



ESTUDO DE VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO LIGANTE (CIMENTO) POR FILLER NO ENCHIMENTO POR PASTE FILL NO MÉTODO SUBLEVEL STOPING

MARIANA BASTOS SANTOS SILVA

Julho de 2025

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO LIGANTE
(CIMENTO) POR FILLER NO ENCHIMENTO POR ‘PASTE FILL’ NO
MÉTODO ‘SUBLEVEL STOPING’**

**Feasibility Study of Partial Replacement of Binder (Cement) by Filler in
Paste Filling with the Sublevel Stopping Method**

Mariana Bastos Santos Silva

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geotécnica e Geoambiente**

Orientador: Professora Sílvia Spínola (ISEP)

Co-orientador: Professor João Paulo Meixedo (ISEP)

Júri

Presidente

Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé, Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais

Sílvia Vieira Pinto Alves da Costa Spínola, Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Luís Carlos Correia Ramos, Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Porto, Julho de 2025

[página propositadamente em branco]

Dedicatória

Dedico esta dissertação aos meus Pais.

[página propositadamente em branco]

Resumo

Esta dissertação foca-se no estudo da viabilidade da substituição parcial de ligante (cimento) por filler no enchimento por pastefill no método 'Sublevel Stopping' nas minas de Aljustrel, com o objetivo de reduzir os custos operacionais, assim como o impacto ambiental associado à produção de cimento. A relevância deste estudo advém da crescente procura da indústria mineira por soluções mais sustentáveis que mitiguem os efeitos da exploração subterrânea. Para tal, foram realizadas, no Laboratório Geotécnico da ALMINA – Minas do Alentejo, S.A., vinte misturas de pasta constituídas por rejeitado de cobre, cimento Portland tipo II/A-L 42.5R, filler, água e aditivo, com o intuito de avaliar o impacto da substituição parcial de cimento por filler nas propriedades reológicas e na resistência mecânica da pasta. Deste modo, realizaram-se vários ensaios laboratoriais, nomeadamente ensaios de abaixamento (slump), espalhamento e resistência à compressão uniaxial, que permitiram assegurar o controlo de qualidade da pasta. Os resultados demonstraram que apenas as seis últimas misturas, sobretudo as de 15%, 12% e de 10% de filler, cumprem os requisitos da pasta de enchimento, apresentando valores favoráveis de resistência mecânica aos 28 dias e uma trabalhabilidade adequada.

Palavras-chave: Pasta de enchimento, 'filler', resistência mecânica, trabalhabilidade

[página propositadamente em branco]

Abstract

This dissertation focuses on studying the feasibility of partially replacing binder (cement) with filler in pastefill using the “Sublevel Stopping” method in the Aljustrel mines, intending to reduce operating costs as well as the environmental impact associated with cement production. The relevance of this study stems from the mining industry's growing demand for more sustainable solutions that mitigate the effects of underground mining. To this end, twenty mixtures of paste made up of copper tailings, Portland cement type II/A-L 42.5R, filler, water, and additive were made at the Geotechnical Laboratory of ALMINA - Minas do Alentejo, S.A., in order to assess the impact of partially replacing cement with filler on the rheological properties and mechanical strength of the paste. Various laboratory tests were conducted, including slump, spreading, and uniaxial compressive strength tests, to ensure the quality control of the paste. The results showed that only the last six mixtures, especially those with 15%, 12% and 10% filler, met the requirements for a filler paste, with favourable mechanical strength values at 28 days and adequate workability

.

Keywords: Pastefill, filler, mechanical resistance, workability

[página propositadamente em branco]

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, à ALMINA – Minas do Alentejo, S.A. e ao Engenheiro Daniel Rocha pela disponibilidade e pela oportunidade que me foi oferecida. Aos restantes colaboradores que tive o prazer de conhecer ao longo destes meses, muito obrigada pela paciência, ajuda e por me acolherem desde o primeiro dia.

À Engenheira Isabela Silva, por toda a partilha e orientação ao longo deste percurso, que em muito contribuiu para a realização e enriquecimento deste trabalho, muito obrigada. Agradeço ainda ao Maurício, ao José e ao Esmael pela paciência, conselhos e toda a ajuda prestada na realização dos ensaios.

Um especial obrigada à Mariana e à Laura. Se tanto gostei dos meses em que passei em Aljustrel, muito se deve a vocês. E obrigada ao meu colega e amigo André, que embarcou comigo nesta aventura.

Agradeço à minha orientadora, Professora Sílvia Spínola e ao meu co-orientador, Professor João Paulo Meixedo, por todo o apoio, dedicação e paciência depositados não só no desenvolvimento desta dissertação, como também ao longo do meu percurso académico.

Agradeço também ao Professor Helder I. Chaminé por me ter desafiado com a proposta de estágio na ALMINA e pela confiança depositada em mim ao longo do meu percurso académico.

Não posso deixar de expressar a minha sincera gratidão a todos os docentes do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP, cujo rigor, dedicação e partilha de conhecimento ao longo destes últimos cinco anos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas e amigos que o ISEP me deu, o meu muito obrigada. Obrigada pela amizade e companheirismo. Obrigada por estarem comigo nesta jornada tão especial.

Obrigada aos meus pais, por serem sempre o meu porto seguro, por todo o carinho, apoio e amor incondicional, não só nesta etapa como também ao longo de toda a minha vida. Ao restante da minha família, muito obrigada, o vosso apoio foi e é fundamental.

A todos que aqui não foram mencionados, mas que foram essenciais ao longo deste percurso, muito obrigada.

[página propositadamente em branco]

Índice

1. Introdução	3
1.1. Âmbito e objetivos	3
1.2. Enquadramento do tema	4
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Enquadramento Teórico	9
2.1. Métodos de Desmonte Subterrâneos	9
2.1.1. Método ‘Room & Pillar’	11
2.1.2. Método ‘Cut & Fill’	12
2.1.3. Método ‘Shrinkage Stopping’	13
2.1.4. Método ‘Vertical Crater Retreat Stopping’	14
2.1.5. Método ‘Longwall Mining’	15
2.1.6. Método ‘Sublevel Caving’	16
2.1.7. Método ‘Block Caving’	17
2.1.8. Método ‘Sublevel Stopping Bench & Fill’	18
2.2. Enchimento e tipos de enchimento	20
2.2.1. Enchimento - seco ou cimentado	22
2.2.2. Enchimento hidráulico	23
2.2.3. Enchimento com pastefill	24
2.3. Constituintes Pasta de enchimento	26
2.3.1. Rejeitado	26
2.3.2. Cimento Portland	26
2.3.3. Água	29
2.4. Parâmetros do Enchimento	29
2.4.1. Reologia	29
2.4.2. Resistência	31

2.4.3.	Distribuição Granulométrica	32
2.4.4.	Permeabilidade e percolação	32
2.4.5.	Teor em água	33
2.4.6.	Mineralogia do rejeitado	33
2.5.	Substituição parcial do ligante (cimento) por filler – Considerações Iniciais	34
3.	Caso de estudo.....	39
3.1.	Enquadramento geográfico	39
3.2.	Enquadramento geológico regional.....	40
3.3.	Enquadramento geológico local	42
3.4.	Processamento e produção de rejeitado.....	45
3.5.	Requisitos da pasta de enchimento.....	46
3.6.	Constituintes das misturas de pasta	47
3.6.1.	Rejeitado.....	47
3.6.2.	Água	50
3.6.3.	Cimento Portland.....	51
3.6.4.	Filler	51
3.6.5.	Aditivo.....	52
3.7.	Estudo de impacto ambiental	54
4.	Estudo Laboratorial	59
4.1.	Preparação das misturas.....	60
4.2.	Preparação dos provetes	62
4.3.	Ensaio de abaixamento – <i>slump test</i>	64
4.4.	Ensaio de espalhamento	64
4.5.	Resistência à compressão uniaxial (RCU).....	65
5.	Discussão de resultados	71
5.1.	Ensaio da pasta fresca	71

5.1.1.	Ensaio de abaixamento (<i>slump</i>) e de espalhamento	71
5.2.	Ensaio da pasta endurecida	75
5.2.1.	Resistência à compressão uniaxial (RCU)	75
6.	Conclusões e Perspectivas Futuras	83
7.	Referências	89

[página propositadamente em branco]

Lista de figuras

Figura 1 - Método ' <i>Room and Pillars</i> ' (Atlas Copco, 2007).....	12
Figura 2 - Método ' <i>Cut and Fill</i> ' (Atlas Copco, 2007).....	13
Figura 3 - Método ' <i>Shrinkage Stopping</i> ' (Atlas Copco, 2007).....	14
Figura 4 - Método ' <i>Vertical Crater Retreat Stopping</i> ' (Atlas Copco, 2007).	15
Figura 5 – Método Longwall Mining (Atlas Copco, 2007).	16
Figura 6 - Método ' <i>Sublevel Caving</i> ' (Atlas Copco, 2007).....	17
Figura 7 - Método ' <i>Block Caving</i> ' (Atlas Copco, 2007).	18
Figura 8 - Método de exploração ' <i>Bench and Fill</i> ' e posterior enchimento (adaptado de Ferreira, 2015).	19
Figura 9 - Esquema do método de desmonte ' <i>Sublevel Stopping</i> ' (adaptado de Villaroel, 2015).....	20
Figura 10 - Vantagens e desvantagens do enrocamento seco ou cimentado (adaptado de Maia, 2019).	23
Figura 11 - Vantagens e desvantagens do enchimento hidráulico (adaptado de Maia, 2019).	24
Figura 12 – Diagrama da composição da pasta de enchimento (Carvalho J. , 2014).....	25
Figura 13 - Vantagens e desvantagens do enchimento com pasta (adaptado de Maia, 2019).....	26
Figura 14 - Modelo de Bingham (adaptado de Carvalho J., 2014).	31
Figura 15 – Enquadramento geográfico de Aljustrel (Google Maps).....	40
Figura 16 - Faixa Piritosa Ibérica (Fonte: geoPortal do LNEG).	41
Figura 17 - Estratigrafia de Aljustrel (Costa, 2017).	42
Figura 18 – Balança do teor de humidade.	48
Figura 19 – Aspeto da pasta com aditivo.	53
Figura 20 – Aspeto da pasta sem aditivo.	53
Figura 21 - Misturadora do Laboratório Geotécnico.	61
Figura 22 - Balança de Marcy.	62
Figura 23 – Prensa de desmolde do Laboratório Geotécnico.	63

Figura 24 - Máquina de corte do Laboratório Geotécnico.....	63
Figura 25 – Exemplo de ensaio de abaixamento (<i>slump</i>).....	64
Figura 26 – Exemplo ensaio de espalhamento.....	65
Figura 27 – Prensa S205N Unitronic (50kN).	66
Figura 28 - Roturas satisfatórias dos provetes (NP EN 12390-3:2011).	67
Figura 29 - Rotura não satisfatória dos provetes (NP EN 12390-3:2011).	67

Lista de tabelas

Tabela 1 - Propriedades do jazigo que influenciam diretamente na escolha do método de desmonte (adaptado de Brady & Brown, 2004 e Nascimento, 2020).	10
Tabela 2 - Métodos de desmonte subterrâneos consoante o tipo de suporte necessário (adaptado de Brady & Brown 2004).	11
Tabela 3 - Funções do enchimento e respetivas vantagens (adaptado de Miranda, 2016).	22
Tabela 4 - Composição do clínquer (adaptado Sá, 2011).	27
Tabela 5 - Tipos básicos de cimento, definidos pela norma europeia EN 197-1:2011 (adpatado de Sá, 2011).	28
Tabela 6 - Classificação dos cimentos consoante a resistência à compressão uniaxial apresentada após 28 dias (MPa).	28
Tabela 7 – Valores de resistências mínimas exigidas consoante as dimensões dos desmontes.	47
Tabela 8 – Valores de teor de humidade dos rejeitados utilizados nas misturas de pasta.	49
Tabela 9 – Totais fissural de cobre e maciço de cobre (cortesia da ALMINA).	49
Tabela 10 – Análise química dos rejeitados utilizados nas misturas de pasta.	50
Tabela 11 – Análise à água da rede interna da ALMINA (cortesia da mesma).	50
Tabela 12 – Análise química à água da rede interna da ALMINA (cortesia da mesma).	50
Tabela 13 – Especificações do cimento Portland tipo II/A-L 42.5R, segundo NP EN 197-1:2001.	51
Tabela 14 – Propriedades físico-químicas do filler do grupo Omya.	51
Tabela 15 – Composição química do filler B do grupo Parapedra (Fonte: Ficha Técnica).	52
Tabela 16 – Características físicas do filler B do grupo Parapedra (Fonte: Ficha Técnica).	52
Tabela 17 – Propriedades físico-químicas do aditivo MasterRoc MF909.	52
Tabela 18 - Resumo comparativo entre pastefill com cimento versus pastefill com filler (parcialmente).	54
Tabela 19 - Ensaios realizados e normas utilizadas.	59
Tabela 20 - Misturas realizadas no Laboratório Geotécnico (ALMINA).	60

Tabela 21 - Valores obtidos do ensaio de abaixamento (<i>slump</i>).	72
Tabela 22 – Valores obtidos do ensaio de espalhamento.....	73
Tabela 23 - Valores obtidos do espalhamento e RCU das seis últimas misturas.	80
Tabela 24 – Custo (€/ton) consoante as proporções de cimento e filler utilizadas.	80
Tabela 25 – Valores de espalhamento e de RCU das misturas mais favoráveis.	84

Lista de gráficos

Gráfico 1 - Comparação valores de espalhamento em misturas com diferente percentagem de filler e aditivo.....	74
Gráfico 2 – Evolução RCU com 12% de filler.	75
Gráfico 3 – Evolução RCU com 15% de filler.	76
Gráfico 4 – Evolução do RCU com 20% de filler.	77
Gráfico 5 – Comparação de misturas com 12% de filler e 400 ml/ton de aditivo.	78
Gráfico 6 – Comparação de misturas com 15% de filler e 400 ml/ton de aditivo.	78
Gráfico 7 – Comparação das misturas com 300 ml/ton de aditivo para 15%, 12% e 10% de filler.	79

[página propositadamente em branco]

Lista de abreviaturas

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

MEGG – Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente

DEG – Departamento de Engenharia Geotécnica

EN – Norma Europeia

RCU – Resistência à compressão uniaxial

CPB – *Cemented paste backfill*

RMN – Ressonância magnética nuclear

MEV – IA – Microscopia eletrónica de varrimento e análise de imagens

RF – *Rockfill*

CRF – *Cemented rockfill*

FQ – Grupo Filito-Quartzítico

VS – Complexo Vulcano-Silicioso

GFBA – Grupo Flysch do Baixo Alentejo

FPI – Faixa Piritosa Ibérica

FC – Fissural cobre

MC – Maciço cobre

Lista de símbolos

A/C – relação água/cimento

η – índice de potência

k – índice de consistência

τ – tensão de corte

σ – tensão normal

ϕ – ângulo de atrito do enchimento

c – coesão do enchimento

σ – valor de compressão uniaxial (Pa)

F – Força aplicada ao provete (N)

A – Área da secção onde foi aplicada a força (m²)

C_u – Coeficiente de uniformidade

C_c – Coeficiente de curvatura

D_{10} – Diâmetro efetivo da partícula a que corresponde 10% em peso de material passado

D_{30} – Diâmetro efetivo da partícula a que corresponde 30% em peso de material passado

D_{60} – Diâmetro efetivo da partícula a que corresponde 60% em peso de material passado

D_{80} – Diâmetro efetivo da partícula a que corresponde 80% em peso de material passado

V_p – taxa de percolação (m/s)

q – Caudal de água

A – Área da secção transversal da amostra à direção do fluxo (m²)

$\gamma_{enchimento}$ – Peso volúmico do enchimento (kN/m³)

c – Coesão do enchimento (kPa)

l – Comprimento do bloco de enchimento (m)

B – largura do bloco de enchimento (m)

H – Altura do bloco de enchimento (m)

FS – Coeficiente de segurança

Cu – Cobre

Zn – Zinco

Pb – Chumbo

Fe – Ferro

S – Enxofre

As – Arsénio

Sb – Antimônio

Mn – Manganês

Al – Alumínio

SO₄ – Sulfato

SST – Sólidos suspensos totais

CQO – Carência química de oxigênio

SiO₂ – Dióxido de silício

CaO – Óxido de cálcio

MgO – Óxido de magnésio

Fe₂O₃ – Óxido de ferro (III)

CO₂ – Dióxido de carbono

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

TiO₂ – Dióxido de titânio

K₂O – Óxido de potássio

Na₂O – Óxido de sódio

P₂O₅ – Pentóxido de fósforo

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

[página propositadamente em branco]

Capítulo I

Introdução

[página propositadamente em branco]

1. Introdução

1.1. Âmbito e objetivos

A presente dissertação insere-se no âmbito da Unidade Curricular “Dissertação/Estágio/Projeto” do 2º semestre do 2º ano do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente (MEGG) do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Este trabalho foi desenvolvido em estágio curricular, na empresa ALMINA – Minas do Alentejo S.A., e em colaboração com o ISEP. Foram desenvolvidos estudos para avaliar a viabilidade da substituição parcial de ligante (cimento) por filler no enchimento por *pastefill* no método *Sublevel Stopping*.

