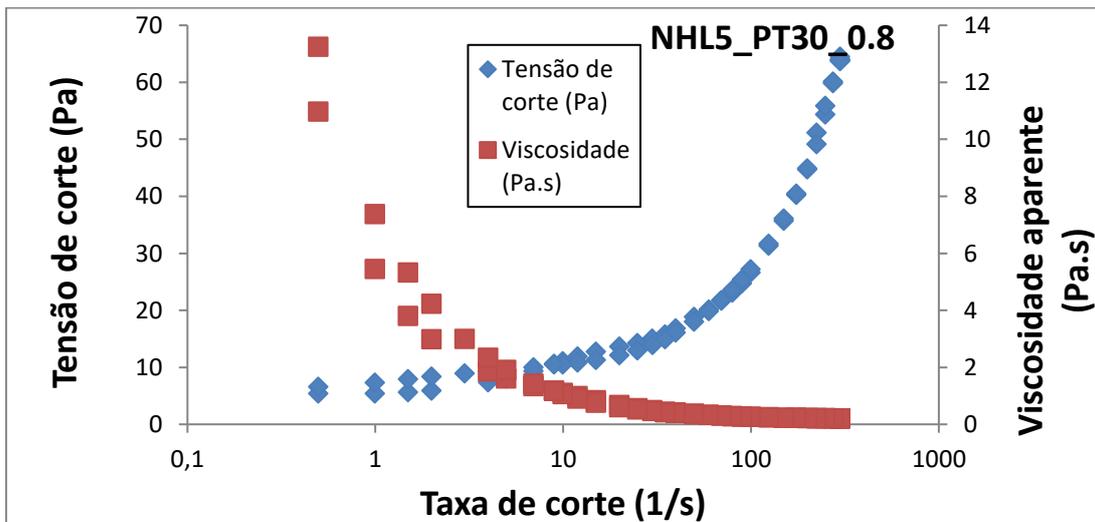


Figura 10.12 - Curvas de fluxo da calda NHL5_PT30_0.8

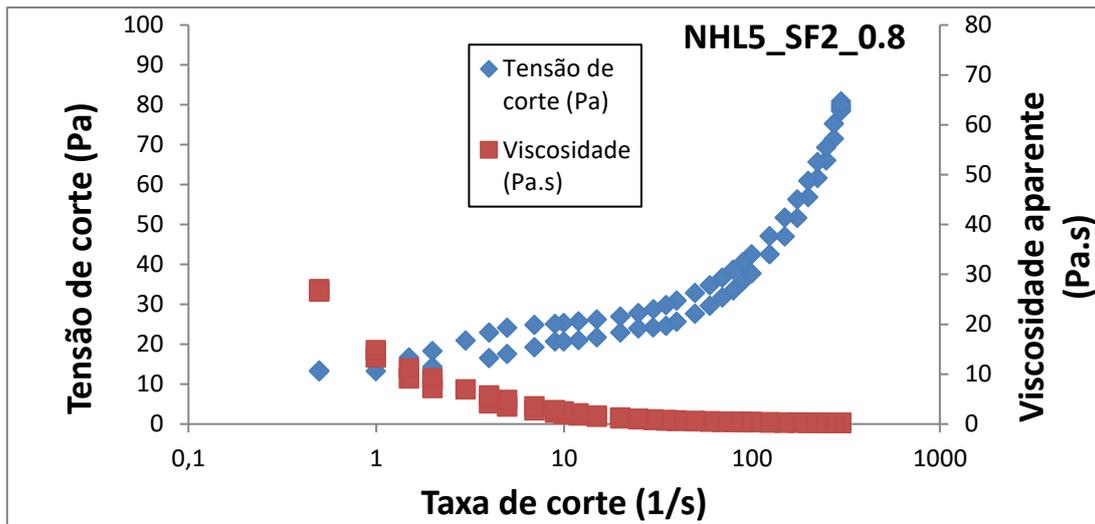


Figura 10.13 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF2_0.8

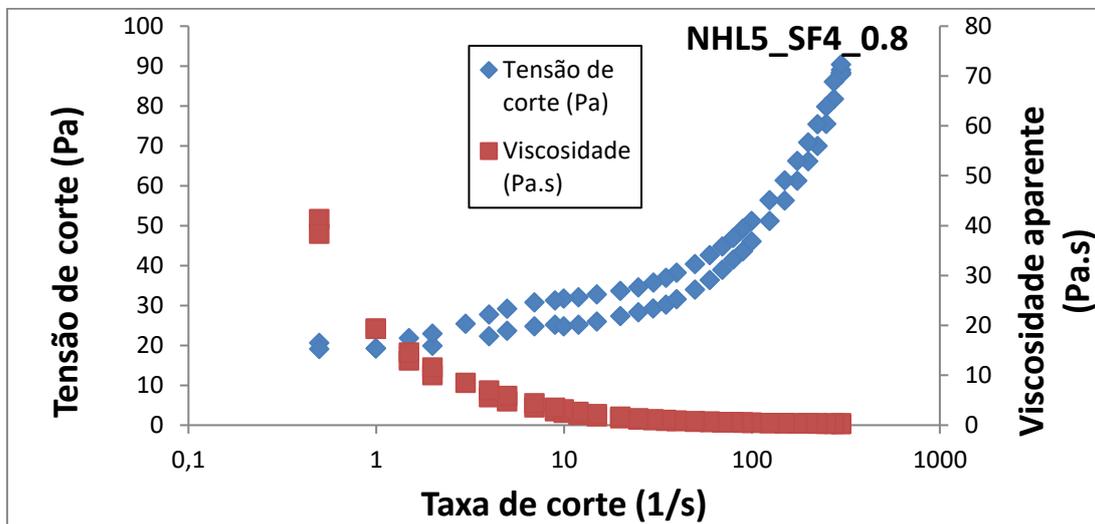


