



Ana Lúcia Freitas Carvalho

Licenciada em Engenharia Geológica

Caracterização de pasta de enchimento de desmontes numa extracção de sulfuretos polimetálicos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica

Orientadora: Doutora Eng.^a Paula F. da Silva, Prof.^a Auxiliar, Geo-Biotec & DCT, FCT, Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutor Eng.^o Fernando Farinha da Silva Pinho, Prof. Auxiliar, CERIS & DEC, FCT, Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidentes: Doutor José António de Almeida,
Prof. Associado - FCT/UNL

Arguentes: Licenciado António Afonso Coelho Delgado,
Direcção de Obras Subterrâneas da ALMINA

Vogais: Doutora Paula F. da Silva,
Prof.^a Auxiliar - FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Caracterização de pasta de enchimento de desmontes numa extracção de sulfuretos polimetálicos

Copyright © Ana Lúcia Freitas Carvalho, 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.

Dedico esta dissertação aos meus pais e avós.

Agradecimentos

À minha orientadora, Professora Doutora Ana Paula Silva, pela paciência, disponibilidade, apoio em todo este percurso académico e pela amizade o meu muito obrigado.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor Fernando Pinho, pela disponibilidade e auxílio prestado, os meus sinceros agradecimentos.

À Almina, pela oportunidade incrível de desenvolver esta investigação, especialmente ao seu administrador, Sr. Engenheiro Arménio Pacheco e ao seu director-técnico Sr. Engenheiro António Delgado.

À Engenheira Ana Raquel Martinho, pelo auxílio e ajuda durante todo este percurso, pela disponibilidade prestada em me receber sempre de braços abertos e por todo o conhecimento partilhado que tornou possível esta investigação.

Ao Rúben Rodrigues, pelo acompanhamento durante este percurso e por todo o conhecimento transmitido o meu especial agradecimento. Ao Cláudio Fragoso, Francisco Pereira e a todo o pessoal do laboratório geotécnico da Almina por me terem ajudado e recebido tão bem durante o tempo ali passado, os meus sinceros agradecimentos.

À Professora Doutora Maria Manuela Simões e ao Professor Doutor Nuno Leal, pela disponibilidade e apoio especializado durante este estudo. Ao Professor Doutor Rui Silva, do CENIMAT, pela disponibilidade e apoio durante a utilização do SEM.

Ao Professor Doutor Fernando Lidon, a amável cedência do colorímetro para o estudo dos provetes.

A todos os Professores, do Departamento de Ciências da Terra, pela transmissão de conhecimentos, apoio e disponibilizada ao longo do percurso académico.

Ao Engenheiro Vítor Silva, por me ter acompanhado durante este percurso, ao longo dos ensaios no laboratório de Ensaios Mecânicos da FCT NOVA, pela disponibilidade, amizade e

conselhos, os meus sinceros agradecimentos.

Aos meus amigos e colegas de curso, pela amizade e apoio. Um especial agradecimento à Leonor, Rita, Andrei, Catarina, João e Luísa.

Ao Diogo Estevens, um especial agradecimento pela compreensão, apoio, amizade e amor demonstrado ao longo destes anos.

À minha mãe, ao meu pai e aos meus avós pelo amor incondicional, carinho e compreensão ao longo de toda a minha vida, o meu profundo agradecimento.

A todos aqueles que aqui não foram mencionados mas que estiveram sempre presentes e me ajudaram ao longo deste percurso, o meu muito obrigada.

Resumo

Esta dissertação caracteriza diferentes misturas de pasta de enchimento, um fluido não-Newtoniano que incluiu estéril, rejeitados, água e cimento Portland como ligante, utilizada como sistema de sustimento flexível numa mina de sulfuretos polimetálicos, para preencher os espaços vazios das actividades de mineração em subterrâneo. O objectivo é garantir a estabilidade do terreno na zona da escavação subterrânea, bem como garantir a progressão de desmontes para outros níveis.

As diferentes misturas de pasta de rejeitado de Zinco ensaiadas, proveniente da lavaria da Almina - Minas do Alentejo S.A., em Aljustrel, são dimensionadas para terem a mesma percentagem de sólidos (82%) e de água (18%), variando apenas a percentagem - 4%, 5% e 6%, de cimento Portland tipo II/A-L 42,5R e de rejeitado, de modo a obter a mistura mais adequada aos requisitos impostos ao enchimento de desmontes. A sua caracterização requer ensaios à pasta fresca e à mistura endurecida, ao longo do tempo de cura - 7, 14, 28, 56 e 91 dias de cura. Efectuam-se ensaios de caracterização e reológicos às misturas frescas e moldam-se provetes cilíndricos de pasta para avaliar a evolução da sua resistência mecânica (compressão uniaxial e tracção indirecta) no tempo. Após a rotura destes provetes, realizam-se ensaios de caracterização física, complementados por ensaios químicos. Concomitantemente e aos 28 dias de cura, submetem-se provetes das três misturas a ataque químico com sulfatos, para estudar sua durabilidade.

Os resultados obtidos possibilitam correlacionar a acção do cimento associado ao rejeitado de granulometria muito fina com o tempo de cura, verificando-se um incremento, em regra não linear, na resistência ao longo dos 91 dias de cura, que cresce com a percentagem de cimento na mistura. Depois de expostos a 15 ciclos de ataque químico com sulfatos, todos os provetes sofreram ainda alteração e degradação significativas, em particular aqueles que continham 4% e 5% de ligante, tendo-se verificado que os provetes com 6% de cimento sofreram um decréscimo significativo da sua resistência à compressão uniaxial.

Palavras-chave: Pasta de enchimento, Rejeitado, Cimento Portland, Resistência mecânica, Ataque com sulfatos.

Abstract

This thesis characterizes different mixtures of paste fill, a non-Newtonian fluid generally made up of sterile and/or tailings, water and Portland cement as binder, used for backfilling mining voids spaces as a flexible support system, in an underground polymetallic sulphide mine. The aim is to ensure the stability of the ground and the progression of cuts to other levels and, thus, the paste fill must present adequate strength shortly after being placed.

The different mixtures of Zn tailings paste tested, from the Almina- Minas do Alentejo S.A. processing plant in Aljustrel, are made-up of the same percentage of solids (82%) and water (18%), but have a variable percentage - 4% 5% and 6%, of type II/A-L 42,5R Portland cement and of tailings, in order to obtain the mixture that best suits the requirements for backfilling. The characterization involves tests on both the fresh paste and the hardened mixture over time - 7, 14, 28, 56 and 91 curing days. Characterization and rheological tests were carried out on the fresh mixtures and on cylindrical specimens were molded to evaluate the evolution of their mechanical strength (uniaxial compression and indirect tensile strengths) over time. After their failure, the specimens physical characterization is undertaken, complemented by some chemical tests. Concomitantly, 28 days of cure specimens of the three mixtures are subjected to sulphates attack to study their durability.

The results achieved make it possible to correlate the action of the cement curing time associated with the very fine particles of tailings, identifying a nonlinear increase of strength during the 91 days of cure with the percentage of cement in the paste. After exposure to 15 sulphates attack cycles, all of the test pieces become significantly altered and degraded, in particular those containing 4% and 5% binder. Additionally, the 6% cement specimens presented a significant reduction in their strength.

Keywords: Paste fill, Tailings, Portland cement, Strength, Sulphate attack.

Índice

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
Abreviaturas	xxv
Lista de Símbolos	xxvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objectivo e metodologia	2
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Revisão da literatura	5
2.1 Generalidades	5
2.2 Exploração mineira em subterrâneo com enchimento - Desmonte por bancada e enchimento	5
2.3 Enchimento artificial	7
2.3.1 Portas de enchimento	7
2.3.2 Tipos de enchimento	8
2.3.2.1 Enrocamento - seco ou cimentado	8
2.3.2.2 Enchimento hidráulico	9
2.3.2.3 Enchimento com pasta	9
2.3.3 Funções do enchimento	13
2.4 Pasta de enchimento	16
2.4.1 Constituintes	16
2.4.1.1 Rejeitados	16
2.4.1.2 Água	17
2.4.1.3 Cimento Portland	17
2.4.2 Reologia	18
2.4.3 Mineralogia do rejeitado	20
2.4.4 Distribuição granulométrica	20
2.4.5 Teor em água	22

2.4.6	Temperatura e humidade	22
2.4.7	Resistência	22
2.5	Controlo de qualidade e monitorização do enchimento	23
2.6	Comportamento da pasta - casos de estudo	24
2.7	Vantagens do enchimento de desmontes com pasta	27
3	Caso de Estudo - Mina de Aljustrel, Almina	29
3.1	Generalidades	29
3.2	Enquadramento geográfico	29
3.3	Enquadramento geológico	31
3.4	Jazigo de Feitais - Exploração de Zinco	31
3.5	Requisitos da pasta de enchimento	34
3.6	Constituintes da pasta de enchimento	36
3.6.1	Rejeitado de Zinco	36
3.6.1.1	Distribuição granulométrica	36
3.6.1.2	Composição química e mineralógica	37
3.6.2	Calda	37
3.6.2.1	Cimento Portland	38
3.6.2.2	Água	39
3.7	Ciclo de produção de rejeitado	40
3.8	Processamento e produção de pasta	41
3.8.1	Central de rejeitado	41
3.8.2	Central de Pasta	42
3.9	Controlo de qualidade	44
4	Estudo laboratorial	47
4.1	Generalidades	47
4.2	Caracterização dos constituintes da pasta	48
4.2.1	Rejeitado	48
4.2.2	Água	49
4.3	Dimensionamento da pasta e moldagem de provetes	51
4.3.1	Preparação das misturas	52
4.3.2	Preparação dos provetes	53
4.4	Ensaios da pasta fresca	55
4.4.1	Massa volúmica e teor em ar	55
4.4.2	Ensaio de abaixamento - Slump	55
4.4.3	Ensaio de espalhamento	56
4.4.4	Ensaio de retracção	57
4.4.5	Viscosidade da pasta	58
4.5	Ensaios de pasta endurecida	58
4.5.1	Identificação dos provetes	58

4.5.2	Ensaio dinâmico	59
4.5.3	Ensaio físico	60
4.5.3.1	Teor em água na rotura	60
4.5.3.2	Porosidade e absorção de água	60
4.5.4	Ensaio mecânico	61
4.5.4.1	Resistência à compressão uniaxial	61
4.5.4.2	Módulo de deformabilidade	62
4.5.4.3	Deformabilidade dos provetes com o <i>software</i> GOM Correlate	63
4.5.4.4	Tracção indirecta	64
4.5.5	Ensaio químico	65
4.5.5.1	Análise colorimétrica	65
4.5.5.2	Microscópio electrónico de varrimento	67
4.5.5.3	Análise química com XRF	67
4.5.6	Ataque químico com sulfatos em provetes com 28 dias de cura	67
5	Análise e discussão de resultados	69
5.1	Generalidades	69
5.2	Análise da pasta fresca	69
5.2.1	Massa volúmica e teor em ar	69
5.2.2	Ensaio de abaixamento e de espalhamento	70
5.2.3	Viscosidade da pasta	71
5.2.4	Ensaio de retracção	73
5.3	Ensaio de pasta endurecida	74
5.3.1	Ensaio dinâmico	74
5.3.2	Ensaio físico	76
5.3.2.1	Teor em água	76
5.3.2.2	Absorção de água e porosidade aparente	77
5.3.3	Ensaio mecânico	78
5.3.3.1	Resistência à compressão uniaxial	78
5.3.3.2	Módulo de deformabilidade	81
5.3.3.3	Utilização do <i>Software</i> GOM Correlate	82
5.3.3.4	Tracção indirecta	83
5.3.4	Análise colorimétrica	84
5.3.5	Análise química e SEM	86
5.3.6	Durabilidade - Ataque com sulfatos aos 28 dias de cura	89
6	Considerações finais	93
6.1	Conclusões	93
6.2	Recomendações para trabalhos futuros	99
7	Referências bibliográficas	101

ÍNDICE

A	Apêndice A	107
B	Apêndice B	109
C	Apêndice C	111
D	Apêndice D	113
E	Apêndice E	115
F	Apêndice F	117
G	Apêndice G	119
H	Apêndice H	121
I	Apêndice I	123
J	Apêndice J	125

Lista de Figuras

2.1	Método de desmonte por bancada e enchimento	6
2.2	Aspecto da pasta de enchimento	9
2.3	Diagrama esquemático da composição da pasta de enchimento	11
2.4	Esquema da filtragem de rejeitados por discos	13
2.5	Convergências e estado de alteração das tensões <i>in situ</i> durante a abertura de desmontes	14
2.6	Representação esquemática do efeito de arco na mineração por enchimento	15
2.7	Representação esquemática da sobrecarga vertical imposta por um pilar ao enchimento	16
2.8	Variação da resistência à compressão dos principais constituintes do cimento Portland ao longo do tempo	18
2.9	Relação entre a tensão de cedência e o factor de cedência para classificação de fluidos	19
2.10	Esquema do escoamento de pasta no interior das tubagens	21
2.11	Exemplo da variação das resistências à compressão uniaxial em função das diferentes percentagens de ligante utilizado nas misturas durante os diferentes dias de cura	24
2.12	Efeito na resistência da pasta de enchimento consoantes os diferentes tipos de água utilizados na mistura	25
2.13	Evolução de vários parâmetros segundo condições consolidadas, drenadas e não drenadas ao longo do tempo de cura	26
3.1	Enquadramento de Aljustrel e em Portugal Continental	30
3.2	Esquema da localização das massas de sulfuretos polimetálicos que fazem parte da Almina, em Aljustrel	30
3.3	Localização das massas de sulfuretos polimetálicos em Aljustrel - Almina	31
3.4	Esquema do método de enchimento primário	33
3.5	Esquema para a análise de Mitchell com mobilização de atrito lateral nas paredes do enchimento	35
3.6	Esquema da análise de Mitchell para a situação de ausência de atrito lateral nas paredes do enchimento	36

3.7	Distribuição granulométrica do rejeitado da Almina durante os meses de Abril a Julho de 2018	37
3.8	Recipiente de vidro com água industrial no laboratório geotécnico da Almina . . .	40
3.9	Aspecto do rejeitado de Zinco depositado quando sai da lavaria da Almina	41
3.10	Central de rejeitado da Almina	41
3.11	Pormenor do material que sedimentou no interior da tubagem que transporta a "polpa" até à central de pasta	42
3.12	Descarga no filtro de disco e aspecto da "torta"	42
3.13	Tela transportadora de "torta" vista pela abertura para a sua amostragem	43
3.14	Tela transportadora de pasta vista pela abertura para a sua amostragem	44
3.15	Controlo de qualidade na central de pasta	44
4.1	Rejeitado de Zn após secagem na estufa	49
4.2	Distribuição granulométrica do rejeitado proveniente da lavaria da Almina em Julho	49
4.3	Análise laboratorial da água da Almina	50
4.4	Mistura de pasta no laboratório geotécnico da Almina	52
4.5	Aspecto das misturas de pasta	53
4.6	Preparação dos provetes de pasta	53
4.7	Faseamento do processo de desmoldagem e rectificação dos provetes de pasta . .	54
4.8	Aerómetro e pormenor da sua base	55
4.9	Ensaio de abaixamento das misturas de pasta	56
4.10	Ensaio de espalhamento das misturas de pasta	57
4.11	Ensaio de retracção das misturas de pasta	58
4.12	Viscosímetro Brokfiel DV-II Pro utilizado	58
4.13	Identificação e marcação dos provetes a serem submetidos a ensaio	59
4.14	Medição das ondas P em provetes de pasta	59
4.15	Ensaio de absorção de água à pressão atmosférica e pesagem hidrostática das amostras dos provetes de pasta	60
4.16	Amostras de provetes utilizadas para determinação absorção de água e porosidade	61
4.17	Rotura satisfatória dos provetes	61
4.18	Rotura não satisfatória dos provetes	62
4.19	Provete de pasta sujeito ao ensaio de resistência à compressão uniaxial	62
4.20	Gráficos de tensão- extensão e determinação do módulo de deformabilidade através do ensaio de RCU	63
4.21	Extracto do vídeo do tutorial do <i>software</i> GOM Correlate	64
4.22	Provete de pasta sujeito ao ensaio de tracção por compressão	64
4.23	Sistema CIELAB	65
4.24	Sistema CIELAB no espaço tridimensional	66
4.25	Calibração do clorímetro e análise colorimétrica a um provete de pasta	66
4.26	Provetes de pasta utilizados no ataque com Sulfatos	68

4.27	Provetes de pasta na solução de sulfatos	68
5.1	Gráficos de viscosidade em função do tempo de ensaio de viscosidade da pasta	73
5.2	Resultados das velocidades de propagação média das ondas P nos provetes de pasta ao longo do tempo de cura	75
5.3	Comparação da velocidade de propagação das ondas P nos provetes de pasta que foram sujeitos a ataque químico com sulfatos, antes e após o ensaio	75
5.4	Resultados do teor em água nos provetes ao longo do tempo de cura	76
5.5	Evolução da absorção de água ao longo do tempo de cura dos provetes ensaiados à rotura	77
5.6	Evolução da porosidade ao longo do tempo de cura para os provetes ensaiados à rotura	78
5.7	Evolução da resistência à compressão uniaxial dos provetes de pasta ao longo do tempo de cura	79
5.8	Aspetto de dois provetes antes e depois da rotura ocorrer no ensaio de RCU	80
5.9	Variação da resistência à compressão uniaxial da média dos provetes com 6% de cimento antes e após o ataque químico com sulfatos	81
5.10	Evolução dos módulos E sec, E méd, E tan e E 600-100 para os diferentes provetes de pasta ao longo do tempo de cura	81
5.11	Sequência de passos durante a análise com o <i>software</i> GOM durante um ensaio de resistência à tracção indirecta por compressão	82
5.12	Proвете de pasta antes e após a sua rotura à tracção indirecta	83
5.13	Evolução da resistência à tracção indirecta dos provetes de pasta ao longo do tempo de cura	83
5.14	Gráficos dos parâmetros de cor dos provetes das diferentes misturas	84
5.15	Gráficos dos parâmetros de cor dos provetes das diferentes misturas que foram submetidas a ataque químico com sulfatos	85
5.16	Alteração de cor dos provetes com 28 dias de cura	86
5.17	Aspecto e leitura da amostra ao microscópio electrónico segundo três espectros	88
5.18	Aspecto da amostra de 5% de cimento aos 7 dias de cura segundo duas ampliações diferentes	88
5.19	Perdas de material dos provetes de pasta após imersão na solução de sulfatos	89
5.20	Aspecto dos provetes de pasta após o 1º e o 15º ciclos de ensaio	89
5.21	Aspecto dos provetes das três misturas após os 15º ciclos	90
5.22	Resultados da massa seca média dos provetes de pasta ao longo dos ciclos de ensaio	90
5.23	Resultados da massa saturada média dos provetes de pasta ao longo dos ciclos de ensaio	91
6.1	Evolução da resistência à compressão uniaxial dos diferentes provetes de pasta ao longo do tempo de cura	98

E.1	Comparação da absorção de água na rotura (%) após rotura ao longo do tempo de cura das misturas	115
E.2	Comparação da evolução da porosidade na rotura (%) ao longo do tempo de cura para os provetes ensaiados à rotura	116

Lista de Tabelas

3.1	RCU da pasta composta por rejeitado de Cu	34
3.2	Resistências mínimas em função das dimensões dos desmontes	36
3.3	Análise química ao rejeitado de Zinco por XRF	37
3.4	Especificações do cimento Portland Tipo II/AL 42,5, segundo NP EN 197-1:2001	38
3.5	Critério do ensaio de abaixamento, segundo NP EN 206-1:2001	39
3.6	Critérios do ensaio de espalhamento, segundo NP EN 206-1:2001	39
4.1	Ensaio e normas utilizadas	48
4.2	Composição química do rejeitado por XRF	49
4.3	Composição química da água da Almina	50
4.4	Dimensões dos moldes e dos provetes	51
4.5	Percentagens dos constituintes da pasta em cada mistura	51
4.6	Massa volúmica dos constituintes da pasta	52
4.7	Massa volúmica teórica das misturas de pasta	52
4.8	Relações entre os constituintes das misturas de pasta	53
5.1	Massa volúmica teórica e experimental das misturas de pasta	70
5.2	Teor em ar das misturas de pasta	70
5.3	Resultados do ensaio abaixamento das misturas de pasta	70
5.4	Tensão de cedência do ensaio de abaixamento	71
5.5	Resultados do ensaio de espalhamento das misturas de pasta	71
5.6	Viscosidades experimentais das misturas de pasta	72
5.7	Resultados de retracção das misturas de pasta ao longo de 3 dias de cura	74
5.8	Composição química das misturas de pasta ao longo dos dias de cura	87
5.9	Elementos químicos presentes no espectro da Figura 5.17	87
6.1	Resultados dos ensaios às misturas de pasta fresca	94
6.2	Resultados de RCU e tracção indirecta (TRAC) dos provetes de pasta ao longo dos dias de cura	97
A.1	Valores médios e respectivo desvio padrão (DP) da caracterização física dos provetes de pasta	107

A.2	Valores médios e respectivo desvio padrão (DP) da caracterização física dos provetes de pasta antes e após serem submetidos a ataque com sulfatos	108
B.1	Retracção das misturas de pasta ao longo de 3 dias de cura	109
C.1	Velocidade de propagação média das ondas P (m/s) e respectivo desvio padrão (DP)	111
C.2	Velocidade das ondas P (m/s) dos provetes antes e após serem submetidos a ataque com sulfatos	111
D.1	Resultados do teor em água médio (%) dos provetes após rotura e o respectivo desvio padrão (DP)	113
E.1	Resultados médios de absorção de água na rotura (%) dos provetes ao longo do tempo de cura e o respectivo desvio padrão (DP)	115
E.2	Resultados médios da porosidade na rotura (%) dos provetes ao longo do tempo de cura e respectivo desvio padrão (DP)	116
F.1	Resistência à compressão uniaxial média (kPa) e respectivo desvio padrão (DP)	117
F.2	Resistência à compressão uniaxial média(kPa) dos provetes antes e após o ataque com sulfatos e respectivo desvio padrão (DP)	117
G.1	Módulo de deformabilidade secante (MPa) e respectivo desvio padrão (DP)	119
G.2	Módulo de deformabilidade médio (MPa) e respectivo desvio padrão (DP)	119
G.3	Módulo de deformabilidade tangente (MPa) e respectivo desvio padrão (DP)	120
G.4	Módulo de deformabilidade (MPa) na zona da curva onde a resistência está nos 800 kPa e respectivo desvio padrão (DP)	120
H.1	Resistência média à tracção indirecta (kPa) dos provetes de pasta e respectivo desvio padrão (DP)	121
I.1	Parâmetros de cor dos provetes de pasta com 4% de cimento ao longo do tempo de cura e respectivo desvio padrão (DP)	123
I.2	Parâmetros de cor ao longo do tempo de cura dos provetes de pasta com 5% de cimento e respectivo desvio padrão (DP)	123
I.3	Parâmetros de cor dos provetes de pasta com 6% de cimento ao longo do tempo de cura e respectivo desvio padrão (DP)	124
I.4	Parâmetros de cor dos provetes com 4% de cimento, antes e após o ataque com sulfatos e respectivo desvio padrão (DP)	124
I.5	Parâmetros de cor dos provetes com 5% de cimento, antes e após o ataque com sulfatos e respectivo desvio padrão (DP)	124
I.6	Parâmetros de cor dos provetes com 6% de cimento, antes e após o ataque com sulfatos e respectivo desvio padrão (DP)	124

- J.1 Resultados da massa seca média dos provetes submetidos a ataque químico com sulfatos ao longo dos ciclos de ensaio e respectivo desvio padrão (DP) 125
- J.2 Resultados da massa saturada média dos provetes submetidos a ataque químico com sulfatos ao longo dos ciclos de ensaio e respectivo desvio padrão (DP) 126

Abreviaturas

Al	Alumínio.
As	Arsénio.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Ba	Bário.
Bi	Bismuto.
Ca	Cálcio.
CRF	Enrocamento Cimentado.
Cu	Cobre.
DP	Desvio padrão.
EN	Norma Europeia.
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia.
Fe	Ferro.
FS	Factor de segurança global.
K	Potássio.
Mg	Magnésio.
NOVA	Universidade NOVA de Lisboa.
O	Oxigénio.
Pb	Chumbo.

ABREVIATURAS

RCU Resistência à compressão uniaxial.

S Enxofre.

Sb Antimônio.

SEM Microscópio electrónico de varrimento.

Si Sílica.

XRF Fluorescência de Raios-X.

Zn Zinco.

Lista de Símbolos

% Água	Percentagem de água, em massa.
% Cimento	Percentagem de cimento, em massa.
% Rejeitado	Percentagem de rejeitado, em massa.
% Sólidos	Percentagem de sólidos, em massa.
σ	Tensão de rotura (kPa).
γ	Peso volúmico (kN/m ³).
ε	Extensão.
η	Viscosidade (Pa.s).
φ	Ângulo de atrito interno (°).
τ_0	Tensão de cedência (kPa).
$\rho_{\text{Água}}$	Massa volúmica da água (Mg/m ³).
ρ_{Cimento}	Massa volúmica do cimento (Mg/m ³).
ρ_{Pasta}	Massa volúmica da pasta (Mg/m ³).
$\rho_{\text{Rejeitado}}$	Massa volúmica do rejeitado (Mg/m ³).
σ_h	Tensão horizontal (kPa).
σ_v	Tensão vertical (kPa).
C_c	Coefficiente de curvatura.
C_u	Coefficiente de uniformidade.
D_{10}	Diâmetro efectivo da partícula a que corresponde 10% em peso de material passado.
D_{30}	Diâmetro efectivo da partícula a que corresponde 30% em peso de material passado.
D_{60}	Diâmetro efectivo da partícula a que corresponde 60% em peso de material passado.
m_d	Massa seca (g).
m_i	Massa inicial (g).
m_{imers}	Massa imersa (g).
m_{sat}	Massa saturada (g).
t_{slump}	Tempo de abaixamento (s).

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da secção (m^2).
a^*	Parâmetro de cor a (espectro vermelho-verde).
A:C	Relação água/cimento.
Ab	Absorção de água (%).
B	Largura do bloco (m).
b^*	Parâmetro de cor b (espectro azul-amarelo).
c	Coesão (kPa).
C^*	Croma.
Ci	Cimento.
D	Diâmetro (mm).
F	Força ou carga de ensaio aplicada aos provetes (kN).
H	Altura do cone de Abrams.
l	Comprimento (mm).
L^*	Parâmetro de cor L (claro-escuro).
Po	Porosidade (%).
R:C	Relação rejeitado/cimento.
S	Abaixamento ou <i>slump</i> (mm).
t	Tensão de corte.
v	Velocidade de rotação (rpm).
x	Constante da pasta (347).
y	Constante da pasta (212).

Introdução

1.1 Enquadramento do tema

O rejeitado mineiro é o material que não é aproveitado e é desperdiçado após o processo de mineração, ou seja, é aquele que após vários processos de separação de estéril e de minério não tem teor suficiente para ser economicamente aproveitado, nem é economicamente viável continuar a separá-lo. O rejeitado pode ser depositado em escombreliras, quando o seu calibre é maior, e dependendo da composição química, ou então é depositado em barragens de rejeitado. Tanto os estéreis das escombreliras como os rejeitados que são colocados em infraestruturas de deposição de resíduos, contêm alguma percentagem de minério que não é extraído durante o processamento em lavaria, podendo assim ser uma fonte de contaminação quando o material é exposto a fenómenos de lixiviação pela circulação de águas de chuva, que proporcionam a sua infiltração nos solos e a percolação de água nos maciços.

Nas últimas décadas, o aparecimento de técnicas mais desenvolvidas de separação de minério do estéril e também pelo aumento da procura e do aumento do valor de determinados minérios, tornou rentável voltar a re-explorar alguns desses materiais. Concomitantemente, surgiu a necessidade de dar novos rumos aos rejeitados, tanto do ponto de vista ambiental, como de espaço necessário ao seu armazenamento, à superfície, visando ainda garantir a estabilidade dos desmontes subterrâneos. É também importante contribuir para tornar a exploração em subterrâneo mais segura do ponto de vista de estabilidade e de acessibilidade, bem como desenvolver métodos que possibilitem um maior aproveitamento dos recursos existentes, reduzindo os desperdícios económicos em termos de pilares, tectos e muros.

A indústria evoluiu no sentido de arranjar soluções que permitissem voltar a explorar o material intacto, que previamente não era possível extrair devido às limitações tecnológicas, cujos custos fossem reduzidos e suplantados pelo benefício da extracção. Estes métodos utilizam os materiais estéreis ou rejeitados como método de sustimento, para garantir a estabilidade do maciço e da sua envolvente permitindo que, a partir do enchimento de cavidades antigas, se executem novos desmonte aumentando a quantidade de material extraído

e garantindo a acessibilidade a novos desmontes.

Dependendo das condições *in situ* do maciço e do método a ser implantado na mineração subterrânea, assim é escolhido o método de enchimento e o respectivo material a ser utilizado.

Neste contexto, o tema deste estudo enquadra-se no início da utilização de pasta de enchimento no âmbito do desmonte por bancadas e enchimento na Almina S.A., em particular no jazigo de Feitais, que se encontra a extrair minério de Zinco (Zn). A utilização de pasta de enchimento nesta mina permitirá prosseguir a extracção de minério para desmontes consecutivos.

O método de enchimento de desmontes mineiros com pasta é implementado através de um circuito de transporte que inicia na saída do rejeitado da lavaria para a central de rejeitado. Pretende-se que o rejeitado deixe de ser depositado na infraestrutura de deposição de resíduos e passe a ser transportado, em forma de "polpa"(rejeitado e água), até uma central de pasta. Aqui, a polpa entra num processo de cicloneamento antes de ser filtrada, e transforma-se em "torta". Nesta central produz-se também calda de cimento, ou seja, é misturada a água e o cimento que irão fazer parte da constituição da mistura de pasta. Após a filtragem da do rejeitado, a "torta"é adicionada à mistura da calda, originando assim a pasta de enchimento, que em seguida é transportada directamente para os desmontes, através de um sistema de distribuição por gravidade. Para que seja introduzida pasta nos desmontes com a percentagem mínima que permita algum sucesso do enchimento e o futuro desempenho do mesmo, é fundamental que a polpa tenha pelo menos 65% de sólidos.

1.2 Objectivo e metodologia

A presente dissertação visa obter o grau de Mestre em Engenharia Geológica e aborda a caracterização da pasta de enchimento a ser utilizada em desmontes subterrâneos, sendo o seu principal objectivo contribuir para a determinação da mistura com melhor desempenho e com menor custo associado. Estudam-se três tipos de mistura de pasta, todas constituídas por 82% de sólidos e 18% de água, sob a forma de pasta fresca e de provetes de pasta endurecida; a diferença entre cada tipo de mistura a ensaiar consiste na componente sólida, onde existem diferentes percentagens (4%, 5% e 6%) de cimento Portland - CEM II/AL 42,5 R, e de rejeitado de zinco.

Estudos anteriores desenvolvidos pela Almina S.A., já tinham pré-definido as percentagens de sólidos a utilizar em pasta de enchimento, a rondar 80 a 85%, com a restante percentagem de água, ficando por aferir as percentagens ideais de rejeitado e cimento, para obedecer aos critérios impostos, de resistência mínima de 800 kPa, e evitar fenómenos de exsudação nas tubagens.

Nesta investigação, numa primeira fase, no dimensionamento das misturas de pasta no laboratório geotécnico da Almina S.A., realiza-se os três tipos diferentes de mistura a submeter a ensaios de caracterização de pasta fresca e são ensaiados em condições controladas, nos laboratórios da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade NOVA de Lisboa (NOVA). Todos os provetes são desmoldados e embalados a vácuo, de modo a recriar as

condições existentes no interior do enchimento, onde não existem perdas de água nem contacto com o ar, e colocados em câmara húmida a $21 \pm 2^\circ\text{C}$ e 95% de humidade. Moldaram-se 210 provetes cilíndricos, subdivididos em conjuntos de 70 provetes, respectivamente, cuja altura é o dobro do diâmetro, com 6%, 5% e 4% de cimento na mistura, cada um. O rejeitado utilizado na mistura era proveniente da lavaria da Almina e a água é a reutilizada no circuito interno da mina, ou seja, é água corrente, que também foi caracterizada na FCT NOVA.

Uma vez que a pasta de enchimento deve adquirir a maior resistência possível e menor deformabilidade ao longo do respectivo tempo de cura, realizam-se ensaios mecânicos para determinação da resistência à compressão uniaxial (RCU), com determinação do módulo de deformabilidade dos provetes e à tracção indirecta, por compressão diametral. Os ensaios de cariz mecânico têm como objectivo recriar as acções ao qual o enchimento vai ser sujeito no decorrer da sua utilização como sustimento flexível. Previamente aos ensaios destrutivos, todos os provetes são submetidos a ensaios com ultrassons. Após a destruição dos provetes nos ensaios mecânicos, os seus testemunhos são submetidos a ensaios de caracterização física e química para analisar os parâmetros que influenciam as características mecânicas da pasta.

A pasta de enchimento pode ser sujeita a diversos factores que influenciam o seu comportamento e aceleram a sua degradação no ambiente subterrâneo, tais como gases, temperatura e humidade ou mesmo à acção de minerais como sulfuretos que estão presentes no rejeitado utilizado na mistura da pasta e que actuarão como agentes que degradam a pasta ao longo do tempo, através de reacções químicas entre os sulfuretos, a água, o ar e outros minerais presentes na pasta. Assim, para além dos ensaios acima mencionados, efectuam-se também testes de previsão de comportamento a partir dos 28 dias de cura, altura em que normalmente o cimento atinge a respectiva resistência. Este ensaio de durabilidade consiste em 15 ciclos de ataque com sulfato decahidratado de sódio em condições normalizadas que permite extrapolar e verificar o pior caso de degradação da pasta ao longo do tempo; no final serão averiguados as características mecânicas dos provetes.

Complementarmente, realiza-se também a análise química da pasta:

- (i) por microscopia electrónica (SEM), que permite analisar as substâncias químicas presentes na mistura, ou as ligações microscópicas entre o cimento e a água, bem como a existência de poros ou cavidades que coloquem em causa a resistência mecânica da pasta, comprometendo o seu desempenho. Acresce a análise expedita, por fluorescência de raio-X, do quimismo das misturas.
- (ii) e por um colorímetro analisa-se sistematicamente a cor da pasta, associada à presença de ferro e outros minerais que reagem com o ar; assim, a cor é um parâmetro importante na avaliação da potencial degradação da pasta endurecida.

Finalmente, para estudar o comportamento da pasta de enchimento é necessário atender às especificações do material constituinte da pasta, pelo que se optou por utilizar as normas ASTM e EN para betões, caldas e rochas, dependendo dos ensaios, pois a pasta não pode ser considerada argamassa nem rocha.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, sendo que no primeiro se efectua uma breve introdução ao tema e o enquadramento necessário para perspectivar o objectivo da investigação.

No Capítulo 2 encontra-se o estado de arte relativo à temática de enchimento mineiro, nomeadamente a utilização da pasta de enchimento e os parâmetros que influenciam a sua prestação, tais como os métodos de exploração mineira que o utilizam e os tipos de enchimento existentes e as vantagens do seu uso.

No Capítulo 3 encontra-se o enquadramento da Mina de Aljustrel, cujo concessionário pertence à Almina S.A., para que seja compreendido o local do enchimento, nomeadamente os métodos de desmonte utilizados, características e geometria do maciço e das galerias de desmonte, como também tudo o que envolve processos de extracção mineira em lavarias e em centrais de processamento que incluem os sulfuretos e toda a operação de reaproveitamento de rejeitado.

O Capítulo 4 consiste na descrição dos métodos laboratoriais de estudo da pasta de enchimento, propriamente dita, desde as suas componentes, dimensionamento e o estudo dos fenómenos de envelhecimento ao fim de 28 dias de cura, bem com as suas características geomecânicas.

No Capítulo 5 apresentam-se e discutem-se todos os resultados obtidos, bem como como possíveis correlações; finalmente no Capítulo 6 incluem-se as conclusões e as informações que possam vir a ser úteis para trabalhos e desenvolvimentos futuros na área.

Complementam este documento a listagem das referências bibliográficas, bem como um conjunto de apêndices com os resultados médios dos ensaios realizados. Todas as figuras não referenciadas são da responsabilidade da autora.

A presente dissertação não está redigida segundo o novo acordo ortográfico.

Revisão da literatura

2.1 Generalidades

Neste capítulo abordam-se os principais aspectos relacionados com a pasta de enchimento na mineração em subterrâneo. Para além de um resumo relativo à reutilização de rejeitados mineiros no enchimento artificial, de aspectos relativos à sua execução e abordam-se as principais propriedades reológicas, físicas e mecânicas relevantes para garantir um desempenho adequado da pasta de enchimento. Discutem-se ainda brevemente alguns casos de estudo.