A ALMINA encontra-se situada em Aljustrel, Beja, e é uma empresa mineira, de capitais portugueses, na qual são explorados jazigos subterrâneos, sendo a separação dos minerais realizada através de processos físicos.

A empresa dispõe de inúmeros laboratórios e áreas dedicadas à investigação e desenvolvimento de métodos tecnológicos referentes à indústria de mineração, comercializando produtos que são utilizados por metalurgias em diversas partes do mundo. Atualmente, explora minério de cobre nos jazigos de Feitais e Moinho, encontrando-se em curso a expansão das atividades de exploração para o jazigo da Estação. Futuramente, o objetivo será explorar quer minério de cobre quer minério de zinco nos jazigos supracitados.

1.2. Enquadramento do tema

O enchimento está-se a tornar cada vez mais uma parte integrante das operações mineiras, preenchendo com material as cavidades derivadas das operações subterrâneas. Além disso, contribui para a estabilidade do maciço rochoso, permitindo a execução de novos desmontes após o enchimento de cavidades previamente exploradas. Esta prática leva a um aumento da quantidade de material extraído, assegurando o acesso a novos desmontes.

O tipo de enchimento utilizado depende das condições *in situ* do maciço e da respetiva mineralogia, cuja componente principal é escombros ou inerte, rejeitados de lavaria, materiais de empréstimo e, se necessário, agentes ligantes. O tema deste estudo foca-se no enchimento por pastefill, constituído principalmente por rejeitados, cimento e água.

Contudo, a crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental na indústria mineira tem impulsionado a procura por alternativas que reduzam o impacto ambiental, assim como os custos associados às operações subterrâneas. Assim surge a proposta de substituir parcialmente o ligante (cimento) por filler, permitindo um menor impacto ambiental, redução de custos e uma melhoria nas propriedades reológicas.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, em que o primeiro capítulo destina-se a uma breve introdução e enquadramento do tema.

O capítulo 2 é dedicado ao enquadramento teórico, nomeadamente os métodos de desmonte, tipos de enchimento, constituintes da pasta de enchimento e respetivos parâmetros.

No capítulo 3 apresenta-se o caso de estudo em questão, procedendo-se ao enquadramento da Mina de Aljustrel, nomeadamente os jazigos que se encontram em exploração, assim como o ciclo de produção do rejeitado, os constituintes das misturas de pasta essenciais para o estudo deste trabalho e, ainda, um breve estudo sobre o impacto ambiental da substituição parcial de cimento por filler.

O capítulo 4 destina-se à descrição dos ensaios laboratoriais realizados no Laboratório Geotécnico da ALMINA, nomeadamente os ensaios de abaixamento, de espalhamento e de resistência à compressão uniaxial, e ainda como é realizada a preparação das misturas e dos provetes de pasta.

Já o capítulo 5 refere-se à discussão dos resultados obtidos e o capítulo 6 às conclusões da presente dissertação e recomendações para trabalhos futuros. Segue-se o capítulo 7 com a listagem das referências bibliográficas consultadas para apoiar e enquadrar o presente estudo.

Por fim, referir que as figuras não referenciadas são de total responsabilidade da autora.

[página propositadamente em branco]

Capítulo II

Enquadramento Teórico

[página propositadamente em branco]

2. Enquadramento Teórico

2.1. Métodos de Desmonte Subterrâneos

Os métodos de desmonte subterrâneos sofreram evoluções com o decorrer dos anos e podem ser caracterizados com base no comportamento do maciço rochoso aquando da sua exploração. Segundo Brady & Brown (2004), os métodos de exploração seguem um ciclo de operações, nomeadamente:

1. Perfuração;
2. Carregamento;
3. Detonação;
4. Ventilação;
5. Saneamento;
6. Carga e transporte;
7. Suporte e reforço;

As propriedades do jazigo que influenciam diretamente na escolha do método de desmonte encontram-se descritas na Tabela 1, que se apresenta a seguir.

Tabela 1 - Propriedades do jazigo que influenciam diretamente na escolha do método de desmonte (adaptado de Brady & Brown, 2004 e Nascimento, 2020).

Propriedades do jazigo	
Dimensão	No caso de o jazigo ser pequeno, é necessário recorrer a um método de desmonte seletivo para obter lucro.
Ambiente externo	Métodos de desmonte diferentes afetam o meio ambiente de variadas formas, influenciando as deslocções do terreno, os aquíferos locais, alterando a composição química da água, entre outros.
Configuração geométrica	A forma e dimensão do jazigo podem influenciar o comportamento do maciço rochoso durante a sua exploração.
Valor e distribuição de valor do jazigo	A variação dos teores do minério e o respetivo valor são fatores críticos no que diz respeito à prática de exploração da mina.
Disposição e orientação	A profundidade, configuração, e outras propriedades geométricas do maciço.
Caracterização geomecânica	Parâmetros como resistência do maciço, deformabilidade, plasticidade e, ainda, existência de falhas, zonas de cisalhamento, entre outros.

Assim, e conforme o tipo de suporte necessário, os métodos de desmonte podem ser classificados em três grupos principais: de Suporte Natural, Suporte Artificial e Sem Suporte, tal como representado na Tabela 2.

Tabela 2 - Métodos de desmonte subterrâneos consoante o tipo de suporte necessário (adaptado de Brady & Brown 2004).

Métodos de desmonte subterrâneos		
Suporte Natural	Suporte Artificial	Sem Suporte
• <i>Room and pillar</i> • <i>Sublevel stoping</i>	• <i>Bench and fill</i> • <i>Cut and fill</i> • <i>Shrinkage stoping</i> • <i>VCR stoping</i>	• <i>Longwall mining</i> • <i>Sublevel caving</i> • <i>Block caving</i>

Os métodos de Suporte Natural, nomeadamente por câmaras e pilares (*room and pillar*) e por subníveis (*sublevel stoping*), não necessitam da aplicação de suportes artificiais, uma vez que as tensões são direccionadas para os pilares no momento da abertura, com a desvantagem do minério não ser recuperável, pois não se procede à remoção desses pilares (Nascimento, 2020).

Os métodos de Suporte Artificial destinam-se a controlar o comportamento do teto e das paredes da galeria, assim como dos deslocamentos de terrenos próximos, sendo utilizadas duas medidas principais de controlo no solo. As rochas instáveis podem ser reforçadas através de elementos metálicos de penetração, como parafusos, ancoragens, cabos ou malha-sol e ainda pela aplicação de enchimento nos vazios criados (Brady & Brown, 2004).

No caso dos métodos Sem Suporte, o minério é extraído com recurso a desabamentos induzidos dos tetos das galerias. Nas minas em que o minério não se encontra a uma grande profundidade, é frequente recorrer à subsidência de terrenos à superfície, uma vez que o método compreende a movimentação de elevadas quantidades de material através da força de gravidade (Brady & Brown, 2004; Nascimento, 2020).

2.1.1. Método 'Room & Pillar'

O método '*Room and Pillar*', ou câmaras e pilares (Figura 1), representa o método mais utilizado na mineração de jazigos planos de espessura moderada a grande, assim como de jazigos inclinados de maior espessura. Consiste em recuperar o minério por meio da abertura de cavidades ou câmaras, no qual os pilares de minério desempenham a função de suporte do teto, sendo deixado para trás o menor número de pilares possível, uma vez que os mesmos têm um custo elevado, permitindo recuperar a máxima quantidade de minério. As câmaras e os pilares são geralmente dispostos

segundo padrões regulares, podendo estes assumir configurações circulares, quadradas ou até paredes alongadas que permitem a separação entre as câmaras (Atlas Copco, 2007).

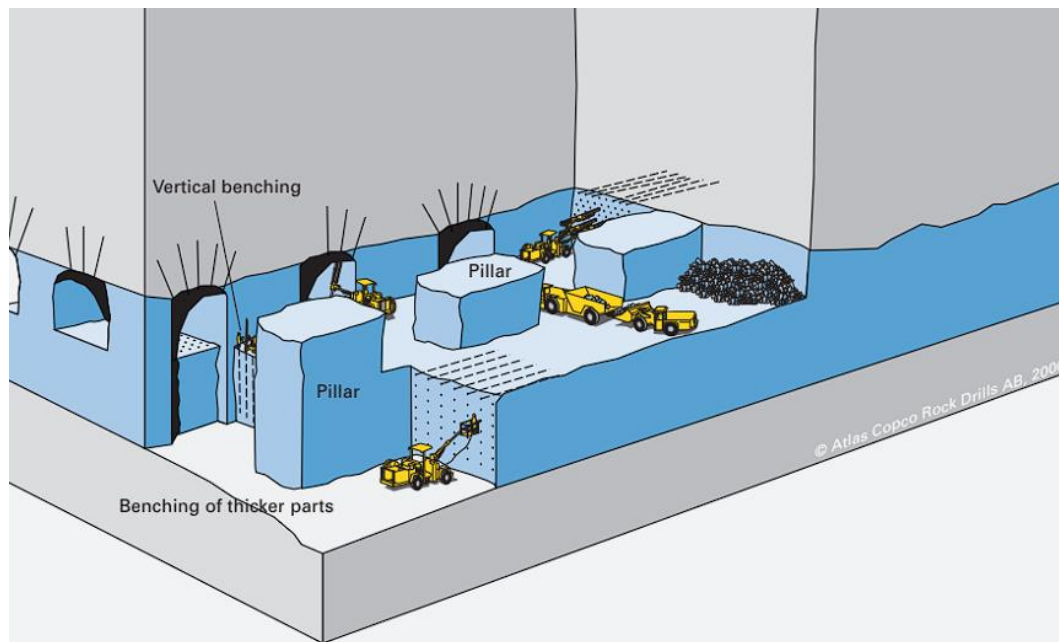


Figura 1 - Método 'Room and Pillars' (Atlas Copco, 2007).

2.1.2. Método 'Cut & Fill'

O método 'Cut and Fill' (Figura 2) é utilizado na mineração de jazigos com declive acentuado, pouca espessura e cujos estratos apresentam uma estabilidade moderada a boa. É um método que oferece flexibilidade e seletividade na mineração, sendo particularmente indicado para minérios de geometria irregular, em que as zonas de alto teor podem ser extraídas de forma isolada, permitindo que as de baixo teor permaneçam na estrutura remanescente. O minério é explorado em camadas horizontais, iniciando-se por um corte inferior e progredindo verticalmente, seguido pelo preenchimento dos vazios com material de enchimento oferecendo suporte imediato. No entanto, constitui um método pouco seguro, uma vez que os operadores e as máquinas trabalham no interior da escavação.

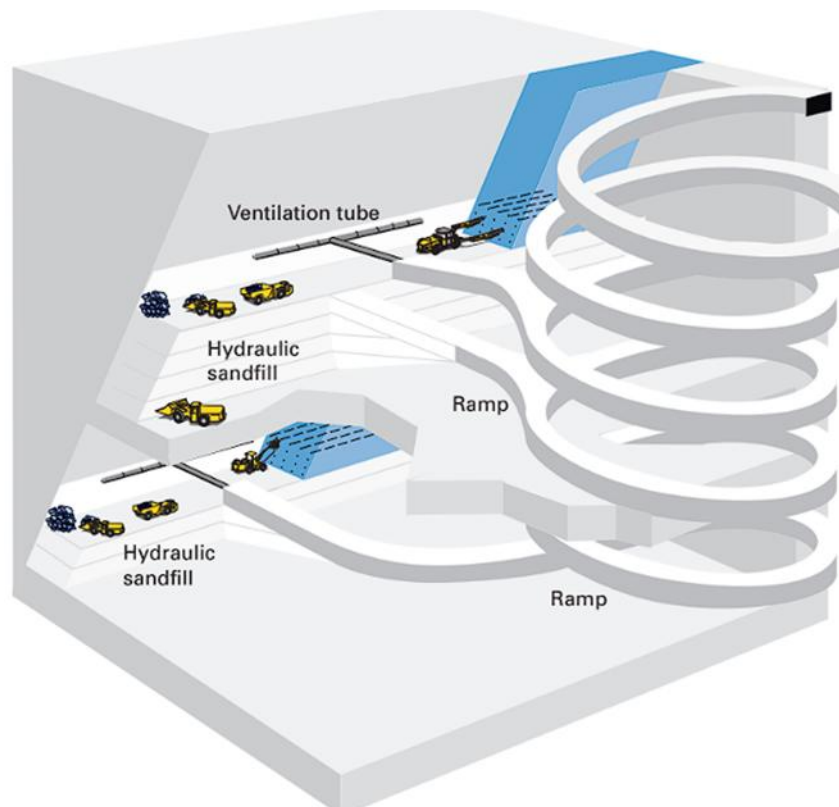


Figura 2 - Método 'Cut and Fill' (Atlas Copco, 2007).

2.1.3. Método 'Shrinkage Stopping'

Neste método de desmonte, o minério é explorado de forma ascendente, em plano vertical ou subvertical, no qual parte do minério é utilizado como suporte temporário e como plataforma de trabalho. É particularmente indicado para jazigos com inclinações acentuadas, boas condições geotécnicas tanto do corpo mineral quanto das rochas encaixantes, e cuja composição não seja afetada pelo armazenamento, uma vez que alguns sulfuretos podem oxidar, causando calor excessivo. O desenvolvimento consiste na construção de galerias de transporte e na execução de cortes transversais de forma a remover o material presente na base, na implementação de pontos de extração (*drawpoints*) e na execução de um corte inferior (*undercut*). À medida que o minério é extraído, ocorre uma redução do espaço, o que leva à formação de uma cavidade maior. Após a realização do último desmonte, o minério é retirado até que o realce esteja vazio (Figura 3).

Este método continua a ser muito utilizado em obras de pequena escala, devido à sua simplicidade e viabilidade, ainda que as condições de trabalho sejam perigosas e a mão-de-obra intensa.

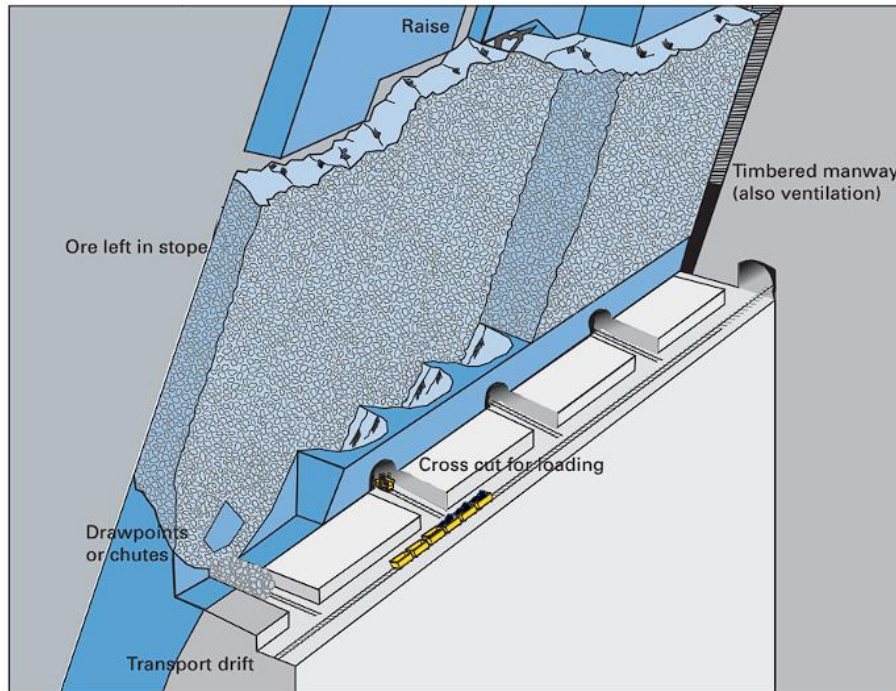


Figura 3 - Método 'Shrinkage Stoping' (Atlas Copco, 2007).

2.1.4. Método 'Vertical Crater Retreat Stoping'

O método 'Vertical Crater Retreat' (Figura 4) é aplicado em rocha competente, de mergulho acentuado e, tal como no método 'Shrinkage Stoping', uma parte do minério explorado permanece no realce durante o ciclo de produção, servindo assim como suporte temporário.

Neste método recorre-se a cargas esféricas concentradas com o intuito de extrair o minério em camadas horizontais, de forma ascendente. Terminada a exploração, o material da coluna é removido, geralmente por gravidade, para ser transportado e processado e procede-se ao enchimento hidráulico da abertura.

É um método seguro e eficiente, especialmente quando comparado com o 'Shrinkage Stoping', uma vez que os operadores permanecem em áreas protegidas durante a detonação e remoção do material.