Figura 10.14 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF4_0.8

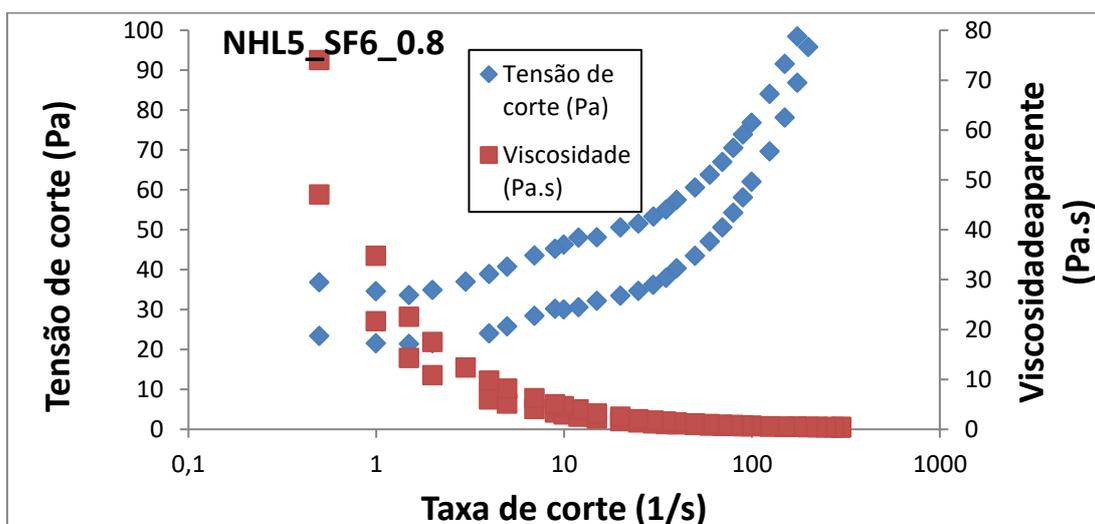


Figura 10.15 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF6_0.8

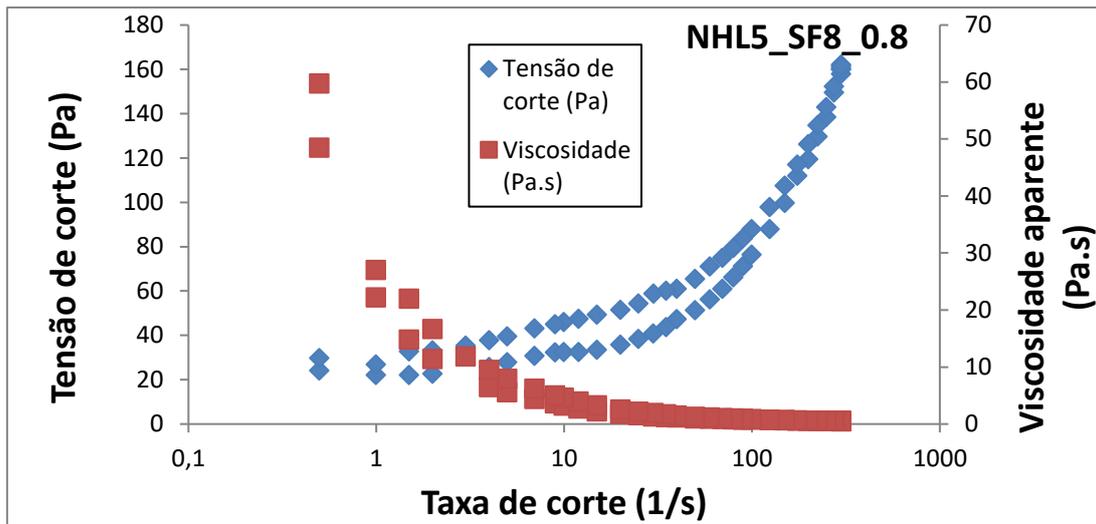