2.2 Exploração mineira em subterrâneo com enchimento - Desmonte por bancada e enchimento

Todos os terrenos têm propriedades geomecânicas diferentes, e requerem certos cuidados para que a extracção subterrânea ocorra sem incidentes. Os métodos de exploração mineira podem ser subdivididos em três grandes grupos (Brady & Brown, 2005):

- (i) os que dependem de o maciço ser autoportante ou competente estruturalmente, e a mineração pode ser executada através de métodos como câmaras e pilares (*pillars and chambers*) ou subníveis (*sublevels*);
- (ii) os casos em que o maciço necessita de suporte artificial, sendo a mineração efectuada com recurso a enchimento por corte e enchimento (*cut and fill*) ou desmonte por bancada e enchimento (*bench and fill*), entre outros;
- (iii) e os métodos que não incluem o suporte do maciço, como sejam os desabamentos por frente corrida (*longwall caving*) ou desabamentos por sub-níveis (*sublevel caving*) ou por blocos controlados (*block caving*).

Uma vez que esta dissertação se refere à mineração com recurso a enchimento artificial numa exploração mineira em subterrâneo com recurso ao método de desmonte por bancada

e enchimento (*bench and fill*), apenas este será de seguida sintetizado. Os métodos que utilizam enchimentos são cada vez mais utilizados, pois permitem um melhor aproveitamento da extracção de minério, pela optimização do método de desmonte e por apresentar custos de operação mais reduzidos, ou seja, quando o valor comercial do minério é relativamente alto e a percentagem de recuperação do minério não consegue ser alcançada com métodos convencionais de mineração, como o desmonte por chaminés (*open stope mining*) ou desmonte por desabamentos (*caving methods*).

O desmonte por bancada e enchimento (*bench and fill*) foi desenvolvida durante 1990 como uma alternativa mais produtiva ao método de corte e enchimento (*cut and fill*). É o tipo de exploração que é normalmente utilizado nos casos de desmontes transversais às massas mineralizadas, sendo abertas duas galerias, uma no tecto e outra no muro; a galeria do tecto é ulteriormente alargada com o auxílio de ancoragens para garantir o sustimento. De seguida, executam-se chaminés para criação de face livre, para prosseguimento execução do desmonte, sendo estas posteriormente cheias com material de enchimento cimentado (Gama & Torres, 2005).

Depois de o enchimento destas galerias verticais estar completo e o tempo de cura chegar ao fim, abrem-se as restantes galerias, ou seja as galerias entre as que foram anteriormente sujeitas a enchimento, de modo a que o processo se repita. Este método de enchimento pode ser esquematizado pela Figura 2.1.

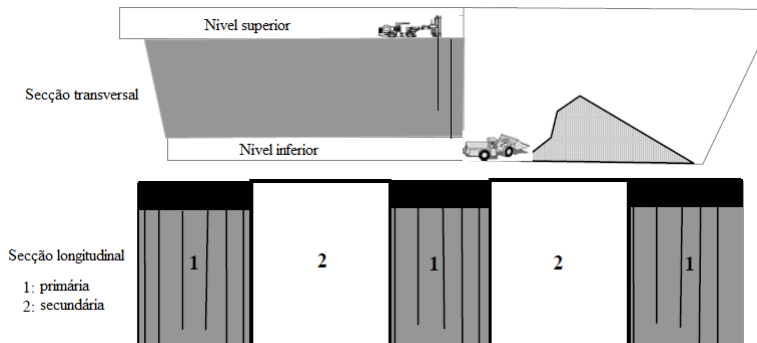


Figura 2.1: Método de desmonte por bancada e enchimento (Caupers, et al., 1998 apud Gama e Torres, 2005)

Também existem algumas limitações que condicionam a utilização deste método, como a reduzida disponibilidade de material rejeitado, em termos de quantidade, para utilizar na mistura da pasta de enchimento, não sendo suficiente para preencher os volumes de desmonte, o custo elevado do material ligante (quando necessário) para a mistura, os custos de produção, preparação, transporte e descarga da pasta.

2.3 Enchimento artificial

Inicialmente, o enchimento artificial era utilizado, frequentemente, para preencher antigas cavidades na eminência do encerramento de minas, de modo a prevenir quaisquer colapsos ou danos futuros infligidos pela actividade mineira. Numa altura em que os preços dos metais são relativamente elevados e a oferta não é muita, as explorações mineiras tendem a arranjar métodos novos para otimizar os processos de extracção e maximizar a quantidade de minério obtida, com os menores custos económicos possíveis. Como referido uma das práticas que se tornou usual em explorações em subterrâneo é a utilização do enchimento artificial na recuperação de pilares rochosos antigos que suportavam as cavidades, que contém minério com valor económico que justifica a sua extracção, uma vez que a galeria mineira se encontra estável, do ponto de vista estrutural, é possível proceder à extracção do material que constitui o pilar antigo. Assim, presentemente, o enchimento é também utilizado quando a mina ainda se encontra a ser explorada, diminuindo os riscos e os impactes ambientais associados e aumentando a produtividade.

É utilizado como um sistema de sustimento passivo, ou seja, depois do desmonte ser realizado (havendo descompressão do maciço), ele é cheio com material que vai sofrer compressão devido à contínua libertação de tensões do maciço envolvente (Atlas Copco, 2007), minimizando fenómenos de convergência no maciço que possam vir a originar subsidência, permitindo a exploração contínua ao garantir o acesso sequencial a novos desmontes e funcionando como uma plataforma de trabalho. Pode ser executado de modo temporário ou definitivo, um vez que o revestimento permanente supõe um método mais seguro e estável, mas também mais rentável a nível da extracção de minério. Contudo, o enchimento pode ser objecto de ataques químicos nas superfícies de contacto com o maciço encaixante, ou na sua superfície livre, pelo que podem ocorrer reacções químicas do material com o meio envolvente, sejam elas devidas à oxidação de sulfuretos, aos gases na atmosfera ou à circulação de águas no interior do maciço.

O enchimento pode ser efectuado com diferentes técnicas e materiais, dependendo dos objectivos a alcançar, do método de extracção, das características do maciço rochoso e dos materiais provenientes dos desmontes, entre outros. Ele pode ser aplicado dependendo do objectivo da mineração e das diferentes geometrias da mesma, e adoptando-se diferentes ciclos para o enchimento - enchimento sucessivo, se a extracção do minério está a ser executada no sentido ascendente, descendente ou adjacente (Atlas Copco, op.cit.), ou ainda em sequências de extracção, como no método por desmonte e enchimento.

2.3.1 Portas de enchimento

São as portas de enchimento que possibilitam o enchimento de desmontes, funcionando como tampão à passagem da pasta e que a retêm na zona pretendida. As portas de enchimento são dimensionadas de modo a impedir a passagem de pasta, para permitir a drenagem de água em excesso da mistura de pasta, apesar desta função não ser supostamente utilizada no

enchimento mineiro com pasta.

Normalmente o enchimento com pasta é feito segundo etapas de enchimento, sendo que o primeiro enchimento é feito até 1 m acima da porta de enchimento e deixado a ganhar presa até atingir pelo menos 150 kPa de resistência; só depois é prosseguido o restante enchimento (Potvin, et al., 2005). As portas de enchimento são instaladas nas galerias de remoção dos desmontes, com recurso à utilização de diversos materiais, como por exemplo estéril proveniente de escombrelras, em sacos de serapilheira, por tijolos, madeira ou betão com fibras sintéticas, dependendo das características da pasta e dos métodos utilizados.

2.3.2 Tipos de enchimento

O objectivo do enchimento na mineração subterrânea é reutilizar o estéril do processo de modo que estes materiais possam preencher as cavidades e ajustarem-se ao maciço para que exista o menor volume possível de vazios. Como já foi mencionado, os seus materiais consistem normalmente numa mistura de estéreis e escombros ou de rejeitados provenientes das lavarias da própria mina, muitas vezes sob a forma de concentrados, e podem ainda incluir material de áreas de empréstimo, quando o que é produzido pela mina não é suficiente para suprir as necessidades. Os principais tipos de enchimento artificial que são implementados em explorações em subterrâneo são o enchimento por enrocamento (*rock fill*), executado com material das escombrelras, recorrendo a blocos de rocha de diferentes calibres, sendo considerado um preenchimento mais rudimentar; o enchimento hidráulico (*hydraulic fill*), muito utilizado, mas mais dispendioso do ponto de vista económico e que consiste numa mistura de rejeitado, cimento e quantidades importantes de água, apresentando uma consistência líquida, e possibilitando o preenchimento de pequenas cavidade, fendas e fissuras, colmatando todos os espaços vazios dos desmontes; e o enchimento com pasta (*paste fill*), menos dispendioso que o hidráulico e que também consiste no preenchimento de cavidades com uma mistura, mas mais pastosa, composta por rejeitado, cimento e água em diferentes proporções.

2.3.2.1 Enrocamento - seco ou cimentado

Este tipo de enchimento consiste no preenchimento de cavidades subterrâneas com rochas e fragmentos de rochas que resultaram dos desmontes; pode ser implementado via seca, sem adição de ligantes, ou com adição de ligantes – cimento (CRF), que possibilita o preenchimento de espaços vazios deixados pela granulometria grosseira do material de enchimento (Atlas Copco, 2007).

No enchimento a seco, deposita-se directamente no desmonte material estéril ou escombros, com dimensões muito diferenciadas, desde blocos de rocha a material de granulometrias menos grosseiras, para preencher melhor os espaços vazios entre os blocos maiores, sem junção de nenhum ligante. O *rock fill* é actualmente mais utilizado para enchimentos secundários, não sendo introduzidos em desmontes principais, constituindo um tipo de enchimento mais convencional e de custos reduzidos em comparação com os restantes.

2.3.2.2 Enchimento hidráulico

Este tipo de enchimento é transportado em subterrâneo por sistemas de distribuição de pasta (reticulado) e a sua percentagem de sólidos ronda 75 a 80% (Sheshpari, 2005). Usam-se frequentemente areias, pois muitas minas implementam o método de enchimento hidráulico não cimentado. É constituído principalmente por areia, água e uma quantidade bastante reduzida de material fino, nomeadamente, rejeitado proveniente das lavarias. Este tipo de enchimento possibilita o preenchimento de espaços vazios, como fracturas e fendas no interior dos desmontes devido à sua liquidez.

É um método extremamente dispendioso, visto que recorre a grandes quantidades de água, podendo inviabilizar a aplicação do mesmo.

O transporte do enchimento hidráulico é feito por via de condutas e a velocidade de enchimento tem de ser superior à velocidade de sedimentação das partículas, para evitar entupimentos causados pela deposição do material nas tubagens de distribuição. A sua implementação deve considerar a drenagem do enchimento, pois é um método que precisa de uma grande quantidade de água, e à medida em que o volume do enchimento aumenta e ganha resistência, a água que se encontra em excesso na mistura acumula-se na superfície do material de enchimento, sendo necessário drená-la, e à água existente no subsolo.

2.3.2.3 Enchimento com pasta

O enchimento com pasta consiste no preenchimento também de cavidades, com mistura de rejeitados, provenientes das lavarias de extracções de minério, devidamente espessados, água, agentes ligantes, como o cimento Portland, e outros aditivos cuja função é aumentar a coesão e as características resistentes da mistura, diminuindo a respectiva deformabilidade (Belem & Benzaazoua, 2004); pode ter diferentes consistências, dependendo da sua composição.

A pasta de enchimento é classificada como um fluido plástico, não-Newtoniano, não drenante, cuja consistência é pastosa, tal como é possível observar na Figura 2.2. É dimensionada de modo a não haver excesso de água - o objectivo é que esta seja toda utilizada no processo de hidratação do cimento. A altura de abaixamento da pasta ("slump") deve ser inferior a 230 mm (Potvin et al, 2005).



Figura 2.2: Aspecto da pasta de enchimento
(Silver corp, 2017)

Existem vários factores que influenciam as características resistentes e o comportamento da pasta durante a sua distribuição nas tubagens e ao longo do tempo de cura, como a granulometria do rejeitado fino, a quantidade de agentes ligantes na mistura, as características mineralógicas dos rejeitados, a massa volúmica e a percentagens de sólidos na mistura e até as características geoquímicas da água utilizada na mistura (Belem & Benzaazoua, *ib.*).

Quanto à distribuição granulométrica, pelo menos 15% das partículas finas do rejeitado devem ter dimensões inferiores a 20 μm . Os rejeitados constituem a maioria da matriz da pasta, sendo que quanto maior for a percentagem de rejeitados, mais densa tende a ser a pasta, pelo que as pastas têm entre 75 a 85% de sólidos por peso (Belem & Benzaazoua, *ib.*).

Antigamente a presença de atmosferas com gases perigosos era muito maior, devido à passagem de veículos pesados que funcionavam a gasolina, e que os libertavam no seu interior, não havendo sistemas de ventilação adequadamente dimensionados para a ventilação desses gases, pelo que poderiam reagir com os materiais do enchimento provocando a sua alteração ao longo do tempo e influenciando a sua resistência. Presentemente, o recurso a sistemas de ventilação bem dimensionados e em funcionamento pleno ao longo dos níveis de extracção e do uso de equipamentos movidos electricamente ou com recurso a combustíveis menos poluentes, a exposição do enchimento a estas atmosferas não é causa de preocupação. Outro factor que pode causar a degradação do enchimento é a passagem de equipamentos pesados de extracção de minério, sendo o enchimento dimensionado para suportar estas cargas e o desgaste pela acção destes.

Como se pode ver no diagrama da Figura 2.3, a composição da pasta de enchimento depende também da percentagem de sulfuretos que se encontra no rejeitado, e que pode afectar a respectiva durabilidade. Estes sulfuretos podem oxidar, colocando em risco as características mecânicas da mistura e a sua função. Os sulfuretos, por oxidação ao longo do tempo, são a principal fonte de sulfatos no material rejeitado.

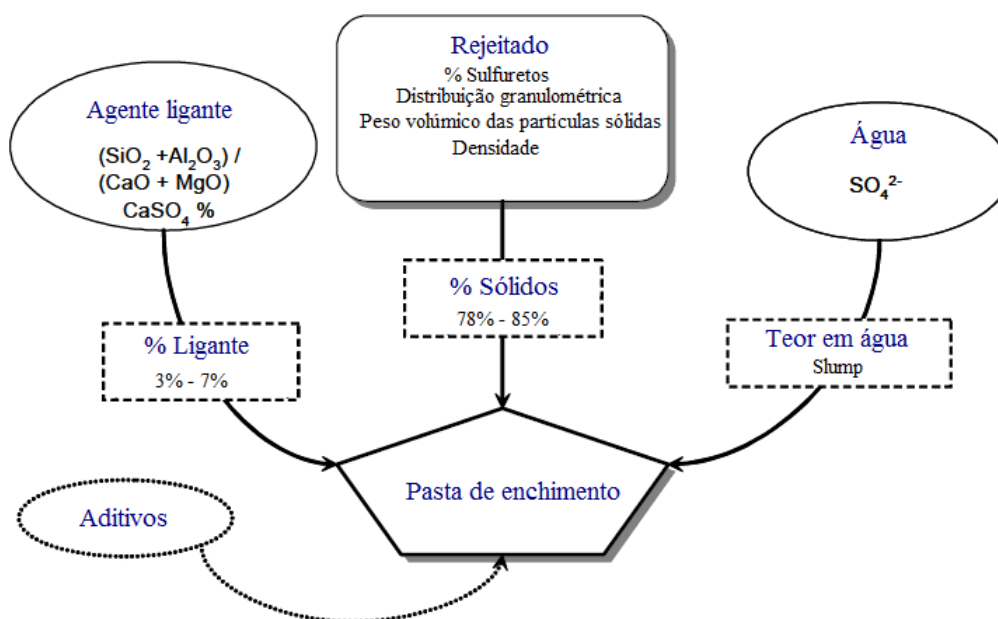
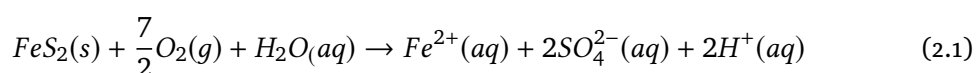


Figura 2.3: Diagrama esquemático da composição da pasta de enchimento (adaptado de Benzaazoua et al., 2002 apud Belem & Benzazoua, 2004)

Os minerais que se formam na pasta, devido a reacções entre cimento, água, ar e presença de sulfuretos, podem ter características expansivas, gerando tensões que induzem fracturas nas paredes do maciço, possibilitando a deterioração do mesmo devido à abertura de espaços que servem de passagem à água e à formação de sais ou outros minerais. A pirite (FeS_2) é um dos sulfuretos mais conhecidos e que sofre reacções químicas de oxidação, sendo a equação da oxidação da pirite a seguinte (Sheshpari, 2005):



Segundo Sheshpari (op. cit.) a reacção de oxidação dos sulfuretos nos rejeitados será muito pequena e praticamente insignificante quando a pasta de enchimento com cimento está num estado de saturação e existe limitação à quantidade de ar disponível, ou seja, como durante o início do tempo de cura da pasta de enchimento a quantidade de ar na mistura é muito reduzida e o material ainda se encontra saturado pela mistura de água, a reacção de oxidação é quase nula. Durante o tempo de cura da pasta, a água que integra a mistura começa a evaporar, criando espaços vazios no interior da pasta e aparecendo reacções químicas quando os sulfuretos reagem com os constituintes do cimento, entrando em contacto com o ar e gerando este processo de oxidação a criação de novos minerais nos espaços vazios da pasta, com consequências nas características de resistência da mesma. Para evitar a exposição dos sulfuretos a condições propícias à oxidação, a mistura deve ser efectuada o mais rápido possível, depois do processamento do rejeitado. O processo de oxidação deve ser evitado, tanto na execução e preparação da pasta, como durante e após o enchimento de desmontes.

Na constituição da pasta de enchimento podem haver minerais com características expansivas ou mesmo a formação de outros novos durante o tempo de cura, através das reacções químicas, que podem proporcionar a abertura de fissuras, e estar relacionados com a perda de resistência da pasta de enchimento ao longo do tempo.

É ainda necessário considerar a composição do agente ligante, ou seja, a composição e características do cimento utilizado, normalmente Portland, cuja percentagem na mistura deve situar-se entre 3 a 7%, e à composição da água da mistura, pois podem os elementos constituintes da mesma reagirem de forma inadequada quando adicionados. Outro factor que pode influenciar o processo de oxidação da pasta, é a hidratação dos agentes ligantes durante a cura, que actua como uma barreira física ao oxigénio e, assim, diminui a porosidade da pasta e a criação de novos minerais no seu interior (Sheshpari, *ib.*). No caso de cimentos que tenham uma componente com gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou anidrite (CaSO_4) no clínquer pode proporcionar uma pequena fracção de sulfatos à pasta (*op. cit.*).

Vários estudos verificam que a pasta de enchimento tem um incremento da resistência à compressão uniaxial até pelo menos aos 91 dias de cura, ou mais, sendo que em diferentes tipos de pasta, com diferentes tipos de rejeitado, pode haver ataque químico a partir dos sulfuretos presentes na sua constituição. Nesta situação, pode ocorrer um decréscimo da resistência e do módulo de deformabilidade dos 28 para os 56 dias de cura, ou a partir dos 120 dias. O ensaio de ataque com sulfatos viabiliza a criação de novos compostos químicos, por reacção entre o cimento e os sulfuretos existentes na mistura, como acontece também em betões e argamassas (Coutinho, 2006), permitindo estudar a durabilidade da mistura em laboratório.

A produção de pasta envolve várias etapas, desde a produção de rejeitado proveniente da diluição em lavaria, até à mistura de pasta ser concluída e depois transportada até ao seu destino, neste caso, os desmontes. Um dos processos mais importantes na produção de pasta é a extracção de água em excesso que vem juntamente com os rejeitados, em forma de "polpa", de modo a aumentar a concentração de sólidos, ou seja, o espessamento do rejeitado, cerca de 60 a 70% de sólidos em peso. A água tem um papel negativo, quando em excesso, no comportamento mecânico da pasta, pelo que é fundamental a sua extracção através de processos de filtração. No tanque de espessamento podem ser adicionados flocculantes de modo a causar reacções químicas que possibilitam o ajuntamento das partículas de sólidos mais finas e a sua sedimentação. As partículas finas que não assentarem e em excesso que forem transportadas pela água, são posteriormente colectadas, em hidrociclones, e filtradas.

O processo de filtração do rejeitado é normalmente o último para extracção de água antes do rejeitado ser adicionado à mistura de pasta, consistindo na separação da componente sólida a partir de filtros, normalmente de disco, que por de sucção removem a água em excesso, sendo o material produzido nesta etapa designado por "torta". Os filtros de disco, os mais utilizados neste processo, têm uma maior área de filtração e são considerados de baixo custo, apesar das capas dos filtros terem de ser substituídas periodicamente. A Figura 2.4 esquematiza o processo de filtração.

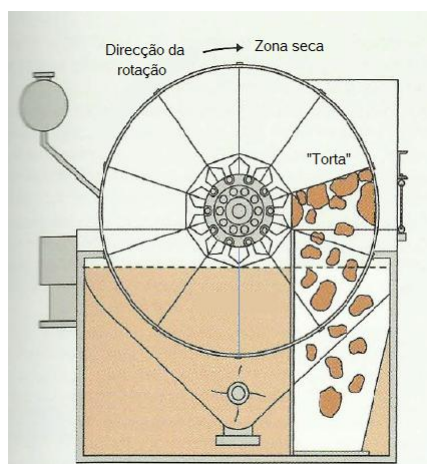


Figura 2.4: Esquema da filtragem de rejeitados por discos
(adaptado de Potvin et al. (2005))

Quando é obtida a "torta" com a percentagem de sólidos necessária à mistura de pasta, inicia-se o processo de mistura de alta intensidade de todos os constituintes, ou seja, é iniciado o processo de mistura de "torta" (rejeitado) ao cimento e à água da mistura de modo a se obter uma pasta com as características o mais homogêneas e uniformes possíveis; segue-se o seu transporte pelo sistema de tubagens de distribuição (reticulado). Este transporte é realizado por tubagens (PVC), equipadas com densímetros para controlo da respectiva densidade. O escoamento deve ser laminar e, dependendo da fluidez e viscosidade da pasta, pode ser feito por gravidade ou com auxílio de bombas. A mistura não deve sofrer fenómenos de sedimentação nas tubagens do sistema de distribuição de pasta.

É essencial conhecer a resistência da pasta de enchimento ao fim de vários dias de cura, inclusive logo aos 3 dias, pois às vezes é necessário garantir a passagem de trabalhadores sobre ela para deslocar as tubagens e permitir que o enchimento dos desmontes sejam totais e não existam espaços vazios que inviabilizem o seu uso.

Para assegurar o desempenho, funcionalidade e diminuir os custos associados à utilização da pasta, é necessário conhecer as propriedades e características do material que a integra. Os custos associados dependem apenas do transporte até ao local de deposição, dos processos de processamento e espessamento e da manutenção das centrais de espessamento e de mistura, para além do material usado, como o cimento Portland, que é necessário em quantidades significativas devido aos grandes volumes das cavidades a preencher.

2.3.3 Funções do enchimento

Segundo Torres & Gama (2005), a instabilidade dos maciços rochosos no interior de cavidades depende das propriedades geotécnicas do maciço e de factores como a respectiva forma, dimensões e geometria e da profundidade a que se encontram, pelo que movimentos de blocos de rocha pela acção do peso próprio, da sobrecarga litostática, da pressão da água e das tensões *in situ* podem causar desabamentos.

Nas explorações em subterrâneo, os desmontes abrem cavidades de que resulta a modificação do estado de tensão natural do maciço rochoso. Esta alteração resulta em descompressão do próprio maciço e pode induzir a deformação das galerias de desmonte, em função do tipo de maciço e das suas características mecânicas, podendo ainda ocorrer desabamentos ou quedas de blocos, que coloquem em risco a operação de mineração, os equipamentos ou as vidas humanas, e ulteriormente problemas em toda a envolvente.

A função original do enchimento artificial é sustentar ou reforçar o maciço onde se realizam as escavações mineiras subterrâneas e substituir os pilares, que normalmente se deixariam para trás intactos, como no método de *cut and fill*, diminuindo assim perdas de minério com significado económico e atribuindo aos níveis superiores o apoio necessário, evitando colapsos, sendo que a criação de "tectos falsos" diminui o perigo, constante, de queda de blocos durante os trabalhos, proporcionando maior segurança. Normalmente utiliza-se o enchimento quando a resistência à compressão da rocha é inferior comparativamente ao estado de tensão natural *in situ* (Brown & Brady, 2005).

Os materiais de enchimento e os seus constituintes têm de apresentar características resistentes que permitam absorver parte da energia elástica provocada pelas tensões do maciço e que induzem deformações. O enchimento desempenha assim um papel estrutural, dependendo do acréscimo da deformação armazenada no maciço e da energia que é absorvida pelo enchimento, sendo necessário controlar estruturalmente as convergências que ocorrem durante a abertura dos desmontes, durante o preenchimento dessas cavidades e o comportamento do material de preenchimento após este processo (Silva, 2012).

O maciço rochoso tende a deformar-se na envolvente do desmonte, ou seja, na zona onde existe espaço vazio dentro do maciço, podendo resultar deste fenómeno a diminuição de volume da cavidade resultante da libertação de tensões do maciço rochoso e, às vezes, em situações mais críticas, a falha do mesmo - Figura 2.5.

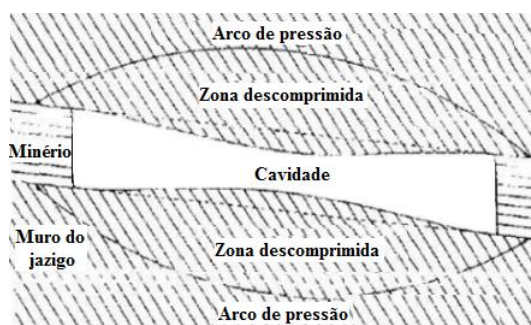


Figura 2.5: Convergências e estado de alteração das tensões *in situ* durante a abertura de desmontes

(adaptado de Costa e Silva, 1989)

Após o preenchimento dos desmontes e durante o tempo de cura, o enchimento tende a empolar, ou seja, a aumentar de volume, aplicando assim tensões ao maciço envolvente, ou às paredes adjacentes, antes de voltar a retrair até os fenómenos de expansão e retracção estarem concluídos.

O enchimento artificial, nomeadamente o efectuado com pasta, uma vez que é o caso estudado nesta dissertação, tem de cumprir com vários requisitos de acordo com as especificações impostas. Para tal é necessário recorrer à determinação das tensões horizontais que são transmitidas ao enchimento, a partir das portas de enchimento e pelas paredes do próprio maciço, que têm o mesmo papel, bem com as resistências mínimas e máximas que o enchimento deve comportar.

Segundo Belem & Benzaazoua (2004), um desses critérios refere-se ao efeito das tensões horizontais nas paredes laterais, pelo que a resistência à compressão uniaxial (RCU) do enchimento tem de ser pelo menos igual à força de compressão final na parede de enchimento sendo que, em muitos casos, as paredes adjacentes ao enchimento, formadas pelo maciço rochoso, também podem funcionar como barreiras ao enchimento e ajudam também a suportar as tensões impostas. Acresce que pode desenvolver-se o efeito de arco - Figura 2.6.

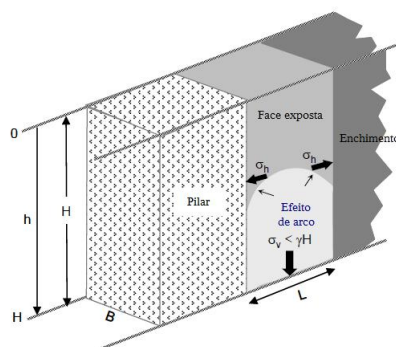


Figura 2.6: Representação esquemática do efeito de arco na mineração por enchimento (adaptado de Belem & Benzaazoua, 2004)

Em casos de enchimento onde ocorra efeito de arco, a tensão vertical é menor no final do enchimento do que o peso próprio do enchimento, devido à transferência de tensão horizontal por interação das forças de atrito e coesão entre o enchimento e o maciço rochoso. Quando o enchimento principia a deformar-se, começa a proporcionar resistência lateral passiva, que pode ser definida pela resistência máxima mobilizada quando é aplicada uma força ao enchimento e este reage a ela, oferecendo-lhe resistência (Martson, 1990 apud Belem & Benzaazoua, op. cit.).

Outro dos requisitos a cumprir pela pasta é que a sua resistência, depende da função que tem que desempenhar. Segundo Belem & Benzaazoua (op. cit.) e para um sistema de sustimento em subterrâneo, a resistência à compressão uniaxial deve ser pelo menos de 5 MPa, enquanto que no caso do enchimento de desmontes, dependendo também da sua função, é comum que seja inferior, na ordem de 1 MPa, situando-se geralmente entre 0.2 MPa e 5 MPa, dependendo da constituição da mistura utilizada.

Relativamente à função de sustimento vertical a cumprir pela pasta e de acordo com estudos efectuados (Cai 1983 apud Belem & Benzaazoua, ib.), tanto *in situ* como em laboratório, o enchimento é incapaz de suportar a totalidade do peso que lhe é imposto (σ_v) e, portanto, deve ser considerado um sistema de sustimento adicional, de modo a que sejam adoptadas

medidas complementares - Figura 2.7. Os valores normais do módulo de deformabilidade da pasta de enchimento estão entre 0,5 e 3 GPa (Yilmaz et al., 2014), enquanto que o módulo de deformabilidade do maciço rochoso envolvente pode variar de 20 GPa a 100 GPa. Estas magnitudes são importantes, pelo que é necessário determiná-las para avaliar a probabilidade de ocorrerem deformações significativas e, assim, prevenir potenciais casos de subsidência no tecto dos desmontes.

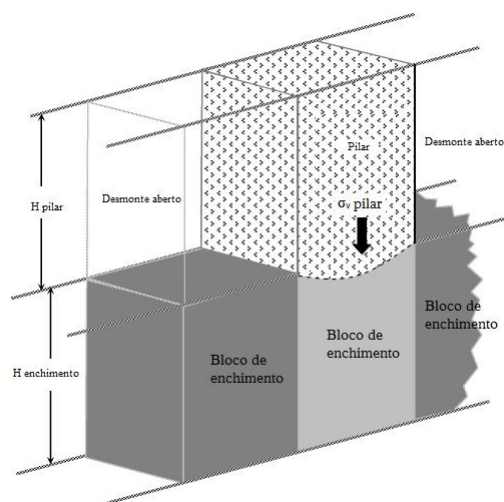


Figura 2.7: Representação esquemática da sobrecarga vertical imposta por um pilar ao enchimento

(adaptado de Belem & Benzaazoua, 2004)

O enchimento tem que cumprir, mais uma vez, os critérios em relação à resistência, pois é necessário que se mantenha estável durante as operações de extracção de minério, nomeadamente durante as furações, explosões e movimentação de equipamentos (Belem & Benzaazoua, 2004). No caso de mais do que duas faces do enchimento se encontrarem expostas, é necessário ter cuidados redobrados adoptando as necessárias medidas preventivas e de segurança. Relativamente às plataformas de trabalho e aos ciclos de trabalho da operação de extracção e também de enchimento, é necessário garantir que o enchimento apresente características resistentes de modo a que possam circular equipamentos pesados e trabalhadores em segurança.

2.4 Pasta de enchimento

2.4.1 Constituintes

2.4.1.1 Rejeitados

Como referido, os rejeitados são a principal fracção da pasta de enchimento e devem conter uma determinada quantidade de partículas finas na sua composição para que a pasta possa ser formada. Estas partículas finas têm uma maior superfície específica que viabiliza um maior

contacto com a água da mistura, proporcionando uma maior retenção de água e uma maior trabalhabilidade da pasta, bem como uma menor perda de água por evaporação (exsudação da água).

Outra característica importante é a mineralogia dos rejeitados, que influencia a capacidade de retenção de água da mistura e afecta a resistência da pasta por reacções químicas que podem ocorrer devido à sua composição e interacção com os outros constituintes.

2.4.1.2 Água

A maior parte das águas utilizadas nas misturas de pasta em minas é reciclada e devidamente tratada, provindo do circuito interno de cada mina. É assim necessário atender à sua constituição uma vez que pode conter percentagens de substâncias como o arsénio ou cianeto, entre outras, e influenciar a resistência da pasta ao reagir com os outros constituintes da mistura, para além do risco de contaminação ambiental que pode estar associado à sua circulação.

O pH da água também pode ter um impacto negativo na resistência da pasta, resultante da acção dos sulfuretos presentes na composição dos rejeitados e que entram em contacto com a água e cujas ligações químicas rompem com as do cimento e água, que conferem resistência à pasta.

Os sais presentes nesta água e cuja concentração também pode ser muito elevada, também devem ser considerados, pois podem afectar quer o peso volúmico, quer a resistência da pasta.

2.4.1.3 Cimento Portland

A função dos agentes ligantes, neste caso, cimento, é aumentar a coesão da pasta de enchimento e a sua resistência. É o cimento que proporciona resistência à pasta e consistência dependendo da relação água/cimento (A/C) que proporciona trabalhabilidade à mistura.

Um dos aspectos a ponderar é a tensão de rotura dos principais constituintes do cimento Portland ao longo do tempo. O silicato tricálcico é a sua componente que mais rapidamente reage com a água e que atinge maior resistência desde os primeiros dias (Coutinho, 2006). Já o silicato bicálcio tem uma hidratação mais lenta que aquele silicato, mas atinge tensões de rotura, também na ordem de magnitude deste último, tal como se pode verificar pela Figura 2.8. O tempo de hidratação muito curto do silicato tricálcico deve-se ao facto deste componente ser muito poroso e pouco denso, permitindo assim o rápido preenchimento dos espaços vazios por água.

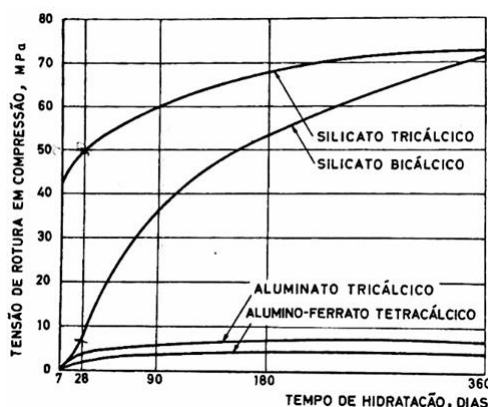


Figura 2.8: Variação da resistência à compressão dos principais constituintes do cimento Portland ao longo do tempo

(Coutinho, 2006)

É o aluminato tricálcico que contribui para a tensão de rotura até aos 28 dias de cura, sendo por essa razão que as misturas feitas com cimento Portland são normalmente ensaiadas ao longo desse tempo.

No contexto da utilização de cimento Portland em pasta de enchimento, pequenas quantidades (0,5%) influenciam o aumento da tensão de cedência acima dos 20 kPa, aceitável em termos de segurança e de estabilidade (Brackebusch, 2000 apud Saebimoghaddam, 2005).

2.4.2 Reologia

A reologia, a ciência que estuda a deformação e o escoamento dos materiais, analisa o comportamento de fluidos não-Newtonianos, como a pasta, que têm comportamento elástico-plástico durante a sua deformação, num certo período durante a cura, tendendo ao longo do tempo a apresentar um comportamento mais rígido. Ela está associada à viscosidade dos materiais e permite avaliar o comportamento da pasta de enchimento nas tubagens, visto ser o ponto de ligação entre a central de pasta e os desmontes a serem preenchidos. As tubagens são umas das responsáveis pela perda de material ou sujeitas a falhas devido à presença de bolsas de ar no seu interior e à existência de descontinuidades que potenciam essas perdas (Belem & Benzaazoua, 2004).

Como referido, as partículas de menor dimensão possuem maiores superfícies específicas, aumentando a viscosidade da pasta. A viscosidade (η) é também influenciada pela temperatura, pH da água da mistura e pelos aditivos utilizados.

A tensão de cedência consiste na tensão mínima para que se verifique fluxo, ou seja, é a resistência ao escoamento que um material apresenta e que conduz à deformação plástica, e é determinada pela trabalhabilidade, obtida no ensaio de abaixamento (*slump test*) ou do ensaio com a mesa de espalhamento. É necessário ter em atenção que o abaixamento não depende da percentagem de sólidos, mas sim, entre outras, das dimensões das partículas sólidas e da percentagem de água da mistura (Saebimoghaddam, po. cit.).

Um fluido não-Newtoniano requer a aplicação de uma determinada tensão para impulsionar o escoamento, pelo que se essa não for aplicada, os fluidos comportam-se como sólidos, cuja sua viscosidade elevada não permite o seu fluxo, aquando da sua circulação nas tubagens.

A reologia de uma pasta, no contexto do seu escoamento em sistemas pela distribuição é determinada a sua viscosidade, que pode indicar se esta tem um fluxo laminar ou mesmo se apresenta uma distribuição uniforme das partículas sólidas ao longo da secção da tubagem (Cooke, 2001 in Saebimoghaddam, 2005).