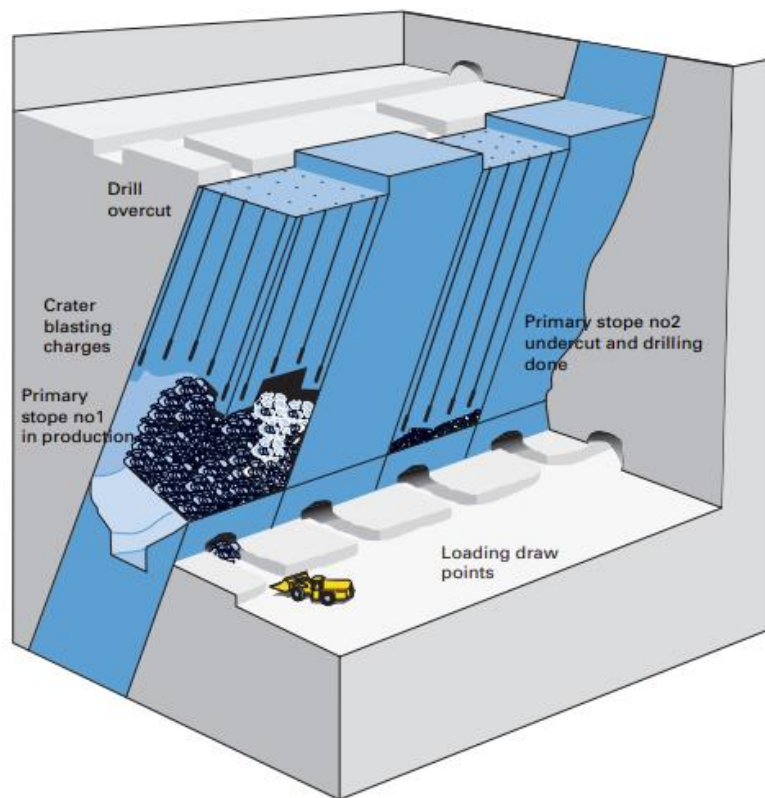


Figura 4 - Método '*Vertical Crater Retreat Stopping*' (Atlas Copco, 2007).

2.1.5. Método '*Longwall Mining*'

O método '*Longwall Mining*' (Figura 5) é utilizado em jazigos finos, de espessura uniforme e vasta extensão horizontal. Consiste na remoção do minério ao longo de uma frente retilínea, com uma extensão longitudinal considerável, cuja operação é realizada horizontalmente. A zona de extração junto à frente é mantida aberta de forma a permitir a circulação dos operadores, assim como, facilitar a passagem dos equipamentos de extração. Aquando da extração, o teto é deixado a uma certa distância atrás da frente de trabalho, garantindo a estabilidade da operação.

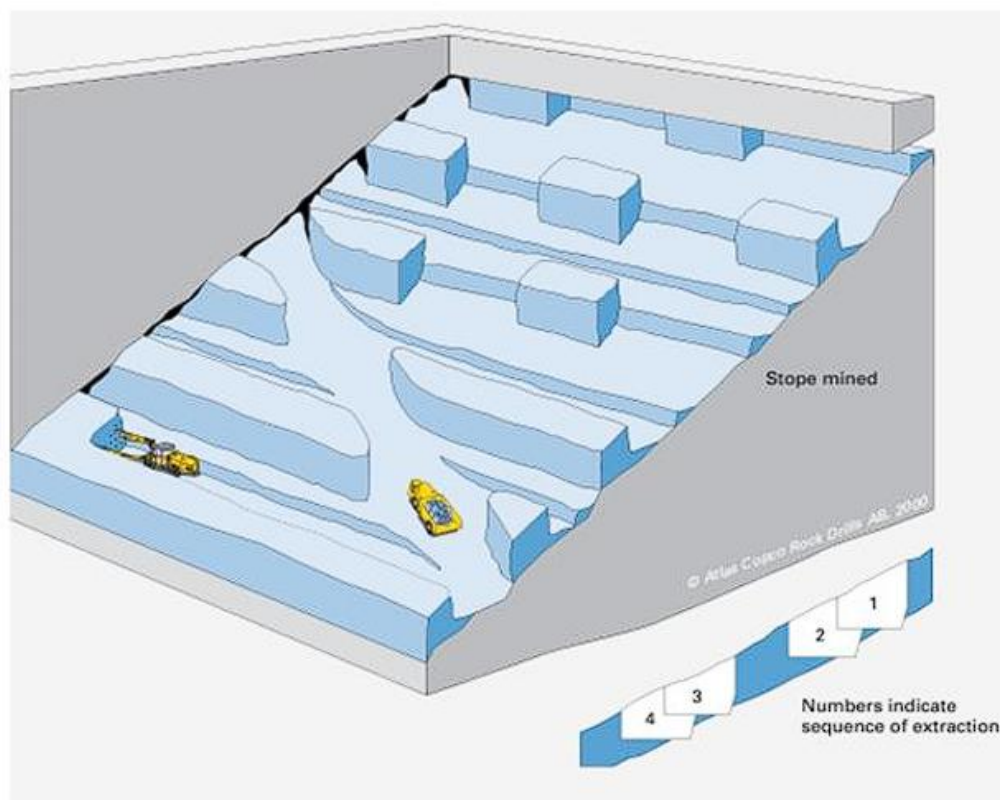


Figura 5 – Método Longwall Mining (Atlas Copco, 2007).

2.1.6. Método ‘Sublevel Caving’

O método ‘*Sublevel Caving*’ (Figura 6) é adequado para corpos mineralizados de grandes e médias dimensões, inclinação acentuada e continuidade em profundidade, suficientemente competentes para garantir uma exploração segura. É um método flexível, permitindo explorar vários níveis ao mesmo tempo. A extração do minério é realizada por meio de subníveis, os quais são desenvolvidos ao longo do corpo mineral, com um espaçamento vertical regular.

Cada subnível é projetado consoante um layout organizado, normalmente com uma distância entre 8 a 10 metros, podendo chegar aos 35 metros. Os subníveis inferiores são desenvolvidos à medida que a extração decorre nos níveis superiores.

Quando o maciço rochoso apresenta condições favoráveis, as operações de escavação e perfuração são realizadas com antecedência significativa relativamente à detonação e carregamento. Esta abordagem, juntamente com procedimentos de trabalho padronizados, possibilita a utilização otimizada e eficiente do equipamentos de elevada capacidade (Tamrock, 1997).

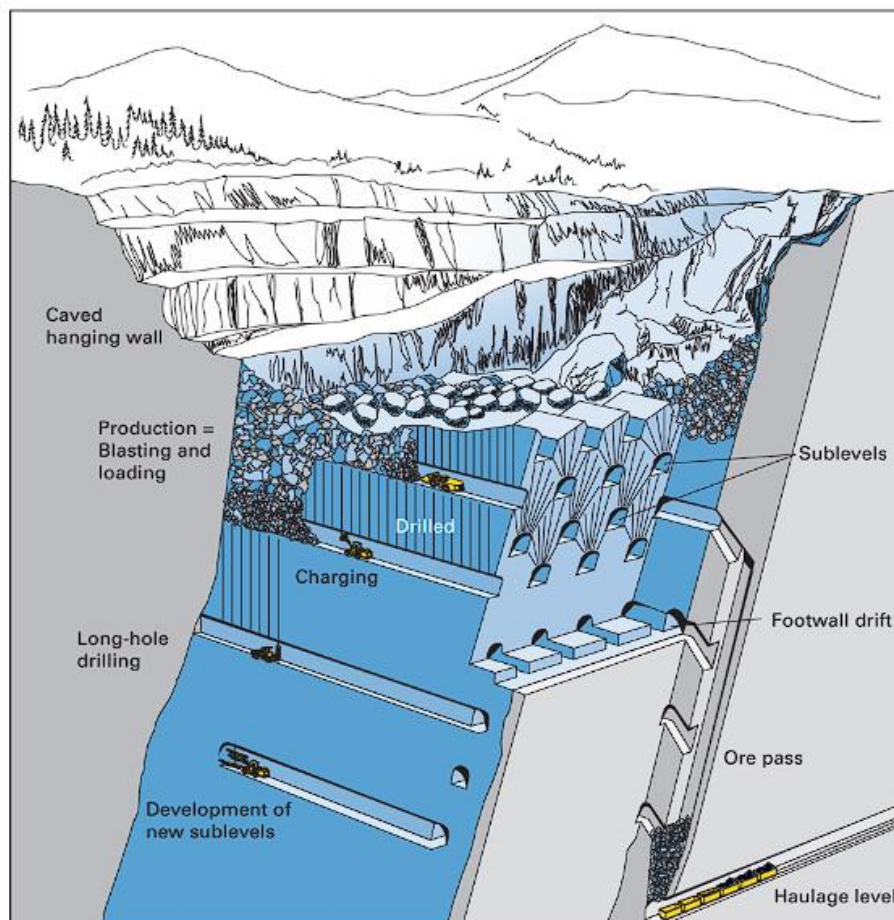


Figura 6 - Método 'Sublevel Caving' (Atlas Copco, 2007).

2.1.7. Método 'Block Caving'

O método 'Block and Caving' (Figura 7) pode ser aplicado em jazigos de grande extensão, tanto verticalmente como horizontalmente, em boas condições geológicas, o qual será fragmentado em blocos grandes. O método consiste em abrir o bloco num corte inferior, permitindo que este ceda naturalmente, pela ação da gravidade e pela tensão interna da rocha. A perfuração e detonação necessárias para a extração do minério são relativamente reduzidas, ao contrário do volume de desenvolvimento.

Este método pode ser realizado segundo três princípios:

- A escavação do corte inferior pode ser efetuada em áreas quadradas ao longo de todo o bloco, de forma a manter um plano horizontal de contacto entre o minério e a massa rochosa sobrejacente;

- O corte inferior é escavado em painéis distribuídos ao longo do corpo mineral, resultando num contacto inclinado entre o minério e a rocha sobrejacente;
- Em certos casos, não se recorre à divisão clara da área horizontal.

A fase de produção subsequente ao corte inferior resume-se às operações de carregamento e transporte do minério, sendo que o carregamento deve ser planeado rigorosamente, uma vez que para cada bloco existe uma taxa de extração ótima, que é determinada pelas condições geotécnicas do minério. Uma extração insuficiente pode induzir em pressões excessivas nas galerias de tração, mas uma extração excessiva pode resultar na diluição do minério e na formação de espaços vazios, suscetíveis a colapsos súbitos. Assim, na escavação por blocos é frequente recorrer à fragmentação secundária na presença de blocos de grande dimensão. Quando este método é realizado com êxito, torna-se o mais económico e de elevada produtividade, apresentando ainda uma boa recuperação do minério (Tamrock, 1997; Atlas Copco, 2007).

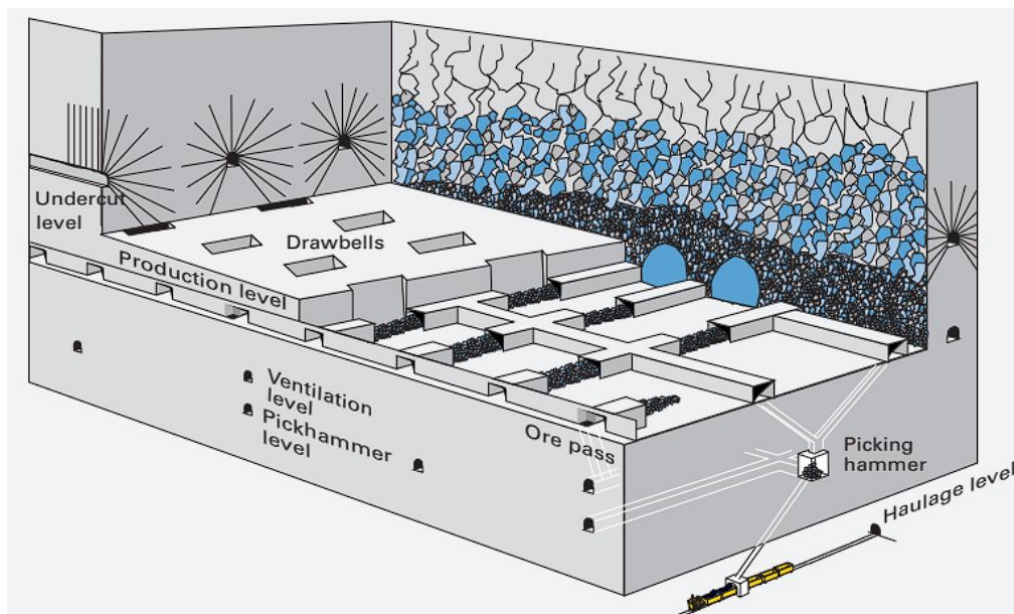


Figura 7 - Método 'Block Caving' (Atlas Copco, 2007).

2.1.8. Método '*Sublevel Stopping Bench & Fill*'

O método '*Bench and Fill*' deriva do tradicional método '*Cut and Fill*', caracterizando-se como mais eficaz relativamente às propriedades do jazigo, com melhor produtividade e redução de custos de produção por tonelada de minério extraído (Gomes, 2019).

Este método foi desenvolvido na década de 90 onde se procedeu ao desmonte em bancada em diferentes níveis, tal como representado na Figura 8. A criação da bancada inicia-se com a abertura de uma ranhura no extremo do corpo mineralizado, avançando de forma descendente. O material é desmontado sequencialmente, aumentando o espaço vazio e permitindo a exploração e remoção no nível inferior. De seguida, procede-se ao preenchimento da cavidade resultante com materiais de enchimento, que podem apresentar diferentes composições (Ferreira, 2015).



Figura 8 - Método de exploração 'Bench and Fill' e posterior enchimento (adaptado de Ferreira, 2015).

Por outro lado, o método 'Sublevel Stopping' é usualmente considerado como alternativa ao método 'Sublevel Caving', quando a rocha é mais competente, caracterizando-se, geralmente, por ser um método seguro. Baseia-se em dividir o jazigo em dois acessos capazes de extrair o minério dos subníveis de exploração através de tiros paralelos e/ou radiais (Villaroel, 2015).

Posteriormente, procede-se ao abatimento dos hasteais do acesso superior, inferior ou ambas, consoante o tipo de bancada e respetiva geometria. De seguida, inicia-se a exploração com a abertura de uma chaminé, através de explosivos, no caso de bancadas com 20 metros, criando a primeira frente livre, ou com recurso a métodos mecânicos, como *raise boring*, quando as bancadas apresentam uma altura superior a 20 metros. (Cardoso, 2024)

A Figura 9 representa o esquema de funcionamento do método de desmonte '*sublevel stoping*'.

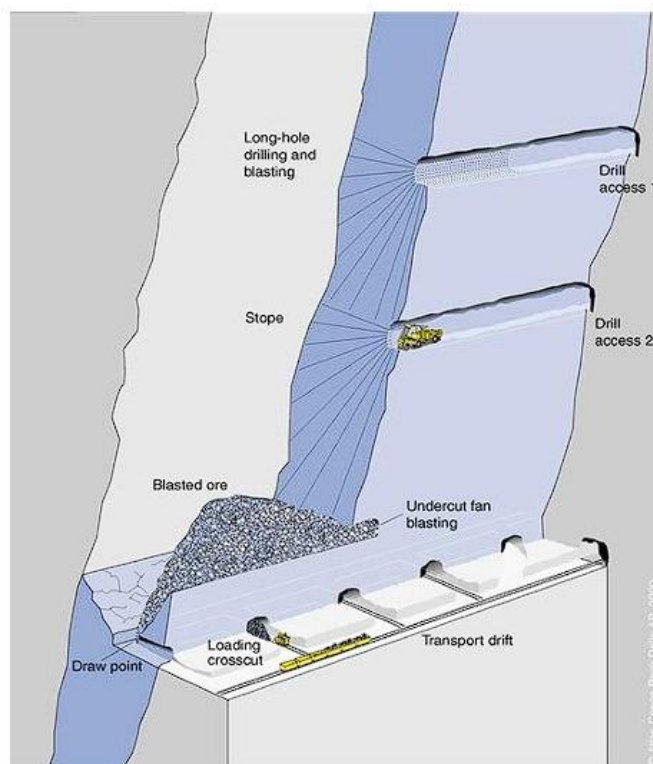


Figura 9 - Esquema do método de desmonte '*Sublevel Stoping*' (adaptado de Villaroel, 2015).

2.2. Enchimento e tipos de enchimento

O enchimento tem-se afirmado como uma das operações mais relevantes na mineração subterrânea a nível global, uma vez que quando cuidadosamente projetado pode melhorar a operação mineira e oferecer maior estabilidade regional dos maciços, permitindo controlar os efeitos de subsidência. Contrariamente, um enchimento projetado incorretamente pode comprometer a segurança na mina.

A finalidade do enchimento na exploração mineira consiste em reutilizar o estéril para preencher as cavidades, reduzindo ao máximo o volume de vazios. Os materiais de enchimento resumem-se a rejeitados provenientes da lavaria, de misturas de estéreis e escombros, bem como materiais de áreas de empréstimo, quando necessário.

Nos primórdios do enchimento, as suas propriedades eram muitas vezes desconsideradas, uma vez que a utilização de enchimento nos vazios teve início com a aplicação de matéria sem qualquer valor económico numa galeria subterrânea, negligenciando as suas propriedades físicas e químicas.

Contudo, a partir da década de 60, aquando do aumento das dimensões das escavações e da introdução dos ligantes, a sua importância passa a ser reconhecida, uma vez que o enchimento revelou-se como um elemento de suporte crucial na indústria mineira. Do mesmo modo, decidiu-se adicionar cimento ao enchimento de forma a aumentar a sua resistência (Gomes, 2016; Miranda, 2016).

De forma a facilitar o transporte, os rejeitados passíveis de serem aproveitados são bombeados em tubagens na forma de polpa.