Figura 10.16 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF8_0.8

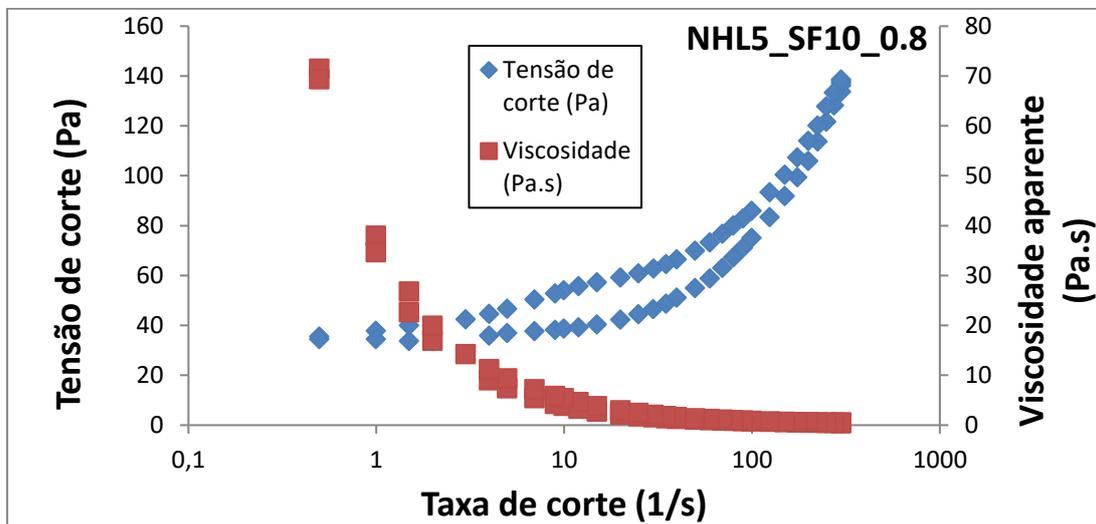


Figura 10.17 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF10_0.8

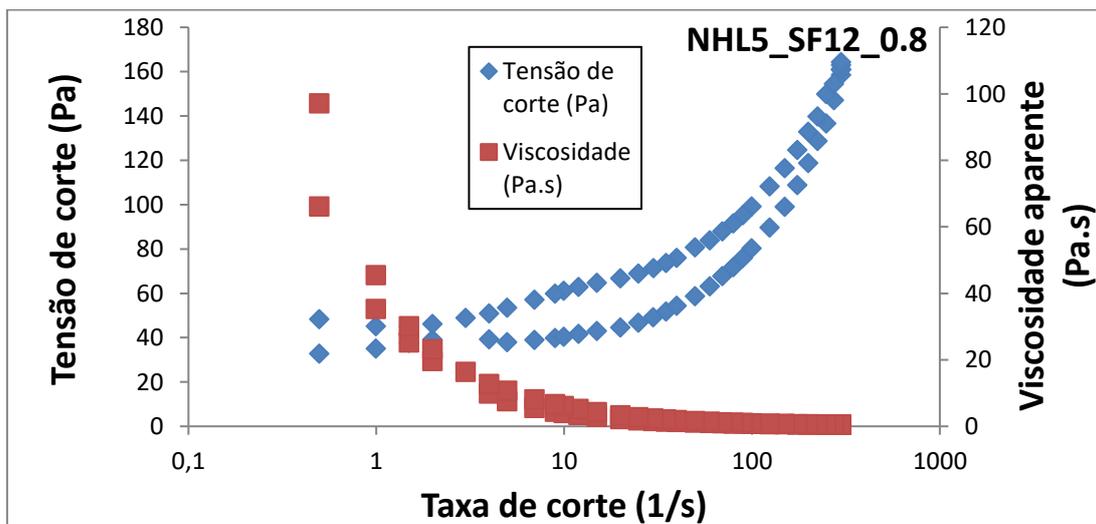


Figura 10.18 - Curvas de fluxo da calda NHL5_SF12_0.8