Os fluidos podem ser classificados como Newtonianos e não-Newtonianos (dependentes ou independentes do tempo) - Figura 2.9, sendo possível obter essa classificação através da relação entre a tensão de cedência (τ_0) e o factor de cedência ($\dot{\gamma}$ (s^{-1})). Segundo Saebimoghaddam, A. (2005) um fluido pode ser classificado como Não-Newtoniano se uma das condições abaixo se verificarem:

- (i) Não existir uma relação linear entre tensão de cedência e factor de cedência;
- (ii) Existir uma relação linear entre tensão de cedência e factor de cedência, mas a recta não pode passar na origem;
- (iii) Se a relação entre tensão de cedência e factor de cedência ser dependente do tempo.

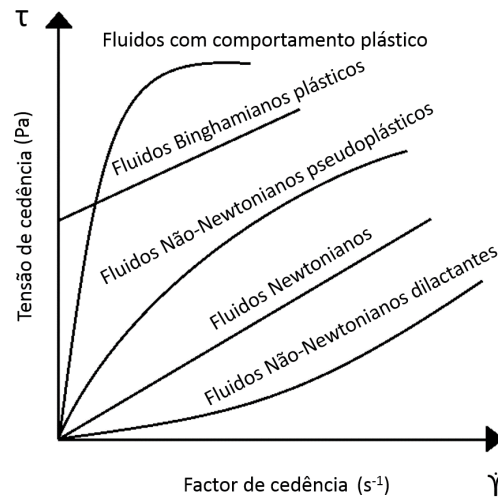


Figura 2.9: Relação entre a tensão de cedência e o factor de cedência para classificação de fluidos

(adaptado de Zvirblis, 2014)

É possível calcular a tensão de cedência (τ_0), depois de se obter o valor do abaixamento (S), usando a equação proposta por Ferraris & de Larrard (1998 apud Belem & Benzaoua, 2004):

$$\tau_0 = \frac{\rho(H - S)}{x} + y \quad (2.2)$$

onde ρ = massa volúmica da pasta (Mg/m^3), S = abaixamento (mm), H = altura do cone (mm), x (pasta) = 347 e y (pasta) = 212.

As propriedades reológicas da pasta de enchimento são obtidas através do ensaio de abaixamento ou em equipamentos como o reómetro e o viscosímetro. A tensão de cedência está correlacionada com o teor em água presente no material. Quando o teor em água aumenta, a tensão de cedência tende a diminuir, ou seja, o material tende a ser menos rígido.

O ensaio de abaixamento normalizado conta com uma altura inicial de 300 mm para determinar a trabalhabilidade da pasta, sendo que os valores de abaixamento aceitáveis situam-se entre 130 mm e 230 mm. Os ensaios à pasta fresca com recurso a viscosímetros atribuem uma tensão de cedência à pasta de enchimento entre 200 Pa e 700 Pa (Potvin et al., 2005).

2.4.3 Mineralogia do rejeitado

O tipo de rejeitado constituinte da mistura de pasta depende primeiramente de tudo, do material que está a ser explorado, tendo a mineralogia do rejeitado influência na retenção de água, na resistência, devido às reacções químicas que podem ocorrer, na capacidade de sedimentação e até na acção abrasiva da pasta.

Esta propriedade afecta diferentes características da pasta de enchimento, como o peso específico das partículas sólidas, assim como a densidade da própria pasta.

A sericite é um mineral que quando presente numa mistura de pasta proporciona uma maior retenção de água reduzindo a resistência da pasta, para além de apresentar uma geometria plana e lisa, que também reduz a resistência quebrando as ligações entre os outros materiais presentes na mistura, formando pontos de fraqueza susceptíveis a deformações (Potvin, et al, 2005).

A presença no rejeitado de minerais siliciosos, como o quartzo, podem ser significativamente abrasivos e causar danos nas tubagens na altura da sua passagem, enquanto minerais como os sulfuretos podem causar a diminuição da resistência ao reagir e quebrando as ligações do cimento formadas durante a sua hidratação, ou gerando novos minerais no interior da pasta, que podem causar a sua degradação.

2.4.4 Distribuição granulométrica

A dimensão dos grãos ou das partículas do rejeitado presente na mistura de pasta depende do processo de cominuição do material extraído em lavaria e da quantidade de vezes que o material passou por esse processo, ou seja, o tamanho das partículas está directamente relacionado com o método utilizado no processamento de minério e da quantidade de vezes pelo qual passou no processo de redução de granulometria. Normalmente, a dimensão das partículas de rejeitado vai variando, pois as características do material que é processado nunca é igual, sendo necessário realizar-lhe uma análise granulométrica.

A distribuição granulométrica do material constituinte da pasta, nomeadamente do rejeitado, é um dos factores mais importantes de que depende o desempenho, no que toca às suas

características mecânicas. Quanto menor for a respectiva dimensão dos grãos de rejeitado, maior superfície específica irá haver em contacto com o cimento, sendo que existirão mais ligações entre estes dois constituintes na mistura, o que vai possibilitar o aumento da coesão e da resistência da pasta. Para além disso, quanto menor for a dimensão dos grãos da mistura, menos espaços vazios existirão, devido ao condicionamento e agrupamento entre as partículas. O facto de existirem poucos espaços vazios diminui o risco de formação de novos minerais no interior da mistura, devido à interacção do ar com os constituintes, e para além disso, quanto menores espaços vazios existirem, maior será a resistência da pasta, uma vez que há uma diminuição dos possíveis pontos de fraqueza no seu interior que poderiam levar à rotura (Potvin, et al, 2005).

A distribuição granulométrica das partículas sólidas do rejeitado estão directamente correlacionadas com outras propriedades da pasta, como a quantidade de vazios, sendo que se as partículas não forem todas da mesma dimensão existe um rearranjo das mesmas, reduzindo os vazios. Quanto mais baixo for a percentagem de vazios na pasta mais elevada é a sua densidade. As propriedades de escoamento da pasta (fluxo) também estão relacionadas com a dimensão das partículas de rejeitado, uma vez que ela deve sempre conter na sua mistura uma determinada proporção de finos para evitar fenómenos de sedimentação, ao favorecer maior contacto com a água. Quanto maior for a percentagem de finos na mistura, mais baixa é a relação entre permeabilidade e percolação, assim como também é afectada a facilidade, ou não, com que a pasta é bombeada através das tubagens. No caso da pasta, a sua velocidade de escoamento deve sempre ser maior que a velocidade crítica, reduzindo a probabilidade de sedimentação e colmatção das tubagens, tal como descrito na Figura 2.10 (Potvin, et al., 2005).

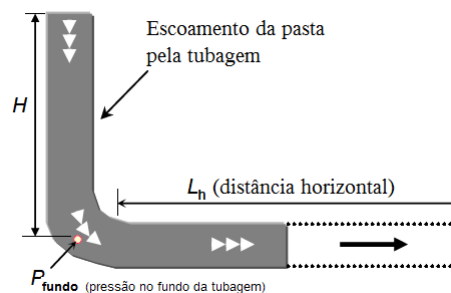


Figura 2.10: Esquema do escoamento de pasta no interior das tubagens (adaptado de Belem & Benzaazoua, 2004)

A granulometria do material é analisada directamente na curva granulométrica, sendo possível quantificar o tipo de granulometria presente através do coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c). Estes traduzem relações entre os diâmetros equivalentes D_{10} , D_{30} e D_{60} ; se os diâmetros equivalentes forem iguais a uma determinada dimensão y , significa que 10%, 30% e 60% do material possui uma dimensão inferior a y respectivamente.

O coeficiente de uniformidade consiste no valor correspondente à graduação do material, ou seja, ao quanto o material é uniforme, e corresponde à razão entre D_{10} e D_{60} , tal como na

seguinte equação:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.3)$$

Já o coeficiente de curvatura representa o tipo de concavidade apresentada na curva, sendo dado pela equação seguinte:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2.4)$$

2.4.5 Teor em água

A água é um componente sempre presente na mistura de pasta de enchimento e em todo o processo de cura, podendo influenciar o comportamento da pasta das mais diversas maneiras.

Quanto maior for a relação A/C de uma mistura, maior é a porosidade que criam e menor é a resistência mecânica da pasta. Quanto mais água houver numa mistura de cimento, maior é a trabalhabilidade da mesma, mas influencia a resistência ao haver excesso de água para hidratar tal proporção de ligante, podendo potenciar fenómenos de exsudação e criando espaços vazios que funcionam como pontos de fraqueza no material, havendo maior probabilidade de ocorrer rotura a partir desses pontos.

A adição de água na mistura é responsável por outros parâmetros característicos da pasta e do comportamento da mistura, ou seja, através da adição contínua de água, a mistura pode começar a comportar-se como um semi-sólido, como um fluido plástico ou como um líquido pastoso (no caso da pasta de enchimento normal), ou como uma lama no caso de conter água em excesso (Potvin et al, 2005).

2.4.6 Temperatura e humidade

A temperatura e humidade são factores que influenciam a pasta de enchimento tanto no momento da mistura, pelo que as condições devem ser controladas, quer durante o enchimento dos desmontes, durante e após o processo de cura da mesma. Durante a mistura dos constituintes da pasta, as condições atmosféricas também devem ser controladas para diminuir a influência no desempenho dos materiais.

2.4.7 Resistência

Um dos parâmetros mais importantes no estudo de pastas de enchimento consiste em averiguar e procurar quais os componentes que atribuem a maior resistência possível à mesma. A resistência da pasta é directamente correlacionada com a estabilidade que a mesma proporciona, ou seja, é caracterizada pela maior ou menor capacidade de resistir às tensões a que fica sujeita durante e após a sua colocação. A resistência resulta da adição de cimento à mistura, um agente ligante que fornece coesão e, ao longo da cura da pasta, estabelece ligações com a água aumentando a resistência do material.

Esta resistência está directamente associada à sua tensão de rotura ou corte, ou seja, o material é mais resistente quando solicitadas as tensões que actuam sobre o mesmo, quanto maior for o valor da tensão de corte (Potvin, et al., 2005). A resistência de um material pode ser representada pela equação de Mohr-Coulomb:

$$t = \sigma \times \tan \varphi + c \quad (2.5)$$

sendo t = tensão de corte, σ = tensão normal, φ = ao ângulo de atrito do material e c = coesão do material.

O enchimento com pasta é o único que permite a exposição de uma face vertical na exploração, ao contrário do enchimento hidráulico.

2.5 Controlo de qualidade e monitorização do enchimento

Ao longo de todo o processo de produção de pasta até à sua deposição nos desmontes é realizado o controlo de qualidade através de monitorização por *software* e por ensaios. Todo o processo de transporte é controlado por densímetros, desde a central de espessamento até à misturadora de pasta. Os ensaios realizados são sobretudo para determinar a percentagem de sólidos e a densidade da "polpa", "torta", pasta e também através de ensaios de abaixamento para determinação da consistência para controlar a adição de cimento e de água e ensaios para determinação da reologia da pasta fresca com recurso a reómetros e a viscosímetros.

Após a deposição da pasta nos respectivos desmontes, a monitorização continua, desde a instrumentação das tensões exercidas nas portas de enchimento, para determinar quando se dá a retracção após a sua presa, a partir de extensómetros e também ao longo de várias vezes ao dia com recurso a sondagens carotadas segundo várias direcções que fornecem tarolos para determinar, em laboratório, a resistência da pasta que está no desmonte ao longo do tempo de cura.

Os ensaios para determinação da resistência mecânica da pasta podem ser de compressão uniaxial (RCU), de tracção indirecta ou em ensaios triaxiais, realizados segundo condições consolidadas e drenadas ou não consolidadas não drenadas. As dimensões dos provetes de pasta a ser utilizados devem estar de acordo com a especificação de que o diâmetro deve ser 10 vezes superior à dimensão do maior grão da amostra, sendo que no caso de pasta de enchimento a composição é normalmente fina.

Numa mina de ouro no Canadá foi feita a instrumentação com células de pressão do enchimento com pasta, para que fosse possível medir as tensões envolvidas durante e após o enchimento estar completo. Os resultados das medições indicaram que as tensões aumentam durante o enchimento, mas tentem a reduzir depois do processo estar concluído e que as tensões longitudinais são mais elevadas do que a vertical e transversal, sendo estas últimas semelhantes (Belem et al., 2004).

2.6 Comportamento da pasta - casos de estudo

O comportamento da pasta de enchimento ao longo do tempo tem sido, nos últimos anos, alvo de variados estudos, que se focam principalmente na resistência e durabilidade da pasta em função dos dias de cura e consoante as quantidades e tipos de rejeitado, cimento e água que estão presentes na mistura. Normalmente os estudos são efectuados tendo em consideração diferentes estágios de cura da pasta, nomeadamente aos 3, 7, 14, 28, 56, 91, 126 e 365 dias de cura. As percentagens de cimento que são utilizadas nas misturas rondam, como já anteriormente referido, entre 3 e 7% de cimento. Num estudo efectuado por Belem & Benzaazoua (2004), mostra-se a evolução da resistência de pastas constituídas por diferentes percentagens de cimento, apesar de serem todas do mesmo tipo, notando-se que quanto maior a percentagem de agente ligante, maior é a resistência da pasta ao longo do tempo, tendo tendência para estabilizar a partir dos 91 dias de cura, tal como demonstrado pela Figura 2.11.

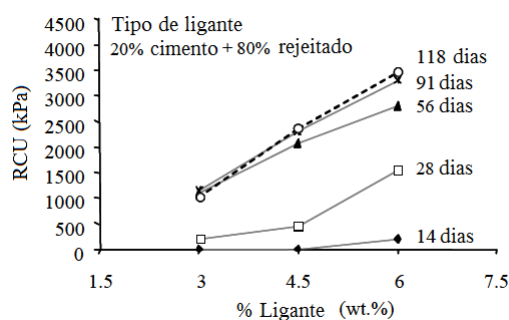


Figura 2.11: Exemplo da variação das resistências à compressão uniaxial em função das diferentes percentagens de ligante utilizado nas misturas durante os diferentes dias de cura (adaptado de Belem & Benzaazoua, op. cit.)

O pH da água, os elementos químicos presentes na pasta e a sua proveniência, associada aos elementos químicos que se encontram na água, também influenciam, por assim dizer, a qualidade. Segundo Belem & Benzaazoua (op. cit.), a maior preocupação em relação à qualidade da água que é introduzida na mistura é o seu pH e a quantidade de sais de sulfatos que possam estar presentes, pois água ácida ou a presença desses sais podem levar a perdas de resistência e à diminuição da durabilidade da pasta, como referido.

Yilmaz et al.(2014) estudaram a acção de três tipos de água diferentes, no comportamento de pasta de enchimento, quando misturada com cimento e cinzas volantes como agentes ligantes e o mesmo tipo de rejeitado. As águas utilizadas foram respectivamente água de abastecimento público, água do lago e água resultante do processamento mineiro. Como se observa na Figura 2.12, a resistência das três pastas são semelhantes durante os primeiros 14 dias de cura, sendo que a resistência começa gradualmente a aumentar até aos 28 dias de cura, notando-se distinções significativas entre os valores, nomeadamente verifica-se que a pasta cuja mistura continha água resultante do processamento mineiro apresentou valores de resistência muito inferiores às restantes, muito provavelmente devido ao facto de haver maior quantidade de sulfuretos presentes nessa mesma água.

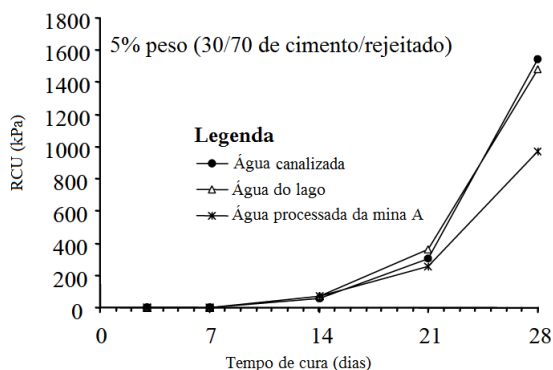
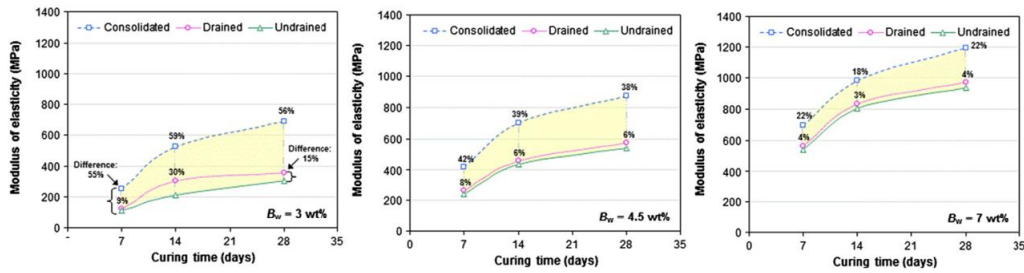


Figura 2.12: Efeito na resistência da pasta de enchimento consoantes os diferentes tipos de água utilizados na mistura

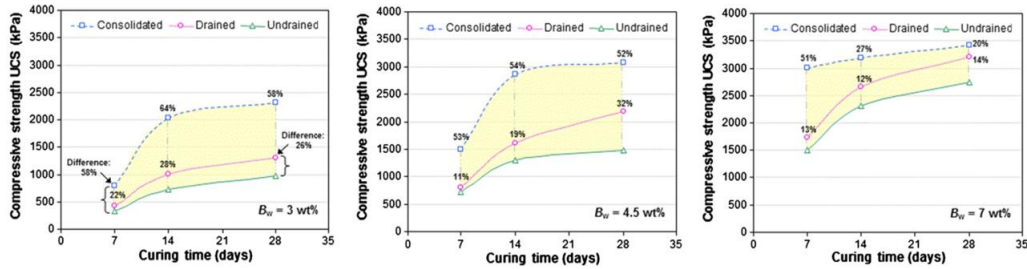
(adaptado de Belem & Benzaazoua, 2004)

Outros estudos também efectuados por Yilmaz et al. (2014) sobre evolução da cura segundo vários parâmetros, nomeadamente em relação às condições de ensaio, consolidada, drenada e não drenada, têm uma correlação directa com o teor em água nos provetes e, consequentemente, como a respectiva resistência mecânica. Ensaíram provetes com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, com 3%, 4,5% e 7% de cimento, ao longo de 7, 14 e 28 dias de cura. A análise da Figuras 2.13 permite verificar que, quanto maior a percentagem de ligante (cimento) na mistura, maior é a resistência obtida ao longo dos dias de cura e que a resistência é maior com provetes em condições drenadas para todas as percentagens de cimento na mistura. É também possível verificar que, quanto maior a percentagem de cimento na pasta, maior é o módulo de deformabilidade (E) e que este é maior em condições não drenadas. O teor em água é sempre maior também em condições não drenadas, não existindo perdas de água, e é menor quanto maior for a percentagem de cimento na pasta, ocorrendo uma diminuição exponencial após os 14 dias de cura para pasta com 7% de cimento, por consumo de água por hidratação do ligante, ao contrário do que sucede com percentagens inferiores, onde existe um excesso de água para a percentagem de cimento que é necessária hidratar.

a) RCU;



b) E;



c) Teor em água

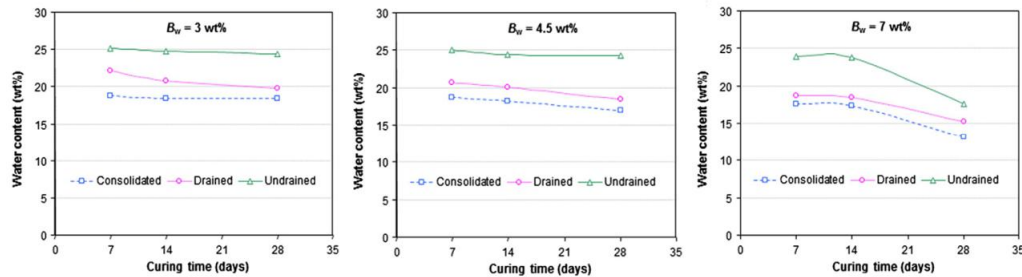


Figura 2.13: Evolução de vários parâmetros segundo condições consolidadas, drenadas e não drenadas ao longo do tempo de cura
(adaptado de Yilmaz et al., 2014)

O módulo de elasticidade (E) em condições de ensaio consolidadas situa-se entre 0,25 GPa a 1,2 GPa, com valores entre 0,15 GPa e 1 GPa em condições drenadas e entre 0,11 GPa e 0,9 GPa para condições não drenadas, o que confirma que, quanto maior for o teor em água da pasta, menor é a sua resistência mecânica e maior é a sua deformabilidade.

Os requisitos imprescindíveis à aplicação de pasta no enchimento mineiro são, em primeiro lugar, as propriedades de escoamento (fluxo) da pasta no âmbito do seu transporte até à sua deposição em desmontes e, em segundo, a pasta deve ser dimensionada de modo a obedecer aos critérios de estabilidade impostos no que diz respeito à resistência mínima exigida necessária para providenciar segurança e estabilidade.

A probabilidade de ocorrência de fenómenos de liquefacção em pasta de enchimento com aproximadamente 3% de cimento e um índice de vazios maior que 0,96, é muito baixa (Aref et al., 1989; Potvin et al., 2005). Estudos efectuados na mina de Neves Corvo, em Portugal, mostram que para evitar fenómenos de liquefacção apenas é necessário cerca de 1% de cimento

na mistura de pasta (Been et al., 2001 apud Potvin et al., 2005).

Como a pasta é um fluido viscoso, necessita que sejam impostas pressões mais altas do que, por exemplo, no enchimento hidráulico, para que o transporte, nos sistemas de distribuição, seja possível e se evitem perdas de material durante esses trajectos. As perdas de pressão são maiores no transporte de pasta do que no de enchimento hidráulico, e como consequência dessa perda de pressão no fundo das tubagens verticais, vai haver menor passagem de pasta nas tubagens horizontais em sistemas de distribuição por gravidade, sendo necessário um dimensionamento da pasta em função do sistema de distribuição que será utilizado na mina. Quando o escoamento por gravidade não é adequado ao transporte da pasta, torna-se necessário a implementação de bombas para aumentar a pressão e, assim, a velocidade de escoamento, evitando perdas de material.

Na produção de enchimento com pasta é fundamental a utilização de sistemas de retenção de água para que haja um aumento da percentagem de sólidos na pasta e não exista excesso de água. Estes sistemas são essenciais uma vez que o rejeitado tende a absorver grandes quantidades de água e esta tem um papel activo na diminuição da resistência da pasta, como anteriormente referido.

2.7 Vantagens do enchimento de desmontes com pasta

Como salientado previamente, a utilização da pasta de enchimento proporciona variadas vantagens, seja em relação à reutilização dos materiais desperdiçados como em termos económicos. As principais vantagens são as seguintes (Potvin et al., 2005):

- Permite reduzir o volume ocupado à superfície pelo material rejeitado;
- Permite reduzir os riscos ambientais associados à contaminação de águas subterrâneas e solos, no caso das barragens de rejeitados ou bacias de sedimentação, denominadas por infraestruturas de deposição de resíduos;
- A reutilização de rejeitados permite reduzir custos e limitar a extracção de areias ou outros materiais que seriam utilizados para a mesma função;
- Permite a utilização de vários materiais a ponto de reduzir os custos associados à utilização de cimento;
- Método de sustimento que confere estabilidade ao maciço rochoso e segurança;
- Método de extracção mineira que possibilita a optimização do processo e uma maior quantidade de minério recolhido;
- Método onde existe um risco muito diminuto de ocorrência de cedência das portas de enchimento e torrentes de pasta, mais provável de ocorrer no enchimento hidráulico;
- Um material cuja mistura é muito uniforme e com baixa porosidade, onde não ocorrem normalmente fenómenos de segregação;

- Os tempos de preparação são reduzidos em comparação com os do enchimento hidráulico, pois como é um método que utiliza maior percentagem de cimento, e por isso a presa ocorre mais rapidamente;
- Permite reduzir custos associados à manutenção das plataformas de trabalho, rampas, entre outras.

Caso de Estudo - Mina de Aljustrel, Almina

3.1 Generalidades

A Mina de Aljustrel é composta por vários jazigos que se localizam em redor de Aljustrel e onde se encontram diferentes massas de sulfuretos polimetálicos, designados por: Algares, Moinho, Feitais, Estação e São João. Como referido, a pasta de enchimento estudada é constituída por rejeitado de Zinco proveniente do jazigo de Feitais, em Aljustrel. Neste capítulo e após breve enquadramento da Mina de Aljustrel, descreve-se principalmente o processo de controlo de qualidade executado pelo laboratório geotécnico da Almina, os estudos de dimensionamento executados para o enchimento de desmontes e a caracterização do rejeitado de Zinco ao longo de alguns meses.

3.2 Enquadramento geográfico

A Mina de Aljustrel, do grupo português Almina - Minas do Alentejo S.A. (adiante designado de Almina), extrai pirites, sulfuretos e outros minérios. A Almina está localizada no Distrito de Beja, Concelho de Aljustrel, englobando quatro Freguesias, a de Aljustrel e Rio de Moinhos, Evidel, Messejana e São João de Negrilhos. A zona de Aljustrel é limitada a norte por Ferreira do Alentejo, a leste por Beja, a sul por Castro Verde, a sudoeste por Ourique e a oeste por Santiago do Cacém - Figura 3.1.

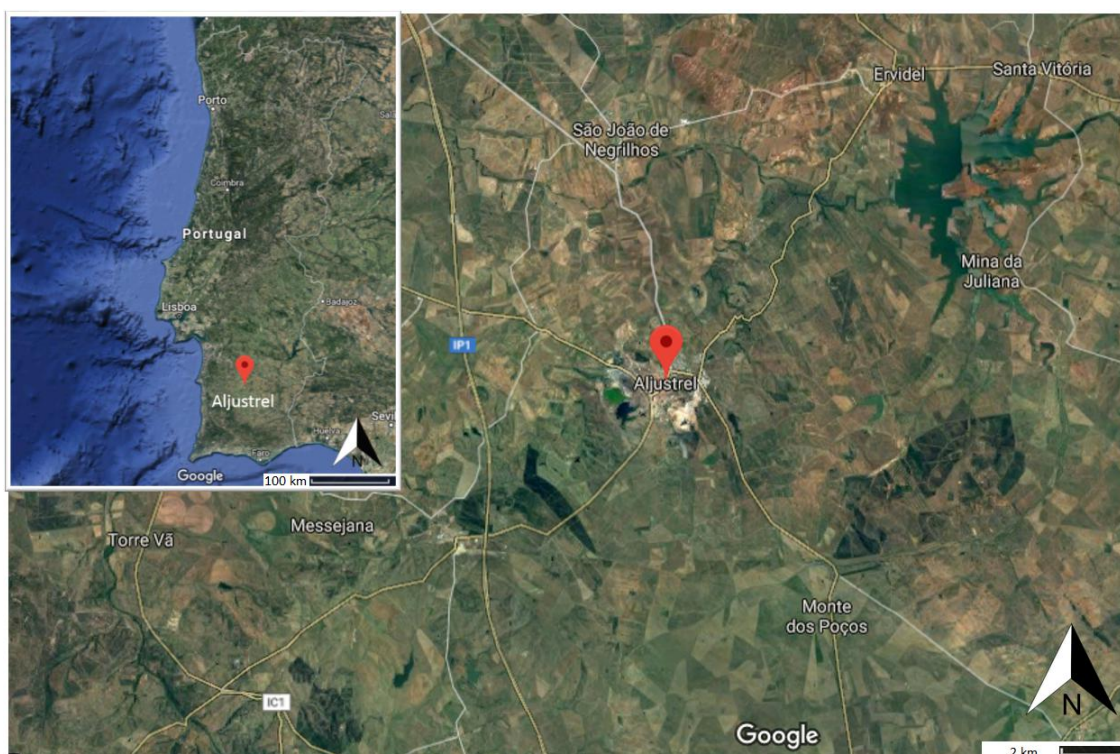


Figura 3.1: Enquadramento de Aljustrel e em Portugal Continental (GoogleMaps.com)

Aljustrel fica no Baixo Alentejo, tem cerca de 4 600 habitantes e é conhecida pela sua mina e historicamente por ser um dos locais explorados pelos Romanos, desde o século I a.C. até ao século IV d.C. Na Figura 3.2 é possível visualizar onde estão localizadas as massas onde se faz a extracção de minério em Aljustrel.



Figura 3.2: Esquema da localização das massas de sulfuretos polimetálicos que fazem parte da Almina, em Aljustrel

(Candeias, 2008)

Segundo Almina (2018), a concessão mineira tem aproximadamente 18.76 km² de área,

abrangendo os depósitos de São João, Moinho, Feitais e Estação. Aljustrel está também ligada à rede nacional ferroviária, nomeadamente à Linha do Sul, e encontra-se somente a 6 km da A2 que liga Lisboa ao Algarve. Para além destas ligações, também são acessíveis os portos de Setúbal, Sines e Huelva, a 160 km, 80 km e 200 km, respectivamente, da Almina (almina.pt).

3.3 Enquadramento geológico

Aljustrel encontra-se localizada geologicamente na Zona Sul Portuguesa, como se pode verificar na Figura 3.3, nomeadamente na Formação de Mértola, com cerca de 340 a 330 M.a. e por um complexo Vulcano-Sedimentar caracterizado pela Faixa Piritosa Ibérica, que tem cerca de 352 a 330 M.a. O soco Paleozóico é fortemente controlado estruturalmente, com evidências de cavalgamentos vergentes para sudoeste e por falhas com orientação N-S e NE-SW. A tectónica nesta região é representada pelos desligamentos subverticais de Azinhal, de Fetais, Represa e Castelo, e pela famosa Falha de Odemira-Ávila (Candeias, M., 2008).

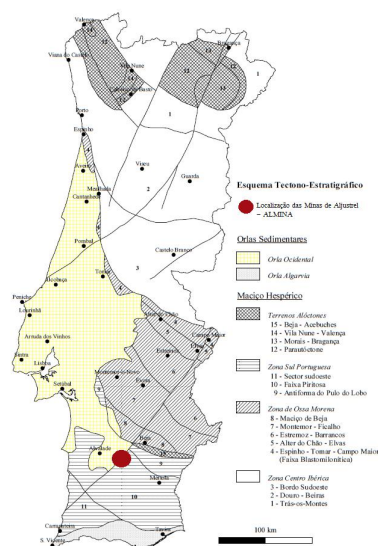


Figura 3.3: Localização das massas de sulfuretos polimetálicos em Aljustrel - Almina (adaptado de Ferreira, A. (s.d.))

De modo a detalhar o enquadramento geológico da zona de Aljustrel e da Faixa Piritosa Ibérica aconselha-se a leitura de Kullberg et al. (2013).

3.4 Jazigo de Feitais - Exploração de Zinco

O jazigo de Fetais, situado na parte Sudeste da concessão mineira, foi descoberta a partir de métodos gravimétricos, e tem um comprimento de cerca de 1000 m, cerca de 800 m de largura e 100 m de espessura com uma inclinação de 50-60° para Noroeste (Ferreira, op. cit.). Os minerais presentes neste jazigo e que são considerados estéreis são maioritariamente o quartzo, os carbonatos e barite.

Este jazigo é constituído pelas formações de Riólito Inferior, *Stockwork*, Sulfuretos maciços, Riólito Superior, Unidade Sedimentar Inferior (Formação siliciosa de Paraíso) e pela Unidade Sedimentar Superior (Grupo *Flych* e Formação de Mértola), da mais antiga para a recente respectivamente (Ferreira, 2015). Esta massa está delimitada por falhas e é rica em Cobre e em Zinco, dependendo das zonas da massa, sendo que os depósitos estão sobrejacentes às zonas de *Stockwork* ricas em Cobre. O muro do corpo mineralizado é constituído por sulfuretos maciços, compostos por pirite, calcopirite, tetraedrite, esfalerite e galena (op. cit.).

Actualmente o minério a ser explorado em Feitais é o Zinco (Zn), não impedindo que quando necessário, e se as cotas do mercado validarem a extracção de Cobre (Cu), não seja também feita a sua exploração. O Zn é muito mais difícil de separar do estéril que o Cu e o rejeitado produzido em lavaria é também de granulometria muito mais fina, podendo ser considerado um silte.

O enchimento com pasta é colocado em prática nesta mina no âmbito da respectiva mineração para permitir a maior rentabilização dos recursos minerais disponíveis e diminuir os desperdícios e os impactes ambientais associados. O método de desmonte utilizado em Feitais é do tipo bancada e enchimento longitudinal (secção 2.2). Este método tem início, no sentido ascendente, com a abertura de uma *slot* nos níveis do corpo mineralizado, até aos níveis inferiores, criando assim a primeira frente livre que possibilita o desmonte, em sequência, e acabando, posteriormente, com a exploração desse nível, após o respectivo enchimento.

Em Feitais, a dimensão dos desmontes é de 25 m de altura \times 15 m de largura \times 40 m de comprimento, sendo que o objectivo é aumentar o desmonte para 40 m de altura \times 15 m de largura \times 40 m de comprimento. Os desmontes são realizados com auxílio a duas galerias (*drift*) com 5 m de altura, sempre reforçadas com betão projectado em toda a sua secção, uma no nível superior e outra no nível inferior, onde se procede à furação de 15 m, ascendente e descendente. Este método de desmonte é realizado segundo a abertura, consecutiva, de desmontes primários e secundários, intervalados.

Depois da abertura dos desmontes, executam-se os abatimentos correspondentes na zona da abertura, sendo que a remoção do minério é posteriormente feita através de pás carregadoras que transportam o material até ao britador primário, ainda dentro da mina. Após o desmonte e o transporte do material estarem concluídos, realizam-se o preenchimento dos desmontes primários e secundários, onde variam as percentagens de cimento utilizados em cada um. Nos desmontes primários é utilizado o rejeitado fino proveniente das lavarias misturado com percentagens maiores de cimento, pois é neles que é crítica a resistência mínima exigida. Nos desmontes secundários, o enchimento é realizado através da mistura de material estéril proveniente das escombrelas, de dimensões mais grosseiras, com percentagens inferiores de cimento.

No caso de um desmonte com 40 m de altura \times 15 m de largura \times 40 m de comprimento o desmonte primário será realizado em três fases. Na primeira fase e com o auxílio de portas de enchimento em betão, é colocada pasta com 6% de cimento até uma altura de 7 m e deixada em repouso durante 5 dias, altura em que o enchimento pára de expandir e começa a retrair. Nesses 5 dias, a pasta começa a ganhar presa e resistência, actuando também como

um tampão no fundo do desmonte. Esta fase tem como objectivo não colocar sob demasiada pressão as portas de enchimento, sendo que se o enchimento fosse contínuo poderia haver o colapso das mesmas devido ao peso da pasta nelas. A segunda fase consiste no prosseguimento do enchimento até 33 m de altura com pasta com 4% de cimento. A última fase corresponde aos 7 m finais, novamente com pasta 6% de cimento, tal como é possível ver na Figura 3.4. Para além da pasta, é também acrescentada à superfície do topo uma camada mais fina de escombros. De referir que, actualmente, os desmontes estão a ser preenchidos unicamente com pasta com 6% de cimento.

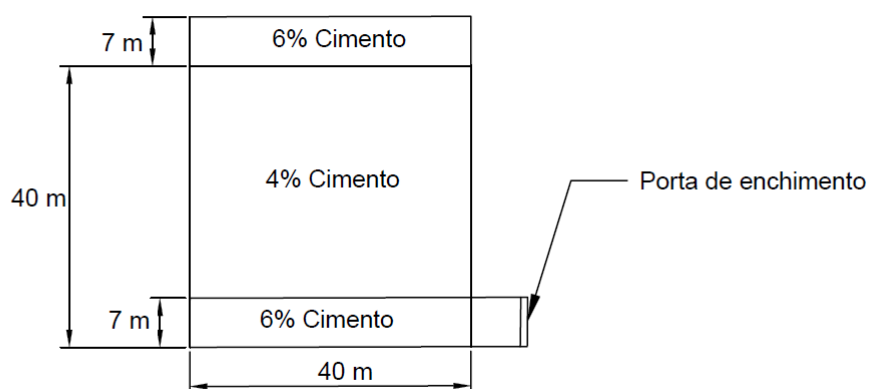


Figura 3.4: Esquema do método de enchimento primário

As portas de enchimento são colocadas normalmente a 7 m do desmonte, ou seja, não estão localizadas imediatamente no fundo do desmonte, mas sim afastadas 7 m para a lateral do mesmo. Todas as portas de enchimento são instrumentadas com extensómetros de corda vibrante, de modo medir as forças que são aplicadas na porta devido à pressão exercida pela pasta, sendo esta uma medida de segurança. A pressão máxima exercida pela pasta é máxima ao fim de 5 dias, pelo que no fim destes dias existe um decréscimo contínuo da mesma.