Com o objetivo de reduzir a quantidade de rejeitados, as minas procuram aumentar a percentagem de sólidos o máximo possível. Neste contexto, o teor de sólidos é definido como a razão entre a massa de sólidos e a massa total da mistura, expressa em percentagem. Contudo, o aumento deste teor compromete a fluidez do material nas tubagens, podendo resultar no seu entupimento. Logo, torna-se importante determinar um teor de sólidos ótimo que assegure um escoamento adequado e maximize o descarte dos rejeitados.

O material resultante das operações de desenvolvimento mineiro, predominantemente estéril, pode ser aproveitado para o enchimento não sendo, por conseguinte, necessário proceder ao seu transporte até à superfície. Da mesma forma, os rejeitados provenientes da lavaria de processamento e tratamento do minério podem igualmente ser utilizados no enchimento mineiro, reduzindo a sua deposição à superfície. A utilização destes rejeitados confere ainda uma boa estabilização dos maciços rochosos envolventes, evitando o risco de colapsos em cavidades subterrâneas que poderiam interferir na produção e ocasionar perdas significativas de minério. (Gomes, 2019)

De acordo com (Cardoso, 2024) e (Carvalho J. , 2014), o tipo de enchimento a aplicar varia consoante a respetiva função a desempenhar, as propriedades geomecânicas do maciço e os materiais disponíveis, dependendo do método de desmonte e dos objetivos a alcançar.

As funções do enchimento e respetivas vantagens encontram-se representadas pela seguinte Tabela 3.

Tabela 3 - Funções do enchimento e respectivas vantagens (adaptado de Miranda, 2016).

Função	Vantagens
Suporte	Maciço rochoso mais estável e redução de efeitos de subsidência
Plataforma de trabalho	Melhores acessos
Recuperação de pilares	Maiores produções

O enchimento é aplicado como um sistema de sustimento passivo, isto é, após a realização do desmonte, podendo ser do tipo temporário ou definitivo, em que o revestimento permanente traduz-se num método mais seguro e economicamente viável (Carvalho A. , 2018).

Existem três métodos de enchimento: enrocamento seco ou cimentado (*rock backfill*), enchimento hidráulico (*hydraulic backfill*) e enchimento com pasta (*paste backfill*). O primeiro recorre a materiais derivados das escombreyras, o segundo a misturas de rejeitado, cimento e água e que, apesar de ser o mais dispendioso, é também o mais utilizado, e, finalmente, o terceiro, que traduz-se no método mais económico e que, à semelhança do anterior, utiliza a mesma mistura, mas em diferentes proporções e com maior consistência (Carvalho A. , 2018; Ferreira, 2015).

2.2.1. Enchimento - seco ou cimentado

Este tipo de enchimento utiliza materiais provenientes da exploração, que serão mais tarde compactados por gravidade ou com recurso a elementos mecânicos.

O enchimento pode ser executado por via seca, ou seja, sem adição de ligantes, ou caso contrário, com adição de ligantes (cimento), preenchendo os espaços vazios (Carvalho A. , 2018; Ferreira, 2015).

É de salientar que é o tipo de enchimento menos dispendioso quando comparado com os restantes, mas não é utilizado em desmontes principais, sendo apenas utilizado para enchimento secundário (Carvalho A. , 2018).

A Figura 10 representa algumas das vantagens e desvantagens deste tipo de enchimento.

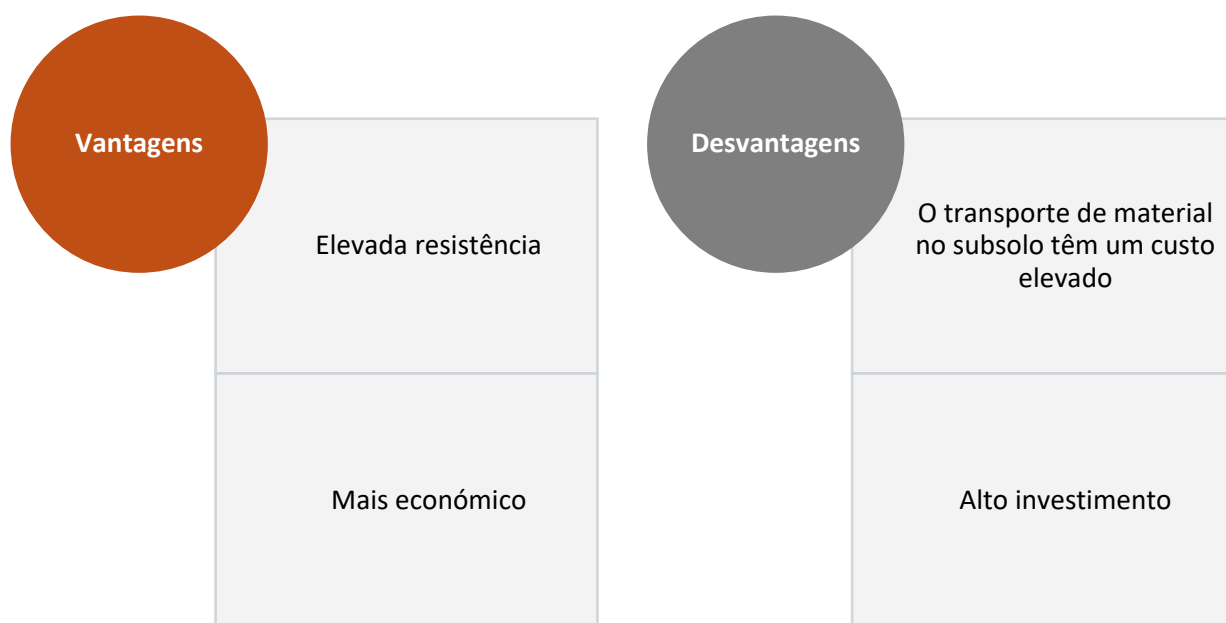


Figura 10 - Vantagens e desvantagens do enrocamento seco ou cimentado (adaptado de Maia, 2019).

2.2.2. Enchimento hidráulico

A técnica de enchimento hidráulico, recorre a uma bombagem de água para o transporte de enchimento. Esta bombagem, em regime turbulento, de rejeitos metalúrgicos, areia e água em que a velocidade de enchimento deverá ser superior à velocidade de sedimentação de partículas, de forma a evitar entupimentos.

Nalguns casos, pode ser necessário utilizar cimento como ligante para garantir a resistência do enchimento, assim como proceder à instalação de drenos para facilitar a consolidação.

É o método mais dispendioso, uma vez que as quantidades de água necessárias são maiores e requer grandes quantidades de cimento, podendo até dificultar a sua aplicação (Carvalho A. , 2018; Ferreira, 2015).

Na Figura 11 é possível observar algumas das vantagens e desvantagens referentes ao enchimento hidráulico.

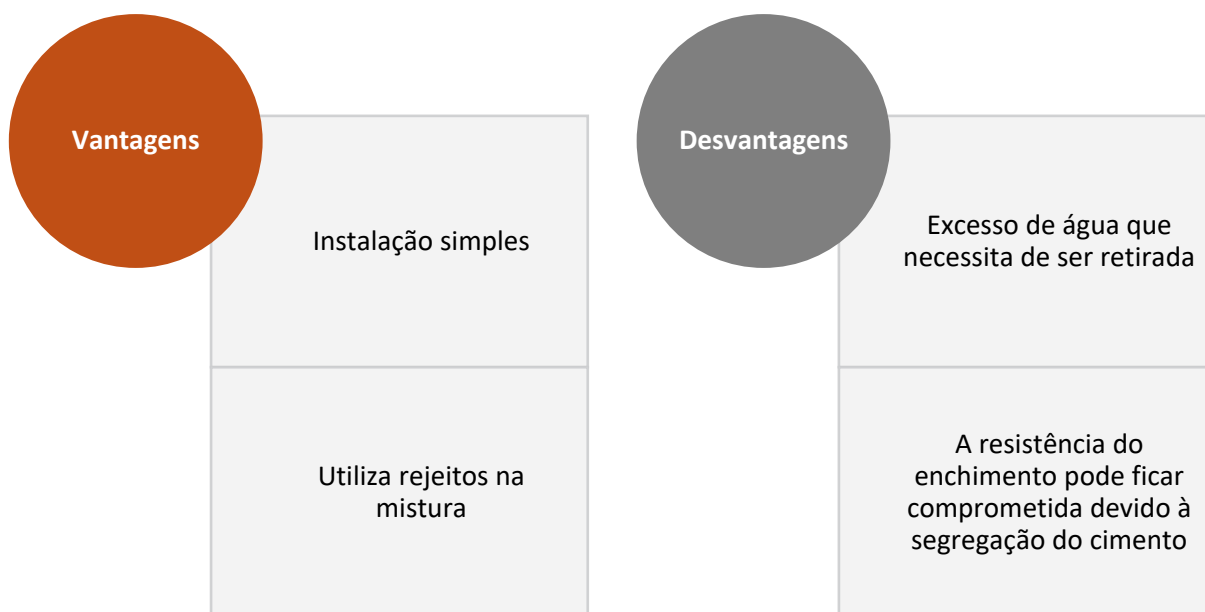


Figura 11 - Vantagens e desvantagens do enchimento hidráulico (adaptado de Maia, 2019).

2.2.3. Enchimento com pastefill

Por fim, a pasta caracteriza-se como sendo um fluido plástico, não drenante e não-Newtoniano, e o seu enchimento baseia-se numa mistura de rejeitados, produzidos pela Lavaria, cimento, água e aditivo, com a finalidade de aumentar a coesão e a resistência da mistura. A pasta de enchimento não deve apresentar água em excesso, uma vez que a mesma deve ser utilizada no decorrer do processo de hidratação do cimento (Carvalho A. , 2018).

A pasta apresenta na sua constituição uma quantidade de sólidos na ordem dos 70 a 85%, água, que pode ser limpa ou processada pela mina, e um agente ligante, nomeadamente cimento Portland, que representa 3 a 7% do peso total (Sheshpari, 2015; Brady & Brown, 2004).

O tipo e distribuição granulométrica dos agregados constituintes da mistura, a quantidade de agentes ligantes, água e aditivos influenciam a resistência, densidade, assim como a permeabilidade do enchimento e do sistema de transporte. No que diz respeito à distribuição granulométrica, no mínimo 15% das partículas finas do rejeitado devem ter dimensões não superiores a 20µm (Sheshpari, 2015; Carvalho A. , 2018).

Contudo, tal como é evidente no diagrama representado pela Figura 12, a pasta de enchimento também depende da percentagem de sulfuretos presentes no rejeitado que, quando oxidados, podem influenciar na durabilidade do enchimento.

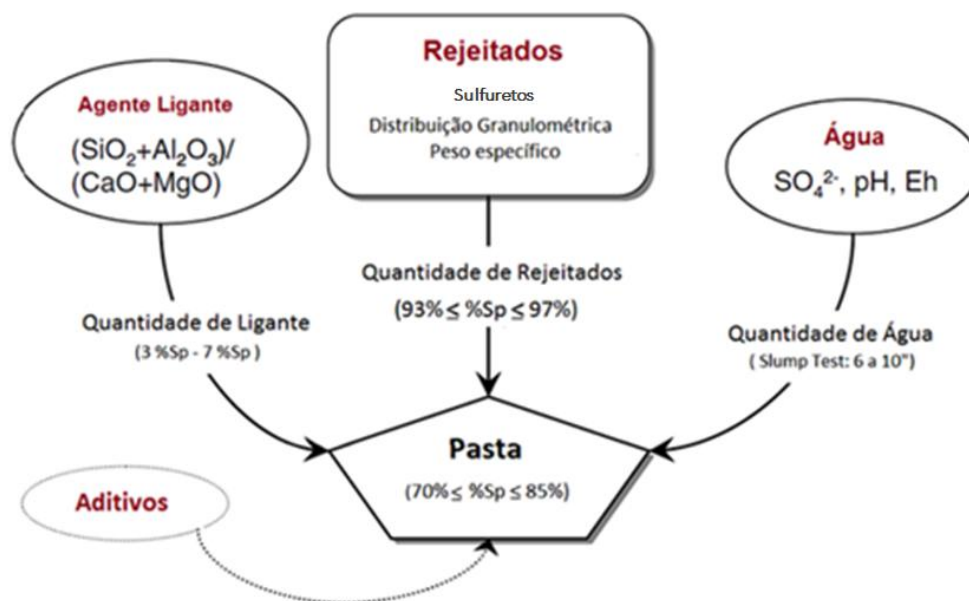


Figura 12 – Diagrama da composição da pasta de enchimento (Carvalho J. , 2014).

A pirite é o principal mineral responsável pela presença de sulfuretos no rejeitado e aquele que sofre mais reações químicas de oxidação. No entanto, segundo (Sheshpari, 2015), a reação de oxidação do sulfureto é insignificante e praticamente nula no enchimento com pasta, em consequência da saturação de água e da limitação de ar disponível. O mesmo autor também refere que no caso de cimentos que tenham na sua composição gesso ou anidrite, de forma a controlar o acelerador de presa, pode levar a uma pequena quantidade de sulfatos na pasta.

A trabalhabilidade e consistência da pasta podem ser determinadas através de ensaios como o teste de abatimento – *slump test*. Do mesmo modo, a resistência à compressão uniaxial (RCU) constitui um outro parâmetro de referência acerca da conformidade da pasta.

Tal como vários estudos apontam, a pasta de enchimento sofre um aumento da resistência à compressão uniaxial até, pelo menos, aos 91 dias de cura, ou até mais. No entanto, podem ocorrer ataques químicos por parte dos sulfuretos em diferentes tipos de pasta com diferentes tipos de rejeitados. Como resultado, pode-se observar uma redução nos valores obtidos da resistência à compressão uniaxial, bem como do módulo de deformabilidade entre os 28 e os 56 dias de cura, ou a partir dos 120 dias (Carvalho A. , 2018).

A Figura 13 apresenta algumas vantagens e desvantagens do enchimento com pasta.

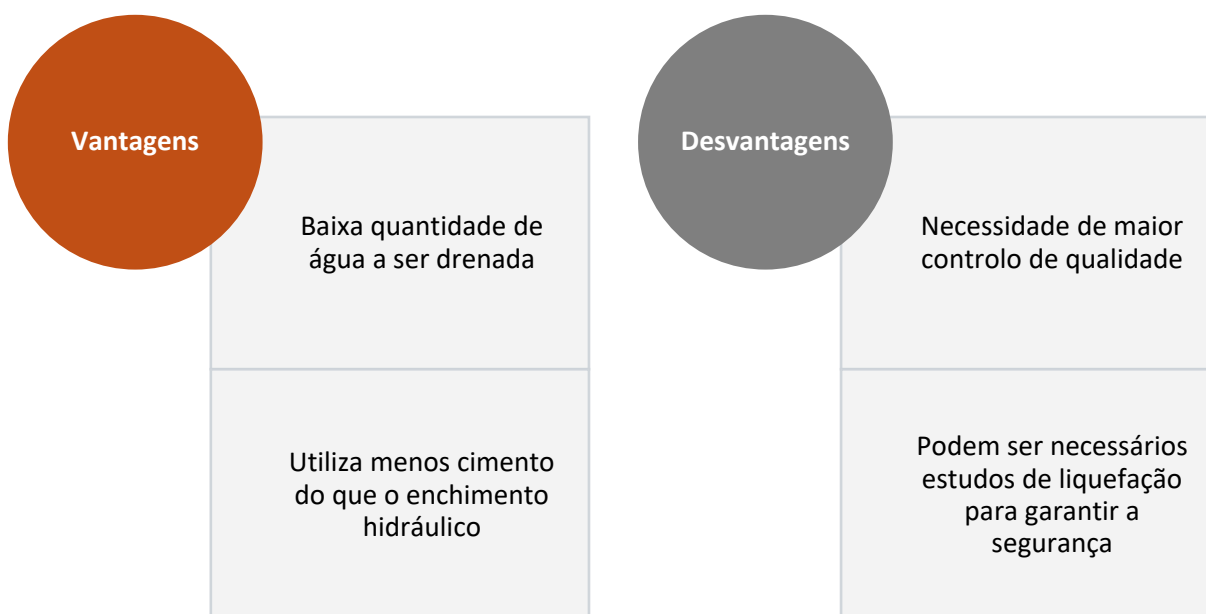


Figura 13 - Vantagens e desvantagens do enchimento com pasta (adaptado de Maia, 2019).

2.3. Constituintes Pasta de enchimento

2.3.1. Rejeitado

O principal constituinte da pasta de enchimento são os rejeitados, sendo que a respetiva mineralogia irá influenciar o potencial de retenção de água da mistura e interferir na resistência da pasta através de reações químicas entre os constituintes da mistura. Deste modo, os rejeitados devem apresentar uma determinada quantidade de finos, uma vez que a sua granulometria possui uma maior superfície específica, conferindo uma maior retenção de água e, consequentemente, uma melhor trabalhabilidade da pasta (Carvalho A. , 2018).

2.3.2. Cimento Portland

A matéria-prima do cimento Portland são rochas calcárias, ricas em carbonato de cálcio que contêm impurezas como quartzo, fosfatos ou pirite em diferentes proporções. É produzido mediante um controlo rigoroso da composição química de cálcio, sílica, alumínio, ferro e outros componentes, mas em pequena quantidade. O cimento oferece resistência e consistência à pasta consoante a relação água/cimento (A/C). Na etapa final da moagem, é adicionada gipsita, vulgarmente

conhecida como pedra de gesso, é um sulfato de cálcio hidratado, que tem como objetivo controlar o tempo de presa do cimento até que este atinja as condições ideais de utilização (Sá, 2011).