O objectivo de implementar diferentes percentagens de cimento na pasta, consoante as fases de enchimento, tem um propósito: obter a maior resistência possível da pasta ao mesmo tempo que se diminui os custos. Para o efeito é fundamental adoptar medidas extra no topo e no base de cada desmonte, para que haja maior segurança, pois são as plataformas mais críticas devido à exposição e ao trabalho desencadeado sobre as mesmas. São o topo e a base dos desmontes que funcionam como plataformas de trabalho (solicitadas por grandes carregamentos), implicando que são os locais onde se exercem mais forças exteriores às tensões induzidas pelo maciço. Para além da plataforma de trabalho ter de estar nas melhores condições, o topo tem também de acompanhar, em termos de segurança, os operadores e os equipamentos. Em sentido ascendente, um topo torna-se numa base e vice-versa. De modo a economizar nas quantidades de cimento utilizadas, o meio do desmonte é assim preenchido com menor quantidade de cimento.

Os desmontes secundários são preenchidos com material proveniente de escombrelas, mais grosseiros e com pasta com uma percentagem inferior de cimento, sendo que também estes levam nos últimos metros uma camada de escombrela. Acresce que os desmontes secundários só são abertos ao fim dos 28 dias de cura da pasta de enchimento dos desmontes primários.

3.5 Requisitos da pasta de enchimento

Em 2016, estando em exploração os jazigos de Moinho e Feitais, foram realizados estudos para a Almina, sobre os parâmetros necessários ao dimensionamento e implantação da central de pasta e da própria pasta. Nessa altura o minério extraído da mina era fundamentalmente o Cu e, pelo que todos os relatórios efectuados e ensaios de dimensionamento da pasta basearam-se no rejeitado desse metal e não em Zn, como no presente estudo.

Actualmente e de modo a colmatar a procura de Zn no mercado, como referido, só está a ser extraído este material, sendo esse o rejeitado utilizado na produção de pasta de rejeitado, existindo assim variações quanto aos critérios dos estudos previamente efectuados.

Os estudos encomendados consideraram única e exclusivamente o rejeitado de Cu, sendo que um dos parâmetros a considerar é a respectiva densidade, fundamental ao dimensionamento da pasta de enchimento. A densidade do rejeitado de Zn é superior à do de Cu.

Os ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial (RCU) efectuados em provetes de pasta de rejeitado de Cu, mostram que nas diferentes percentagens consideradas - 2%, 4% e 6%, de cimento que constituem a pasta, a resistência aumenta até aos 28 dias de cura e dos 28 aos 56 dias há uma diminuição da mesma, associada à presença de sulfuretos presentes no rejeitado de Cu, tal como se verifica pela Tabela 3.1.

Tabela 3.1: RCU da pasta composta por rejeitado de Cu

	Tempo de cura (dias)	Resistência à compressão uniaxial - σ (kPa)		
		2% Ci	4% Ci	6% Ci
(Cortesia da Almina)	7	194	340	652
	28	223	406	729
	56	192	370	695

A recomendação inicial era que a percentagem de sólidos transportado da central de pasta, como polpa, a partir da central de rejeitado, devia ser pelo menos de 65%.

Os estudos analisaram ainda as resistências mínimas que a pasta teria de cumprir, obrigatoriamente, para cumprir as suas funções. Tal foi efectuado através da análise de Mitchell, ou seja, procedeu-se à estimação da resistência que o enchimento necessita de suportar quando é sujeito à acção de um bloco de enchimento, segundo diferentes condições. Considerando o método do assentamento é possível determinar quais os factores que são responsáveis pela possível rotura de um bloco de enchimento por um plano de rotura e compará-los às forças de resistência mobilizados, pelo cálculo do respectivo Factor de Segurança (FS) global.

A resistência de um bloco de enchimento pode ser determinada, primeiramente, considerando que as paredes do bloco de enchimento têm atrito lateral (melhor cenário) e que após a sua exposição, ou seja, ambos os desmontes secundários estão abertos, não existindo atrito nas paredes do bloco de enchimento, respectivamente.

Para o caso de haver atrito lateral - Figura 3.5, nas paredes do bloco de enchimento pode-se obter a resistência do bloco de enchimento segundo a seguinte equação da análise de Mitchell (1982, *apud* Belem e Benzaazoua, 2004):

$$RCU_{enchimento} = \frac{(\gamma_{enchimento} - 2c)(H - \frac{B}{2} \times \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2})) \times (\sin(45^\circ + \frac{\varphi}{2}))}{l} \times FS \quad (3.1)$$

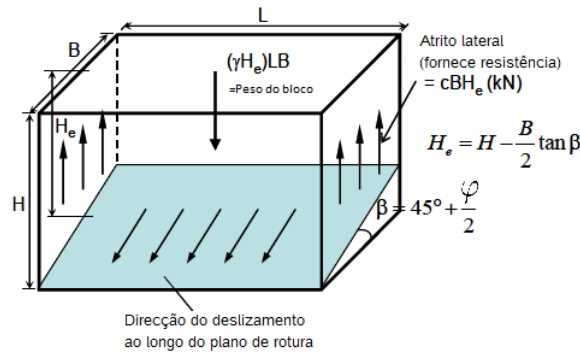


Figura 3.5: Esquema para a análise de Mitchell com mobilização de atrito lateral nas paredes do enchimento

(Mitchell, 1982 *apud* Belem e Benzazzoua, 2004)

Já para o pior cenário de todos, em que as paredes do bloco de enchimento estão totalmente expostas, como na Figura 3.6, onde $\varphi = 0$ e $c = \frac{RCU}{2}$, caso do enchimento fino. Para o caso de ser possível a obtenção daqueles parâmetros resistentes em ensaios triaxiais, pode-se recorrer à seguinte equação, também sugerida por Mitchell:

$$RCU_{enchimento} = \frac{(\gamma l - 2c)(H - \frac{B}{2}) \sin 45^\circ}{l} \times FS \quad (3.2)$$

No caso de não ser possível obter c pode ser utilizada a equação dada de Mitchell (1983 *apud* op. cit.):

$$RCU_{enchimento} = \frac{\gamma l H}{l + H} \times FS \quad (3.3)$$

Nestas equações, $\gamma_{enchimento}$ corresponde ao peso volúmico do enchimento (kN/m^3), c a coesão do enchimento (kPa), l o comprimento do bloco de enchimento (m), B é a largura desse bloco (m), H é a respectiva altura (m) e FS , normalmente igual a 1,5.

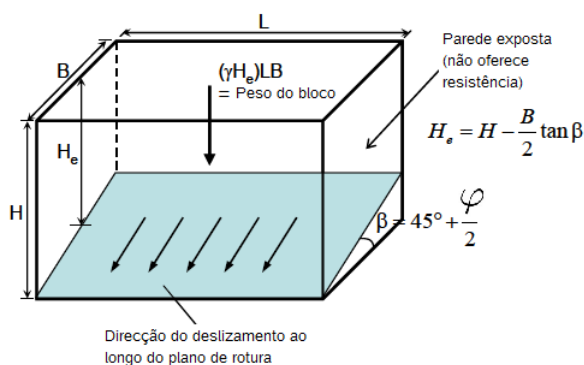


Figura 3.6: Esquema da análise de Mitchell para a situação de ausência de atrito lateral nas paredes do enchimento

(Mitchell, 1983 *apud* Belem e Benzazzoua, 2004)

Com esta análise é possível estimar os valores de resistência mínima exigidos para desmontes com diferentes dimensões, estando estes valores referidos na Tabela 3.2 .

Tabela 3.2: Resistências mínimas em função das dimensões dos desmontes

Dimensão dos desmontes - $A \times L \times C$ (m)	Resistências mínimas exigidas (kPa)
25 × 15 × 40	583
40 × 15 × 40	800
60 × 15 × 40	910

No caso da pasta de enchimento, a água não é o factor mais relevante a considerar no seu dimensionamento, pois é suposto não existir excesso de água, mas apenas a quantidade certa para permitir a hidratação do cimento e que a consistência da pasta seja a correcta, o que nem sempre acontece na realidade, sendo necessário tomar algumas medidas adicionais, no que toca à possibilidade de ocorrência de fenómenos de exsudação e sedimentação, principalmente nos sistemas de distribuição de pasta.

3.6 Constituintes da pasta de enchimento

3.6.1 Rejeitado de Zinco

3.6.1.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica do rejeitado de Zinco analisado pelos laboratórios da Almina nos meses de Abril a Julho de 2018. A Figura 3.7 mostra a distribuição granulométrica das partículas de rejeitado durante estes meses.

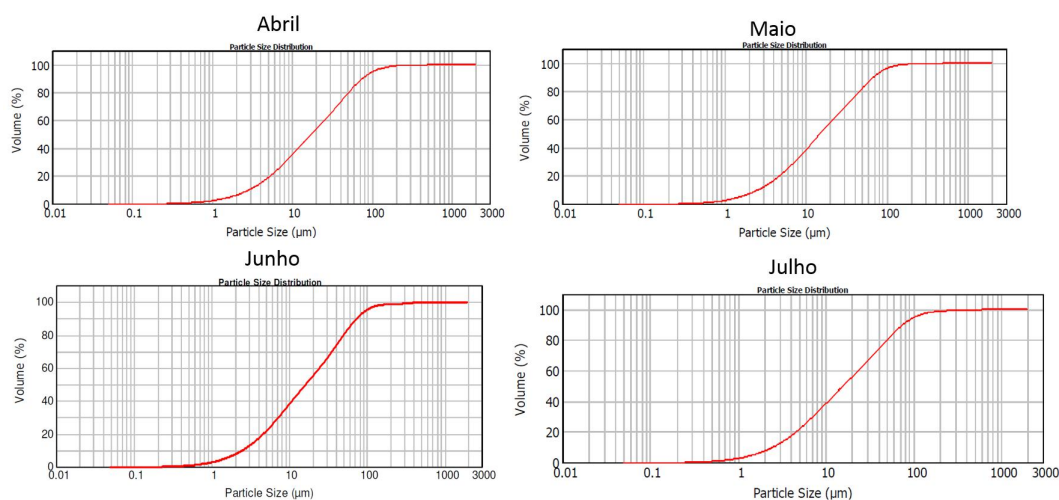


Figura 3.7: Distribuição granulométrica do rejeitado da Almina durante os meses de Abril a Julho de 2018

(Cortesia da Almina, 2018)

3.6.1.2 Composição química e mineralógica

Como referido, a composição química dos rejeitados influencia as propriedades físicas e o comportamento mecânico dos materiais de enchimento, nomeadamente a presença de sulfuretos condiciona o desempenho da pasta (Guo et al., 2014).

A partir da análise química realizada nos laboratórios da Almina por fluorescência de raios-X (XRF), verifica-se pela Tabela 3.3, que o rejeitado de Zn tem uma percentagem importante de Ferro (Fe) na sua composição, que pode ser um agente de deterioração da pasta e da sua resistência mecânica. Apresentam também valores elevados de Zn, alguma de Cu, Chumbo (Pb) e Arsénio (As).

Tabela 3.3: Análise química ao rejeitado de Zinco por XRF

Mês	Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)	As (ppm)
Abril	0,16	2,37	0,83	36,47	8425
Maio	0,15	1,05	0,72	39,03	8846
Junho	0,14	1,56	0,72	36,86	8164
Julho	0,16	1,50	0,67	38,00	8253

3.6.2 Calda

Como referido, na Almina é feita uma mistura de cimento e de água, que constitui uma calda para a produção de pasta. Para tal é necessário a execução de ensaios para dimensionamento das percentagens de cimento e água a utilizar para evitar fenómenos de exsudação. O fenómeno de exsudação consiste na sedimentação do cimento no fundo da misturadora, devido à grande quantidade de água na mistura e também pelo facto da velocidade de

rotação das pás da misturados não ser suficiente, provocando um aglomerar de cimento na misturadora, e conseqüentemente passando uma percentagem de sólidos insuficiente para suprir o pretendido na mistura da pasta. A exsudação da água pode provocar perda de material necessária à mistura, aumentando os custos associados à produção de pasta e as perdas significativas de cimento, assim como a paragem de trabalhos devido ao entupimento de tubagens quando o cimento hidrata e ganha presa dentro destas. Por último, a perda de sólidos necessários para completar a mistura de pasta, coloca em causa a consistência desta, e pode, por sua vez, colocar em perigo a passagem de pasta para o desmonte pelo sistema reticulado por gravidade.

3.6.2.1 Cimento Portland

Na Almina, o cimento Portland utilizado é o CEM Tipo II/AL 42,5 R, cujas características estão especificadas na Tabela 3.4, segundo a norma NP EN 197-1:2001. A designação de R no tipo de cimento significa que este é de desempenho elevado, ou seja, tem uma resistência inicial elevada. Este cimento tem, segundo aquela norma, cerca de 80% a 94% de clínquer Portland, 6% a 20% de calcário e até 5% de outros constituintes na sua composição, sendo o clínquer que confere resistência ao cimento. Tem um teor de sulfatos (SO_3) abaixo dos 4% e um teor em cloretos abaixo de 0,10%. Apresenta uma resistência entre 42,5 e 62,5 MPa aos 28 dias de cura, começando a ganhar presa ao fim de 60 minutos.

Tabela 3.4: Especificações do cimento Portland Tipo II/AL 42,5, segundo NP EN 197-1:2001

Tempo de cura	2 dias	7 dias	28dias
Resistência à compressão (MPa)	≥ 20,0	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5
Tempo de início de presa (min)	≥ 60		
Expansibilidade (mm)	≤ 10		

Para determinar a trabalhabilidade do cimento a partir da sua consistência, sendo que é necessário proceder ao ensaio de abaixamento (*slump*) e no caso das condições dos critérios especificados no ensaio de abaixamento não se verificarem, ao ensaio de espalhamento. As especificações dos ensaios de abaixamento e de espalhamento do cimento, segundo a norma NP EN 206-1:2001, incluem as Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5: Critério do ensaio de abaixamento, segundo NP EN 206-1:2001

Classe do Cimento	Altura de abaixamento (mm)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5 *	≥ 220

Tabela 3.6: Critérios do ensaio de espalhamento, segundo NP EN 206-1:2001

Classe do Cimento	Diâmetro de espalhamento (mm)
F1 *	≤ 340
F2	350 a 410
F3	420 a 480
F4	490 a 550
F5	560 a 620
F6 *	≥ 630

3.6.2.2 Água

A água com que é feita a mistura pode derivar das infraestruturas de deposição de resíduos ou de água intersticial de rejeitado. Ambas podem ter características relativamente ácidas e apresentar alguma quantidade de partículas sólidas, ou presença de determinados minerais em quantidades que podem ter impacto na qualidade da pasta e nas respectivas características.

A água utilizada na mistura da pasta de enchimento pela Almina, proveniente de uma central de água, é água industrial reciclada do circuito interno da mina e que é reutilizada também para outros fins. A sua composição pode variar ao longo do tempo devido, por exemplo, ao nível de contaminação decorrente dos processos de separação do minério em lavaria. Salienta-se que em Aljustrel existe uma amplitude térmica significativa ao longo do dia e, dependendo dos meses, a temperatura da água de manhã não é igual à da tarde, podendo ter influência em variados aspectos.

No laboratório da Almina foi possível ver que esta água, quando foi recolhida e armazenada em recipientes de vidro novos (vidro transparente), provocou uma descoloração do vidro, verificada ao fim de 2 dias, sendo que o mesmo aparentou ser "fosco", tal como se pode observar pela Figura 3.8. Este efeito da água no vidro pode ter sido causado pelas partículas de sulfuretos em suspensão na água, que reagiram, ou pelo facto de a água poder ser ácida.



Figura 3.8: Recipiente de vidro com água industrial no laboratório geotécnico da Almina

A água utilizada na mistura deve estar fria quando adicionada à mistura de pasta. De facto, se for adicionada quente, o rejeitado tende a absorver mais água de uma só vez, tornando a mistura mais espessa e com uma aparência mais espessa, que pode contribuir para a diminuição da respectiva trabalhabilidade.

3.7 Ciclo de produção de rejeitado

Nas lavarias, os processos de beneficiação do minério estão adaptadas às características do jazigo e podem ter de ser ajustadas consoante as variações espaciais do mesmo em termos mineralógicos, estruturais, de teores, entre outros, sendo que o fundamento da beneficiação mineira está no sucesso da sucessiva redução da granulometria do minério até à dimensão óptima, ou seja, a dimensão que permita a "libertação óptima" da fase mineral que se pretende.

Estes processos de beneficiação dão-se nas lavarias das minas, sendo que no caso particular de sulfuretos, o processo mais utilizado e versátil é o da flutuação. A flutuação é o método de beneficiação que separa as fases minerais considerando as características de hidrofobicidade dos mesmos, existindo a agregação do minério sob a forma de "espuma".

O método de flutuação fundamenta-se nos diferentes graus de molhabilidade dos minerais, tendo por base a adesão selectiva de alguns minerais para com o ar (hidrófobos) e de outros para com a água (hidrófilos), sendo que o grau de hidrofobicidade pode ser alterado através da adição de reagentes (Mondlane et al, 2014). O material que é rejeitado no processo de beneficiação normalmente é depositado em infraestruturas de deposição de resíduos próprios. Este material é comumente designado por estéril, apesar de nos últimos anos ter sido reaproveitado, não só para extracção de teores reduzidos de minérios que antes não tinham valor económico, como também para reutilizar como material de enchimento dos desmontes.

Na Almina, da lavaria sai uma mistura de rejeitado e água, cujas percentagens não são controladas antes de chegar à central de rejeitado, onde é espessado. O rejeitado proveniente

da lavaria, neste caso, de Zn, tem uma granulometria muito fina, tipo silte, como é possível observar pela Figura 3.9, que antes de ser aproveitado para enchimento de desmontes era depositado numa pequena bacia de descarga, e posteriormente na bacia de sedimentação da Almina.



Figura 3.9: Aspecto do rejeitado de Zinco depositado quando sai da lavaria da Almina

3.8 Processamento e produção de pasta

3.8.1 Central de rejeitado

Em Feitais, a pasta que é transportada pelo reticulado até aos desmontes é produzida após vários processos de espessamento do rejeitado e da adição, posterior, de calda da central de cimento para que a mistura da pasta esteja completa. A central de rejeitado - Figura 3.10, situa-se junto à lavaria.



Figura 3.10: Central de rejeitado da Almina

Aqui o rejeitado é espessado, sendo sujeito a um primeiro processo de ciclonagem para se obter uma primeira separação dos sólidos da água e, em seguida, segue para um tanque de agitação. Aqui os sólidos, por acção da gravidade, assentam no fundo, sendo possível transferir este material, denominado por "polpa" (água e rejeitado), com pelo menos 65% de sólidos. A polpa é transferida nas tubagens por bombas para evitar a sedimentação de sólidos, até à central de pasta. Antes da central de pasta entrar em funcionamento, foram realizados testes onde a "polpa" produzida na central de rejeitado foi transportada pelas tubagens e onde se verificou que, por causa da baixa velocidade de escoamento, os sólidos começaram a sedimentar, provocando entupimento das tubagens - Figura 3.11.



Figura 3.11: Pormenor do material que sedimentou no interior da tubagem que transporta a "polpa" até à central de pasta

A sedimentação deste material ocorre quando a velocidade linear é baixa (caudal reduzido), sendo necessário aumentar a pressão, através de bombas, e controlar permanente a densidade do material que passa nas tubagens, a partir de densímetros.

3.8.2 Central de Pasta

Na central de pasta, após a chegada da "polpa", ela é armazenada num tanque com uma misturadora, que impede a sedimentação dos sólidos, sendo posteriormente sujeita ao processo de filtração em filtros de disco a vácuo, Figura 3.12, que são continuamente alimentados e que extraem, uma última vez, a água da "polpa", transformando esta em "torta".



Figura 3.12: Descarga no filtro de disco e aspecto da "torta"

A "torta" consiste no material produzida pelos filtros e é transportada por uma tela transportadora, onde se recolhem amostras para ensaio de controlo de qualidade - Figura 3.13,

nomeadamente, determinação da densidade e da percentagem de sólidos através da balança de Marcy. A "torta" contínua a ser constituída por rejeitado e por uma pequena percentagem de água. Para que a pasta produzida tenha a percentagem de sólidos para que foi dimensionada, a "torta" tem de ter pelo menos 87% de sólidos.



Figura 3.13: Tela transportadora de "torta" vista pela abertura para a sua amostragem

O material filtrado é transferido para um tanque de processamento de água, via bombas de filtragem, onde a água proveniente do processo de filtragem é reciclada na central de água e adicionada novamente ao sistema de distribuição de água.

A central de cimento, onde é feita a calda da pasta, situa-se junto à central de pasta, e é aqui, que após a alimentação dos silos com cimento da Secil, é feita a mistura. A calda é uma mistura de cimento e água que é previamente misturada antes de ser transportada até à misturadora de pasta, onde é adicionada à "torta".

A percentagem de cimento presente na calda é controlada através da velocidade de escoamento por bombagem (*Binder Dosing Pumps*) no tanque de alimentação. A percentagem de cimento na pasta é controlada com base na percentagem de sólidos que é produzida pelo filtro de discos a vácuo ("torta").

Após estar completa a mistura de pasta, é também realizado o seu controlo de qualidade - Figura 3.14, sendo que quando a consistência da pasta aparenta não ser a correcta, devido a factores externos, é adicionada água à mistura até a consistência ser a ideal. Para o contínuo enchimento de desmontes tem de ser produzida cerca de $149 \text{ m}^3/\text{h}$ de pasta e feita recolha de pasta duas vezes por dia para ensaios de controlo de qualidade, sendo este valor válido para desmontes com dimensões de $25 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 40 \text{ m}$.

A pasta é misturada via *overflow* e daí segue para uma torva que a descarga, directamente, para o sistema de distribuição até ao desmonte, por gravidade.



Figura 3.14: Tela transportadora de pasta vista pela abertura para a sua amostragem

3.9 Controlo de qualidade

O controlo de qualidade na Almina é executado de diversas maneiras, como já se veio a referir em secções anteriores. A amostragem de "torta" e de pasta fresca é realizada duas vezes por dia, para submeter a ensaios de abaixamento e de determinação da percentagem de partículas sólidas através da balança de Marcy, por pesagens, tal como a recolha de pasta para ensaios destrutivos de determinação da resistência segundo diferentes dias de cura, no laboratório geotécnico.

Na Figura 3.15 é possível observar o controlo de qualidade na central de pasta, pela balança de Marcy e ensaio de abaixamento. A altura de abaixamento máxima que a pasta deve ter é de 230 mm, se tiver valores inferiores significa que a percentagem de sólidos na pasta não é suficiente, sendo indicador de problemas na central, em relação à percentagem de sólidos de rejeitado que está a ser produzido ou mesmo pela adição de cimento e água em excesso à mistura.

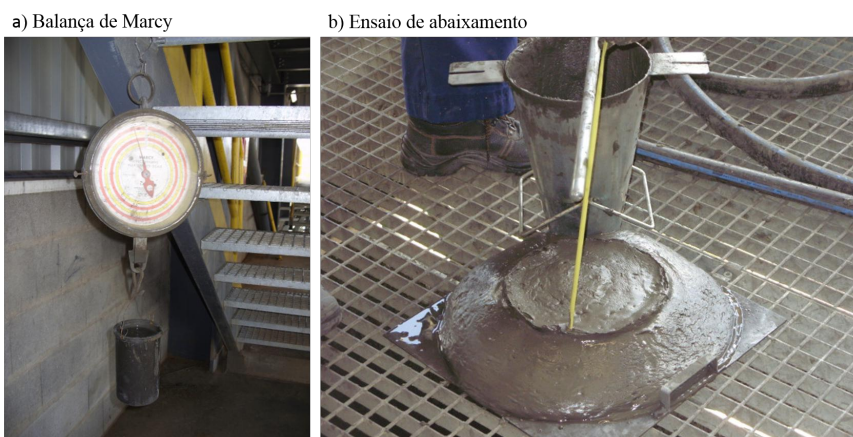


Figura 3.15: Controlo de qualidade na central de pasta

Após o enchimento dos desmontes com pasta, realizam-se sondagens ao enchimento para recolha de tarolos, desde o dia 1 até aos 182 dias de cura, sendo ensaiados 3 provetes cilíndricos

para cada dia de recolha.

Na fase inicial de estudo da pasta de rejeitados, a Almina optou por realizar ensaios mecânicos a provetes cúbicos em condições confinadas e não drenadas, de modo a replicar as condições aproximadas do estado real dentro do desmante, mas verificou-se que os provetes não resistiam a ser removidos dos moldes, sendo que as suas arestas ficavam rachadas, não sendo adequados para execução dos testes mecânicos. A melhor solução passou a ser o uso de provetes cilíndricos em condições drenadas, permitindo assim o escoamento de água dos provetes, mesmo sendo reduzida.

As dimensões aconselhadas para provetes de betão são de 150 mm por 300 mm, para provetes cilíndricos, sendo que para provetes prismáticos as dimensões padrão são de 160 × 40 × 40 mm.

Estudo laboratorial

4.1 Generalidades

O estudo laboratorial realizado teve como principal objectivo, tal como anteriormente referido, a caracterização de pasta de enchimento, recriando laboratorialmente, segundo os pressupostos iniciais, a mistura de pasta que a Almina dimensionou de rejeitado de Zn com 6% de cimento e que é de interesse conhecer, visto ser uma futura opção; a de 4% de cimento, para avaliar o respectivo comportamento mecânico; e a de 5% teve como objectivo verificar se é uma opção viável utilizá-la em substituição da pasta com 6%, visando a redução de custos.

A primeira etapa da investigação desenrolou-se na mina de Aljustrel, no laboratório geotécnico da Almina e consistiu no dimensionamento das quantidades de pasta, para três misturas diferentes, na moldagem dos provetes cilíndricos com as respectivas misturas e na devida caracterização da pasta fresca utilizada. Ulteriormente, no Laboratório de Geologia de Engenharia e no laboratório de Ensaios Mecânicos da FCT NOVA, executaram-se os ensaios de caracterização física e mecânica dos provetes.

Em seguida executaram-se, nos tempos de cura já referidos - 7, 14, 28, 56 e 91 dias, ensaios dinâmicos, físicos e mecânicos destrutivos para determinação da resistência à compressão uniaxial e tracção indirecta. Nestes últimos ensaios, recorreu-se ainda ao *software* GOM Correlate para acompanhar a deformação ocorrida nos provetes, antes, durante e após a rotura.

Após 28 dias de cura, altura em que o cimento completa a presa e em que normalmente os sulfuretos presentes na mistura começam a reagir com os outros componentes, formando sulfatos, foram colocados sob ataque químico provetes das três misturas diferentes, com a finalidade de, ao fim dos 15 ciclos de ataque químico e 56 dias de cura, serem submetidos a ensaios de resistência à compressão uniaxial, possibilitando a comparação das resistências assim obtidas com as dos provetes que não sofreram ataque químico e dos que foram submetidos a esse ataque.

Na Tabela 4.1 estão as normas utilizadas ao longo do estudo.

Tabela 4.1: Ensaios e normas utilizadas

Ensaios	Normas
Cimento	NP EN 197-1:2001 NP EN 206-1:2007
Cura de betão endurecido para ensaios	NP EN 12390-2:2009
Ensaios à pasta fresca	
Massa Volúmica	NP EN 12359-6:2009
Ensaio de abaixamento	NP EN 12350-2:2009 ASTM C143/C143M-10a
Ensaio da mesa de espalhamento	NP EN 12350-5:2009
Reologia de fluidos não-Newtonianos	ASTM D 2196-10
Ensaios dinâmicos	
Ultrassons	ASTM D 2845-08 ASTM C597-09
Ensaios físicos	
Teor em água	NP EN 1097-5:2011
Absorção de água à pressão atmosférica	BS EN 137755 :2008
Porosidade aberta	BS EN 1936:2006
Ensaios mecânicos	
Resistência à compressão	NP EN 12390-3:2011 ASTM C39/C39M-12
Resistência à compressão e Módulo de deformabilidade	ASTM D 7012-07
Resistência à tracção	NP EN 12390-6:2011
Ataque químico	
Ataque com sulfatos	EN 12370:1999

Detalham-se, em seguida, os materiais e os procedimentos experimentais adoptados.

4.2 Caracterização dos constituintes da pasta

4.2.1 Rejeitado

O rejeitado utilizado para realizar as misturas de pasta foi recolhido na central de pasta como "torta" e seco, até massa constante, em estufa do laboratório geotécnico a 100°C durante 48 h, em tabuleiros. Em seguida, foi reservado à temperatura ambiente em contentores para que não absorvesse humidade. É de notar que o rejeitado seco apresenta uma cor cinza amarelada, com alguma aglomeração de matéria branca, sendo provavelmente resultante da oxidação do Fe a temperaturas altas, como é possível visualizar pela Figura 4.1. Como o rejeitado foi colocado em tabuleiros dentro da estufa, foi necessário, após o arrefecimento deste, destorroá-lo. A massa volúmica do rejeitado de Zn é de cerca de 4,4 Mg/m³.

O rejeitado utilizado foi recolhido em Julho, sendo possível visualizar a curva da distribuição granulométrica pela Figura 4.2, tendo coeficientes C_u de 10,02 e C_c de 0,82.



Figura 4.1: Rejeitado de Zn após secagem na estufa

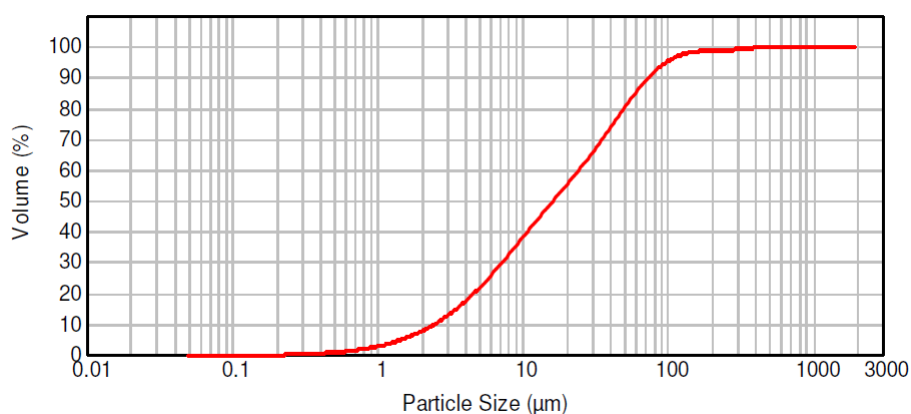


Figura 4.2: Distribuição granulométrica do rejeitado proveniente da lavaria da Almina em Julho

Já a composição química deste rejeitado, obtida a partir do XRF, inclui a Tabela 4.2. É possível verificar, por ser rejeitado de Zn, que a percentagem de Cu na composição é mais baixa, o Fe por outro lado é o elemento que mais se destaca na composição do rejeitado, sendo a este que se irão dever as mudanças de cor e a maioria das reacções químicas devido à sua oxidação.

Tabela 4.2: Composição química do rejeitado por XRF

Mês	Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)	As (ppm)
Julho	0,16	1,50	0,67	38,00	8253

4.2.2 Água

A água da rede interna da Almina foi sujeita a diferentes análises laboratoriais, no Laboratório de Hidrogeoquímica na FCT NOVA, visando caracterizar o seu pH, composição química e condutividade, para controlar o seu papel quando misturada com sulfuretos, que vão reagir durante a cura da pasta e que pode por em causa a respectiva resistência.

O pH e a condutividade eléctrica da água foram determinados com o analisador electroquímico Consort C6030, utilizando os eléctrodos SP21 e SK20T, respectivamente. O ião bicarbonato foi determinado por titulação (alcalinidade), com 100 ml de amostra da água da mina e ácido clorídrico 0,1N como titulante, na presença do indicador alaranjado de metilo a 0,1% (Rodier et al, 2009).

A recolha de água para aquela análise, cerca de 2L, foi feita na torneira (rede), sendo a mesma utilizada na mistura da pasta, apresentou estar algo turva. Em laboratório verificou-se que o seu pH é de 6,8, aproximadamente neutro, com a existência de partículas sólidas em suspensão, com uma condutividade eléctrica de cerca de 668 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Determinou-se o ião bicarbonato (HCO_3^-) em 100 ml de água, a que se adicionou o corante alaranjado de metilo para tornar visível a mudança de pH, e mediu-se 1,93 m eq/l, ou seja, 117,73 ppm ($1.93 \text{ m eq/l} \times 61 \text{ g/mol}$) - Figura 4.3.

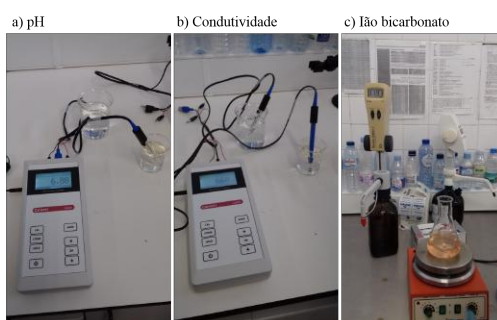


Figura 4.3: Análise laboratorial da água da Almina

Foi realizada a esta água, também, uma análise por cromatografia iónica líquida de alta pressão (HPL), com o aparelho Metrohm, modelo 761 Compact IC, equipado com coluna e pré-coluna Metrosep cation 1-2, 6.1010.000, segundo o método proposto pelo laboratório da Metrosep Application Bulletin N° 2571/1e - Tabela 4.3, verificando-se que a água é bicarbonatada mista, entre cálcica e sódica, possivelmente devido à presença de sulfuretos. A classificação foi obtida pelo diagrama de Piper, representando graficamente a composição química da água (Barroso et al, 2011).

Tabela 4.3: Composição química da água da Almina

Substâncias	Quantidade (ml/L)
Na^+	33,199
K^+	4,134
Ca^{2+}	42,713
Mg^{2+}	16,918

4.3 Dimensionamento da pasta e moldagem de provetes

Nesta investigação, utilizaram-se provetes, moldados em condições drenadas, em moldes cilíndricos de aço inox, com diâmetro de 55 mm por 110 mm de altura.

Foram realizadas 3 misturas diferentes de pasta, com 6%, 5% e 4%, todas elas com 82% de sólidos e 18% de água. Só foi possível retirar os provetes dos moldes ao fim de três dias após a mistura ser feita. Os provetes foram depois acondicionados em vácuo, em câmara húmida, de modo a recriar as condições de temperatura e humidade em subterrâneo, até à altura de ensaio, nos tempos de cura estipulados.

As dimensões dos molde de aço que foram utilizados na moldagem dos provetes e as dimensões dos provetes de pasta estão descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Dimensões dos moldes e dos provetes

	l (mm)	D (mm)	Volume (L)
Molde de aço inox	150	55	0,36
Proвете de pasta	110	55	0,26

Assim, a mistura de pasta foi dimensionada para 70 provetes de cada percentagem de ligante, contabilizando possíveis danos que pudessem ocorrer durante a moldagem, transporte, para substituições de provetes que pudessem ser considerados inválidos para submeter a ensaios, bem como um adicional para os ensaios de pasta fresca.

O dimensionamento de cada tipo de mistura foi realizada considerando um volume de 28 L para cada mistura e uma massa volúmica de pasta de $2,71 \text{ Mg/m}^3$. Na Tabela 4.5 estão descritas as percentagens utilizadas de cada constituinte para cada mistura de pasta realizada. O dimensionamento da quantidade, em massa, dos constituintes das diferentes misturas foi efectuado calculando a quantidade necessária para realizar 28 L de cada mistura e da pesagem dos constituintes na balança do laboratório, tendo esta uma capacidade máxima de 16 kg.

Tabela 4.5: Percentagens dos constituintes da pasta em cada mistura

Misturas de Pasta	% Sólidos	% Rejeitado	% Água
4% Ci	82	78	18
5% Ci		77	
6% Ci		76	

Foram utilizados os valores da Tabela 4.6 para determinar a massa volúmica teórica de cada mistura de pasta e utilizada a seguinte equação:

$$\rho_{\text{Pasta}} = \frac{m_{\text{Rejeitado}} + m_{\text{Água}} + m_{\text{Cimento}}}{\frac{m_{\text{Rejeitado}}}{\rho_{\text{Rejeitado}}} + \frac{m_{\text{Água}}}{\rho_{\text{Água}}} + \frac{m_{\text{Cimento}}}{\rho_{\text{Cimento}}}} \quad (4.1)$$

Tabela 4.6: Massa volúmica dos constituintes da pasta

ρ Pasta (Mg/m^3)	ρ Rejeitado (Zn) (Mg/m^3)	ρ Cimento (Mg/m^3)	ρ Água (Mg/m^3)
2,71	4,40	3,03	1,00

A massa volúmica teórica de cada mistura de pasta inclui a Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Massa volúmica teórica das misturas de pasta

Mistura	ρ teórico (Mg/m^3)
4% Ci	2,70
5% Ci	2,69
6% Ci	2,68

4.3.1 Preparação das misturas

Após a pesagem na balança do laboratório geotécnico dos constituintes da pasta, estes foram reservados e adicionados na misturadora, lentamente, a uma velocidade de rotação mais lenta. Quando todos os constituintes estavam na misturadora, esta foi programada para manter a rotação constante, a uma velocidade mais elevada durante, pelo menos, 3 min, até a pasta estar misturada uniformemente e apresentar a consistência esperada, Figura 4.4. Na Figura 4.5 é possível observar o aspecto de cada uma das misturas de pasta, sendo que a pasta com 6% de cimento apresenta uma cor mais escura e uma consistência mais fluida que as restantes.