O clínquer é o constituinte do cimento em maior proporção, composto essencialmente por 4 fases de aluminatos e silicatos, tal como evidente na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição do clínquer (adaptado Sá, 2011).

Composto	Fórmula	Designação Comum	Fração do Clínquer
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Alite	50% a 70%
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Belite	10% a 30%
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	Celite	2% a 15%
Aluminoferato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	Felite	5% a 15%

A indústria cimenteira também fabrica outros tipos de cimento mediante a adição de aditivos ao clínquer, com o objetivo de conferir características distintas ao produto final. Os aditivos mais utilizados são os seguintes:

- Gesso: regulação do tempo de presa evitando que o clínquer endureça rapidamente.
- Escória siderúrgica: contém silicatos que atuam como ligantes hidráulicos resistentes que permitem o aumento da durabilidade; no entanto, pode prejudicar a consistência mecânica do cimento quando utilizada em excesso no clínquer.
- Materiais Pozolânicos: reagem com o carbono na presença de água originando compostos com propriedades aglomerantes; modificam a microestrutura do cimento, reduzindo a sua permeabilidade e aumentando a sua durabilidade.
- Calcário: atua como lubrificante para tornar o produto mais plástico, mas sem comprometer a ação dos outros elementos.

Este tipo de características dos aditivos possibilita a distinção dos diferentes tipos de cimento. Os tipos básicos de cimento, definidos pela norma europeia EN 197-1:2011, encontram-se representados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tipos básicos de cimento, definidos pela norma europeia EN 197-1:2011 (adaptado de Sá, 2011).

Designação	Nome	Aplicação
CEM I	Cimento Portland	Sem aditivos – uso geral
CEM II	Cimento Portland composto	Estruturas em água ou solo
CEM III	Cimento de Alto-Forno	Necessária elevada resistência inicial
CEM IV	Cimento Pozolânico	Necessária baixa taxa de geração de calor
CEM V	Cimento Composto	Água ou solo altamente alcalinos

Os cimentos podem ainda ser classificados segundo a sua resistência, tal como definido pela norma europeia EN 196-1:2005. A Tabela 6 retrata a classificação dos cimentos, determinada pela sua resistência à compressão uniaxial aos 28 dias (Carvalho J. , 2014):

Tabela 6 - Classificação dos cimentos consoante a resistência à compressão uniaxial apresentada após 28 dias (MPa).

Classe de resistência	Resistência Compressão Standard - 28 dias (Mpa)	
32.5	≥ 32.5	≤ 42.5
42.5	≥ 42.5	≤ 52.5
52.5	≥ 52.5	-

Adicionalmente, a percentagem de aditivos varia consoante a classe e é representada pelas letras A ou B. A letra A representa 80% a 94% de clínquer, enquanto que a letra B representa 65% a 79% de clínquer. Cada uma das classes de resistência da Tabela 6 podem ser classificadas relativamente ao ganho de presa inicial. Se apresentarem a letra N a sua resistência inicial é baixa, mas se apresentarem a letra R a sua resistência inicial é alta.

2.3.3. Água

Na indústria mineira, a água utilizada nas misturas de pasta é, em grande parte, reciclada e tratada, geralmente proveniente dos circuitos internos das próprias unidades de exploração. Assim, é essencial proceder à sua caracterização química detalhada, uma vez que pode conter concentrações significativas de substâncias potencialmente tóxicas, como arsénio ou cianeto, que podem interferir com os componentes da mistura, afetando negativamente a resistência mecânica da pasta.

Adicionalmente, o pH da água é outro parâmetro crítico a ter em consideração, uma vez que pode ter um efeito adverso na resistência da pasta, principalmente quando influenciado por sulfuretos presentes nos rejeitados. Estes compostos, ao reagirem com a água, podem alterar o peso volúmico e comprometer as propriedades mecânicas da pasta.

2.4. Parâmetros do Enchimento

2.4.1. Reologia

A reologia caracteriza-se como a ciência que estuda a deformação e o escoamento dos materiais, sendo responsável por observar o comportamento dos fluidos não-Newtonianos, cujo comportamento é elástico-plástico. Estes materiais não têm uma viscosidade estabelecida, por isso tanto podem ser fluidos como sólidos, sendo importante estudar o comportamento da pasta de enchimento no decorrer do seu transporte ao longo das tubagens.

Na reologia de um fluido não-Newtoniano, a relação mais relevante é entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento na parede das tubagens (Belem & Benzaazoua, 2007). Assim que esta relação é conhecida, é possível determinar o comportamento do fluído em todas as situações de escoamento. Os modelos mais utilizados para descrever este comportamento são o *Power Law*, o modelo de Bingham e o modelo de Herschel-Bulckley.

O *Power Law* é o modelo mais simples para fluidos viscosos e é representado equação 1:

$$\eta(\dot{\gamma}) = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad [1]$$

Onde,

k — índice de consistência (Pa.s)

n – índice de potência

Quando $n = 1$, a viscosidade é constante, correspondendo a um fluido newtoniano. Quando $n > 1$, o fluido é dilatante, dado que a viscosidade é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento. Já quando $n < 1$, a viscosidade é inversamente proporcional à taxa de cisalhamento, igualando-se a um fluido pseudoplástico.

O modelo Herschel-Bulckley descreve o comportamento de fluidos não-Newtonianos. Ao atingir a tensão limite de escoamento, o fluido quebra-se, resultando numa diminuição da viscosidade. Quando a tensão está abaixo da tensão limite o escoamento apresenta uma viscosidade a tender para o infinito, isto é, não escoará, dada pela equação 2.

$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \cdot \dot{\gamma}^{n+1} & \text{se } \tau > \tau_0 \\ \infty & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [2]$$

Por fim, o modelo Bingham é o mais utilizado para fluidos não-Newtonianos que exigem uma determinada tensão para iniciar o escoamento, tal está representado pela equação 3.

$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu_p & \text{se } \tau > \tau_0 \\ \infty & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [3]$$

À semelhança do anterior, quando a tensão se encontra abaixo do valor esperado, os fluidos apresentam viscosidade infinita, ou seja, passam a comportar-se como um sólido (Figura 14).

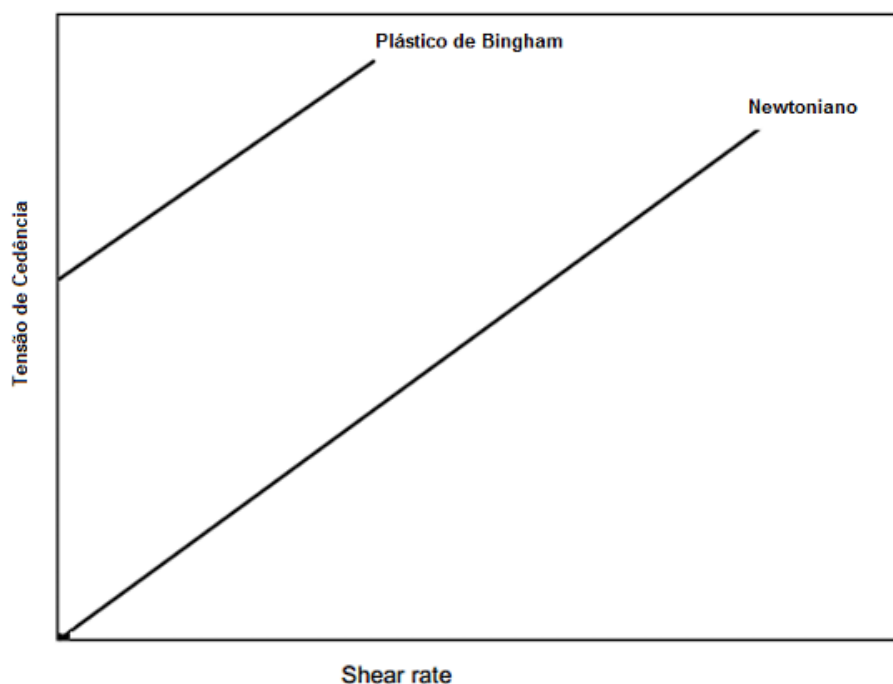


Figura 14 - Modelo de Bingham (adaptado de Carvalho J. , 2014).

Características como a forma e dimensão das partículas influenciam o transporte do enchimento com pasta. As partículas de menor dimensão apresentam superfícies específicas maiores levando a uma maior viscosidade, bem como a uma maior força de ligações entre as partículas. No caso de partículas mais achatadas, a velocidade de sedimentação é menor, influenciando a resistência, drenagem e consolidação. Adicionalmente, parâmetros como o pH, a temperatura e a adição de reagentes/aditivos também podem influenciar significativamente a viscosidade.

A tensão mínima responsável pelo escoamento deste tipo de enchimento designa-se por tensão de cedência, que é dada pela resistência ao escoamento que um material apresenta e que conduz à deformação plástica. É determinada através da trabalhabilidade pelo ensaio de abaixamento (*slump test*) e através de um reómetro (Carvalho J. , 2014).

2.4.2. Resistência

A resistência é um dos parâmetros mais importantes no estudo de pastas de enchimento, estando relacionada com a capacidade do enchimento oferecer estabilidade local e regional, assim como resistir às tensões após a sua colocação.

É também influenciada pela adição de agentes ligantes, como o cimento, à mistura, uma vez que este aumenta a resistência e, especialmente, a tensão de corte. A resistência ao corte de um enchimento pode ser representada pela equação de Mohr-Coloumb:

$$t = \sigma \cdot \tan \phi + c \quad [4]$$

Onde,

t – tensão de corte (Pa)

σ – tensão normal (Pa)

ϕ - ângulo de atrito do enchimento (°)

c – coesão do enchimento

2.4.3. Distribuição Granulométrica

A granulometria das partículas do rejeitado influencia a percentagem de vazios, uma vez que quanto menor for a dimensão dos grãos da mistura, menor será o número de vazios. Quanto menor for o tamanho das partículas, maior a superfície específica. Assim, o contacto com o cimento será também maior, isto é, existem mais ligações entre o cimento e os grãos do rejeitado, permitindo o aumento da resistência e coesão da pasta. O tamanho das partículas do rejeitado depende do método utilizado no processamento do minério, bem como da quantidade de vezes ao qual foi sujeito ao processo de cominuição (Carvalho J. , 2014).

O coeficiente de uniformidade, C_u , retrata a graduação do material e é dado pela razão entre D_{10} e D_{60} , isto é, 10% e 60% do material possuem uma dimensão inferior a uma determinada dimensão equivalente, equação 5.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad [5]$$

É ainda possível recorrer ao coeficiente de curvatura, C_c , representado pela equação 6, que corresponde à concavidade apresentada na curva granulométrica.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad [6]$$

Um valor mais elevado de C_u indica uma amostra com melhor graduação granulométrica e, consequentemente, com uma menor percentagem de índice de vazios.

2.4.4. Permeabilidade e percolação

A permeabilidade baseia-se na capacidade que o enchimento apresenta de permitir a passagem de água existente na mistura. A percolação consiste no movimento de um líquido, geralmente água,

num meio poroso. No enchimento, é responsável pela drenagem da água em excesso, de forma a reduzir os fenómenos de liquefação e evitar a acumulação de água em determinadas zonas do enchimento (Carvalho J. , 2014). É representada pela taxa de percolação, que indica a velocidade do líquido no meio em que se desloca (equação 7).

$$V_p = \frac{q}{A} \quad [7]$$

Onde,

V_p – taxa de percolação (m/s)

q – caudal de água (m³/s)

A – área da secção transversal da amostra à direção do fluxo (m²)

2.4.5. Teor em água

A adição de água na mistura desempenha um papel importante nas suas propriedades reológicas e no comportamento global da mistura, podendo comportar-se como um material semi-sólido, como um fluido plástico ou líquido pastoso, podendo evoluir para uma lama no caso de adição excessiva de água. A relação água/cimento (A/C) pode-se tornar num parâmetro crítico, uma vez que quanto mais elevada for esta relação, maior será a porosidade e menor a resistência da pasta (Carvalho A. , 2018).

Embora um aumento do teor em água ofereça maior trabalhabilidade à mistura, o excesso de água para a hidratação do cimento pode comprometer a resistência da mesma, conduzindo à formação de vazios e fenómenos de exsudação e, por consequência, roturas nos pontos de fraqueza do material.

2.4.6. Mineralogia do rejeitado

As características do rejeitado utilizado na pasta de enchimento estão relacionados com o tipo de minério em exploração, sendo a sua mineralogia um fator determinante nas propriedades físico-químicas da mistura. A mineralogia do rejeitado influencia parâmetros como a retenção de água, a resistência, devido às reações químicas que podem ocorrer entre os constituintes, e a capacidade de sedimentação da pasta. Estas propriedades refletem-se em características da pasta de enchimento, nomeadamente no peso específico das partículas sólidas e na densidade final da mistura (Carvalho A. , 2018).

Minerais como a sericite, quando presentes na mistura, possibilitam uma maior retenção de água, o que tende a reduzir a resistência da pasta. Não obstante, o facto de apresentar uma geometria plana e lisa também interfere negativamente na resistência, quebrando as ligações entre outros constituintes na mistura e originando zonas de fraqueza suscetíveis a deformações.

Do mesmo modo, a presença de quartzo pode conferir à pasta um forte carácter abrasivo, causando danos nas tubagens. Já minerais como os sulfuretos podem comprometer a resistência da pasta ao reagir com as ligações do cimento aquando do processo de hidratação, ou até mesmo promover a formação de novos minerais, podendo afetar a estabilidade e durabilidade do material.

2.5. Substituição parcial do ligante (cimento) por filler – Considerações Iniciais

A substituição parcial do cimento por filler no pastefill é benéfica principalmente no que diz respeito à redução de custos, menor impacto ambiental e melhoria das propriedades reológicas.

O cimento Portland é o constituinte mais dispendioso do pastefill. Logo, ao substituir parte desse ligante por filler, um material de custo inferior, verifica-se uma redução significativa no custo final do enchimento. Há estudos que demonstraram que o uso de materiais alternativos, como o filler ou até mesmo material estéril pode reduzir o consumo de cimento em mais de 50% no pastefill, resultando numa economia direta sem comprometer o desempenho do enchimento, desde que as proporções utilizadas sejam adequadas (Maia, 2019). Do ponto de vista ambiental, a produção de cimento é responsável por uma parte significativa das emissões globais de CO₂, pelo que a utilização de filler neste contexto torna-se ainda mais benéfica.

Em relação às propriedades reológicas, a utilização de filler melhora a distribuição granulométrica, por se tratar de um pó fino, aumentando a compacidade da mistura e, consequentemente, reduzir a quantidade de água necessária. O uso de filler pode melhorar a trabalhabilidade da mistura, diminuindo a tensão de escoamento e a viscosidade, facilitando o transporte da pasta nas tubagens (Sequeira & Ghisleni, 2020).

O estudo intitulado por *“Effect of Incorporating Waste Limestone Powder into Solid Waste Cemented Paste Backfill Material”* (Hu et al. 2019), publicado em maio de 2019 destaca a aplicação específica de produzir enchimento económico e reduzir o desperdício de resíduos sólidos nas minas.

A investigação foca-se no desempenho de pasta cimentada com resíduos sólidos, contendo pó de calcário como filler, propondo a sua utilização para substituir uma parte do cimento. O *cemented paste backfill* (CPB) é uma tecnologia cada vez mais utilizada na indústria mineira, mas o custo associado é relativamente elevado, devido, principalmente, ao cimento. O CPB é responsável por cerca de 40% ou mais do teor de cimento, embora constitua apenas 3-9% do peso. Portanto, torna-se necessário encontrar outro material de cimentação alternativo que possa substituir parte do cimento, de forma a reduzir os custos e minimizar os problemas ambientais causados pelos resíduos sólidos.

Neste trabalho, com a intenção de estudar a viabilidade da reutilização do pó de calcário no CPB, foram recolhidas amostras de resíduos obtidos a partir de uma mina de chumbo e zinco localizada no sul da China. Para tal, foram utilizados rejeitos (rejeito A e rejeito B) de duas áreas de processamento mineral diferentes, ligante complexo composto por pó de calcário (0-20%) e cimento Portland (80-100%). Os principais fatores que afetam a resistência do enchimento são a composição e tamanho das partículas das matérias-primas. Assim, o efeito do pó de calcário pode ser determinado com a alteração do tamanho das partículas.

Como forma de controlo, consideraram duas amostras, de duas áreas de processamento mineral diferentes, A1 e B1, com 100% de cimento. As amostras foram submetidas a uma análise de ressonância magnética nuclear (RMN) e a uma microscopia eletrónica de varrimento e análise de imagens (MEV-IA), com o intuito de examinar a microestrutura dos poros e respetivas propriedades, bem como a ensaios de resistência à compressão uniaxial.

Deste estudo foi possível constatar que a substituição parcial do cimento por pó de calcário residual mostrou ser viável, especialmente em termos de resistência aos 28 dias e também quanto à otimização da estrutura dos poros e microestrutura. Embora a resistência inicial possa ser afetada, a reação do SiO_2 presente no pó de calcário na fase posterior de cura contribuiu para o aumento da resistência.