Figura 4.4: Mistura de pasta no laboratório geotécnico da Almina



Figura 4.5: Aspecto das misturas de pasta

Na Tabela 4.8 é possível verificar os valores da relação R/C (rejeitado/cimento) e A/C (Água/Cimento).

Tabela 4.8: Relações entre os constituintes das misturas de pasta

Mistura	R/C	A/C
4% Ci	13	3
5% Ci	15	4
6% Ci	20	5

4.3.2 Preparação dos provetes

Os moldes de aço foram preparados com serrapilheira na base presa com uma braçadeira de plástico, de modo a conter a pasta e a permitir a drenagem da água em excesso. Após a mistura das diferentes pastas, esta era colocada directamente nos moldes através de um funil também de aço; de seguida, segundo a norma NP EN 12390-2:2009, procedeu-se à compactação da pasta com uma vareta de metal, permitindo a homogeneização do provete e a redução de espaços vazios no seu interior. Na Figura 4.6 é possível observar a preparação dos moldes cilíndricos de aço e o seu enchimento com pasta.



Figura 4.6: Preparação dos provetes de pasta

Após algumas horas da moldagem, foi possível verificar que, no topo dos provetes, se encontravam gotículas de água, provenientes da exsudação da pasta, existindo também drenagem de água pela base, indicando que no final os provetes não iriam ter 18% de água

na sua composição, e que essa quantidade de água era excessiva nas misturas. Só foi possível decidir retirar os provetes dos moldes ao fim de três dias, por tentativa, ou seja, os provetes ao fim de 24 h e 48 h, não tinham ainda ganho presa suficiente, sendo que alguns deles ficaram deformados.

Os provetes desmoldados foram em seguida cortados de modo para adquirirem as dimensões previstas, visando aproveitar o meio do provete de pasta, sendo a parte do provete considerada a mais homogénea. Após o corte as faces do provete foram alisadas, para ficarem o mais planas e lisas possível. Na Figura 4.7 é possível observar o processo envolvido durante a preparação dos provetes.

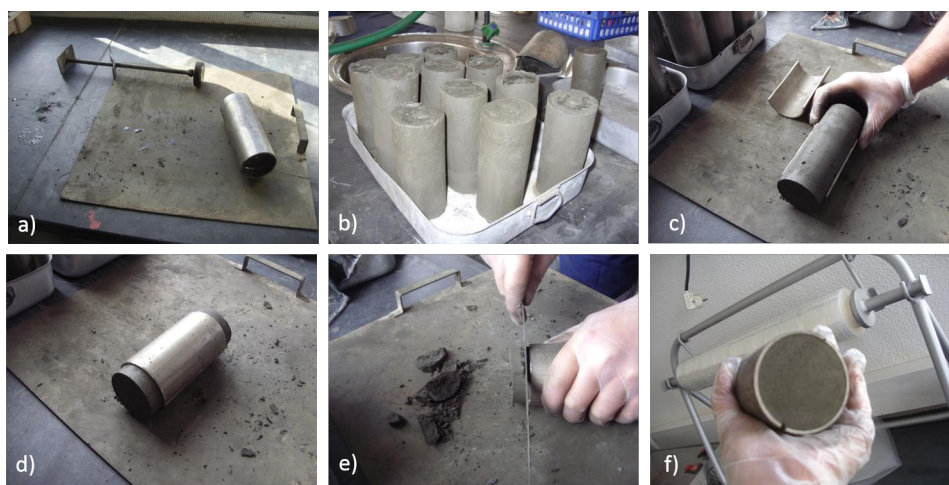


Figura 4.7: Faseamento do processo de desmoldagem e rectificação dos provetes de pasta

Em seguida, os provetes foram acondicionados em sacos de plástico forte, cada um com três provetes, e em vácuo de modo a que não existisse ar que pudesse comprometer as características do provete (reações químicas) e impedindo perdas de água. Os provetes foram transportados e devidamente acondicionados até ao laboratório de Engenharia de Geologia da FCT NOVA e colocados em câmara húmida, a 23°C e 95% de humidade, sendo a sua cura lenta com a máxima absorção de água ao longo do tempo.

Salienta-se que os provetes de pasta, apresentaram uma média de cerca de 54 a 55 mm de diâmetro 108 a 110 mm de altura – Apêndice A. De facto, estas eram as medidas aproximadas, havendo ligeiras variações que não comprometiam os resultados dos ensaios para o qual foram utilizados. É necessário referir, também, que a partir da medição do diâmetro do provete em três pontos, conforme as normas, é conclusivo que durante o processo de moldagem nos moldes de aço houve um ligeiro assentamento dos sólidos das misturas, por acção da gravidade. Durante as medições, realizadas segundo a norma ASTM D 4543-08, foi possível perceber qual eram o topo e a base do provete, uma vez que na base o diâmetro era ligeiramente maior.

Durante a mistura e a colocação da pasta nos moldes de aço inox, verificou-se que a pasta era cada vez mais difícil de trabalhar, sendo a consistência da mesma ao início muito trabalhável e, ao fim de algum tempo sem sofrer agitação, tornava-se muito espessa.

Durante o processo de mistura das pastas, observou-se que a pasta com 4% de cimento

aqueceu muito mais do que as restantes, muito provavelmente devido à maior percentagem de rejeitado, que causava mais atrito entre os constituintes e a própria pá misturadora.

4.4 Ensaios da pasta fresca

4.4.1 Massa volúmica e teor em ar

Depois de cada mistura de pasta estar pronta e segundo a norma NP EN 12350-6:2009, foi colocada a pasta de cada mistura na base aerómetro, com capacidade de 1L e massa conhecida, sendo que o procedimento efectuado constou no enchimento, primeiro até meio do recipiente, seguida da compactação da pasta e numa segunda fase no enchimento, até ao topo seguido este também da compactação da mesma e no rasuramento do excesso. A determinação experimental da massa volúmica das misturas de pasta tem como objectivo a comparação com a preconizada no dimensionamento.

Após a determinação da massa volúmica pela pesagem na balança do laboratório geotécnico, procedeu-se à determinação do teor em ar das misturas com o aerómetro - Figura 4.8.



Figura 4.8: Aerómetro e promenor da sua base

4.4.2 Ensaio de abaixamento - Slump

O ensaio de abaixamento foi realizado segundo a norma de betão fresco NP EN 12350-:2009 e ASTM C143/C143M-10a, procedendo ao enchimento do cone de Abrams, seguindo-se a respectiva compactação com um varão de compactação. Após a compactação de cada mistura mediu-se a altura de abaixamento. Na Figura 4.9 observa-se que a mistura com 6% de cimento é muito mais fluida que as restantes. Segundo a norma NP EN 206-1:2007, se a altura de abaixamento de uma mistura com cimento for superior a 220 mm é necessário realizar o ensaio de espalhamento em substituição. No caso em estudo, como não se trata de um ensaio a um betão mas sim a pasta, fez-se o ensaio de abaixamento a todas as misturas, bem como o de espalhamento, mesmo que o critério não se aplicasse à mistura de 6% de cimento.

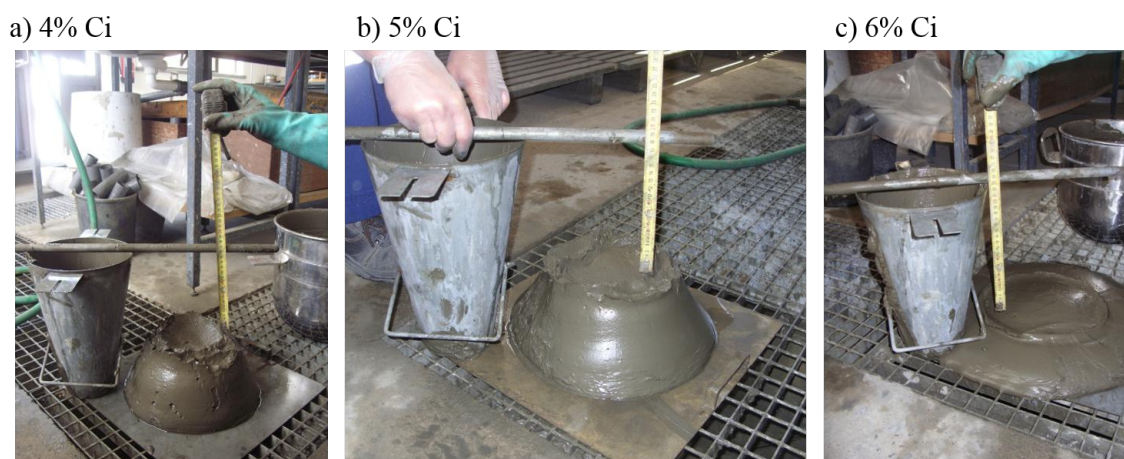


Figura 4.9: Ensaio de abaixamento das misturas de pasta

4.4.3 Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado segundo a norma de betão fresco NP EN 12350-5:2009, onde se encheu o cone de Abrams em cima da mesa de espalhamento, até meio, seguindo-se a compactação da mistura com a barra de compactação (10 pancadas) e novamente no enchimento completo do cone, seguindo-se a respectiva compactação. Após este procedimento o cone foi levantado e deu-se início ao ensaio a medição do espalhamento após as 15 bancadas da mesa. Na Figura 4.10 mostra-se a altura inicial da pasta, antes do ensaio ter início e o espalhamento final.

a) 4% Ci



b) 5% Ci



c) 6% Ci



Figura 4.10: Ensaio de espalhamento das misturas de pasta

4.4.4 Ensaio de retracção

Este ensaio foi realizado para quantificar a retracção da pasta com 3 dias de cura, obtendo uma relação, a uma escala diferente, do desligamento do enchimento às portas de enchimento. Para tal, procedeu-se ao enchimento faseado de meias canas com 20 mm de altura \times 40 mm de largura \times 400 mm de comprimento e a respectiva compactação da pasta, sendo a retracção medida ao longo dos três dias de cura. Na Figura 4.11 é possível observar a retracção das 3 misturas de pasta ao fim de três dias.



Figura 4.11: Ensaio de retracção das misturas de pasta

4.4.5 Viscosidade da pasta

Os ensaios para determinação da viscosidade das misturas de pasta seguiram a norma ASTM D2196-10, utilizando um viscosímetro Brookfield DV-II Pro, como o da Figura 4.12, e uma agulha LV4(64) com 31 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro. Utilizando o *software* Rheocalc V3.1.1 Rheometer foi possível obter os valores de viscosidade das pastas com uma velocidade de rotação constante de 0,3 rpm num tempo de ensaio de 3 min.

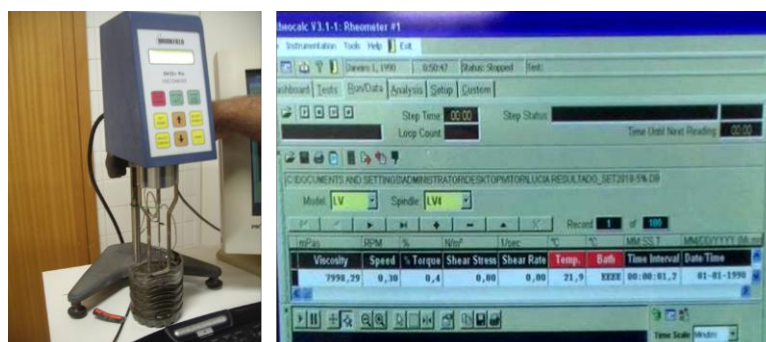


Figura 4.12: Viscosímetro Brokfiel DV-II Pro utilizado

4.5 Ensaios de pasta endurecida

4.5.1 Identificação dos provetes

Os sacos de plástico com todos os provetes de pasta em vácuo estavam identificados com a inscrição, a tinta indelével, da percentagem de cimento da pasta.

À medida que eram retirados para submeter a ensaios, os provetes eram devidamente identificados, consoante a percentagem de cimento da mistura de pasta, e adicionado um número representativo do ensaio mecânico a que estavam direccionados, ou seja, para os ensaios de RCU os provetes foram identificados de 1 a 3 e para os de tracção de 4 a 6. Para cada ensaio mecânico foram utilizados sempre três provetes de cada percentagem, ou seja,

em cada dia eram destruídos 6 provetes por cada tipo de mistura para determinação da sua resistência.

Antes de cada ensaio, todos os provetes eram pesados numa balança, logo após serem retirados do saco onde estavam acondicionados, e determinadas as suas dimensões - comprimento e diâmetro, e no final fez-se uma média desses valores. A partir do comprimento (mm) e do diâmetro (mm) médio obteve-se a área da secção de cada provete.

Entre cada ensaio, os provetes foram sempre tapados com panos húmidos, para mitigar a perda de água por evaporação. Em cada provete foi pintada uma malha de pontos - Figura 4.13, para que na altura do ensaio de RCU ou tracção o provete pudesse ser filmado para, ulteriormente, ser feita a sua análise com o *software* GOM - secção 5.3.3.3.

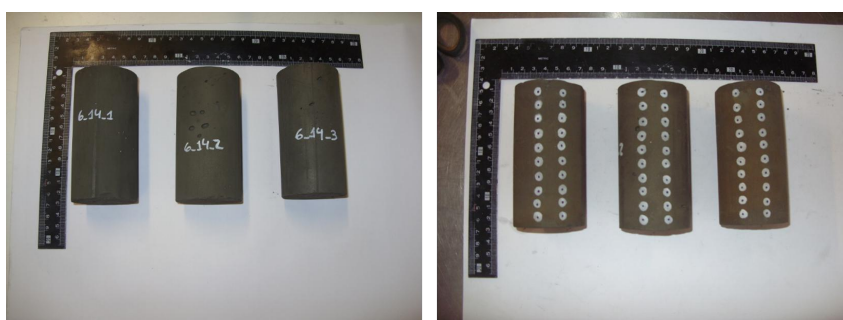


Figura 4.13: Identificação e marcação dos provetes a serem submetidos a ensaio

4.5.2 Ensaios dinâmicos

Com o objectivo de obter uma correlação entre os valores das ondas P e a quantidade de espaços vazios nos provetes, e avaliar, antes da rotura, se os provetes foram bem misturados, tinham poucos espaços vazios no seu interior e eram homogéneos. As ondas P foram obtidas directamente no equipamento Pundit da Proceq - Figura 4.14, segundo a norma ASTM D 2845-08.

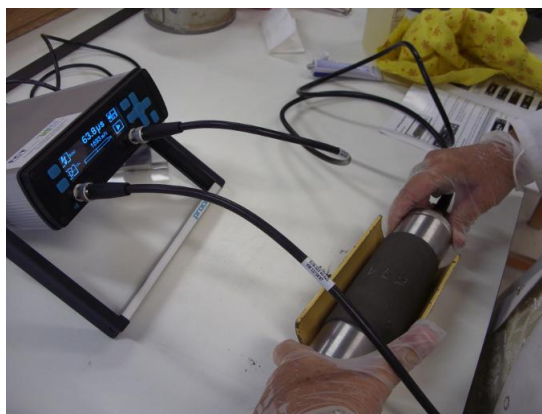


Figura 4.14: Medição das ondas P em provetes de pasta

4.5.3 Ensaios físicos

4.5.3.1 Teor em água na rotura

O teor em água dos provetes de pasta foi determinado após a rotura dos provetes de pasta, segundo a norma NP EN 1097-5:2011, quer nos ensaios de resistência à compressão uniaxial, quer nos de tracção indirecta. Este ensaio foi realizado utilizando sempre três pedaços de provete para cada mistura de pasta. Para determinação do teor em água procedeu-se à pesagem dos pedaços de provetes na rotura e na sua secagem até massa constante na estufa. O teor em água (w) é calculado pela seguinte equação:

$$w(\%) = \frac{m_i - m_d}{m_d} \times 100 \quad (4.2)$$

onde m_i é a massa inicial (g) e m_d é a massa seca (g) da amostra.

4.5.3.2 Porosidade e absorção de água

Através do ensaio de absorção de água à pressão atmosférica, respeitando a norma BS EN 13755:2008 e BS EN 1936:2006, determinou-se por pesagem, as massas das amostras saturada, imersa e seca até massa constante, obtendo-se os valores da absorção e porosidade - Figura 4.15. Para o efeito, utilizaram-se amostras serradas a partir de restos dos provetes de pasta após sofrerem rotura - Figura 4.16. Obtiveram-se assim pequenos provetes, o mais regulares possível, sendo que para cada mistura de pasta ao longo de todos os dias de cura, se ensaiaram 10 pedaços por cada mistura. A porosidade (P_o) e absorção (Ab) de água obtém-se pelas seguintes equações, respectivamente:

$$P_o(\%) = \frac{m_{sat} - m_d}{m_{sat} - m_{imers}} \times 100 \quad (4.3)$$

$$Ab(\%) = \frac{m_{sat} - m_d}{m_d} \times 100 \quad (4.4)$$

onde m_{sat} é a massa saturada (g), m_d é a massa seca (g) e m_{imers} é a massa imersa (g) da amostra.



Figura 4.15: Ensaio de absorção de água à pressão atmosférica e pesagem hidrostática das amostras dos provetes de pasta



Figura 4.16: Amostras de provetes utilizadas para determinação absorção de água e porosidade

4.5.4 Ensaios mecânicos

4.5.4.1 Resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial (RCU) foi determinada ao longo dos 91 dias de cura, nos dias estipulados para os ensaios, e consistiu na aplicação de uma força vertical a provetes com faces regulares e lisas, até à respectiva rotura, sendo a altura do provete o dobro do seu diâmetro (este 10 vezes superior ao tamanho do maior grão). A RCU do ensaio é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_{compressao} = \frac{F}{A} \quad (4.5)$$

onde $\sigma_{compressao}$ é a tensão de rotura do provete de pasta (Pa), F a força aplicada ao provete (N) e A a área da secção onde foi aplicada a força (m^2).

O ensaio de resistência à compressão uniaxial foi realizado segundo a aplicação das normas ASTM C39/C39M-12, NP EN 12390-6:2011 e EN 12390-3:2011, com recurso à prensa servocontrolada Zwick (50kN) do laboratório de Ensaios Mecânicos na FCT NOVA. A prensa utilizada é constituída por dois pratos ajustáveis, preso a uma rótula, as medições da força axial aplicada e da deformação axial correspondente a que o provete é sujeito foram possíveis devido ao *software* de leitura acoplado. Pelas Figuras 4.17 e 4.18 foi possível classificar a rotura dos provetes como válida ou inválida.

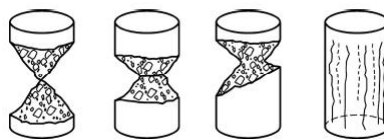


Figura 4.17: Rotura satisfatória dos provetes
(EN 12390-3:2011)

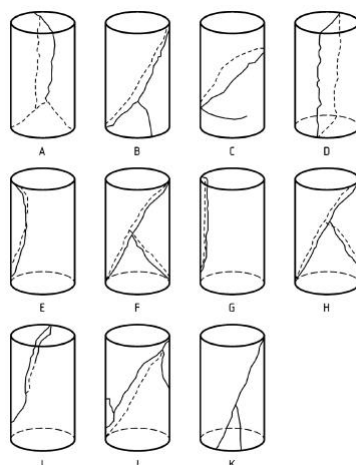


Figura 4.18: Rotura não satisfatória dos provetes (EN 12390-3:2011)

A velocidade de ensaio foi de 0,6 mm/min durante cerca de 60 s, tendo em atenção de não se tratava nem de um provete de rocha nem de betão, havendo uma maior deformação do provete quando aplicada a carga. O tempo de ensaio e a velocidade foram ajustados em provetes extra, usados para o ajuste e a definição dos termos de ensaio. Adicionalmente, utilizou-se filmagens da face do provete com a malha de pontos para analisar pelo *software* GOM Correlate - Figura 4.19, conforme descrito adiante.



Figura 4.19: Provete de pasta sujeito ao ensaio de resistência à compressão uniaxial

4.5.4.2 Módulo de deformabilidade

O módulo de deformabilidade ou elasticidade (E) foi obtido a partir dos gráficos da tensão de rotura axial em função da extensão axial. Esta foi obtida pelo cálculo da divisão da deformação axial, dada pela leitura da prensa servocontrolada, pelo comprimento de cada provete de pasta. O módulo E corresponde ao declive da recta de regressão linear das curvas do gráfico de tensão axial pela extensão axial, segundo a norma ASTM D7012-07, tal como demonstrado

pela Figura 4.20. No geral foram calculados quatro módulos de deformabilidade para cada mistura de pasta durante todos os dias de ensaio.

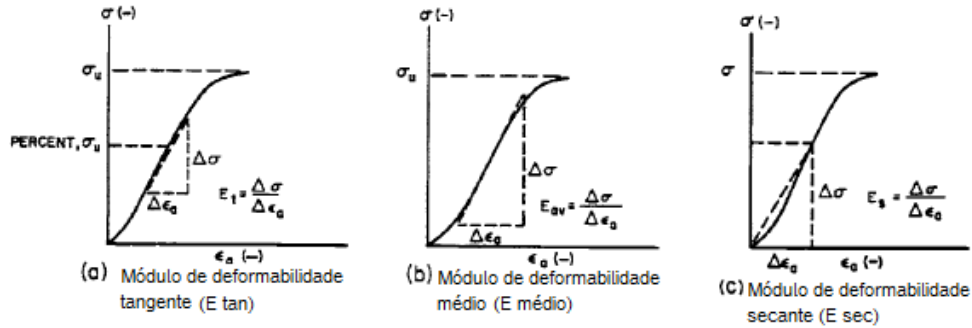


Figura 4.20: Gráficos de tensão- extensão e determinação do módulo de deformabilidade através do ensaio de RCU

(adaptado da norma ASTM D 7012-07)

O módulo de deformabilidade tangente (E_{tan}) é calculado pelo declive da recta tangente à curva ao valor de tensão que corresponde a 50% do valor de tensão de rotura, calculado na zona elástica da curva tensão - extensão axial ($\sigma - \epsilon$).

O módulo de deformabilidade médio (E_m) corresponde ao declive médio da recta na parte linear e elástica da curva $\sigma - \epsilon$.

O módulo de deformabilidade secante (E_{sec}) pode ser dado pelo declive que é calculado entre o ponto inicial e o valor final até à rotura.

O último módulo calculado (E 600-1000), refere-se à recta secante à curva $\sigma - \epsilon$, entre os valores de tensões de 600 kPa e 1000 kPa, devido ao facto da resistência alvo da Almina S.A. para o enchimento de desmontes ser de 800 kPa e, assim, se obter o correspondente módulo de deformabilidade para essa gama de valores.

4.5.4.3 Deformabilidade dos provetes com o *software* GOM Correlate

O *software* GOM Correlate já foi utilizado na FCT NOVA (Silva, 2018, no prelo) para avaliar deformações e estimar a deformabilidade em provetes prismáticos de betão submetidos a ensaios mecânicos de tracção, viabilizando a determinação das extensões axial e lateral e dos respectivos parâmetros elásticos E e ν (coeficiente de Poisson). Este *software* viabiliza a monitorização das deformações a que o provete é submetido, através de imagens retiradas da filmagem dos ensaios destrutivos. Para o efeito, ele define uma superfície na envolvente de uma matriz de pontos dispostos no provete que servem de referência para aquelas medições.

Nesta investigação decidiu-se testar a aplicabilidade deste *software* em ensaios de compressão. Todos os provetes submetidos a ensaios de resistência à compressão uniaxial e à tracção indirecta por compressão foram monitorizados para serem submetidos a esta análise.

Na Figura 4.21 observa-se a aplicação deste *software* numa peça e o modo como este gera uma superfície regular, devidamente calibrada, com pontos escolhidos para a obtenção de dados.

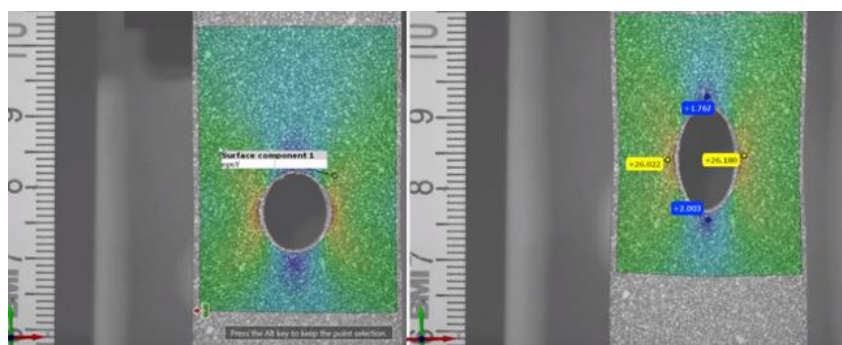


Figura 4.21: Extracto do vídeo do tutorial do *software* GOM Correlate (youtube.com, 2018)

4.5.4.4 Tracção indirecta

O ensaio de tracção indirecta por compressão, segue a norma NP EN 12390-6:2011 e também utiliza a prensa servocontrolada Zwick já descrita, que foi adaptada para o ensaio. Para o efeito utilizaram-se duas canas de madeira presas aos pratos da prensa, superior e inferior, e entre elas era colocado, na horizontal, o provete a submeter ao ensaio de tracção por compressão - Figura 4.22, havendo um ajustamento das rótulas dos pratos ao provete.

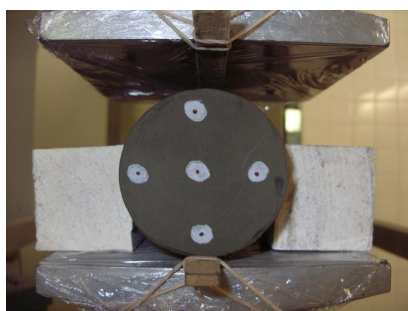


Figura 4.22: Provete de pasta sujeito ao ensaio de tracção por compressão

A velocidade de aplicação de força foi de 0,8 mm/min, tendo cada ensaio demorado cerca de 60 s. Os resultados são considerados válidos se o provete fracturar na mesma direcção, ao longo de todo o comprimento, em que a força compressiva é aplicada. Este ensaio permite observar a capacidade de não deformação de um material quando lhe são aplicadas forças compressivas.

A tensão de rotura de um material por tracção é dado pela seguinte equação:

$$f_{compressao} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (4.6)$$

onde $f_{compressao}$ corresponde à resistência à tracção por compressão (Pa), F à carga máxima aplicada ao provete de pasta (N), L é o comprimento do provete que está em contacto com as canas do ensaio (mm) e d é a dimensão vertical da secção transversal do provete (mm).

À semelhança do ensaio de RCU, também estes provetes foram marcados para visualização de eventuais deformações axiais e transversais durante o ensaio, tendo-se efectuado a filmagem

de todo o ensaio para análise com o *software* GOM Correlate.

4.5.5 Ensaios químicos

4.5.5.1 Análise colorimétrica

A cor dos provetes ao longo dos seus 91 dias de cura, foi avaliada nos dias dos ensaios mecânicos por análise colorimétrica. Para o efeito recorreu-se ao colorímetro CR-400 da Konica Minolta. A determinação da cor no âmbito deste trabalho consistiu na verificação da influência da potencial oxidação dos sulfuretos na cor, devido à presença do Fe na pasta.

A utilização do colorímetro consiste num método quantitativo para determinação dos parâmetros de cor. A *Comission Internationale de l'Eclairage* (CIE) definiu três espaços de cor, CIE XYZ, CIE L^*C^*h e CIE $L^*a^*b^*$ (sensing.konicaminolta.com), sendo o espaço de cor $L^*a^*b^*$ ou CIELAB o mais utilizado para classificação de cores. Este sistema (CIELAB) funciona com coordenadas que são expressas em termos de tonalidade, luminosidade e saturação. O L^* corresponde à luminosidade (0 indica preto e 100 indica branco), o a^* à coordenada vermelho/verde (+ a^* indica vermelho e - a^* indica verde) e b^* corresponde à coordenada amarelo/azul (+ b^* indica amarelo e - b^* indica azul), tal como é possível visualizar na Figura 4.23.

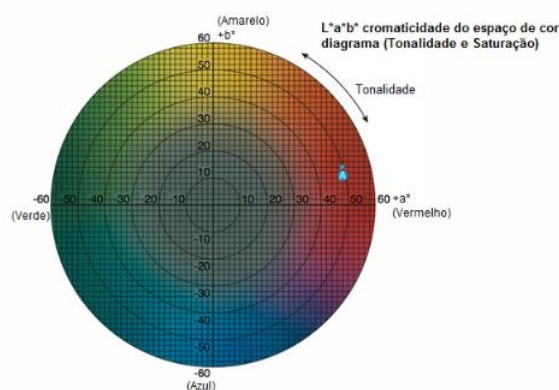


Figura 4.23: Sistema CIELAB
(adaptado de sensing.konicaminolta.com)

A cromaticidade pode ainda ser representada segundo as coordenadas polares *Croma* (C^*) e *ângulo de cor* (h^*), que correspondem à saturação de cor e à tonalidade, respectivamente. Na Figura 4.24 é possível visualizar no espaço xyz os parâmetros de cor e os parâmetros de cromaticidade, respectivamente.

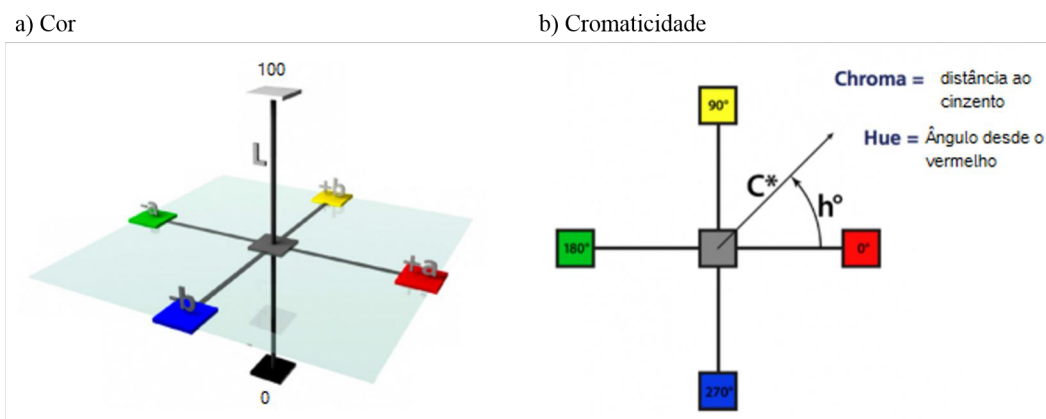


Figura 4.24: Sistema CIELAB no espaço tridimensional (adaptado de gqsystems.eu)

A partir do colorímetro é possível obter os parâmetros L^* , a^* e b^* , sendo que os valores de C^* e h° são calculados a partir desses parâmetros pelas seguintes equações, respectivamente:

$$C^* = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

e

$$h^\circ = \frac{\arctan(\frac{b}{a})}{6,2832} \times 360 \quad (4.8)$$

Valores de h° igual a 0° indica vermelho; igual a 90° indica amarelo; 180° indica verde e 270° indica azul.

Em primeiro lugar, procedeu-se à calibração do colorímetro até se verificarem os valores de referência, nomeadamente de $Y=85,50$; $x=0,3185$ e $y=0,3356$ e, posteriormente, feita a medição de cor no provete através de três disparos, que fazem uma média dos valores medidos. No caso em estudo realizaram-se três leituras, cada uma com três disparos, de modo a obter-se uma melhor correlação de cores, por existirem disparidades ao longo dos provetes de pasta - Figura 4.25.

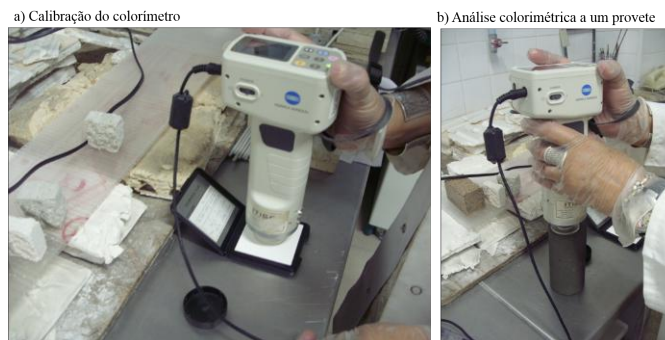


Figura 4.25: Calibração do colorímetro e análise colorimétrica a um provete de pasta

4.5.5.2 Microscópio electrónico de varrimento

Com o objectivo de se obter uma análise química e via microscopia electrónica de varrimento, foram cortadas pequenas taliscas aos provetes de pasta com 7 dias de cura, para serem submetidas a esta análise após estarem em vácuo.

A análise química por microscópio electrónico de varrimento (SEM) é uma análise que consiste na produção de imagem através da superfície da amostra. O aparelho utilizado foi o SEM, Zeiss DSM 962, com três detectores, electrões secundários ou de baixa energia (SE), varimento de electrões (BSE) e fotões raios-X que são emitidos por átomos excitados pelo foco de electrões.

4.5.5.3 Análise química com XRF

Para proceder à análise química das três misturas de pasta ao longo dos dias de cura, foram aproveitadas partes dos provetes partidos que resultaram dos ensaios destrutivos, seguindo-se a sua moagem para parar qualquer reacção em curso. As amostras moídas foram acondicionadas em sacos de plástico fechados a vácuo e colocadas em câmara húmida de modo a retardar qualquer reacção por contacto com ar.

Seguidamente e nas instalações da Almina, estes pós foram todos sujeitos a ensaio por fluorescência de raios-X (XRF), com uma pistola de XRF calibrada para analisar material proveniente de minas, como rejeitado com elevada presença de sulfuretos. Por este motivo, o instrumento não detecta o ligante que existe no provete, pois não está calibrado para tal.

4.5.6 Ataque químico com sulfatos em provetes com 28 dias de cura

Na mineração em subterrâneo, o enchimento está sujeito à acção de condições de temperatura e humidade agrestes. Pelo que neste caso em particular foi decidido que o aspecto mais preocupante em termos de degradação do enchimento seria a presenta dos sulfuretos no rejeitado que é utilizado na mistura de pasta, podendo este, normalmente a partir dos 28 dias de cura, reagir com outras substâncias presentes na pasta, e através da reacção com a água e ar, produzir sulfatos que são agentes de degradação de materiais. Sendo assim e através da norma EN 12370:1999, executou-se o ensaio de previsão do comportamento para avaliar a durabilidade do enchimento sob ataque químico com sulfatos.

Preparou-se solução de água com sulfato de sódio decahidratado (Scharlau) a 14% e os provetes das três misturas foram submetidos a 15 ciclos de ataque. Em cada ciclo, os provetes eram imersos na solução de sulfatos durante 120 min e depois eram levados a uma estufa ventilada com atmosfera húmida durante um mínimo de 16 h, onde ficavam submetidos a uma temperatura húmida de 105°C.

Após 28 dias de cura, foram sujeitos a ataque dois provetes de cada mistura de pasta - Figura 4.26, sendo os provetes utilizados devidamente identificados, medidos, pesados e submetidos a ensaios de ultrassons (ondas P), após os quais eram então submetidos ao ataque químico - Figura 4.27; ao fim dos 15 ciclos de ataque com sulfatos, os provetes foram

acondicionados novamente em câmara húmida, a 105°C, e depois foi novamente determinada a sua massa, altura, diâmetro e velocidade de propagação das ondas P. Finalmente, caso os provetes suportassem os 15 ciclos, aos 56 dias de cura seriam submetidos a ensaios para determinação da respectiva resistência à compressão uniaxial para verificar a decadência na sua resistência.



Figura 4.26: Provetes de pasta utilizados no ataque com Sulfatos



Figura 4.27: Provetes de pasta na solução de sulfatos

A temperatura da água utilizada na mistura da solução e na solução de sulfatos foi controlada com um termómetro adequado e foi mantida nos 20°C.

Durante todos os ciclos de ataque químico realizaram-se pesagens de massa seca e saturada dos provetes, para controlar a perda de material e a porosidade dos mesmos. Também foi possível, através das medições de altura e diâmetro dos provetes, analisar a perda de material pela respectiva variação. Nestes provetes foi ainda realizada uma análise colorimétrica antes e após o ataque químico para verificar a evolução da cor nos mesmos.

Análise e discussão de resultados

5.1 Generalidades

Neste capítulo apresentam-se todos os resultados obtidos nos ensaios realizados de acordo com as misturas de pasta com 4%, 5% e 6% de cimento ensaiadas, respectivamente com 78%, 77% e 76% de rejeitado, ao fim de 7, 14, 28, 56 e 91 dias de cura.

Realizaram-se ensaios de caracterização reológica às misturas de pasta fresca utilizadas na moldagem dos provetes, nomeadamente a determinação dos valores teóricos de tensão de cedência obtidos através dos ensaios de abaixamento e a viscosidade das misturas através de um viscosímetro.