Concluiu-se também que a adição de pó de calcário pode melhorar o desempenho do transporte, reduzindo a viscosidade da polpa.

Assim, com este estudo conclui-se que a substituição parcial do cimento por pó de calcário pode ser uma abordagem promissora para reduzir o desperdício de resíduos sólidos nas minas, e produzir um enchimento viável do ponto de vista económico.

[página propositadamente em branco]

Capítulo III

Caso de Estudo

[página propositadamente em branco]

3. Caso de estudo

O presente estudo referente à viabilidade da substituição parcial do cimento por filler baseia-se em ensaios realizados no Laboratório Geotécnico da ALMINA – Minas do Alentejo, S.A, em contexto académico-empresarial. A pasta de enchimento estudada é constituída por rejeitado de cobre proveniente dos jazigos de Feitais e Moinho.

3.1. Enquadramento geográfico

A área em estudo localiza-se na vila de Aljustrel, no sul do país, pertencente à região do Alentejo, sub-região do Baixo Alentejo e distrito de Beja (Figura 15). O concelho de Aljustrel contempla quatro freguesias: União de freguesias de Aljustrel e Rio de Moinhos, Ervidel, Messejana e São João de Negrilhos.

Segundo os dados da Pordata (2023), Aljustrel conta com 8.922 habitantes e ocupa uma área de 458.5 km². É acessível por rodovia, passando a autoestrada A2 a 7 km, com nó próprio e é atravessada pelas EN2 (Chaves – Faro), EN261 (Aljustrel – Santiago do Cacém), EN263 (Aljustrel – Santo André), EN283 (Aljustrel – Santa Margarida do Sado) e EN539 (Aljustrel – Ferreira do Alentejo). Aljustrel fica a 175 km a SSE de Lisboa e a 175 km de Faro.

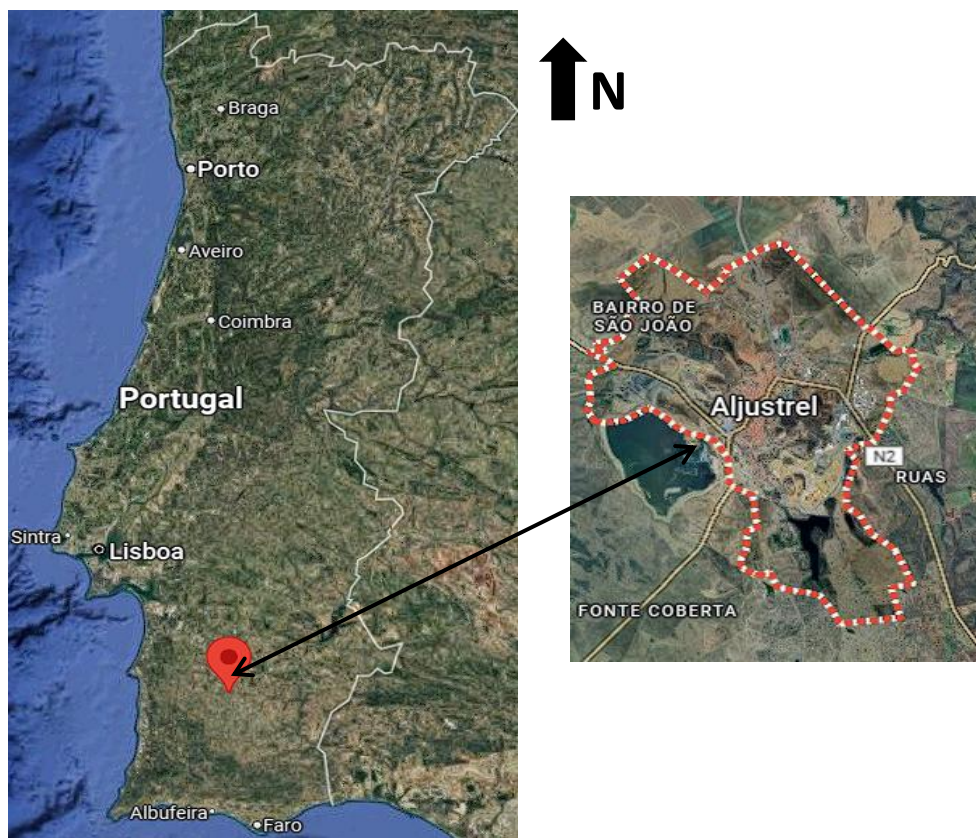


Figura 15 – Enquadramento geográfico de Aljustrel (Google Maps).

3.2. Enquadramento geológico regional

Barriga et al. (1997) referem que Aljustrel abrange um conjunto de jazigos (Moinho, Algares, S. João, Feitais e Estação) que se encontram entre os principais depósitos de sulfuretos maciços da Faixa Piritosa Ibérica (FPI), com cerca de 250 km de comprimento e 60 km de largura, com orientação WNW-SSE.

A FPI corresponde à área de rochas vulcânicas e sedimentares do Devónico – Carbonífero (Figura 16) . É constituída por três principais unidades tectono-estratigráficas, da mais antiga para a mais recente:

- 1) Grupo Filito – Quartzítico (FQ);
- 2) Complexo Vulcano – Silicioso (VS);
- 3) Grupo Flysch do Baixo Alentejo (GFBA).

O Grupo FQ, do Devónico Superior, é composto maioritariamente por ardósias e quartzitos, aflorando no interior de anticlinais.

De acordo com Santos (2020), o complexo VS é uma das unidades mais importantes da FPI e é constituída por rochas vulcânicas e sedimentares félsicas a máficas. A nível regional observa-se uma predominância de rochas sedimentares, representando cerca de 75% da composição litológica, em contraste com as rochas vulcânicas, que correspondem a cerca de 25%. Assim, a componente sedimentar é composta por xistos negros, xistos siliciosos, xistos borra-de-vinho, grauvaques e quartzograuvaques e rochas siliciosas de precipitação química como jaspes e chertes.

O Grupo Flysch do Baixo Alentejo (GFBA), datado do Viseano Superior ao Vestefaliano, é composto por alternâncias rítmicas de xistos e grauvaques com níveis de conglomerados intraformacionais.

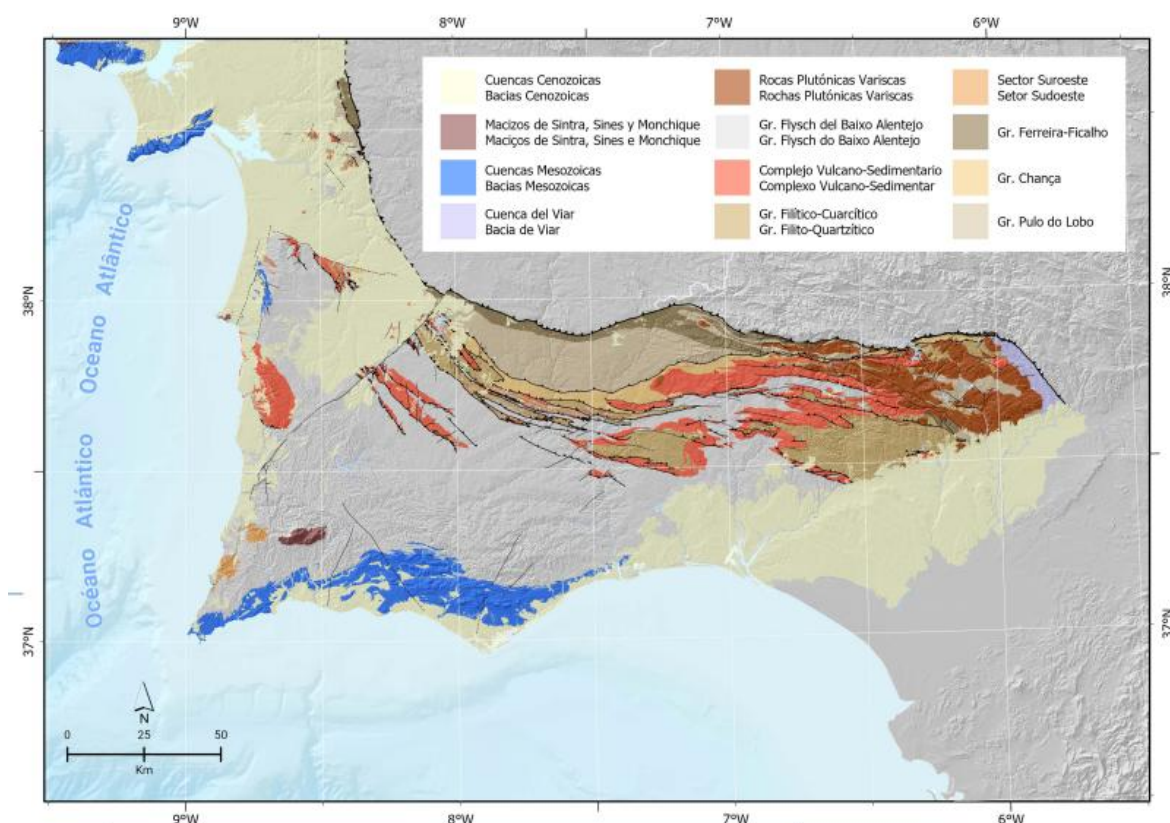


Figura 16 - Faixa Piritosa Ibérica (Fonte: [geoPortal do LNEG](#)).

Atualmente, são conhecidos aproximadamente 92 jazigos de sulfuretos maciços vulcanogénicos na FPI distribuídos de forma distinta pelos territórios de Portugal e Espanha, sendo Aljustrel, Neves-Corvo, Águas Teñidas e Las Cruces os principais centros mineiros da FPI.

O Couto Mineiro de Aljustrel tem uma área de 12 km² com cerca de 250 milhões de toneladas de reserva, constituindo um dos centros mineiros mais importantes do mundo.

3.3. Enquadramento geológico local

Aljustrel engloba seis depósitos de sulfuretos maciços, datados do Devónico Superior ao Carbónico Inferior: Feitais, Estação, Algarès, Moinho, São João e Gavião.

Os depósitos de Feitais e Estação estão associados ao Anticlinal Central, enquanto que os restantes encontram-se na estrutura Sinclinal – Anticlinal de São João – SW (Plano de Lavra, 2023)¹.

Os depósitos das minas de Aljustrel estão delimitados por megaestruturas, nomeadamente a falha ativa de Messejana que se estende a partir da costa alentejana até Madrid com desligamento horizontal de 2.5 km, com orientação NE – SW. Foram encontradas outras falhas, nomeadamente as falhas de Castelo, de Feitais e da Represa, com orientação NW – SE, maioritariamente associados às orlas menores das anticlinais (Barriga et al., 1997; Costa, 2017).

A Figura 17 representa a estratigrafia da área mineira de Aljustrel.

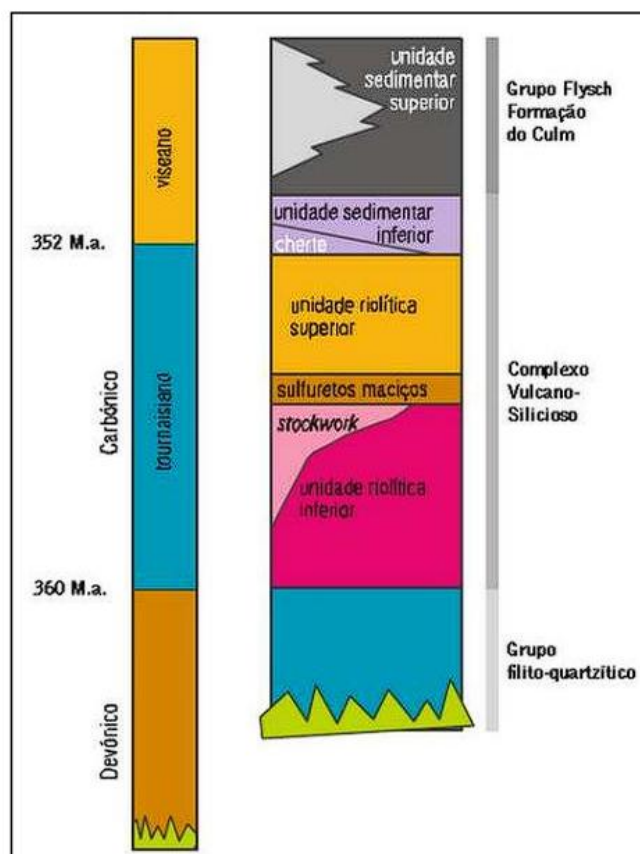


Figura 17 - Estratigrafia de Aljustrel (Costa, 2017).

¹ Documentação interna da ALMINA – Minas do Alentejo S.A.

Os sulfuretos maciços em Aljustrel correspondem a rochas vulcânicas como tufos, riólitos, etc, que, devido à passagem de fluidos quentes e da água do mar sofreram alterações.

Os depósitos minerais em estudo apresentam, da formação mais antiga à mais recente, a seguinte sequência:

- I. Riólito Inferior
- II. Sulfuretos maciços ou *stockwork*
- III. Riólito Superior
- IV. Unidade Sedimentar Inferior
- V. Unidade Sedimentar Superior

De salientar que a espessura dos rejeitos varia de 10 a 100 metros nas áreas influenciadas pelas falhas.

Jazigo de Feitais

O jazigo de Feitais, como já anteriormente referido, ocorre no anticlinal de Feitais, na parte SE da Mina de Aljustrel. Possui cerca de 900 m de comprimento, 700 m de largura e mais de 100 m de espessura, tornando-se assim numa das maiores massas minerais da FPI e na maior de Aljustrel. Tem direção N 305°E, inclinando menos de 50° para NE e mergulha 30° para NW na direção da falha da Represa.

A massa mineralizada apresenta uma zona rica em cobre próximo do contacto a *footwall*, passando por uma zona intermédia pobre em pirite nas proximidades do *hanging-wall* até chegar a uma zona rica em zinco. Estes depósitos que são ricos em cobre estão situados em zonas de stockwork e são constituídos por material félsico alterado, de origem vulcânica, contendo veios de sulfuretos e clorite (Ferreira, 2015).

O jazigo é composto por sulfuretos de grão fino constituídos por pirites, em maior quantidade, e por esfalerite, galena, calcopirite, tetraedrite e arsenopirite, em menor quantidade.

Com base em informação recolhida na documentação interna da empresa, as estruturas dominantes da mina de Feitais são:

- Anticlinal de Feitais;
- Falha do Muro;
- Falha de Compressão de Feitais;
- Falha Transversal de Feitais;
- Falha da Represa

Jazigo do Moinho

O jazigo do Moinho ocorre a norte da parte central do Couto Mineiro de Aljustrel, no flanco normal do anticlinal de SW. Trata-se do depósito mais antigo em exploração, com várias semelhanças ao de Feitais, mas com um maior grau de deformação (Plano de Lavra, 2023). Possui 700 m de comprimento, 700 m de largura e 100 m de espessura, com direção AZ 315° e inclinação 60-70° NE. O depósito mergulha para sul e é cortado pelo ramo NW – SE da falha do teto do próprio jazigo. É constituído, maioritariamente, por sulfuretos maciços de granulometria fina, compostos por pirite com esfalerite, galena e calcopirite e quantidades acessórias de tetraedrite, arsenopirite e outros sulfossais.

Tal como referido, a mina do Moinho sofreu uma maior deformação relativamente à mina de Feitais, apresentando várias falhas sub-paralelas ao plano axial das dobras que limitam o sulfureto maciço. Assim, quer o teto quer o muro encontram-se intensamente laminados e a maioria dos contactos demonstra, ainda que pequeno, algum movimento.

As estruturas principais na mina do Moinho são:

- Anticlinal de SW;
- Falha do Muro;
- Falha do Teto;
- Falha Transversal do Moinho.

Jazigo da Estação

O jazigo da Estação está localizado no extremo NE de Aljustrel e acredita-se que os depósitos de Feitais e Estação formavam um corpo mineralizado único. Este jazigo, que ainda não se encontra em exploração, apresenta uma massa com cerca de 600 m de rejeito provocada pela falha da Represa. Apresenta uma morfologia lenticular com 600 m de comprimento, 480 m de largura e cerca de 100 m de espessura.

As estruturas dominantes no jazigo da Estação são:

- Anticlinal de Feitais;
- Falha do Muro;
- Falha da Represa.

3.4. Processamento e produção de rejeitado

Proveniente da Lavaria sai uma mistura de rejeitado e água, com cerca de 25% de sólidos, passando pelo processo de espessamento, através de hidrociclones que permitem realizar uma primeira separação dos sólidos da água. Esta operação é feita na central de rejeitado, situada junto à Lavaria, na qual os sólidos assentam no fundo, devido à força da gravidade, sendo possível transportar este material, designado por “polpa”, com uma percentagem de sólidos entre os 80-85% até à Central de Pasta.

O sistema de reticulação dos jazigos foi calculado com base em estudos prévios, tendo em conta as características da pasta e os parâmetros de fluxo para os ritmos de enchimento projetados pela ALMINA.

Na Central de Pasta, a “polpa” é encaminhada para a misturadora, cuja função é evitar a sedimentação dos sólidos, sendo posteriormente submetida ao processo de filtração recorrendo a filtros de disco a vácuo. Estes filtros são continuamente alimentados e permitem extrair, pela última vez, a água presente na “polpa”, resultando na transformação de um material denominado por “torta”. A “torta” é constituída por rejeitado e por uma pequena percentagem de água e é transportada através de uma tela transportadora. Aqui, são recolhidas amostras para a determinação da densidade e da percentagem de sólidos com recurso à Balança de Marcy, permitindo fazer um controlo de qualidade.

Após o processo de filtração, o material é encaminhado, através de bombas de filtragem, para o tanque de processamento de água, onde a água extraída durante o processo é reciclada e introduzida novamente no sistema de distribuição de água.

A calda da pasta, composta por uma mistura de cimento e água, é preparada na central de cimento, após a alimentação dos silos com cimento Secil. A calda é previamente misturada antes de ser transportada para a misturadora da pasta, sendo adicionada à “torta”. A quantidade de cimento na calda é controlada através da velocidade de escoamento por bombagem no tanque de alimentação, assim como pela percentagem de sólidos presentes na “torta”.

Para a substituição parcial de cimento por filler, torna-se necessário instalar um novo silo para o filler junto ao do cimento, procedendo de seguida à mistura do rejeitado, cimento e filler.

Caso a mistura de pasta aparente não ter a correta trabalhabilidade, o operador poderá ajustá-la adicionando estéreis ou água, controlando a sua consistência através do consumo de energia da misturadora. Durante o processo de enchimento, é indispensável que o operador verifique o *slump*,

de forma a confirmar se está de acordo com o *slump* mínimo, de forma a garantir os requisitos de resistência.

Finalmente, a pasta é misturada por meio de um sistema de *overflow* e, posteriormente, é conduzida para uma torva que a descarrega diretamente no sistema de distribuição, por ação da gravidade, até ao desmonte.

3.5. Requisitos da pasta de enchimento

Em 2016, uma empresa contratada pela ALMINA levou a cabo uma investigação sobre a implementação de um sistema de enchimento com pasta das minas do Moinho e de Feitais, assim como os requisitos para a pasta. Até então, a empresa utilizava enchimento com estéril, designado por *rockfill* (RF), e enchimento com estéril cimentado, *cemented rockfill* (CFR). Por motivos de aumento da produtividade, segurança e diminuição de custos operacionais, surgiu a proposta de alteração do método de enchimento das minas de Aljustrel.

Desse modo, foi recomendado que a percentagem mínima de sólidos transportado a partir da central de rejeitado, em forma de “polpa”, até à central de pasta, fosse de 65%. A investigação também avaliou as resistências mínimas que a pasta deveria cumprir. Tal requisito foi proposto pela análise de Mitchell, que consiste em estimar a resistência exigida ao enchimento quando este é submetido à ação de um bloco de enchimento, considerando diferentes condições (Belem & Benzaazoua, 2007).

A resistência de um bloco de enchimento pode ser determinada considerando o melhor cenário, isto é, que as paredes do bloco de enchimento tenham atrito lateral. Caso isto se verifique, a resistência do bloco de enchimento pode ser obtida a partir da equação 8 da análise de Mitchell.

$$RCU_{enchimento} = \frac{(\gamma_{enchimento} - 2c) \times \left(H - \frac{B}{2} \times \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \right) \times \left(\sin\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \right)}{l} \times FS \quad [8]$$

Onde,

$\gamma_{enchimento}$ – peso volúmico do enchimento (kN/m³)

c – coesão do enchimento (KPa)

l – comprimento do bloco de enchimento (m)

B – largura do bloco (m)

H – altura do bloco (m)

FS – coeficiente de segurança

Para o pior cenário, no qual as paredes do bloco de enchimento encontram-se totalmente expostas, como se verifica para o enchimento fino, pode-se determinar a resistência segundo a equação 9, também proposta pela análise de Mitchell.

$$RCU_{enchimento} = \frac{(\gamma l - 2c) \times \left(H - \frac{B}{2}\right) \sin 45^\circ}{l} \times FS \quad [9]$$

Caso não seja possível determinar c , dado pela coesão do enchimento, pode-se recorrer à equação 10 para obter a resistência do bloco, mais uma vez sugerida pela análise de Mitchell.

$$RCU_{enchimento} = \frac{\gamma l H}{l + H} \times FS \quad [10]$$

Assim, foi possível determinar os valores de resistência mínima exigidas consoante as dimensões dos desmontes, tal como se evidencia pela Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de resistências mínimas exigidas consoante as dimensões dos desmontes.

Dimensões dos desmontes (A x L x C)	Resistências mínimas exigidas (KPa)
25x15x40	583
40x15x40	800
60x15x40	910

Atualmente, como as dimensões dos desmontes em Feitais são de 40x15x40 metros, o valor de resistência alvo aos 28 dias é de 800 KPa (0.800 MPa).

3.6. Constituintes das misturas de pasta

3.6.1. Rejeitado

O rejeitado foi recolhido na central de pasta e armazenado na câmara húmida do Laboratório Geotécnico, para manter as condições de humidade. Deste modo, antes de se proceder à realização das misturas, é essencial retirar o teor de humidade do rejeitado. Este teor de humidade foi obtido na balança designada por “Moisture analyser DBS 60-3” da Kern & Sohn GmbH (Figura 18), do laboratório.



Figura 18 – Balança do teor de humidade.

A Tabela 8 representa os valores de teor de humidade obtidos dos rejeitados utilizados nas misturas de pasta.

Tabela 8 – Valores de teor de humidade dos rejeitados utilizados nas misturas de pasta.

Data	Designação	Teor de humidade (%)
04-03-2025	FI20S79L4_450	14.59
05-03-2025	FI0S78L4_300	14.22
06-03-2025	FI15S79L4_300	14.26
07-03-2025	FI15S79L4_400	14.18
13-03-2025	FI15S79L4_450	14.62
14-03-2025	FI12S79L4_300	14.60
20-03-2025	FI12S79L4_450	13.72
24-03-2025	FI12S79L4_400	13.30
25-03-2025	FI15S79L4.5_400	18.97
26-03-2025	FI12S79L4.5_400	15.97
27-03-2025	FI20S79L4.5_400	14.89
28-03-2025	FIB20S79L4_400	15.80
31-03-2025	FIB15S79L4_400	14.68
02-04-2025	FIB12S79L4_400	13.30
08-04-2025	FI15S80L4.5_300	13.01
08-04-2025	FI15S80L4.5_400	13.01
09-04-2025	FI12S80L4.5_300	13.38
09-04-2025	FI12S80L4.5_400	13.38
10-04-2025	FI10S80L4.5_300	12.80
10-04-2025	FI10S80L4.5_400	12.80

Os rejeitados recolhidos apresentavam totais fissurais de cobre (FC) e de maciço cobre (MC) com as seguintes percentagens (Tabela 9).

Tabela 9 – Totais fissural de cobre e maciço de cobre (cortesia da ALMINA).

Data	Total FC	Total MC
03-03-2025	77%	23%
13-03-2025	63%	37%
14-03-2025	63%	37%
25-03-2025	69%	31%
07-04-2025	61%	39%

Os rejeitados utilizados nas misturas de pasta apresentavam a seguinte análise química, assim como o parâmetro D_{80} , que indica o diâmetro das partículas finas (Tabela 10).

Tabela 10 – Análise química dos rejeitados utilizados nas misturas de pasta.

Data	Teores							D_{80} (μm)
	Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)	S (%)	As (ppm)	Sb (ppm)	
03-03-2025	0.09	0.08	0.14	21.19	17.88	920	66	94.99
13-03-2025	0.10	0.10	0.06	20.86	15.81	899	10	86.61
14-03-2025	0.11	0.07	0.07	20.07	15.52	1417	33	134.67
25-03-2025	0.10	0.04	0.15	20.95	16.07	1539	79	87.48
07-04-2025	0.09	0.01	0.03	28.67	24.50	604	17	93.35

3.6.2. Água

A água utilizada nas misturas de pasta é oriunda de uma central de água, correspondendo a água industrial reciclada do circuito interno da mina, sendo igualmente reutilizada para outros fins. A Tabela 11 representa os valores de pH, temperatura e condutividade elétrica tanto da água do Laboratório Geotécnico como da Central de Pasta.

Tabela 11 – Análise à água da rede interna da ALMINA (cortesia da mesma).

Água	pH	Temperatura	Condutividade elétrica
	a 25°C	°C	a 25°C (mS/cm)
Lab. Geotécnico	7.9	20.9	0.65
Central Pasta	8.2	20.7	0.72

A Tabela 12 apresenta a análise química das águas do Laboratório Geotécnico e das águas da Central de Pasta.

Tabela 12 – Análise química à água da rede interna da ALMINA (cortesia da mesma).

Água	Cu	Fe	Mn	Zn	SST	SO4	Al	CQO	Pb
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Lab. Geotécnico	<0,04	0,04	0,2	0,08	3	41	0,025	<15	0,26
Central Pasta	<0,04	0,06	0,2	0,53	3	69	0,058	17	0,20

É de destacar que a água adicionada à mistura de pasta de enchimento deve estar fria, pois caso contrário o rejeitado pode absorver mais água, resultando numa mistura mais espessa, influenciando, consequentemente, a trabalhabilidade da pasta.

3.6.3. Cimento Portland

O cimento Portland utilizado na ALMINA corresponde ao CEM II/A-L 42.5 R, fornecido pela Secil. A designação “R” indica que este tipo de cimento apresenta desempenho elevado, isto é, possui uma elevada resistência inicial. Segundo a norma NP EN 197-1:2001, este cimento tem, na sua composição, cerca de 80% a 94% de clínquer Portland, 6% a 20% de calcário e 0% a 5% de outros constituintes.

Na Tabela 13 apresentam-se as especificações deste cimento.

Tabela 13 – Especificações do cimento Portland tipo II/A-L 42.5R, segundo NP EN 197-1:2001.

Tempo de cura	2 dias	7 dias	28 dias
Resistência à compressão (MPa)	≥ 20.0	-	≥ 42.5 e ≤ 62.5
Princípio de presa (min)	-	≥ 60	-
Expansibilidade (mm)	≤ 10	-	-

3.6.4. Filler

Nas misturas de pasta realizadas foram utilizados dois tipos de filler diferentes: filler pó de calcário da Omya e filler B do Grupo Parapedra. As propriedades físico-químicas do filler utilizado na maioria das misturas, o filler do grupo Omya, cujo nome comercial é designado por MICRO 1045-OU são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Propriedades físico-químicas do filler do grupo Omya.

Propriedades físico-químicas - filler Grupo Omya	
Aspetto	pó
Estado físico	sólido
Cor	branco
Odor	característico
pH	8.5-9.5 (20°C)
Densidade	2.3-2.8 g/cm ³

Na Tabela 15 apresenta-se a composição química do filler B do grupo Parapedra, enquanto a Tabela 16 descreve algumas das características físicas mais relevantes do mesmo.

Tabela 15 – Composição química do filler B do grupo Parapedra (Fonte: Ficha Técnica).

Composição Química – Filler B									
CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CaCO ₃
55.1	0.32	0.04	0.1	0.1	0.01	0.01	0.02	0.01	96.7

Tabela 16 – Características físicas do filler B do grupo Parapedra (Fonte: Ficha Técnica).

Características físicas – Filler B	
pH	8.6
Densidade aparente	1.05 g/ml
Massa volúmica	2.62 Mg/m ³
Humidade	≤ 0.3%
Partículas <75 µm	65%
Diâmetro D ₅₀	76 µm

3.6.5. Aditivo

O aditivo utilizado em todas as misturas de pasta, cujo nome comercial é MasterRoc MF 909 da Master Builders Solutions, tem as suas propriedades físico-químicas apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Propriedades físico-químicas do aditivo MasterRoc MF909.

Propriedades físico-químicas - MasterRoc MF909	
Estado	líquido
Cor	amarelado
Odor	específico do produto
pH	aprox. 7.2 (aprox. 20°C)
Viscosidade	< 350 mPa.s (20°C)
Densidade	aprox. 1.120 g/cm ³ (20°C)

Trata-se de um adjuvante líquido à base de polímeros modificados, plastificante e redutor de água, otimizando a reologia da pasta de enchimento. Permite melhorar o *slump* e as propriedades de escoamento, aumenta a resistência em todos os tempos de cura e ainda reduz pressões de bombagem e transporte no reticulado.

A Figura 20 representa o aspeto da pasta antes da adição do aditivo e a Figura 19 representa o aspeto da pasta com 400 ml/ton de aditivo.



Figura 20 – Aspetto da pasta sem aditivo.



Figura 19 – Aspetto da pasta com aditivo.

3.7. Estudo de impacto ambiental

O pastefill é amplamente utilizado na indústria mineira como forma de preencher os vazios deixados pelos desmontes, e é responsável pela gestão sustentável de rejeitos.

A produção de cimento Portland é uma das principais fontes de emissões de CO₂, sendo responsável por uma grande parte dos gases de efeito de estufa lançados para a atmosfera. Na produção de uma tonelada de cimento Portland são emitidas 0.6 toneladas de CO₂ na atmosfera, fazendo com que a indústria cimenteira seja responsável por mais de 5% das emissões deste gás (Fortunato et al., 2019).

Deste modo, a substituição parcial do cimento por filler contribui para a redução dessas emissões influenciando positivamente na mitigação das alterações climáticas. Também permite ainda reduzir a extração de matérias-primas necessárias para a produção do cimento e diminuir o consumo energético associado, assim como melhorar as propriedades do pastefill, dependendo das quantidades utilizadas.

Do ponto de vista geral, a substituição parcial de cimento por filler no pastefill permite reduzir significativamente as emissões de CO₂, passivos ambientais, o consumo de energia, assim como reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterro, contribuindo para práticas mais sustentáveis.

Na Tabela 18 apresenta-se um resumo comparativo dos indicadores do impacto ambiental causado pelo pastefill com cimento e o pastefill com filler como substituto parcial do cimento.

Tabela 18 - Resumo comparativo entre pastefill com cimento versus pastefill com filler (parcialmente).

Indicador	Pastefill com cimento	Pastefill com filler (substituição parcial do cimento)
Emissões de CO ₂	Elevadas	Reduzidas
Consumo de recursos naturais	Alto	Baixo
Reutilização de resíduos	Não	Sim
Impacto ambiental	Maior	Menor

Como medidas de mitigação do impacto ambiental da substituição parcial do cimento por filler destacam-se as seguintes:

- Controlar as propriedades reológicas e mecânicas da pasta, garantindo que a substituição parcial do cimento por filler não interfira negativamente na trabalhabilidade da pasta;

- Utilizar fillers derivados de resíduos industriais ou subprodutos da mineração, tal como o pó de calcário;
- Analisar a composição química do filler de modo a assegurar que não haja contaminantes ou impurezas que possam afetar o meio ambiente;
- Garantir que a implementação do pastefill com filler não suscite efeitos secundários, como a lixiviação de substâncias indesejadas.

[página propositadamente em branco]

Capítulo IV

Estudo Laboratorial

[página propositadamente em branco]

4. Estudo Laboratorial

Com o intuito de estudar a viabilidade da substituição parcial do cimento por filler, quer a nível de segurança, quer a nível económico, foram realizadas várias misturas no Laboratório Geotécnico da ALMINA. Após a preparação das misturas, e como forma de controlo de qualidade do pastefill, procedeu-se à pasta fresca tais como ensaio de espalhamento e ensaios de abaixamento, e ensaios de resistência à compressão uniaxial, segundo as Normas Europeias (Tabela 19).

Tabela 19 - Ensaio realizados e normas utilizadas.

Ensaio à pasta fresca	
Ensaio de abaixamento – <i>slump test</i>	NP EN 12350-2:2009
Ensaio da mesa de espalhamento	NP EN 12350-5:2009
Ensaio mecânicos	
Resistência à compressão uniaxial	NP EN 12390-3:2011

A resistência à compressão uniaxial (RCU) é normalmente estudada até aos 364 dias de cura. No entanto, tendo em conta que o estágio curricular teve a duração de quatro meses, apenas foi possível determinar a resistência até aos 56 dias de cura.

4.1. Preparação das misturas

Foram preparadas, no Laboratório Geotécnico da ALMINA, 20 misturas cuja designação e composição se encontra na Tabela 20. A designação das misturas representa a percentagem de cada constituinte da mistura, ou seja, “FI” representa a percentagem de filler na mistura, “S” representa a percentagem de sólidos e “L” a percentagem de ligante (cimento) utilizada. Por exemplo, a mistura “FI20S79L4_450” apresenta 20% de filler, 79% de sólidos, 4% de ligante e 450 ml/ton de aditivo.

Tabela 20 - Misturas realizadas no Laboratório Geotécnico (ALMINA).