Os resultados provêm ainda da análise directa de cada provete (massa, altura e diâmetro) e dos dinâmicos, físicos e mecânicos, complementados por análise química e colorimétrica ao longo dos tempos de cura; acresce a análise dos parâmetros mecânicos avaliados nos ensaios destrutivos.

Por cada ensaio destrutivo, ultrassons e colorímetro foram ensaiados três provetes de cada mistura, e nos ensaios físicos 10 amostras de cada mistura, pelo que os valores apresentados neste capítulo são valores médios dos obtidos para cada mistura de pasta. Ao longo das próximas secções a pasta cuja mistura contém 4%, 5% e 6% de cimento serão designadas em tabelas e gráficos por "4% Ci", "5% Ci" e "6% Ci", respectivamente, para simplificar.

5.2 Análise da pasta fresca

5.2.1 Massa volúmica e teor em ar

Como já anteriormente referido, foram obtidas teórica e experimentalmente a massa volúmica das três misturas de pasta. Estes valores são ligeiramente diferentes dos esperados, apesar de serem eles os que são considerados reais. Pela Tabela 5.1 é possível verificar que os valores experimentais são ligeiramente superiores aos teóricos. A mistura com maior percentagem de

rejeitado na sua mistura (4% de cimento) tem uma massa volúmica superior às das restantes, o que está de acordo com o esperado.

Tabela 5.1: Massa volúmica teórica e experimental das misturas de pasta

Mistura	ρ teórico (Mg/m^3)	ρ experimental (Mg/m^3)
4% Ci	2,70	2,73
5% Ci	2,69	2,72
6% Ci	2,68	2,71

Com o aérometro determinou-se a percentagem de ar em cada mistura de pasta, tendo-se verificado que os três tipos eram relativamente uniformes, uma vez que aquela percentagem no geral é relativamente baixa. Os valores de teor em ar das pastas estão especificadas pela Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Teor em ar das misturas de pasta

Mistura	Teor em ar (%)
4% Ci	2,40
5% Ci	2,20
6% Ci	1,80

De facto, como esperado, a percentagem de ar na mistura com 6% de cimento foi a mais baixa das três misturas, uma vez que era também a mistura com mais percentagem de cimento e menos de rejeitado. Já a mistura com 4% de ligante foi a pasta com menos trabalhabilidade e, como possuía a maior percentagem de rejeitado, foi a que teve maior percentagem de ar, sendo a mais espessa e aquela que durante a mistura aparentou também ter uma consistência mais espessa.

5.2.2 Ensaios de abaixamento e de espalhamento

Como referido e como nesta investigação se analisa uma mistura com cimento, cuja componente principal é rejeitado, os valores aceitáveis de *slump* utilizados para controlo de qualidade da pasta, conforme a secção 2.4.2, são no máximo de 230 mm. Os valores incluídos na Tabela 5.3 corresponderam ao esperado, verificando-se ser inferior 230 mm - para a mistura com mais percentagem de ligante.

Tabela 5.3: Resultados do ensaio abaixamento das misturas de pasta

Mistura	Slump (mm)
4% Ci	160
5% Ci	180
6% Ci	230

A pasta com 6% de cimento na sua constituição é muito mais fluida do que as com 5% e 4% de ligante, apresentando um valor de *slump* superior aos das restantes pastas, sendo provavelmente aquela que teria menos problemas de escoamento nas tubagens do sistema de reticulado da mina. Apesar da diferença de quantidades de rejeitado e de cimento em cada mistura, o ensaio de abaixamento foi o que apresentou maior variação, representando os valores de abaixamento das pastas com 5% e 4% de cimento diferenças menores de consistência entre si.

A tensão de cedência (τ_0) pode ser calculada através da altura de abaixamento (Eq. 2.2) retirada do ensaio de *slump*(S), os valores desta constam da Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Tensão de cedência do ensaio de abaixamento

Mistura de pasta	τ_0 (Pa)
4% Ci	222,68
5% Ci	221,12
6% Ci	217,30

Como referido na secção 2.4.2, os valores teóricos da tensão de cedência estão na gama dos que são aceitáveis para pasta de enchimento.

Apesar do ensaio de abaixamento ser o mais utilizado no controlo de qualidade de pastas, para obter a maior correlação possível e evitar erros, foi realizado também para todas as misturas o ensaio de espalhamento. Mais uma vez os valores registados na Tabela 5.5 demonstram que a pasta mais fluida e que apresenta melhor trabalhabilidade é a que contém 6% de cimento, com um diâmetro de espalhamento superior às restantes.

Tabela 5.5: Resultados do ensaio de espalhamento das misturas de pasta

Mistura	Diâmetro de espalhamento (mm)
4% Ci	508
5% Ci	530
6% Ci	568

Salienta-se que os valores de espalhamento obtidos para as três misturas são mais próximos entre si do que em relação aos obtidos pelo ensaio de abaixamento, cuja mistura de 6% obteve uma maior variação. Esta ocorrência pode derivar do método de compactação utilizado em cada ensaio, sendo que é possível observar pelas figuras anteriormente referidas que, quando a compactação é realizada segundo a especificação do ensaio de abaixamento, as misturas apresentam maior fluidez do que com o ensaio com a mesa de espalhamento.

5.2.3 Viscosidade da pasta

A determinação da viscosidade tem como objectivo caracterizar a pasta quanto às suas características de escoamento, sendo por isso realizado este ensaio à pasta fresca, pouco

tempo após ser misturada; acresce que quanto maior fosse a percentagem de cimento, em detrimento da de rejeitado, a viscosidade deveria ser menor, pelo simples facto de a pasta se apresentar mais fluida. No entanto, devido à consistência da pasta e da agulha utilizada no ensaio com o viscosímetro ser fina, verificou-se que a pasta com 6% de cimento apresentava uma viscosidade muito mais elevada do que as restantes. Este facto pode ser explicado pela maior consistência das pastas com 5% e 4% de cimento, que durante a rotação da agulha no ensaio, ao possuírem mais rejeitado, o atrito das partículas sólidas em contacto com a agulha terá criado um espaço vazio, tipo parede, entre a mistura e a agulha, diminuindo o contacto desta com a pasta, pelo que os valores de viscosidade seriam muito diferentes dos reais. Inversamente, a pasta com 6% de cimento, sendo mais fluida, não gerou esse espaço entre a pasta e a agulha, fluindo sempre e colmatando os espaços durante a rotação da mesma, estando aparentemente mais correcto o valor registado na Tabela 5.6. Seria assim previsível que a pasta com maior percentagem de rejeitado (4% de cimento) tivesse a maior viscosidade.

Tabela 5.6: Viscosidades experimentais das misturas de pasta

Mistura de pasta	Temp. (°C)	v (rpm)	Torque(%)	η (mPa.s)	η (Pa.s)
4% Ci	34	0,3	31,1	621867	622
5% Ci	22	0,3	22,6	451904	452
6% Ci	22	0,3	99,8	1995574	1996

A Figura 5.1 apresenta os gráficos de viscosidade e temperatura registados ao longo do tempo de ensaio para as três misturas ensaiadas.

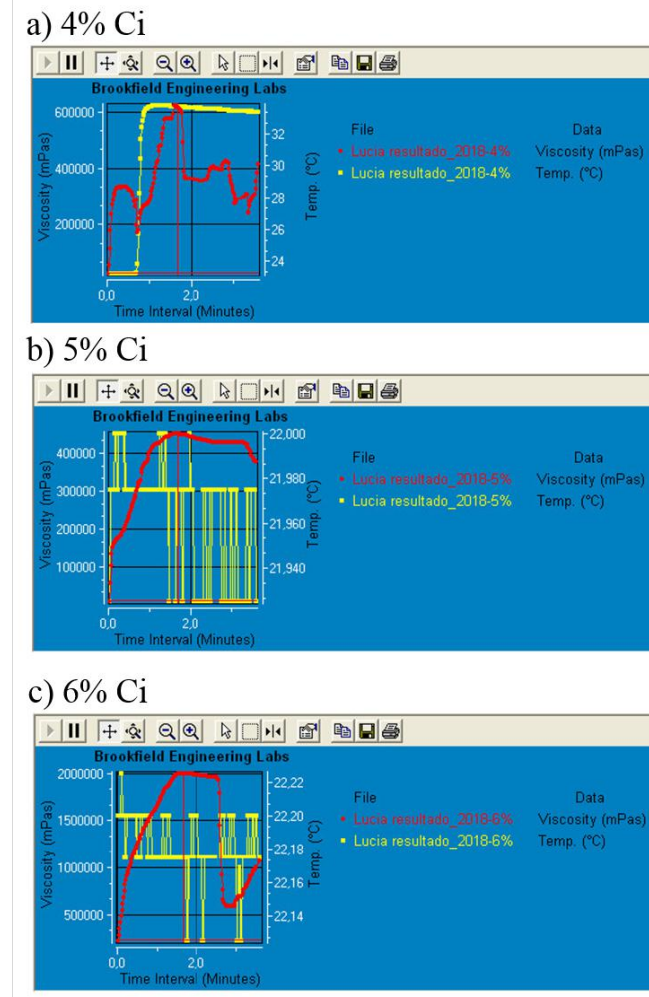


Figura 5.1: Gráficos de viscosidade em função do tempo de ensaio de viscosidade da pasta

5.2.4 Ensaio de retracção

Os valores de retracção - Apêndice B, foram medidos ao longo de 3 dias de cura da pasta para os três tipos de mistura estão descritos na Tabela 5.7. Salienta-se que neste ensaio a mistura de pasta que apresentou maior retracção foi a que continha maior percentagem de cimento, ou seja, a pasta com 6% de ligante. O expectável seria as pastas com maior percentagem de rejeitado retraírem mais, uma vez que a pasta com mais cimento tem um tempo de presa menor e ganha resistência mais rapidamente que as restantes, sendo que a sua retracção também se dá de uma forma mais rápida. Falta complementar os resultados com o ensaio até aos 5 dias de cura, que não foi possível de executar nesta investigação, sendo este o tempo em que a retracção será máxima.

Tabela 5.7: Resultados de retracção das misturas de pasta ao longo de 3 dias de cura

Mistura de pasta	L inicial (mm)	Tempo (h)	Retracção total (mm)	Retracção (%)
4% Ci	400	24	2,21	0,55
		48	0,63	0,16
		72	0,86	0,22
5% Ci	400	24	1,12	0,28
		48	6,55	1,64
		72	5,325	1,33
6% Ci	400	24	4,6	1,15
		48	2,45	0,61
		72	5,012	1,25

Refira-se que a distribuição granulométrica e a quantidade de partículas finas do rejeitado têm um papel fundamental na retenção de água da mistura, sendo que a existência de exsudação de água na mistura, resulta na sua retracção.

5.3 Ensaio de pasta endurecida

5.3.1 Ensaio dinâmico

A partir da utilização de ultrassons foi possível determinar a velocidade de propagação das ondas sísmicas P dos provetes de pasta das diferentes misturas, e compará-los com as condições de anisotropia das misturas testadas. Os valores médios obtidos para a velocidade de propagação das ondas P - Apêndice C, permitem, através da pequena diferença de valores relativa, concluir que a mistura de pasta foi bem compactada durante a moldagem dos provetes, sendo poucos os espaços de vazios no interior das três misturas testadas.

Também como previsível, os provetes de pasta com 6% de cimento têm uma velocidade média de propagação das ondas P superior à dos restantes, devido à maior quantidade de ligações do cimento com a água, que diminuem os espaços vazios no interior dos provetes. Os provetes de pasta com 4% de cimento, contudo, devido à maior percentagem de rejeitados na sua mistura, são mais porosos, pelo que a velocidade de propagação das ondas P é a menor, aos 91 dias de cura apenas são ligeiramente superiores em comparação com os provetes de 5% de cimento. Este valores podem ser observados na Figura 5.2.

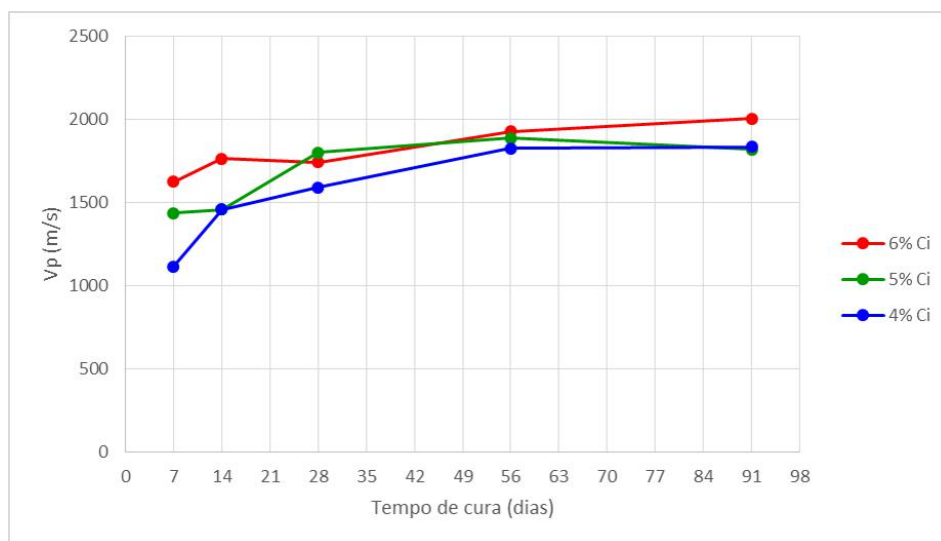


Figura 5.2: Resultados das velocidades de propagação média das ondas P nos provetes de pasta ao longo do tempo de cura

Dos 7 aos 91 dias de cura houve um aumento da velocidade das ondas P de cerca de 39% para os provetes com 4% de cimento, e da ordem de 21% para os de 5% e 19% para os de 6%; sendo que se verificou um incremento mais significativo na velocidade nos provetes de 4% com o tempo de cura.

Também se mediu a velocidade das ondas P nos provetes sujeitos a ataque químico com sulfatos, pelo que os mesmos provetes foram avaliados pelos ultrassons antes dos ciclos de ataque, aos 28 dias, e aos 56 dias de cura, após o ataque. Estas velocidades médias das ondas P, registadas no Apêndice C, identificam um decréscimo da velocidade - gráfico da Figura 5.3, por aumento de vazios (fissuras/poros) decorrentes da degradação química e térmica a que os provetes foram submetidos durante os 15 ciclos de ataque.

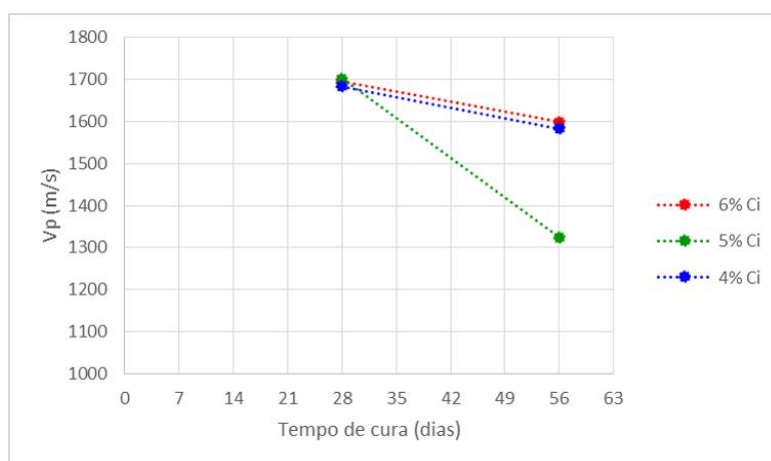


Figura 5.3: Comparação da velocidade de propagação das ondas P nos provetes de pasta que foram sujeitos a ataque químico com sulfatos, antes e após o ensaio

O decréscimo da velocidade das ondas P, corresponde a cerca de 6% para os provetes com 4% de cimento, 22% para os de 5% de cimento e 6% para os de 6% de cimento. Deste modo, a variação é mais significativa nos provetes de 5% de cimento, que correspondem àqueles que perderam mais materiais sem que tivessem sido compensados pela recristalização de sais. A variação da velocidade das ondas é reduzida nos provetes com 6%, pois foram os que sofreram menores alterações durante os ciclos de ataque. O facto de os provetes de pasta com 4% de cimento apresentarem valores de velocidade de propagação das ondas P superiores aos de 5%, pode estar correlacionado com esses serem mais porosos e, por isso, possuírem mais espaços vazios no seu interior que facilitaram a recristalização de sais durante o ataque com sulfatos. Este assunto é discutido ainda na secção 5.3.6.

5.3.2 Ensaio físicos

5.3.2.1 Teor em água

O teor em água das amostras de pasta - Apêndice D, observa-se no gráfico da Figura 5.4, onde a pasta com 6% de cimento tem um teor em água menos elevado do que as pastas com menos ligante - 5% e 4% de cimento, querendo isto dizer que aqueles provetes utilizaram a água da mistura no processo de hidratação. Ao longo do tempo de cura os provetes de 4% de cimento apresentaram maior teor em água, seguindo-se dos de 5% e por último os de 6% de cimento.

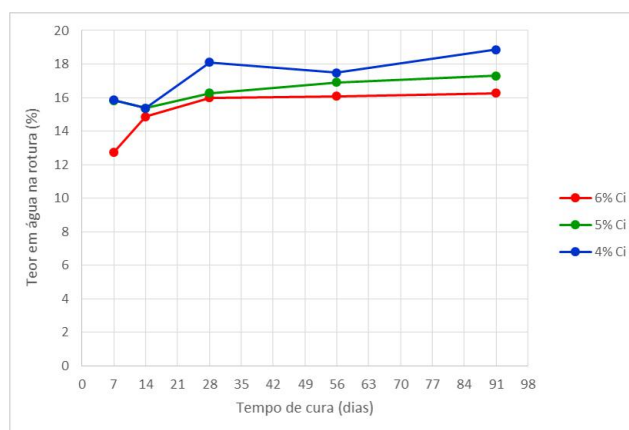


Figura 5.4: Resultados do teor em água nos provetes ao longo do tempo de cura

A partir dos 14 dias de cura, o teor em água não varia significativamente, sendo que os provetes com 4% de cimento, ao serem mais porosos por terem maior quantidade de rejeitado na sua mistura, absorveram toda a água que estaria na mistura ao longo dos dias. Pela observação dos provetes de pasta no momento em que foram retirados dos sacos de plástico a vácuo, foi possível verificar que dos 7 aos 14 dias havia muita água proveniente da mistura dentro dos sacos de plástico onde estavam acondicionados, mas como os sacos estavam selados a vácuo a cura foi húmida. Os sacos com provetes de 6% de cimento pareciam estar mais secos que os de 5% e 4%, ficando a ideia que houve hidratação total do cimento e utilização de toda a água da mistura, não havendo excesso. Inversamente, os sacos com

provetes com 5% e 4% de cimento apresentavam mais água retida, sendo que esta não foi utilizada no processo de hidratação, estando em excesso; estes provetes, como contêm menor percentagem de cimento e maior de rejeitado, são mais porosos e portanto, perdem mais água por evaporação. Salienta-se que, a partir dos 28 dias de cura até aos 91 dias, deixou de haver água nos sacos selados a vácuo, significando que ao longo deste tempo de cura houve a absorção contínua da água da mistura.

5.3.2.2 Absorção de água e porosidade aparente

Pelo gráfico da Figura 5.5 é possível verificar que, ao longo dos dias de cura, a absorção de água - Apêndice E, foi mais elevada nos provetes com 5% e 4% de cimento, uma vez que, seriam mais porosos e permitiram uma maior absorção de água. A partir dos 14 dias de cura, sendo a cura dos provetes de 6% e 5% mais rápida que a dos de 4%, estes últimos apresentaram sempre uma maior absorção de água, tendo os outros provetes estabilizado nesta altura. Tal significa que ao longo dos dias de cura, foram criadas mais ligações do cimento com a água, diminuindo os espaços vazios no interior dos provetes.

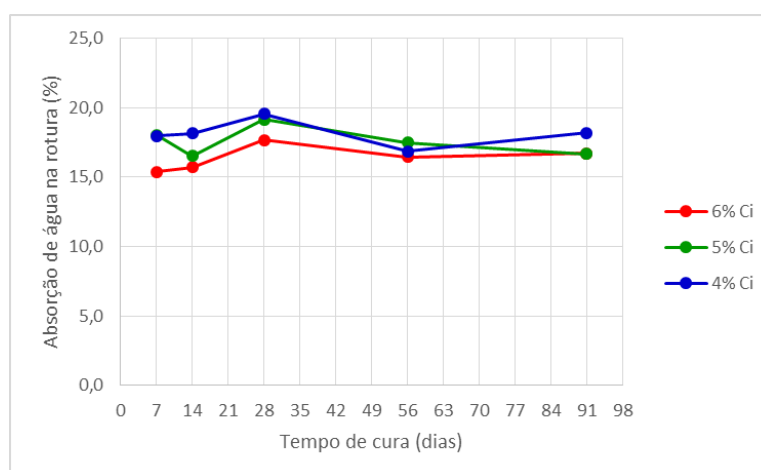


Figura 5.5: Evolução da absorção de água ao longo do tempo de cura dos provetes ensaiados à rotura

Os valores de porosidade aparente obtidos também durante o ensaio de absorção de água à pressão atmosférica estão descritos no Apêndice E e no gráfico da Figura 5.6. Verifica-se uma concordância com os valores de absorção, ou seja, que os provetes de pasta com 4% de cimento na sua composição são mais porosos que os provetes com 6% e 5% de cimento, identificando-se uma tendência ao longo do tempo para a esta propriedade dos provetes estabilizar e se aproximar, demonstrando que a cura é lenta e que os provetes tendem a convergir para os mesmos valores.

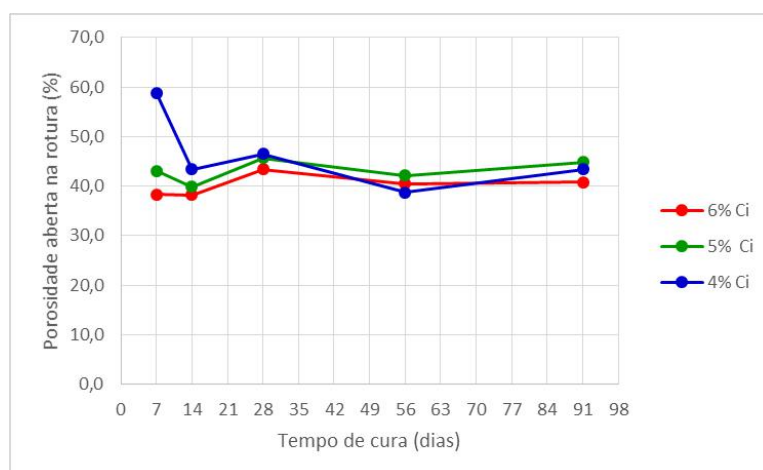


Figura 5.6: Evolução da porosidade ao longo do tempo de cura para os provetes ensaiados à rotura

Salienta-se que, para estes ensaios, utilizaram-se 10 provetes de cada mistura de pasta com o intuito de obter a melhor correlação possível, mas podem haver *outliers*. Nem todos os provetes são iguais, devido a alterações técnicas na compactação durante a respectiva moldagem. Estes valores são apenas sugestivos, tendo como objectivo indicar a tendência dos efeitos da mistura na evolução da cura.

5.3.3 Ensaios mecânicos

5.3.3.1 Resistência à compressão uniaxial

Os provetes de pasta das três misturas diferentes foram sujeitos a ensaios de resistência à compressão uniaxial a uma velocidade constante, sendo que os valores de resistência dos 7 aos 91 dias de cura estão registados no Apêndice F.

Os provetes de pasta com 6% de cimento na sua composição apresentam valores superiores de resistência em relação aos restantes, tendo os provetes de 4% de cimento menor resistência ao longo do tempo de cura. O objectivo deste trabalho era verificar quando e se os provetes teriam 800 kPa de resistência mínima, exigidos através do dimensionamento proposto pela análise de Mitchell - secção 3.5. Os provetes de pasta com 6% na sua composição apresentam valores superiores a 800 kPa logo nos primeiros 7 de cura, sendo que a sua resistência continua a aumentar, de forma gradual, até aos 91 dias. Já os provetes com 4% de cimento nos primeiros 14 dias de cura exibem valores inferiores a 800 kPa (Tabela 3.2), havendo um aumento significativo da resistência aos 28 dias de cura. Os provetes com 5% de cimento nos primeiros 7 dias de cura também apresentavam valores de resistência abaixo de 800 kPa, contudo registam um incremento de resistência linear, tal como os provetes com 6% de cimento, até aos 28 dias, ultrapassando logo o valor alvo aos 14 dias.

Pelo facto de as misturas conterem rejeitado de Zn, e por isso alguma percentagem de sulfuretos na sua constituição que poderiam originar formação de sulfatos e, portanto, um decréscimo de resistência durante o tempo de cura, a partir dos 28 dias. No entanto, apenas

se identifica uma ligeira atenuação no decréscimo da resistência dos 28 para os 56 dias. A partir dos 56 dias e até aos 91 dias, registou-se novamente um aumento mais significativo da resistência, sendo este superior nos provetes de pasta com 6% de cimento do que nos restantes. Verificou-se também que a partir dos 56 dias de cura os provetes com 5% e 4% de cimento tenderam a apresentar valores de resistência de magnitude semelhante, sendo apenas ligeiramente superiores nos provetes com 5% de cimento - Figura 5.7.

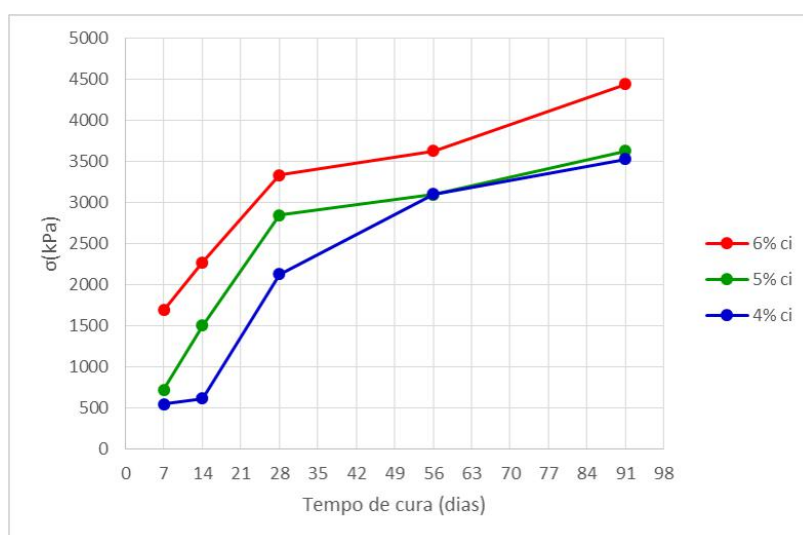


Figura 5.7: Evolução da resistência à compressão uniaxial dos provetes de pasta ao longo do tempo de cura

Na Figura 5.8 é possível observar o aspecto de um provete antes do ensaio de resistência à compressão ter início e o estado de outro provete após a rotura. Verifica-se que as fracturas apresentadas nos provetes sujeitos a este ensaio ocorreram de forma válida (Figura 4.17). Em alguns provetes ocorreram picos de resistência, sendo sinal que os pratos da prensa se estariam a adaptar às faces do provete, e noutros casos foi possível identificar uma primeira fase de rotura superficial, em que um dos lados (superficialmente) rompia. Nestes casos não se deu o ensaio como terminado, pois a situação era característica de provetes que tinham maior percentagem de sólidos de um dos lados, podendo ter ocorrido uma sedimentação natural ligeira desse lado ou induzida por problemas de moldagem, sendo que o ensaio continuou até à rotura total do provete.

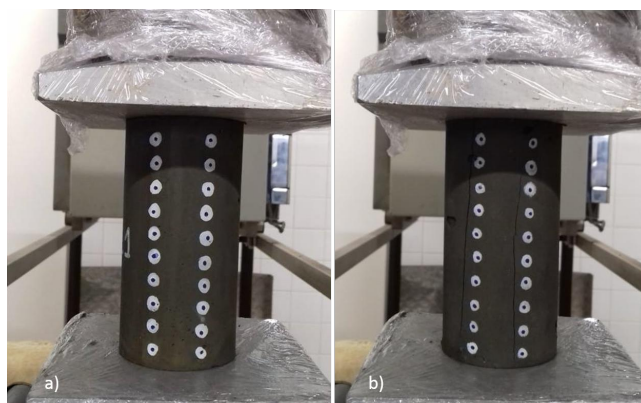


Figura 5.8: Aspeto de dois provetes antes e depois da rotura ocorrer no ensaio de RCU

O ganho de resistência ao longo do tempo de cura revela que, como os provetes tiveram uma cura lenta e húmida, houve uma diminuição do índice de vazios e do teor em água, associado às ligações químicas resultantes da hidratação do cimento que preenchem esses vazios e o consumo total de água para esse efeito. O ganho de resistência foi mais elevado nos provetes com 6% de cimento, e foram logo alcançados valores elevados nos primeiros dias de cura. A presa do cimento Portland ocorre ao fim de 60 min, sendo que em comparação com a pasta, a utilização deste tipo de cimento contribuiu para o aumento da resistência nos primeiros dias. O betão, dependendo do cimento utilizado, atinge cerca de 60% a 90% da sua resistência máxima aos 28 dias (Costa & Appleton, 2002).

Os valores de RCU aos 28 dias de cura dos provetes com 4%, 5% e 6% de cimento correspondem a 60%, 78% e 75%, respectivamente, da resistência aos 91 dias de cura. Dos 7 aos 91 dias de cura houve um aumento de resistência da ordem de 85% para os provetes com 4% de cimento, 80% para os de 5% e 61% para os de 6% de cimento.

Outro factor que também tem influência na resistência da pasta é o modo como o provete é compactado, sendo que a moldagem contribui para uma melhor consolidação e drenagem da pasta, influenciando o aumento da resistência da mesma. Também a razão A/C tem influência na resistência do betão e por isso na da pasta com cimento. É fundamental ter em atenção esta razão, sendo que às vezes uma quantidade maior de água é prejudicial.

Foram também realizados ensaios de RCU a provetes com 6% de cimento aos 56 dias de cura, mas após terem sido submetidos a ataque com sulfatos aos 28 dias, secção 5.3.6. Como expectável, houve um decréscimo significativo da resistência destes provetes de pasta relativamente àqueles que não sofreram qualquer ataque químico com sulfatos - gráfico da Figura 5.9, salientando-se que ambos os provetes provieram da mesma mistura de pasta. Nestas condições e após o ataque químico, verificou-se um decréscimo na ordem de 47% da RCU relativamente aos provetes com 28 dias de cura e de 51% para os provetes sem ataque aos 56 dias de cura, sendo esta análise realizada tendo em consideração que estes valores são meramente representativos, uma vez que os provetes não são os mesmos.

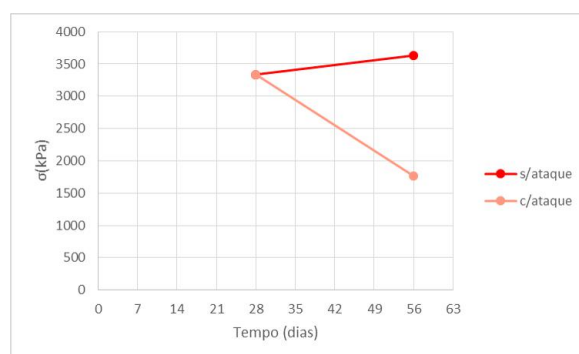


Figura 5.9: Variação da resistência à compressão uniaxial da média dos provetes com 6% de cimento antes e após o ataque químico com sulfatos

5.3.3.2 Módulo de deformabilidade

No Apêndice G é possível encontrar os quatro módulos de deformabilidade calculados em função das três misturas e ao longo dos dias de cura - secção 4.5.4.2. Na Figura 5.10 é possível observar a evolução do módulo de deformabilidade desses provetes de pasta.

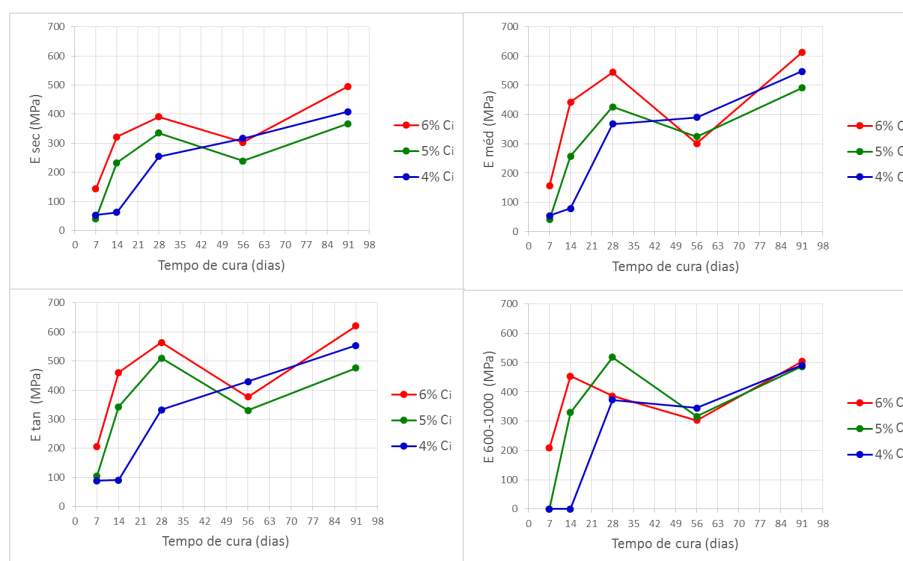


Figura 5.10: Evolução dos módulos E_{sec} , E_{med} , E_{tan} e $E_{600-1000}$ para os diferentes provetes de pasta ao longo do tempo de cura

Salienta-se que o módulo de deformabilidade tangente é sempre superior ao módulo secante e que os provetes ensaiados com 6% e 5% de cimento na mistura revelam um decréscimo no módulo aos 56 dias de cura, aumentando este novamente aos 91 dias. Há alguns provetes com 5% e 4% de cimento para os quais não foi possível obter o módulo de deformabilidade secante entre 600 kPa e 1000 kPa aos 7 e 14 dias de cura, uma vez que ambos ainda não tinham rompido antes daqueles valores de tensão axial.

Os módulos de deformabilidade, à excepção dos 56 dias de cura, apresentam um aumento gradual, estando em concordância com os valores de RCU obtidos, pois este módulo deve aumentar com a resistência da pasta ao longo do tempo, sendo possível que tenha ocorrido

algum tipo de erro na leitura das deformações axiais dos provetes durante a sua rotura. Os valores dos módulos de deformabilidade para as percentagens de 5% e 6% são assim considerados anómalos e não representativos.

5.3.3.3 Utilização do *Software* GOM Correlate

Ao longo de todos os tempos de cura, durante os ensaios destrutivos, foram realizados vários tipos de identificação dos provetes de modo a serem reconhecidos pelo *software* GOM Correlate. Como referido na secção 4.5.4.3, o objectivo era medir deformações axiais e radiais nos provetes durante os ensaios. Contudo, no âmbito dos ensaios à compressão realizados constatou-se que, após um tratamento das imagens retiradas dos vídeos dos ensaios, o *software* era incapaz de reconhecer a superfície dos provetes, provavelmente devido à sua cor e forma cilíndrica (não planar). A única superfície que o *software* reconhecia eram os diferentes pontos nos provetes, sendo que mesmo considerando as pequenas superfícies reconhecidas e marcando aqueles que se queria medir os deslocamentos, o *software* não reconhecia esses mesmos pontos durante a sequência de imagens. Portanto e como é possível verificar pela Figura 5.11, não foi possível analisar os deslocamentos dos provetes, tanto de resistência à compressão como os de tracção indirecta por compressão e, conseqüentemente, não se obtiveram os valores do módulo de deformabilidade (E) nem o coeficiente de Poisson (ν) com base nesta análise.

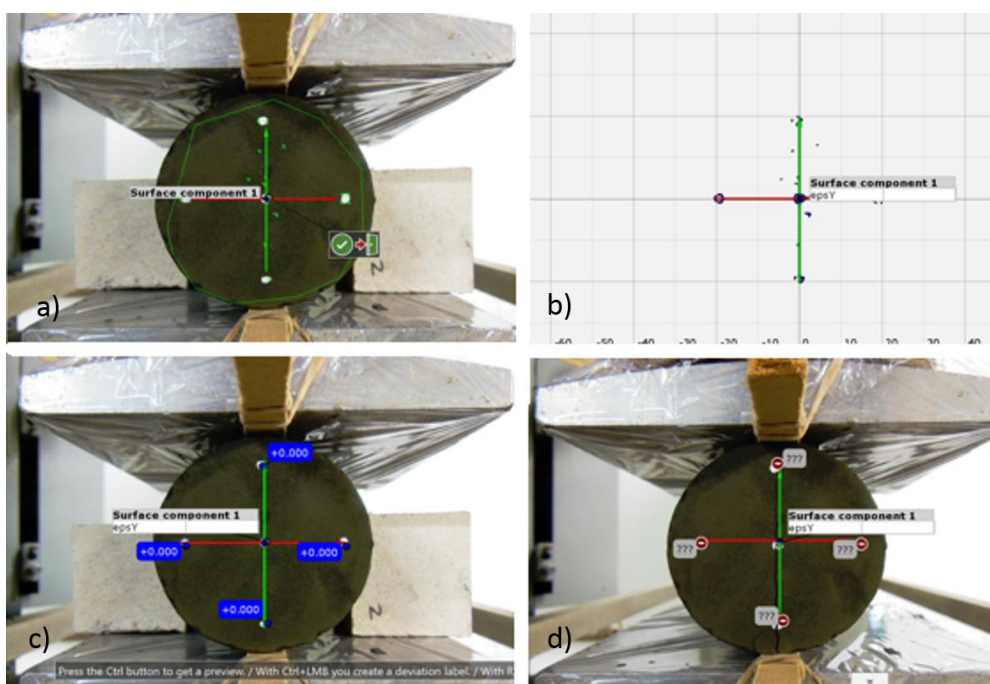


Figura 5.11: Sequência de passos durante a análise com o *software* GOM durante um ensaio de resistência à tracção indirecta por compressão

5.3.3.4 Tracção indirecta

Na Figura 5.12 é possível observar um provete de pasta montado para ser submetido ao ensaio de tracção por compressão antes e depois da rotura. A rotura verificada é considerada válida, sendo possível considerar os respectivos resultados. A rotura destes provetes ocorria na secção onde a força era aplicada pelas meias canas. Após os ensaios, visualizava-se o estado do interior dos provetes, verificando-se a existência ou ausência de bolhas de ar, resultantes do processo de moldagem.

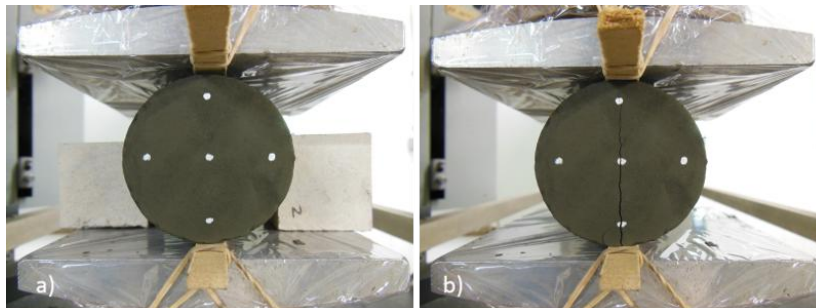


Figura 5.12: Proвете de pasta antes e após a sua rotura à tracção indirecta

Os valores da resistência à tracção indirecta por compressão dos provetes de pasta - Apêndice H, não demonstram o mesmo comportamento que os valores retirados dos ensaios de RCU. Como é possível observar, pelo gráfico da Figura 5.13, onde aos 91 dias de cura há um decréscimo da resistência ao invés de um aumento da mesma. Este facto pode estar relacionado com a anisotropia dos provetes ensaiados horizontalmente, podendo apresentar uma estrutura mais frágil ao longo deste plano.

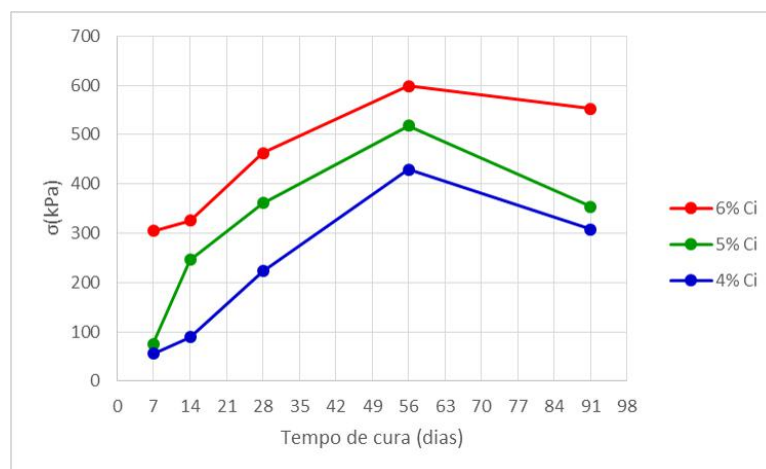


Figura 5.13: Evolução da resistência à tracção indirecta dos provetes de pasta ao longo do tempo de cura

5.3.4 Análise colorimétrica

A análise colorimétrica dos provetes de pasta teve como propósito avaliar a evolução da cor ao longo do tempo de cura do mesmo, de modo a caracterizá-la e em termos de alterações de cor devido à oxidação do Ferro (Fe) presente na pasta, bem como comparando a cor antes e após o ataque químico com sulfatos. Para tal foram realizadas medições em vários lados de cada provete, retirando os parâmetros L^* , a^* e b^* e calculando os parâmetros C^* e h° , através das equações 4.7 e 4.8, respectivamente. Os valores medidos com o colorímetro e os calculados encontram-se no Apêndice I. Na Figura 5.14 estão apresentados os gráficos obtidos de acordo com cada mistura de pasta.

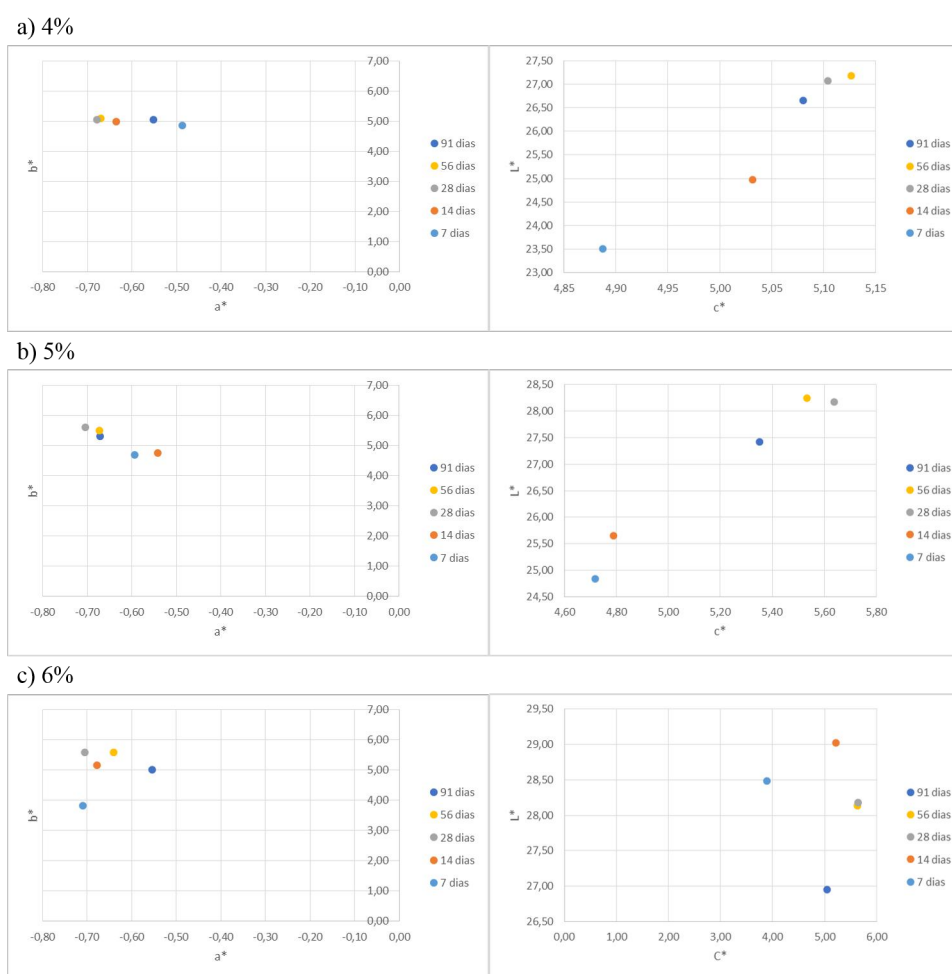


Figura 5.14: Gráficos dos parâmetros de cor dos provetes das diferentes misturas

Da sua análise verifica-se que todos os provetes de pasta apresentam, ao longo dos 91 dias de cura, parâmetros de cor a^* , muito semelhantes, indicando proximidade à zona verde do espectro, bem como de b^* , apontando para a zona amarelada do espectro. Os parâmetros L^* e C^* situam-se na zona mais escura, nomeadamente cinzento, tendo tendência para aclararem ao longo do tempo de cura.

Realça-se que os provetes de pasta com 6% de cimento mostram uma cor ligeiramente

mais clara do que os outros provetes de pasta. No geral, todos eles exibem cor mais escura entre 7 e 28 dias de cura. Como a cura dos provetes de pasta foi realizada a vácuo, notou-se que eles mantiveram a cor cinzenta escura não havendo oxidação dos minerais em contacto com o ar, que lhe iriam atribuir uma cor avermelhada. Contudo, aos 28 dias alguns provetes apresentam uma pequena alteração da cor, principalmente nos respectivos topos e bases, ocorrendo manchas amareladas, características da oxidação do Fe, como é possível observar na Figura 5.16. Também se verificou, em alguns provetes deformados que foram removidos das respectivas embalagens e expostos ao ar, o aparecimento de uma cor cinza alaranjada ao longo do tempo.

A análise colorimétrica foi realizada também, como referido, para avaliar os parâmetros de cor antes e depois do ataque químico com sulfatos, e estes os valores integram o Apêndice I. Os gráficos com os respectivos parâmetros incluem a Figura 5.15.

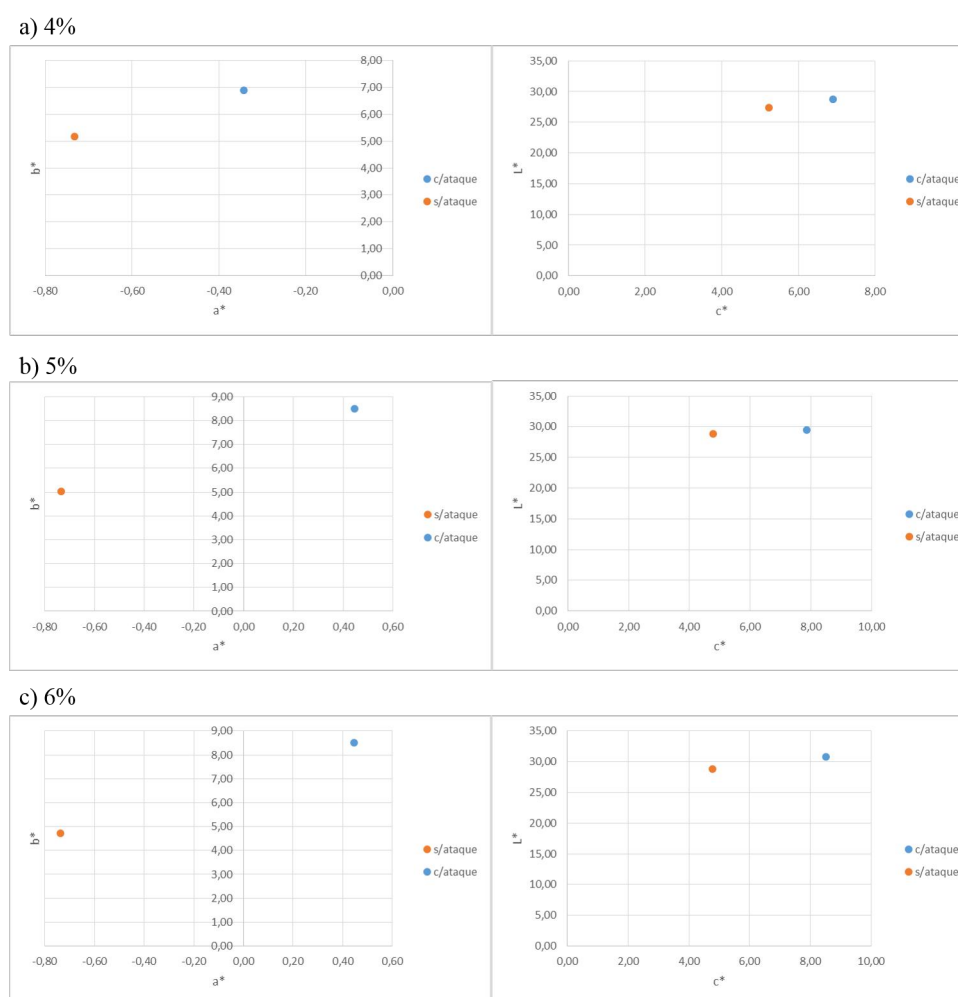


Figura 5.15: Gráficos dos parâmetros de cor dos provetes das diferentes misturas que foram submetidas a ataque químico com sulfatos



Figura 5.16: Alteração de cor dos provetes com 28 dias de cura

Os provetes de 5% e 6% de cimento apresentam, após o ataque químico, uma mudança no parâmetro a^* , que passou a estar mais próximo da zona da cor vermelha, devido provavelmente à oxidação de Fe durante o ensaio. Os provetes mostram ainda uma cor cinzenta, mas com vestígios de cor vermelha alaranjada. Estes provetes, devido ao ataque e aos ciclos de temperatura extremos a que foram submetidos, apresentaram no final do ensaio alteração significativa na cor, sendo que o cinzento escuro tornou-se muito mais claro e, à superfície, ficou maioritariamente cinzento amarelado.

5.3.5 Análise química e SEM

As amostras moídas foram submetidas a análise por XRF até aos 56 dias de cura. Não foi possível obter informação sobre os 91 dias de cura, pois foi impossível moer os provetes de pasta, devido ao seu ganho de resistência já ser muito significativo.

Na Tabela 5.8 encontram-se os valores médios da composição química das diferentes misturas ao longo dos dias de cura. As amostras revelam valores mais elevados de Fe e Enxofre (S), sendo que também existem vestígios de Arsénio (As), Bismuto (Bi) e de Antimónio (Sb). Provavelmente a percentagem de Magnésio (Mg) detectada provém da mistura de cimento. A análise desenrolada ao longo dos dias de cura faz pressupor que não existem reacções químicas significativas, ou seja, não houve a formação de novas substâncias à custa das existentes, podendo este facto estar relacionado com o método de cura utilizado, em vácuo, sem influência do ar e com uma cura húmida e lenta.

Tabela 5.8: Composição química das misturas de pasta ao longo dos dias de cura

Tempo	Mistura	Cu	Zn	Pb	Fe	S	Mg	As	Bi	Sb
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
7 dias	6% Ci	0,11	1,13	0,44	30,86	38,65	0,08	6375	17	417
	5% Ci	0,11	1,09	0,37	31,4	38,85	0,085	6395	19	440
	4% Ci	0,12	1,1	0,38	31,97	39,85	0,065	6726	11	444
14 dias	6% Ci	0,12	1,28	0,45	31,69	39,93	0,102	6279	17	440
	5% Ci	0,12	1,11	0,39	32,4	39,52	0,066	6774	26	460
	4% Ci	0,12	1,09	0,39	32,46	40,92	0,066	6837	20	465
28 dias	6% Ci	0,11	1,07	0,36	31,22	38,43	0,061	6399	26	410
	5% Ci	0,12	1,11	0,38	32,54	40,67	0,099	6809	25	452
	4% Ci	0,12	1,08	0,37	31,91	40,31	0,083	6658	22	427
56 dias	6% Ci	0,11	1,07	0,36	31,22	38,43	0,061	6399	26	410
	5% Ci	0,12	1,3	0,46	32,01	39,85	0,077	6355	21	411
	4% Ci	0,12	1,09	0,38	31,54	39,16	0,07	6559	29	459

Aos 7 dias de cura uma amostra de provete de pasta com 5% de cimento foi submetida ao SEM, tendo-se efectuado algumas determinações com a sonda. Na Figura 5.17 observam-se registos obtidos em diferentes secções da superfície da amostra e com detalhe variável. A Tabela 5.9 inclui a percentagem, em peso, dos elementos encontradas. Por esta análise é possível perceber que na pasta existem compostos, como a sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), sulfuretos de Ferro (FeS_2), bem como outros relativos ao cimento, como Potássio (K) e Cálcio (Ca).

Tabela 5.9: Elementos químicos presentes no espectro da Figura 5.17

Elementos detectados	Peso relativo (%)		
	Superfície 1	Superfície 2	Superfície 3
O	23,53	28,44	24,58
Al	0,42	0,83	0,61
Si	2,75	2,08	2,44
S	34,05	29,51	32,31
K	0,45	0,82	0,64
Ca	6,37	8,45	7,98
Fe	29,39	26,06	29,05
Zn	2,07	1,59	1,61
As	0,98	1,11	0,78
Cu	-	0,31	-
Ba	-	0,8	-

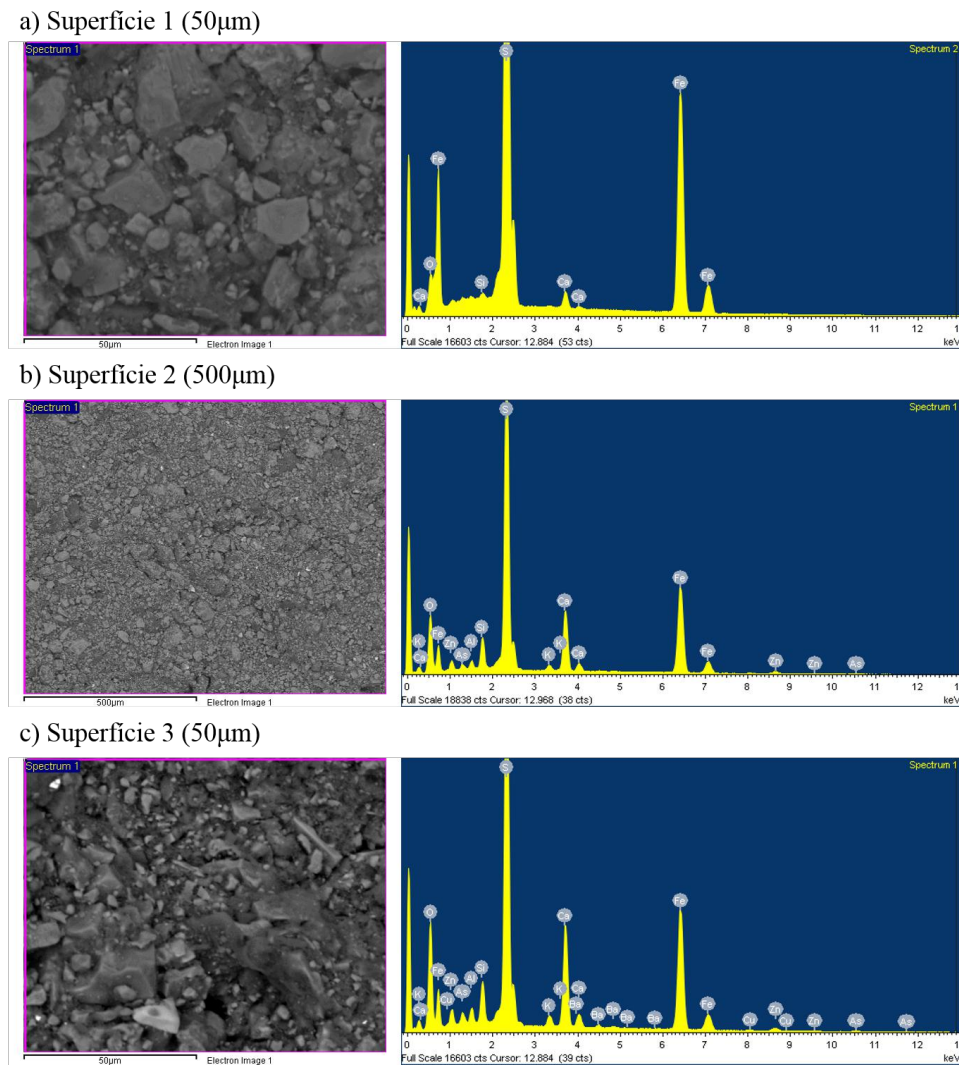


Figura 5.17: Aspecto e leitura da amostra ao microscópio electrónico segundo três espectros

No SEM, ao fim de 7 dias de cura, já é possível observar na Figura 5.18, a existência de poros, a amarelo, e o aparecimento de ligações de cimento, a vermelho.

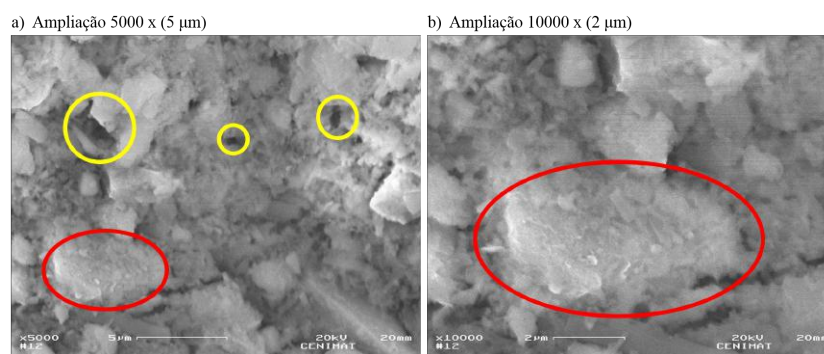


Figura 5.18: Aspecto da amostra de 5% de cimento aos 7 dias de cura segundo duas ampliações diferentes

5.3.6 Durabilidade - Ataque com sulfatos aos 28 dias de cura

Durante o início e o fim de cada ciclo de ensaio foram realizadas pesagens para controlo das amostras - Apêndice J, sendo que no fim de cada ciclo de imersão na solução era visível a perda de material dos provetes, resultantes da acção dos sulfatos, como se mostra na Figura 5.19.



Figura 5.19: Perdas de material dos provetes de pasta após imersão na solução de sulfatos

Na Figura 5.20 é possível observar a evolução do aspecto geral dos provetes de pasta desde o primeiro ao último ciclo de ataque. A superfície dos provetes após saírem da imersão em sulfatos era pastosa, havendo perda de material contínua durante o seu manuseamento, após a sua secagem e no ataque, apresentavam uma cor amarelada esverdeada com zonas esbranquiçadas devido à cristalização de sais na sua superfície.

a) 1º Ciclo de ataque



b) 15º Ciclo de ataque

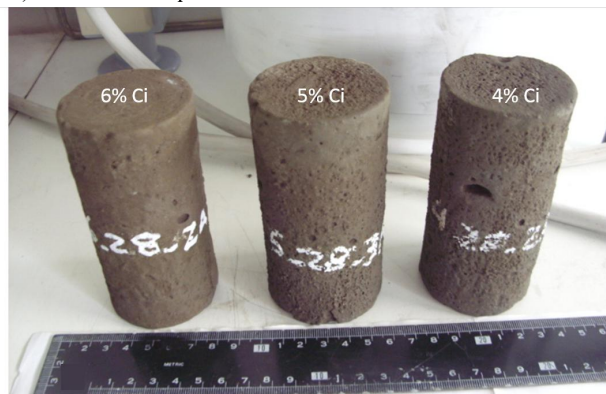


Figura 5.20: Aspecto dos provetes de pasta após o 1º e o 15º ciclos de ensaio

De acordo com a norma deste ensaio deve-se terminar o ataque aos provetes que apresentem fissuras, sendo estes considerados inválidos para submeter a ensaios ulteriores. Contudo e para observar a contínua degradação dos provetes, o ataque prosseguiu até ao fim em todos eles, mesmo nos provetes com 4% e 5% de cimento que registaram fissuras a partir do 8º ciclo de ensaio. Na Figura 5.21 é possível visualizar o estado dos provetes de pasta no último ciclo de ataque com sulfatos. Salienta-se que os provetes com 6% de cimento tinham apenas alguma rugosidade superficial, apresentando as faces ligeiramente lisas. Já os provetes com 4% e 5% de cimento mostraram elevada porosidade e fissuras muito profundas na base e topo,

tendo sofrido maior ataque do que os que tinham mais ligante na sua mistura. Os provetes de 6% de cimento foram os únicos considerados válidos para ensaiar à RCU.



Figura 5.21: Aspecto dos provetes das três misturas após os 15º ciclos

Os valores de massa média seca e saturada estão incluídos no Apêndice J. É possível perceber que os provetes ao longo dos ciclos de ataque, apesar de perderem muito material, ganham massa, ou seja, a partir da perda de material e existe a criação de espaços vazios para deposição de sais nos provetes - Figuras 5.22 e 5.23, sendo também por esta razão que a velocidade dos ultrassons dos provetes com 5% de cimento é relativamente semelhante à dos de 6%, apesar das suas fissuras. Através do gráfico é também possível verificar que os provetes com 6% de cimento foram os que mais ganharam massa, pois foram os que perderam menos material e ganharam à mesma sais. O 16º ciclo corresponde à lavagem dos provetes, ou seja, após o último ciclo de ataque, os provetes foram lavados (ficando submersos em água destilada) sendo por isso que a sua massa diminui.

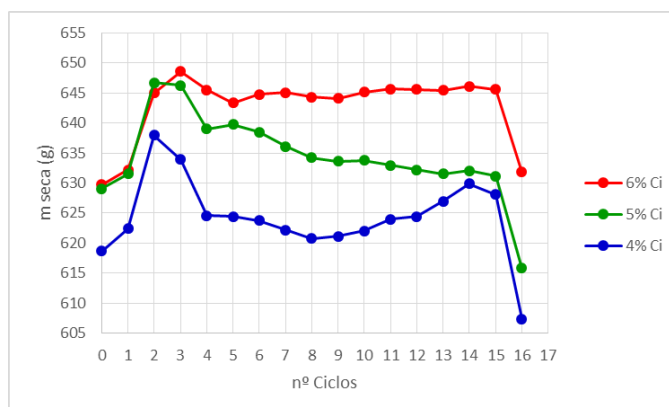


Figura 5.22: Resultados da massa seca média dos provetes de pasta ao longo dos ciclos de ensaio



Figura 5.23: Resultados da massa saturada média dos provetes de pasta ao longo dos ciclos de ensaio

Considerações finais

6.1 Conclusões

Esta investigação teve por objectivo caracterizar três misturas de pasta diferentes, com 4%, 5% e 6% de cimento, tanto fresca como endurecida, para determinar qual delas teria um melhor comportamento mecânico, visando a sua utilização no enchimento de desmontes no jazigo de Feitais, em Aljustrel. As três pastas foram feitas a partir de rejeitado de Zn, com uma massa volúmica de $4,4 \text{ Mg/m}^3$, contendo cerca de 56% de material passado abaixo dos $20 \mu\text{m}$ e com uma superfície específica de $1,03 \text{ g/m}^2$, superior à do rejeitado de Cu. Em termos de composição, a pasta apresenta na sua constituição sílica, alumina, sulfuretos de ferro e outros compostos contendo magnésio e potássio, estes derivados do cimento. Salienta-se também que o rejeitado de Zn apresenta grande fluidez quando em contacto com água.

Análises realizadas nesta investigação, demonstram que água reciclada da Almina utilizada na mistura de pasta tem pH de 6,8, isto é, aproximadamente neutro, com presença de partículas sólidas em suspensão e uma condutividade eléctrica de cerca de $668 \mu\text{S/cm}$, cuja análise cromatográfica revelou a existência de substâncias como o Na^+ e Ca^{2+} , respectivamente com cerca de 33,199 ml/L e 42,713 ml/L e em menor quantidade os iões de Mg^{2+} e K^+ . É uma água bicarbonatada mista, o que pode ser um factor que potencie o aparecimento de reacções químicas na pasta ao longo da cura.

A síntese dos resultados dos ensaios de caracterização mais representativos para o estudo da pasta fresca inclui a Tabela 6.1, e referem-se ao ensaio de abaixamento, estimativa da tensão de cedência de cada mistura de pasta e consistências relativas, bem como a respectiva viscosidade, teor em ar e a retracção ao fim de 3 dias de cura.

Tabela 6.1: Resultados dos ensaios às misturas de pasta fresca

Misturas	ρ (Mg/m ³)	Teor em ar (%)	Slump (mm)	Retracção (%)	τ_0 (Pa)	η (Pa.s)
4% Ci	2,73	2,40	160	0,22	222,68	622
5% Ci	2,72	2,20	180	1,33	221,12	452
6% Ci	2,71	1,80	230	1,25	217,30	1996

Verificou-se que a pasta fresca da mistura com 4% de cimento, apresenta uma massa volúmica de 2,73 Mg/m³, devido à maior percentagem de rejeitado presente na sua composição, sendo por isso também a que se revelou mais espessa e de difícil trabalhabilidade. Durante a sua preparação, foi a mistura que apresentou uma temperatura mais elevada na misturadora, explicada pelo efeito abrasivo que os constituintes do rejeitado provocam, sendo necessário considerar este aspecto tanto no dimensionamento dos materiais e equipamentos utilizados na sua mistura, como também durante a sua passagem em sistemas de reticulado, podendo estes ser danificados.

Coube-lhe a menor altura de abaixamento, comparativamente às restantes pastas, apenas 160 mm, e uma tensão de cedência teórica mais elevada, da ordem de 223 Pa, parâmetro importante para analisar o respectivo escoamento no sistema de reticulado. Esta pasta apresentou também e como seria de esperar, o teor em ar mais elevado, de cerca de 2,4%. A mistura aparentou ser a mais viscosa, como referido, pelo que a sua viscosidade experimental, ao corresponder ao valor mais baixo de 622 Pa.s, não corresponde à sua viscosidade real e deve-se certamente à agulha fina utilizada no viscosímetro, que era a única disponível para o efeito.

Em relação ao estudo da retracção desta mistura, observou-se que ao fim de 3 dias foi a pasta que apresentou menor retracção, sendo superior nas primeiras 24 h do que ao 3º dia de cura, fenómeno que pode ser explicado, por observação directa, devido ao facto de ser a mais porosa e a que perdeu mais água por exsudação nas primeiras horas, retraindo assim mais; após esse período, devido à sua maior porosidade, absorveu novamente essa água (ambiente de cura) e voltou a expandir.

A pasta com 5% de cimento (Tabela 6.1) tem uma massa volúmica de 2,72 Mg/m³, apresentou em regra parâmetros reológicos melhores do que os da pasta com 4% de cimento: a tensão de cedência estimada era semelhante, da ordem de 221 Pa, a altura de abaixamento relativamente baixa, teor em ar inferior à mistura com de 4%; foi a que apresentou maior retracção das três misturas, e foi mais significativa durante as primeiras 48h, pois ainda apresentava alguma exsudação. Esta pasta também aparentou ser viscosa, embora menos do que a de 4%, pelo que o valor registado através do viscosímetro, de 452 Pa.s, não é representativo da sua viscosidade real e enferma do problema já salientado anteriormente.

A pasta fresca de 6% de cimento foi a que incorporou na sua mistura menor percentagem de rejeitado e mais de cimento, sendo a sua massa volúmica de 2,71 Mg/m³, ligeiramente inferior às duas outras. Esta pasta era a mais fluida e menos viscosa, pelo que a sua altura de abaixamento, 230 mm, situa-se no limite do aceitável para uma pasta de enchimento mineiro,

ultrapassando contudo o limite para betões em 10 mm; a sua tensão de cedência teórica, cerca de 217 Pa, é inferior à das outras duas misturas, sendo por isso aquela que, em termos de escoamento nos sistemas de reticulado por gravidade, irá apresentar menor probabilidade de sofrer sedimentação e provocar a oclusão da tubagem. Devido à sua fluidez, esta mistura com mais cimento mostrou melhor trabalhabilidade durante a realização dos provetes, sendo a que ficou melhor compactada e também tinha um teor em ar de apenas 1,8%, inferior às restantes.

Ao longo dos 3 dias do ensaio de retracção e não havendo indício significativo de exsudação, foi a pasta que mais retraiu nas primeiras 24 h, e também ganhou presa mais rapidamente, e no final aparentou uma retracção semelhante à da pasta de 5% de cimento. O facto desta pasta apresentar uma retracção mais elevada no início da sua cura e reduzida exsudação, pode significar que é a pasta que mais rapidamente ganha presa, devido à maior percentagem de cimento na sua constituição e, naturalmente, o processo de retracção também ocorreu rapidamente, havendo hidratação total do cimento da mistura. No ensaio de viscosidade foi a que exibiu o valor de viscosidade mais alto, de ordem de 1996 Pa.s, mas que também não é representativo da viscosidade real da pasta.

No conjunto, os valores de tensão de cedência das três misturas de pasta estão dentro da gama de valores publicados para pastas de enchimento, entre 200 e 700 Pa (Yves et al., 2005), situando-se um pouco acima de 200 Pa. Também os valores de *slump* obtidos nos ensaios de abaixamento estão em concordância com os aceitáveis para pastas de enchimento, nomeadamente entre 130 e 230 mm. Salienta-se ainda que os valores de abaixamento elevados indicam que a pasta apresenta viscosidade baixa, enquanto que os valores mais baixos de abaixamento indicam que a pasta apresenta viscosidade elevada, em consequência da sua maior percentagem de sólidos, neste caso, de rejeitado, na sua composição.

Na moldagem de provetes e após o enchimento dos moldes cilíndricos de aço inox com pasta, foi possível verificar que a presa dos provetes com 6% de cimento ocorreu mais rapidamente do que os das restantes percentagens, verificando-se que só ao fim de 3 dias os provetes com 4% e 5% conseguiam ser desmoldados sem deformarem; foram em seguida embalados a vácuo até serem ensaiados.

Nos provetes de pasta endurecidos, realizaram-se diferentes ensaios, desde inspecção visual, passando por ensaios dinâmicos, físicos e mecânicos, complementados por uma análise química com FRX, SEM e colorimétrica.

Nos dias de ensaio, ao longo do tempo de cura, mais precisamente aos 7, 14, 28, 56 e 91 dias, observou-se que durante a abertura dos sacos onde se encontravam acondicionados, tanto os provetes com 4% e 5% de cimento mostravam nos primeiros dias perda de água por exsudação, sintomático de excesso de água na mistura, o que em caso de enchimento de desmontes reais não é favorável, visto não ser suposto existir necessidade de drenagem neste tipo de enchimento. Após os 28 dias de cura verificou-se, contudo, que ambos os provetes, com 4% e 5% de cimento, passaram a absorver a água em excesso anteriormente, podendo concluir-se que, como a cura foi lenta, conseguiram absorver água devido, quer à sua porosidade, quer à hidratação lenta do cimento.

A inspecção visual dos provetes permitiu identificar a base e o topo dos mesmos durante a sua moldagem, pois todos eles tinham o diâmetro ligeiramente superior na base. Salienta-se ainda que foram utilizados valores médios para a apresentação dos resultados dos ensaios realizados à pasta endurecida e que, às vezes, o respectivo desvio padrão é relativamente elevado, devido sobretudo à heterogeneidade natural do material que os constitui, bem como à própria compactação dos provetes, pelo que se consideraram todos os valores obtidos em ensaio.

Os ensaios com ultrassons para medição da velocidade das ondas P, realizados para verificar a homogeneidade dos provetes devido ao processo de moldagem, revelou que ao longo do tempo de cura a velocidade aumentou gradualmente, não se registando variações elevadas dos respectivos valores – Figura 5.2. Os provetes com 4% de cimento apresentaram, ao 7º dia, um valor mais alto de velocidade das ondas P que o dos provetes com 5% Ci, sugerindo que eram menos porosos. A velocidade das ondas P começa a estabilizar por volta dos 56 dias de cura, aumentando ligeiramente ainda aos 91 dias; na generalidade, a sua velocidade variou entre 1113 m/s e 1832 m/s entre 7 dias e 91 dias de cura, crescendo cerca de 39%.

Os provetes de pasta com 5% de cimento sofreram um ligeiro decréscimo da velocidade das ondas P aos 91 dias de cura, o que pode ser devido a problemas de moldagem desses provetes, que ficaram com mais vazios. A velocidade dos ultrassons em todos os provetes ao longo do tempo também não sofreram variações significativas e mantiveram-se entre 1434 m/s e 1817 m/s, sendo que os valores começaram a estabilizar a partir dos 28 dias de cura.

A velocidade das ondas P medidas nos provetes de pasta com 6% de cimento foram mais elevadas que as dos restantes provetes, com os valores entre 1622 m/s e 2002 m/s, respectivamente, entre entre 7 dias e 91 dias de cura. São portanto os provetes que, como anteriormente referido, apresentaram menos espaços vazios no seu interior.

Todas as misturas de pasta continham a mesma percentagem de água na mistura, de 18%, podendo haver ligeiras variações que não eram significativas. Também as condições de cura influenciaram a resistência dos provetes de pasta, pois ao ocorrer lentamente, sem a possibilidade de perdas de água e sem contacto com o ar, diminui-se a oxidação dos provetes e, portanto, a sua deterioração potencial, obtendo-se valores de resistência mais elevados do que se a cura fosse somente realizada em ambiente húmido, mas exposta ao ar. Contudo, o objectivo do estudo realizado, sob provetes mantido em vácuo e humidade, teve como objectivo simular o comportamento da pasta no interior de um desmorte, assumindo que o interior do enchimento não está exposto ao ar e a perda de água é muito baixa, sendo superior no seu topo, exposto ao ar. Após a rotura dos provetes nos dias de ensaios, verificou-se que o seu teor em água foi sempre superior nos provetes com 4% Ci, com valores variando entre 16% e 19%, seguindo-se os provetes com 5% Ci, com valores entre 16% e 17%, e os provetes com 6% apresentaram teores em água inferiores. O teor em água tendeu a estabilizar a partir dos 28 dias de cura, exibindo os provetes com 6% Ci um valor de cerca de 15% dos 28 aos 91 dias de cura.

Os provetes com 4% de cimento absorveram mais água durante os ensaios de absorção de água à pressão atmosférica, sugerindo a existência de espaços vazios no seu interior e maior

porosidade, principalmente nos primeiros 7 dias de cura. Os provetes com 5% Ci apresentaram absorção de água e porosidades na rotura semelhantes aos com 4% de Ci, tendendo essa diferença a diminuir ao longo do tempo de cura. Os provetes com 6% apresentaram a menor absorção de água e menor porosidade, devido à sua presa rápida e a serem menos porosos; contudo, apresentaram ainda valores significativos, sugerindo que existe absorção e retenção de água no seu interior. A presente investigação focou-se, essencialmente, nos resultados obtidos pelos ensaios mecânicos, de RCU e tracção indirecta (TRAC) entre 7 e 91 dias de cura, resultados estes que incluem a Tabela 6.2. Ao longo do tempo de cura verificou-se um acréscimo não linear no valor da RCU. O estudo da resistência, para além da averiguar o seu aumento ou decréscimo ao longo do tempo de cura, é também fundamental para definir quais as misturas que obtêm a resistência mínima exigida aos enchimentos mineiros do jazigo de Feitais - 800 kPa, e a partir de quando é que ela é alcançada.

Tabela 6.2: Resultados de RCU e tracção indirecta (TRAC) dos provetes de pasta ao longo dos dias de cura

Tempo	4% C		5% C		6% C	
	RCU (kPa)	TRAC (kPa)	RCU (kPa)	TRAC (kPa)	RCU (kPa)	TRAC (kPa)
7 dias	545,52	55,85	722,75	75,18	1690,15	304,27
28 dias	2127,41	223,28	2844,96	360,60	3337,12	462,14
91 dias	3530,14	307,38	3627,53	353,69	4443,07	552,38

Nos primeiros 7 dias, os valores de resistência para os provetes com 4% e 5% Ci foram muito significativas, mas foi ainda mais significativo para a mistura com 6% Ci, ganhando presa e resistência nos primeiros dias. Os provetes com 4% de cimento demoram mais tempo a ganhar presa e apresentam valores de resistência muito baixos nos primeiros dias de cura, sendo somente alcançada a resistência mínima exigida de 800 kPa após 14 dias; aquele valor é ultrapassado aos 28 dias de cura. A resistência média destes provetes, obtida aos 91 dias, foi da ordem de 3,5 MPa.

Também os provetes com 5% de Ci nos primeiros 7 dias de cura não chegaram a obter os valores de resistência mínima de 800 kPa, ultrapassando-o nos provetes ensaiados aos 14 dias de cura; a sua resistência aos 91 dias de cura é semelhante à dos provetes com 4% Ci, cerca de 3,6 MPa. Os provetes com 6% Ci revelaram valores médios de resistência superiores aos exigidos desde os 7 dias de cura, rondando cerca de 4,4 MPa aos 91 dias.

Os valores de RCU aos 28 dias de cura dos provetes com 4%, 5% e 6% de cimento correspondem a 60%, 78% e 75%, respectivamente, da resistência aos 91 dias de cura. Dos 7 aos 91 dias de cura houve um aumento de resistência da ordem de 85% para os provetes com 4% Ci, 80% para a mistura com 5% Ci e 61% para os provetes com 6% de cimento. A partir do gráfico da Figura 6.1 é possível observar a RCU dos provetes das três misturas diferentes ao longo do tempo. É possível verificar uma relação aproximadamente linear entre a percentagem de cimento utilizada na pasta e o acréscimo de resistência entre 14 e 28 dias de cura.

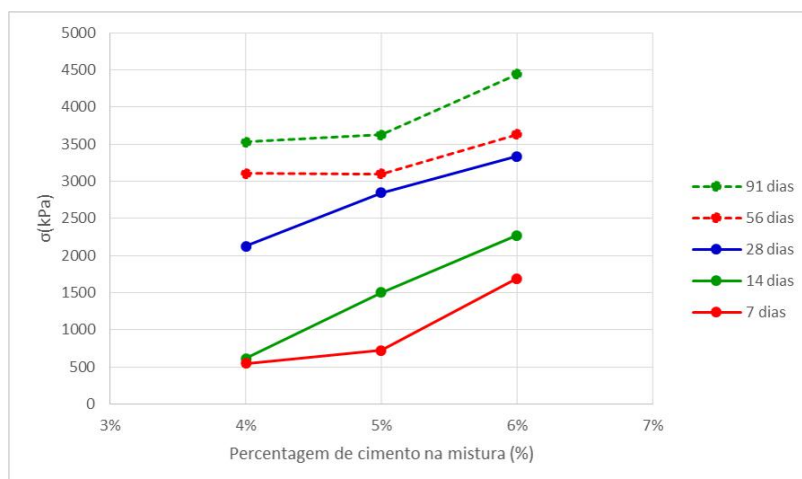


Figura 6.1: Evolução da resistência à compressão uniaxial dos diferentes provetes de pasta ao longo do tempo de cura

Os provetes com 6% Ci revelam um aumento, relativamente linear, ao longo dos dias de cura, apesar de ter existido uma atenuação desse aumento dos 28 aos 56 dias. A partir dos 56 dias até aos 91 dias continuou a existir um acréscimo na resistência dos provetes de 4% e 5% Ci, mas com uma aproximação significativa na magnitude final da resistência, sendo que os provetes com 6% Ci se evidenciam dos restantes, pois a percentagem de cimento na sua mistura confere-lhes resistência mais elevada. Os provetes de pasta das diferentes misturas foram testados à tracção por compressão diametral. Ao contrário do acréscimo contínuo na resistência ao longo do tempo de cura verificado nos ensaios de RCU, nos de tracção indirecta verificou-se que, aos 91 dias, existiu um decréscimo de cerca de 28% da resistência para os provetes com 4% Ci, de 32% para os provetes com 5% Ci e apenas de 8% nos provetes com 6% Ci.

Para analisar a durabilidade das misturas, executou-se um ensaio de ataque químico com sulfatos às três misturas de pasta a partir dos 28 dias de cura, e verificou-se que após os 15 ciclos de ataque e apenas nos provetes de pasta com 6% Ci, os únicos elegíveis segundo as normas de ensaio, houve um decréscimo significativo da RCU; contudo essa resistência continuava a ser superior a 800 kPa, o valor de resistência mínima pretendido para o enchimento. Nestas condições e após o ataque químico, verificou-se um decréscimo na ordem de 47% da RCU relativamente aos provetes com 6% Ci e 28 dias de cura sem ataque com sulfatos – Figura 6.1, e de 51% para os provetes sem ataque aos 56 dias de cura.

Verificou-se que, após o ataque químico, os provetes com 4% e 6% Ci não apresentaram um decréscimo significativo na velocidade das ondas P. Contudo, os provetes com 4% Ci, sendo mais porosos, perderam mais material e abriram mais fissuras, mas também durante os ciclos de ataque houve recristalização de sais no seu interior e à sua superfície, que os preencheram; sofreram um decréscimo de 6% na velocidade das ondas P dos 28 aos 56 dias após o ataque com sulfatos. Já os provetes com 6% Ci não registaram tantas alterações físicas, sendo o decréscimo da velocidade também de cerca de 6%. Nos provetes com 5% Ci observaram-se

mais variações nestes valores, visto que também perderam bastante material, mas como não sendo tão porosos como os provetes com 4% Ci, não apresentaram recristalização significativa de sais, sofrendo um decréscimo maior na velocidade das ondas P após o ataque químico, da ordem de 22%.

Em síntese, a mistura de pasta que atinge resistências mais elevadas e superiores a 800 kPa logo desde os 7 dias de cura foi, portanto, a pasta com 6% de cimento e 76% de rejeitado, sendo aquela que registou também o menor teor em ar e altura de abaixamento mais elevada em comparação os mesmos registos obtidos pelas pastas com 4% e 5% de cimento; constituiu a pasta que melhor se adapta às condições de escoamento, por gravidade, pelo sistema de reticulado até aos desmontes. Os valores de resistência obtidos para o rejeitado de Zn, durante este estudo, tendo todos os provetes a mesma percentagem de sólidos (82%), como a mesma percentagem de sólidos é superior aos obtidos nos estudos efectuados para a Almina, mas usando um rejeitado de Cu. Deste modo, para implementação da pasta de 4% de cimento, teria de ser necessário esperar até aos 28 dias de cura, para que esta alcançasse 800 kPa de resistência mínima, antes de dar continuidade aos trabalhos de mineração. Para uso da pasta com 5% de cimento, ter-se-ia de esperar apenas até aos 14 dias de cura para que ela ultrapassasse a resistência de 800 kPa. Estas duas misturas tendem depois a apresentar comportamento mecânico semelhante, atingindo valores de RCU semelhantes aos 91 dias de cura.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

A experiência obtida no âmbito deste estudo e alguns dos resultados obtidos, recomendam que se considerem, de imediato, alguns aspectos a aprofundar por investigações adicionais a curto prazo.

Durante a realização da pasta fresca, foi possível verificar que a temperatura, tanto do ar como da água, parecem influenciar a trabalhabilidade da pasta e o sucesso da mistura, em termos da sua homogeneidade. Sugere-se, assim, que para trabalhos futuros em laboratório, elas sejam realizadas com água fria e, no tempo quente, logo pela manhã, e de forma faseada, pois o rejeitado tende a absorver grande parte da água, dificultando a mistura. Tendo em conta que não foi possível realizar o ensaio de retracção até aos 5 dias de cura, seria um aspecto de interesse para ser estudado futuramente, tal como a resistência ao fim de 5 dias em concordância com o tempo de cura.

Outro estudo interessante para a aplicação do método de mineração em enchimento em locais com variações térmicas significativas, seria a realização de pasta com as mesmas percentagens de constituintes já ensaiadas, mas efectuadas com água a diferentes temperaturas, de modo a determinar se há alteração da resistência ao longo dos tempos de cura.

Um outro aspecto de estudo a desenvolver relativo à optimização da utilização da pasta seria realizar ensaios com diferentes tipos de cimento, mas mantendo as respectivas percentagens relativas, para conhecer e avaliar a sua potencial utilização, controlo de custos e a evolução das resistências ao longo do tempo de cura.

Uma vez que existe uma anomalia nos valores do módulo de deformabilidade obtidos para os provetes aos 56 dias de cura, recomenda-se que sejam ensaiados novos provetes, em tudo idênticos aos desta investigação, para despistar se houve algumas leituras anómalas nas deformações axiais realizadas.

A fim de determinar o valor do coeficiente de Poisson (ν) da pasta endurecida, recomenda-se o recurso, por exemplo, a LVDT, para medir as deformações axiais e transversais dos provetes submetidos a ensaios de RCU.

Relativamente à utilização do *software* GOM Correlate, uma vez que funciona melhor em provetes com faces planas, ou seja, provetes prismáticos, bem como provetes com matriz clara, a fim de facilitar o reconhecimento pelo *softawre*, da superfície dos mesmos, recomenda-se que os provetes prismáticos sejam pintados de branco com pintas pequenas pretas de *Spray* aleatórias antes de utilizar este método novamente.

Referências bibliográficas

ASTM C39/C39M-12. **Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos da América.

ASTM C143/C143M-10a. **Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete.** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos da América.

ASTM C597-09. **Standard test method for pulse velocity through concrete.** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos da América.

ASTM D 2196-10. **Standard test method for rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) viscometer.** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos da América.

ASTM D 2845-08. **Standard test method for laboratory determination of Pulse Velocities and Ultrasonic elastic constants of rock.** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos da América.

ASTM D 4543-08. **Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos da América.

ASTM D 7012-07. **Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperature.** Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos da América.

Barroso, A., Gomes, G., Lima, A., Palácio, H., Lima, C. (2011). **Avaliação da qualidade da água para irrigação na região Centro Sul no Estado do Ceará.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Agriambi, v.15, n° 6, pp. 588-593.

Belem T., Benzaazoua M. (2004). **An overview on the use of paste backfill technology as a ground support method in cut-and-fill mines.** Proceedings of the 5th Int. Symp. on Ground support in Mining and Underground Construction. Villaescusa & Potvin (eds.), 28-30 September 2004, Perth (Australia), Tayler & Francis Group, London, pp. 637 – 650.

Belem T., Harvey A., Simon R., Aubertin M. (2004). **Measurement and prediction of internal stresses in an underground opening during its filling with cemented fill.** Proceedings of the 5^a Int. Symp. on Ground support in Mining and Underground Construction. Villaescusa & Potvin (eds.) 28-30 September 2004, PerthPerth (Australia), Tayler & Francis Group, London, pp. 619 – 630.

Benzaazoua, M., Belem, T., Bruno, B. (2002). **Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill.** Cement and concrete research, Pergamon, pp.113-1144.

Brady, B., Brown, E. (2005). **Rock Mechanics for underground mining.** 3^a Edição, Springer Science e Business Media, Inc.

Candeias, M. (2008). **Caracterização ambiental da zona envolvente à área mineira de aljustrel.** Tese de Mestrado em Engenharia Geológica Universidade de Aveiro.

Costa, A., Appleton, J. (2002). **Estruturas de Betão I (Parte II - Materiais).** IST, Lisboa.

Coutinho, S. (2006). **Fabrico e propriedades do betão.** Volume 1, LNEC, 622 pp.

Deere, D., Miller, R. (1966). **Engineering classification and index Properties for intact Rock.** Air Force Weapons Laboratory, University of Illinois, 327 pp.

Depósitos de Jales Filtrados (2017). XV Taller. Taller de intercambio de experiencias. FM First Majestic, Silver corp.

Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., Kullberg, J. (edt.) (2013). **Geologia de Portugal - Geologia Pré—Mesozóica de Portugal.** Volume 1, Escolar Editora, Lisboa.

EN 1936 (2006). **Natural stone test methods - Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity.**

EN 13755 (2008). **Natural stone test methods - Determination of water absorption at atmospheric pressure.**

Ferreira, A. (s.d). **Caracterização de Portugal Continental.** pp. 19-61.

Ferreira, T. (2015). **Geomecânica aplicada à estabilidade de explorações mineiras bench and fill: o caso do jazigo de Feitais, Minas de Aljustrel,** Tese de Mestrado em Geotécnica e Geoambiente, ISEP, Porto.

Guo, L., et al. (2014). **An Experimental Study on the Mechanical Properties of Cemented Rock-tailings Fill.** Advanced Materials Research Vols. 941-944 (2014) pp. 2611-2611.

Mondlane, N., Pita, F., Pratas, J. (2014). **Flutuação de sulfuretos do estéril da antiga mina da Escádia Grande (Góis).** LNEG, IX CNG/2º CoGePLiP, Porto, pp. 807-811.

NP EN 197-1 (2001). **Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.** Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 1097-5 (2011). **Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 5: Determinação do teor de água por secagem em estufa ventilada.** Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 2016-1 (2007). **Betão - Parte 1: Especificações, desempenho, produção e conformidade.** Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 12390-2 (2009). **Ensaio do betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.** Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 12350-2 (2009). **Ensaio do betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento.** Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 12350-5 (2009). **Ensaio do betão fresco - Parte 5: Ensaio da mesa de espalhamento.** Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 12350-6 (2009). **Ensaio do betão fresco - Parte 6: Massa volúmica**. Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 12390-3 (2011). **Ensaio do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes**. Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

NP EN 12390-6 (2011). **Ensaio do betão endurecido - Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes**. Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

Pirapakaran, K. (2008). **Load-deformation characteristics of minefills with particular reference to arching and stress development**. Tese de Doutoramento, James Cook University, Austrália, 264 pp.

Potvin, Y., Thomas, E., Fourie, A. (2005). **Handbook on Mine Fill**. Australian Centre for Geomechanics, Perth, Austrália, 400 pp.

Rodier, J., Merlet, N., Bernard, L. (2009). **L'Analyse De L' Eau**. 9º Edição, DUNOD.

Saebimoghaddam, A. (2005). **Reological yield stress measurement of mine paste fill material**. Tese de Mestrado em Engenharia. Department of Mining, Metals and Materials Engineering, McGill University, Montreal, Canada.

Secil (2004). Cimento Portland de Calcário CEM II/A-L 42,5 R. Ficha técnica. Outão.

Sheshpari, M. (2015). **A review of Underground Mine Backfilling Methods with emphasis on cemented Paste backfill**. EJGE, Volume 20, bund.13, pp. 5183-5208.

Silva, D. (2018), no prelo. **Reforço de arcos de Alvenaria de tijolo com FRP**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Perfil de estruturas, FCT NOVA, Monte da Caparica, 180 pp.

Silva e Costa, M. (1989). **Entulhamento mineiro em jazigos muito inclinados e pouco espessos**. Tese de Mestrado em Mecânica dos Solos, FCT NOVA, Monte da Caparica, 138 pp.

Smith, M., ed. (2007). **Mining Methods in Underground Mining**. 2ª Edição, Mining Methods in Undergroud Mining, Atlas Copco.

Torres, V. e Gama, C., Villas-Bôas, R. (ed.) (2005). **Engenharia Ambiental Subterrânea e aplicações**. 542 pp.

Yilmaz, E., Benzaazoua, M., Belem, T., Bussière, B. (2009). **Effect of Curing Under Pressure on Compressive Strength Development of Cement Paste Backfill**. Minerals Engineering, vol. 22, pp. 772-785.

Yilmaz, E., Belem, T., Benzaazoua, M. (2014). **Effects of curing and stress conditions on hydromechanical, geotechnical and geochemical properties of cemented paste backfill**. Engineering Geology, volume 168, pp. 23-37.

Yumlu, M. (2009). **Mining with Paste Fill**. AMC Consultants Pty Ltd e AusIMM Cobar Mining Seminar, Melbourne, Austrália, pp. 26.

Zvirblis, D. (2014). **Influence of High RAP on Binder Properties in Hot Mix Asphalt of Northeast**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de New Jersey, pp. 71.

Webliografia

<http://www.almina.pt/location.html> - *Localização, Almina, Aljustrel* - Acedido a 08/02/2018

<http://www.cement.org/learn/concrete-technology/concrete-construction/curing-in-construction> - **Role of Concrete Curing**, Jerzy Z. Zemajtis, Ph. D., PE (WA) - Acedido: 16/04/2018

<http://www.tailings.info/storage/backfill.htm> - **Backfill of Tailings to Underground Workings**. Jon Engels 2017 -Acedido: 16/04/2018

<https://www.youtube.com/watch?v=tJYPysKQPIU> - **GOM Correlate Video Tutorial - 3 - 2D Evaluation of Surface Components**. Acedido: 13/05/2018

<https://gqsystems.eu/blog/how-choose-the-right-color-tolerancing-method-for-your-process> - **How to choose the right color tolerancing method for your process?**, Jana Loskotova - Acedido: 10/07/2018

<http://sensing.konicaminolta.com.br/2013/11/entendendo-o-espaco-de-cor-lab/> - **Entendendo o Espaço de Cor L*a*b*** 2006-2018 Konica Minolta Sensing Americas, Inc. - Acedido: 10/07/2018

Apêndice A

Tabela A.1: Valores médios e respectivo desvio padrão (DP) da caracterização física dos provetes de pasta

Tempo de cura	Misturas	Massa (g)	DP	l (mm)	DP	D (mm)	DP
7	4% Ci	674,34	16,14	108,03	0,76	53,33	0,87
	5% Ci	712,47	11,76	109,39	0,28	54,36	0,50
	6% Ci	707,16	3,07	108,21	0,39	54,44	0,19
14	4% Ci	723,13	9,25	109,28	0,51	54,61	0,26
	5% Ci	703,95	6,48	108,32	0,27	54,50	0,25
	6% Ci	724,59	10,21	109,76	0,68	54,83	0,29
28	4% Ci	710,54	26,32	109,01	0,72	54,54	0,12
	5% Ci	726,25	10,04	109,24	0,93	54,78	0,29
	6% Ci	709,32	8,47	108,47	0,35	54,58	0,27
56	4% Ci	718,25	7,83	109,10	0,71	54,57	0,07
	5% Ci	711,85	13,56	108,62	1,11	54,40	0,07
	6% Ci	710,86	8,90	108,63	0,54	54,76	0,27
91	4% Ci	675,60	27,34	108,61	0,35	53,48	0,92
	5% Ci	709,09	5,34	108,43	0,27	54,39	0,06
	6% Ci	714,45	8,70	108,67	0,69	54,74	0,34

Tabela A.2: Valores médios e respectivo desvio padrão (DP) da caracterização física dos provetes de pasta antes e após serem submetidos a ataque com sulfatos

Tempo de cura	Misturas	Massa (g)	DP	l (mm)	DP	D (mm)	DP
28 (s/ataque)	4% Ci	714,18	1,63	107,98	0,82	54,49	0,11
	5% Ci	719,62	2,14	108,45	0,12	54,97	0,09
	6% Ci	717,07	13,62	108,27	1,07	54,87	0,27
56 (c/ataque)	4% Ci	607,39	1,33	110,01	0,46	54,43	0,30
	5% Ci	615,83	1,54	108,93	0,28	54,36	0,35
	6% Ci	631,83	20,91	108,21	1,25	54,09	0,64

Apêndice B

Tabela B.1: Retracção das misturas de pasta ao longo de 3 dias de cura

Mistura de pasta	l inicial (mm)	Tempo (h)	Retracção Dir. (mm)	Retracção Esq. (mm)	Retracção (mm)	Retracção total (mm)	Retracção (%)
4% Ci	400	24	0,01	0,5	1,7	2,21	0,55
		48	0,03	0,6		0,63	0,16
		72	0,06	0,8		0,86	0,22
5% Ci	400	24	0,02	1	0,1	1,12	0,28
		48	1	4	1,55	6,55	1,64
		72	1,5	3	0,825	5,325	1,33
6% Ci	400	24	0,1	1	3,5	4,6	1,15
		48	0,15	2	0,3	2,45	0,61
		72	1	3,5	0,512	5,012	1,25

Apêndice C

Tabela C.1: Velocidade de propagação média das ondas P (m/s) e respectivo desvio padrão (DP)

	7 dias	DP	14 dias	DP	28 dias	DP	56 dias	DP	91 dias	DP
4% Ci	1113	91	1458	17	1588	184	1824	34	1832	34
5% Ci	1434	23	1458	140	1798	90	1884	82	1817	22
6% Ci	1622	108	1763	36	1740	70	1926	34	2002	32

Tabela C.2: Velocidade das ondas P (m/s) dos provetes antes e após serem submetidos a ataque com sulfatos

	28 dias	DP	56 dias	DP
4% Ci	1684	8	1583	20
5% Ci	1703	69	1325	9
6% Ci	1696	19	1599	36

Apêndice D

Tabela D.1: Resultados do teor em água médio (%) dos provetes após rotura e o respectivo desvio padrão (DP)

Tempo de cura (dias)	4% Ci	DP	5% Ci	DP	6% Ci	DP
7	15,9	0,04	15,8	0,74	12,7	1,71
14	15,4	0,86	15,4	0,24	14,9	0,86
28	18,1	2,67	16,3	1,61	16,0	0,98
56	17,5	0,15	16,9	0,62	16,1	0,15
91	18,9	2,65	17,3	0,93	16,3	0,65

Apêndice E

Tabela E.1: Resultados médios de absorção de água na rotura (%) dos provetes ao longo do tempo de cura e o respectivo desvio padrão (DP)

Tempo de cura (dias)	4% Ci	DP	5% Ci	DP	6% Ci	DP
7	18,0	0,88	18,0	1,14	15,4	1,17
14	18,1	0,79	16,5	0,93	15,7	0,80
28	19,6	1,08	19,1	1,08	17,7	1,83
56	16,9	1,39	17,5	1,11	16,5	0,43
91	18,2	1,26	16,7	0,94	16,7	1,18

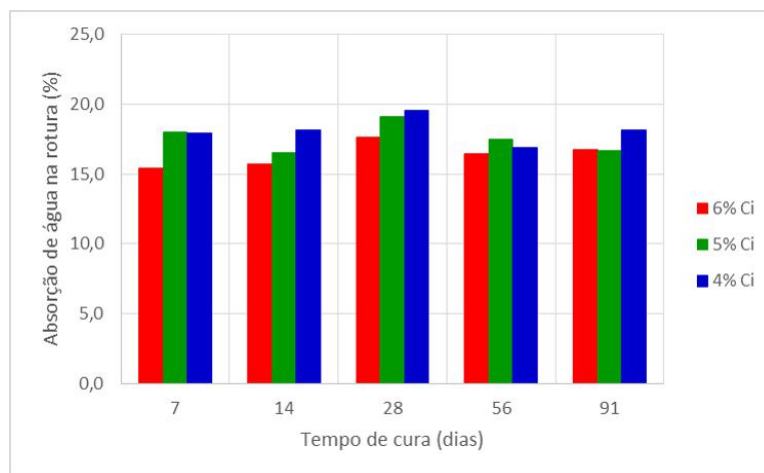


Figura E.1: Comparação da absorção de água na rotura (%) após rotura ao longo do tempo de cura das misturas

Tabela E.2: Resultados médios da porosidade na rotura (%) dos provetes ao longo do tempo de cura e respectivo desvio padrão (DP)

Tempo de cura (dias)	Mistura 4% Ci	DP	Mistura 5% Ci	DP	Mistura 6% Ci	DP
7	58,8	1,34	43,1	1,74	38,3	1,91
14	43,4	1,07	39,9	1,55	38,2	1,29
28	46,6	1,52	45,6	1,48	43,4	2,65
56	38,7	2,25	42,1	1,93	40,5	0,64
91	43,4	1,79	44,8	1,51	40,9	1,95

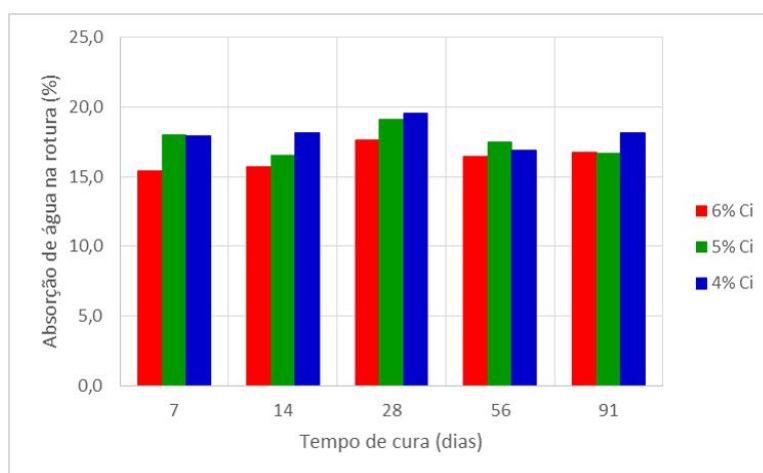


Figura E.2: Comparação da evolução da porosidade na rotura (%) ao longo do tempo de cura para os provetes ensaiados à rotura

Apêndice F

Tabela F.1: Resistência à compressão uniaxial média (kPa) e respectivo desvio padrão (DP)

Tempo de cura (dias)	4% Ci	DV	5% Ci	DV	6% Ci	DV
7	545,52	55,71	722,75	142,37	1690,15	84,38
14	612,73	148,02	1501,25	131,74	2268,90	315,48
28	2127,41	164,85	2844,96	213,95	3337,12	717,88
56	3105,64	164,85	3099,26	340,51	3632,34	376,52
91	3530,14	258,67	3627,53	129,81	4443,07	332,44

Tabela F.2: Resistência à compressão uniaxial média(kPa) dos provetes antes e após o ataque com sulfatos e respectivo desvio padrão (DP)

Tempo de cura (dias)	6% Ci	DP
28 (s/ataque)	3337,12	19,17
56 (c/ataque)	1765,69	35,50

Apêndice G

Tabela G.1: Módulo de deformabilidade secante (MPa) e respectivo desvio padrão (DP)

	4% Ci	DP	5% Ci	DP	6% Ci	DP
7 dias	54	18,36	41	22,12	143	13,29
14 dias	63	19,66	233	45,61	322	60,43
28 dias	255	2,87	336	35,58	391	180,35
56 dias	317	106,35	239	43,57	303	69,24
91 dias	408	72,31	367	39,93	495	58,72

Tabela G.2: Módulo de deformabilidade médio (MPa) e respectivo desvio padrão (DP)

	4% Ci	DP	5% Ci	DP	6% Ci	DP
7 dias	55	28,59	42	23,48	156	18,12
14 dias	80	16,74	258	67,62	442	59,86
28 dias	367	33,35	427	46,83	544	176,40
56 dias	390	116,58	325	43,16	301	91,18
91 dias	548	49,08	491	82,48	612	71,33

Tabela G.3: Módulo de deformabilidade tangente (MPa) e respectivo desvio padrão (DP)

	4% Ci	DP	5% Ci	DP	6% Ci	DP
7 dias	89	14,69	105	42,83	207	52,56
14 dias	91	28,68	343	102,24	460	48,20
28 dias	332	67,14	510	60,15	564	200,87
56 dias	430	165,07	331	46,97	377	56,50
91 dias	553	45,05	476	68,53	621	66,65

Tabela G.4: Módulo de deformabilidade (MPa) na zona da curva onde a resistência está nos 800 kPa e respectivo desvio padrão (DP)

	4% Ci	DP	5% Ci	DP	6% Ci	DP
7 dias	-	-	-	-	209	44,91
14 dias	-	-	330	78,71	454	53,64
28 dias	373	22,79	518	81,82	386	199,63
56 dias	345	115,02	316	128,85	303	59,01
91 dias	491	42,88	486	47,09	504	83,56

Apêndice H

Tabela H.1: Resistência média à tracção indirecta (kPa) dos provetes de pasta e respectivo desvio padrão (DP)

	4% Ci	DV	5% Ci	DV	6% Ci	DV
7 dias	55,85	1,46	75,18	6,44	304,27	48,37
14 dias	89,07	9,31	245,53	10,99	325,23	55,11
28 dias	223,28	71,72	360,60	71,22	462,14	127,95
56 dias	428,71	39,69	518,00	86,46	598,51	90,37
91 dias	307,38	18,39	353,69	103,64	552,38	32,35

Apêndice I

Tabela I.1: Parâmetros de cor dos provetes de pasta com 4% de cimento ao longo do tempo de cura e respectivo desvio padrão (DP)

	L*	DP	a*	DP	b*	DP	C*	DP	h (°)	DP
7 dias	23,51	1,41	-0,49	0,05	4,86	0,06	4,89	0,06	95,71	0,62
14 dias	24,97	0,87	-0,64	0,05	4,99	0,13	5,03	0,12	97,26	0,62
28 dias	27,07	0,60	-0,68	0,06	5,06	0,24	5,10	0,23	97,64	0,96
56 dias	27,18	0,59	-0,67	0,12	5,08	0,28	5,13	0,28	97,51	1,38
91 dias	26,65	0,41	-0,55	0,08	5,05	0,16	5,08	0,15	96,23	1,01

Tabela I.2: Parâmetros de cor ao longo do tempo de cura dos provetes de pasta com 5% de cimento e respectivo desvio padrão (DP)

	L*	DP	a*	DP	b*	DP	C*	DP	h (°)	DP
7 dias	24,84	1,21	-0,59	0,03	4,68	0,06	4,72	0,06	97,23	0,31
14 dias	25,65	0,35	-0,54	0,03	4,76	0,14	4,79	0,14	96,49	0,45
28 dias	28,18	0,80	-0,71	0,08	5,59	0,53	5,64	0,52	97,18	1,08
56 dias	28,25	0,79	-0,67	0,08	5,49	0,65	5,53	0,64	96,98	1,08
91 dias	27,42	1,00	-0,67	0,09	5,31	0,60	5,35	0,58	97,21	1,86

APÊNDICE I. APÊNDICE I

Tabela I.3: Parâmetros de cor dos provetes de pasta com 6% de cimento ao longo do tempo de cura e respectivo desvio padrão (DP)

	L*	DP	a*	DP	b*	DP	C*	DP	h (°)	DP
7 dias	28,49	0,45	-0,71	0,02	3,83	0,14	3,89	0,14	100,51	0,41
14 dias	29,03	3,88	-0,68	0,01	5,17	0,33	5,22	0,32	97,47	0,44
28 dias	28,18	0,80	-0,71	0,08	5,59	0,53	5,64	0,52	97,18	1,08
56 dias	28,14	0,73	-0,64	0,10	5,59	0,54	5,62	0,53	96,55	1,55
91 dias	26,95	1,03	-0,55	0,13	5,02	0,21	5,05	0,20	96,30	1,66

Tabela I.4: Parâmetros de cor dos provetes com 4% de cimento, antes e após o ataque com sulfatos e respectivo desvio padrão (DP)

	L*	DP	a*	DP	b*	DP	C*	DP	h (°)	DP
s/ataque	27,34	0,12	-0,73	0,04	5,17	0,09	5,23	0,09	98,07	0,26
c/ataque	28,77	0,29	-0,34	0,03	6,88	0,26	6,89	0,26	92,86	0,11

Tabela I.5: Parâmetros de cor dos provetes com 5% de cimento, antes e após o ataque com sulfatos e respectivo desvio padrão (DP)

	L*	DP	a*	DP	b*	DP	C*	DP	h (°)	DP
s/ataque	25,72	0,48	-0,74	0,01	5,04	0,31	5,10	0,30	98,29	0,63
c/ataque	29,51	0,09	-0,05	0,08	7,87	0,08	7,87	0,08	90,35	0,60

Tabela I.6: Parâmetros de cor dos provetes com 6% de cimento, antes e após o ataque com sulfatos e respectivo desvio padrão (DP)

	L*	DP	a*	DP	b*	DP	C*	DP	h (°)	DP
s/ataque	28,84	0,57	-0,74	0,07	4,73	0,02	4,78	0,01	98,86	0,87
c/ataque	30,79	0,07	0,45	0,04	8,51	0,24	8,52	0,24	87,01	0,34

Apêndice J

Tabela J.1: Resultados da massa seca média dos provetes submetidos a ataque químico com sulfatos ao longo dos ciclos de ensaio e respectivo desvio padrão (DP)

Ciclos	Massa seca (g)					
	6% Ci	DP	5% Ci	DP	4% Ci	DP
0	629,76	13,13	629,08	2,40	618,66	2,55
1	632,18	12,84	631,51	1,92	622,44	2,58
2	644,95	20,55	646,72	3,42	637,98	2,42
3	648,53	14,45	646,23	2,00	633,90	2,75
4	645,49	13,07	639,04	2,27	624,58	2,84
5	643,36	13,32	639,75	3,30	624,46	2,63
6	644,78	13,47	638,45	3,75	623,80	2,85
7	645,03	13,58	636,12	3,09	622,17	2,89
8	644,34	14,03	634,21	2,81	620,78	2,82
9	644,12	15,94	633,61	2,84	621,12	3,13
10	645,14	16,64	633,81	2,21	622,02	2,65
11	645,68	17,65	632,95	1,33	623,98	20,30
12	645,60	18,58	632,23	0,80	624,42	0,20
13	645,45	19,56	631,53	0,67	626,99	0,01
14	646,10	20,31	632,05	0,72	629,90	0,12
15	645,61	21,10	631,19	0,91	628,11	0,09
16	631,83	20,91	615,83	1,54	607,39	1,33

Tabela J.2: Resultados da massa saturada média dos provetes submetidos a ataque químico com sulfatos ao longo dos ciclos de ensaio e respectivo desvio padrão (DP)

Ciclos	Massa saturada (g)					
	6% Ci	DP	5% Ci	DP	4% Ci	DP
0	629,76	13,13	629,08	2,40	618,66	2,55
1	729,66	13,47	681,66	52,87	717,12	5,15
2	728,94	15,26	733,30	2,21	720,01	2,41
3	730,79	14,49	734,61	1,95	720,67	1,47
4	732,98	14,68	735,48	2,18	717,37	2,69
5	733,51	14,40	734,36	3,49	715,01	2,59
6	734,21	14,97	732,25	4,13	714,13	2,26
7	733,62	14,57	729,41	3,07	711,38	2,87
8	732,03	15,33	726,59	2,57	709,16	2,76
9	730,91	17,38	724,62	2,59	707,59	3,80
10	724,99	13,16	723,58	1,88	706,42	1,88
11	728,97	19,12	720,48	1,11	704,93	3,09
12	728,10	19,78	719,21	0,35	703,12	1,02
13	727,67	20,69	718,33	0,21	704,02	1,32
14	727,30	21,40	718,09	0,11	702,48	1,42
15	725,29	21,59	714,94	0,50	704,80	0,91
16	719,07	21,72	707,33	0,69	695,07	0,83