Data	Designação	Sólidos %	Ligante (cimento) %	Cimento %	Filler %	Aditivo (ml/ton)
04/03/2025	FI20S79L4_450	79	4	80	20	450
05/03/2025	FI0S78L4_300	78	4	100	0	300
06/03/2025	FI15S79L4_300	79	4	85	15	300
07/03/2025	FI15S79L4_400	79	4	85	15	400
13/03/2025	FI15S79L4_450	79	4	85	15	450
14/03/2025	FI12S79L4_300	79	4	88	12	300
20/03/2025	FI12S79L4_450	79	4	88	12	450
24/03/2025	FI12S79L4_400	79	4	88	12	400
25/03/2025	FI15S79L4.5_400	79	4.5	85	15	400
26/03/2025	FI12S79L4.5_400	79	4.5	88	12	400
27/03/2025	FI20S79L4.5_400	79	4.5	80	20	400
28/03/2025	FIB20S79L4_400	79	4	80	20	400
31/03/2025	FIB15S79L4_400	79	4	85	15	400
02/04/2025	FIB12S79L4_400	79	4	88	12	400
08/04/2025	FI15S80L4.5_300	80	4.5	85	15	300
08/04/2025	FI15S80L4.5_400	80	4.5	85	15	400
09/04/2025	FI12S80L4.5_300	80	4.5	88	12	300
09/04/2025	FI12S80L4.5_400	80	4.5	88	12	400
10/04/2025	FI10S80L4.5_300	80	4.5	90	10	300
10/04/2025	FI10S80L4.5_400	80	4.5	90	10	400

Após a pesagem dos constituintes da pasta, nomeadamente a quantidade de rejeitado, de cimento, filler, água e aditivo, os mesmos foram colocados na misturadora (Figura 21). Inicialmente, adicionou-se metade do rejeitado e metade da água, a uma velocidade de rotação mais lenta durante 2min e 30seg. Em seguida, acrescentou-se a restante quantidade de rejeitado, assim como as respetivas quantidades de cimento e de filler e, por fim, adicionou-se a quantidade restante da água, misturando novamente durante 2min e 30seg, mas com uma velocidade de rotação mais elevada. Finalmente, adicionou-se o aditivo à mistura, misturando durante 3min a velocidade de rotação constante.



Figura 21 - Misturadora do Laboratório Geotécnico.

As misturas de 08/04, 09/04 e 10/04 são essencialmente as mesmas entre si, mudando apenas a percentagem de filler e a quantidade de aditivo. Assim, as quantidades dos constituintes da mistura foram determinadas com base nos cálculos efetuados com 300 ml/ton de aditivo, adicionando depois o restante do aditivo necessário para os 400 ml/ton. Para as misturas com 300 ml/ton de aditivo, encheram-se seis provetes de cada, determinando a resistência até aos 28 dias de cura. Isto

foi feito de modo a comparar os valores obtidos para diferentes quantidades de aditivo utilizadas, mas mantendo as mesmas quantidades de rejeitado, cimento, filler e água.

Após a preparação da mistura, foi realizada a verificação da densidade da mistura de pasta, recorrendo à Balança de Marcy (Figura 22) e ao *slump test*.

A utilização da balança permitiu determinar a densidade da mistura e a percentagem de sólidos, enquanto o *slump test* permitiu obter informações sobre a fluidez e trabalhabilidade da pasta. Já o ensaio de resistência à compressão uniaxial, que é o único que requer a preparação de provetes, permitiu verificar a resistência da pasta.

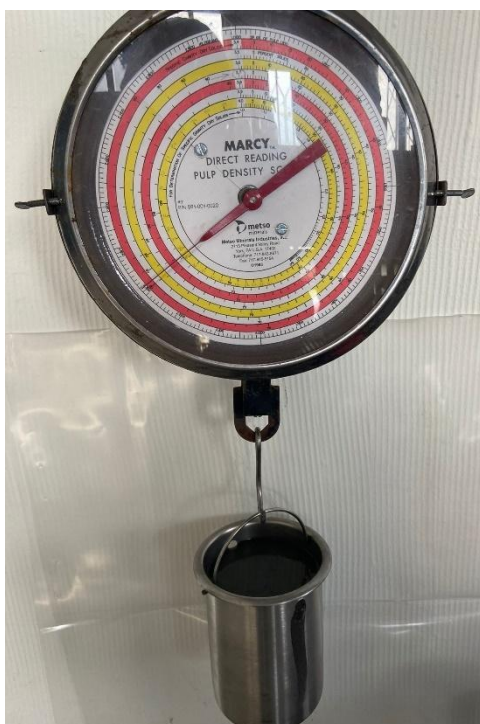


Figura 22 - Balança de Marcy.

4.2. Preparação dos provetes

De modo a conter a pasta e permitir a drenagem de água em excesso, os provetes de aço são preparados utilizando serrapilheira na base presa com braçadeiras de plástico. Após a medição na Balança de Marcy e do ensaio *slump*, encheram-se, com auxílio de um funil de aço, 24 provetes, colocando-os em bandejas até secarem. O processo de cura demora entre 5 a 7 dias, podendo variar consoante condições externas como a temperatura e a humidade, tendo sido feitos, por isso, em ambiente controlado.

O desmolde dos provetes cilíndricos ocorreu após o endurecimento dos mesmos com recurso à prensa (Figura 23), sendo cortados à medida na máquina de corte (Figura 24) e embalados a vácuo em sacos com três provetes cada. Os sacos foram armazenados na câmara húmida, visando preservar o teor de humidade e recriar as condições de cura no interior dos desmontes.



Figura 23 – Prensa de desmolde do Laboratório Geotécnico.



Figura 24 - Máquina de corte do Laboratório Geotécnico.

4.3. Ensaio de abaixamento – *slump test*

O ensaio de abaixamento, *slump test*, foi realizado de acordo com a norma do betão fresco: NP EN 12350-2:2009. O ensaio consistiu em colocar o molde no centro da placa/superfície, após estes serem humedecidos. O enchimento do molde foi realizado por camadas, seguido pela compactação com recurso a um varão de compactação. De seguida, procedeu-se à medição da altura do abaixamento. A Figura 25 representa o exemplo de um dos ensaios de abaixamento realizado no Laboratório Geotécnico da empresa.



Figura 25 – Exemplo de ensaio de abaixamento (*slump*).

Foram realizados ensaios de abaixamento para o total de misturas concretizadas, tendo sido feitos 20 ensaios.

4.4. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado segundo a norma europeia NP EN 12350-5:2009. À semelhança do ensaio anterior, o molde, devidamente humedecido, é preenchido pela mistura, seguindo-se a sua compactação. Posteriormente, o molde foi retirado com cuidado e mediu-se o espalhamento da pasta (Figura 26). Na ALMINA, o intervalo de referência para os valores de espalhamento situam-se na ordem dos 180-235 mm.



Figura 26 – Exemplo ensaio de espalhamento.

Tal como no ensaio anterior, foram realizados ensaios de espalhamento para o total de misturas concretizadas, num total de 20 ensaios.

4.5. Resistência à compressão uniaxial (RCU)

O ensaio da resistência à compressão uniaxial, realizado segundo a norma europeia NP EN 12390-3:2011, permite fazer o controlo de qualidade do pastefill. Foram realizados ensaios de RCU para as 20 misturas realizadas, cada uma com 24 provetes de pasta, obtendo um total de 480 provetes. No entanto, tendo em conta a duração do estágio, apenas foram ensaiados 222 provetes.

O ensaio consistiu em submeter os provetes cilíndricos, com faces regulares e lisas, até à respetiva rotura. Cada provete tem 110 mm de altura, isto é, o dobro do respetivo diâmetro, que é de 55 mm. A resistência à compressão uniaxial é obtida pela equação 11.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [11]$$

Onde,

σ – valor de compressão uniaxial (Pa)

F – força aplicada ao provete (N)

A – área da secção onde foi aplicada a força (m²)

Foi utilizada uma prensa S205N Unitronic (50 kN) da Matest, mais sensível e precisa para obter resultados mais fidedignos (Figura 27). A prensa possui dois pratos ajustáveis, em que a deformação axial e a força axial aplicada no provete ensaiado podem ser lidos no *software* de leitura acoplado ao equipamento.



Figura 27 – Prensa S205N Unitronic (50kN).

As roturas dos provetes podem ser satisfatórias (Figura 28) ou não satisfatórias (Figura 29). As roturas consideradas não satisfatórias podem ter sido provocadas por um posicionamento errado do provete, considerando-se esse provete como não válido.

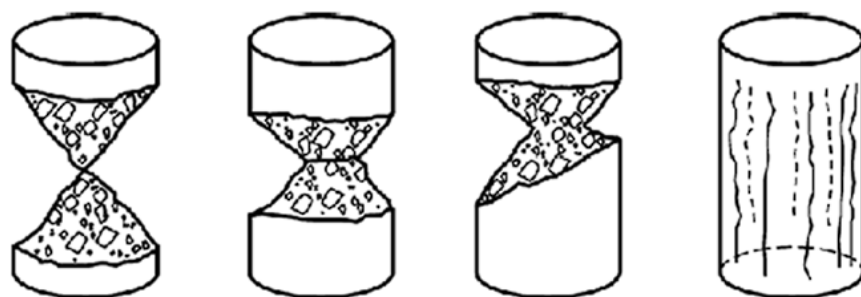


Figura 28 - Roturas satisfatórias dos provetes (NP EN 12390-3:2011).

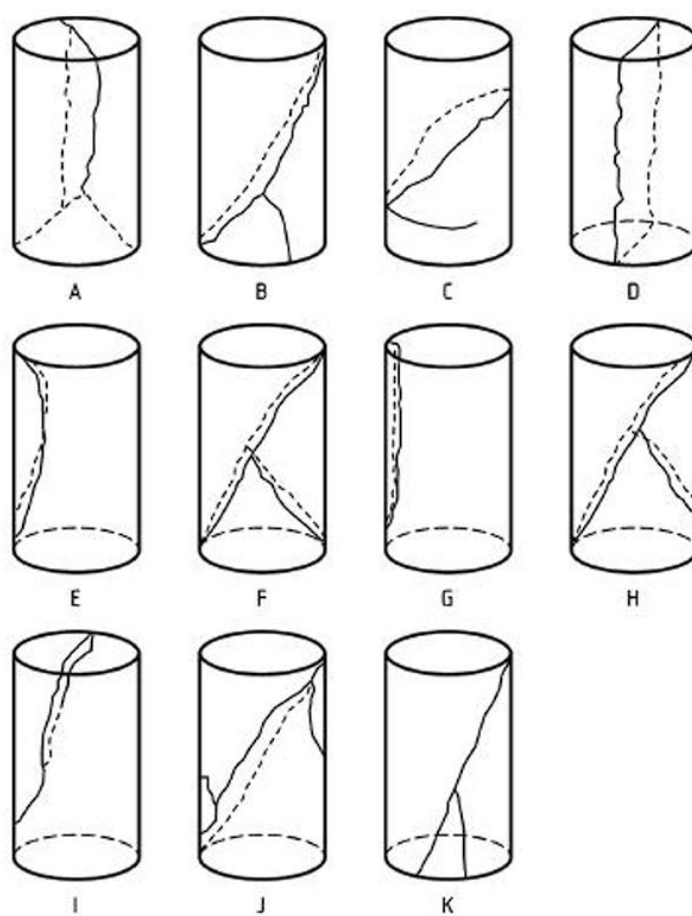


Figura 29 - Rotura não satisfatória dos provetes (NP EN 12390-3:2011).

[página propositadamente em branco]

Capítulo V

Discussão de resultados

[página propositadamente em branco]

5. Discussão de resultados

Neste capítulo apresentam-se todos os resultados obtidos nos ensaios realizados, de acordo com as misturas de pasta realizadas.

Foram realizados os ensaios de abaixamento, de espalhamento e de resistência à compressão uniaxial. Este último foi estudado desde os 7 aos 56 dias de cura. A comparação de resultados foi feita com base em gráficos de barras de forma a acompanhar a evolução da resistência ao longo do tempo de cura.

5.1. Ensaios da pasta fresca

5.1.1. Ensaios de abaixamento (*slump*) e de espalhamento

Na ALMINA o ensaio de espalhamento é o ensaio utilizado no controlo de qualidade da pasta, uma vez que permite determinar a fluidez e trabalhabilidade da pasta. Ainda assim, a Tabela 21 representa os valores obtidos no ensaio de abaixamento das misturas realizadas.

Tal como referido, foram realizadas 20 misturas de pasta, ou seja, realizaram-se 20 ensaios de abaixamento e 20 ensaios de espalhamento.

Tabela 21 - Valores obtidos do ensaio de abaixamento (*slump*).

Data	Designação	Slump (mm)
04/03/25	FI20S79L4_450	65
05/03/25	FI0S78L4_300	60
06/03/25	FI15S79L4_300	40
07/03/25	FI15S79L4_400	55
13/03/25	FI15S79L4_450	60
14/03/25	FI12S79L4_300	50
20/03/25	FI12S79L4_450	50
24/03/25	FI12S79L4_400	20
25/03/25	FI15S79L4.5_400	67
26/03/25	FI12S79L4.5_400	72
27/03/25	FI20S79L4.5_400	75
28/03/25	FIB20S79L4_400	60
31/03/25	FIB15S79L4_400	29
02/04/25	FIB12S79L4_400	65
08/04/25	FI15S80L4.5_300	65
08/04/25	FI15S80L4.5_400	70
09/04/25	FI12S80L4.5_300	50
09/04/25	FI12S80L4.5_400	60
10/04/25	FI10S80L4.5_300	50
10/04/25	FI10S80L4.5_400	65

Os valores obtidos no ensaio de espalhamento estão representados pela Tabela 22.

Tabela 22 – Valores obtidos do ensaio de espalhamento.

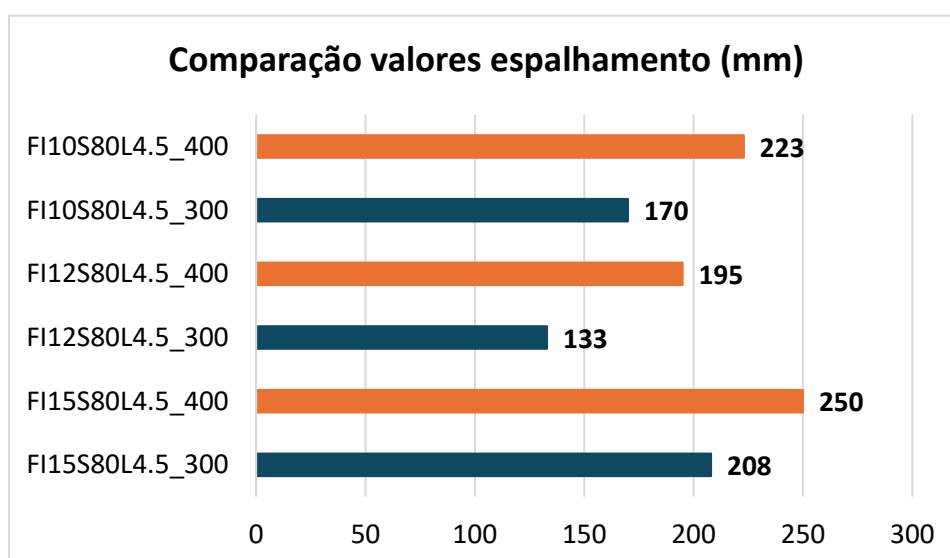
Data	Designação	Espalhamento (mm)
04/03/25	FI20S79L4_450	220
05/03/25	FI0S78L4_300	198
06/03/25	FI15S79L4_300	128
07/03/25	FI15S79L4_400	185
13/03/25	FI15S79L4_450	200
14/03/25	FI12S79L4_300	155
20/03/25	FI12S79L4_450	113
24/03/25	FI12S79L4_400	95
25/03/25	FI15S79L4.5_400	265
26/03/25	FI12S79L4.5_400	368
27/03/25	FI20S79L4.5_400	333
28/03/25	FIB20S79L4_400	195
31/03/25	FIB15S79L4_400	95
02/04/25	FIB12S79L4_400	205
08/04/25	FI15S80L4.5_300	208
08/04/25	FI15S80L4.5_400	250
09/04/25	FI12S80L4.5_300	133
09/04/25	FI12S80L4.5_400	195
10/04/25	FI10S80L4.5_300	170
10/04/25	FI10S80L4.5_400	223

Os valores de referência para o ensaio de espalhamento utilizados pela empresa situam-se no intervalo 180-230 mm, ou seja, valores demasiado abaixo ou demasiado acima deste devem ser desconsiderados. Assim, na tabela estão marcados a *bold* os ensaios das amostras que não foram considerados. Um valor demasiado baixo de espalhamento significa que a pasta apresenta uma consistência demasiado alta, resultando numa trabalhabilidade baixa, dificultando o escoamento

da pasta nas tubagens do sistema de reticulado da mina, podendo mesmo levar a um entupimento destas. Já um valor exorbitante do espalhamento pode revelar uma elevada fluidez da pasta, ou seja, elevada quantidade de água presente, podendo fazer com que o material fino fique concentrado na parte inferior da tubagem, dificultando a operação de enchimento. Daí ser importante o uso do aditivo nas misturas de pasta, dado que oferece uma maior homogeneidade.

Os valores de espalhamento relativos às seis últimas misturas (Gráfico 1) foram analisados com maior detalhe, por se tratar daquelas que revelaram um desempenho mais favorável no que diz respeito a este ensaio, assim como no ensaio da resistência à compressão uniaxial, como será demonstrado no subcapítulo seguinte.

Gráfico 1 - Comparação valores de espalhamento em misturas com diferente percentagem de filler e aditivo.



5.2. Ensaios da pasta endurecida

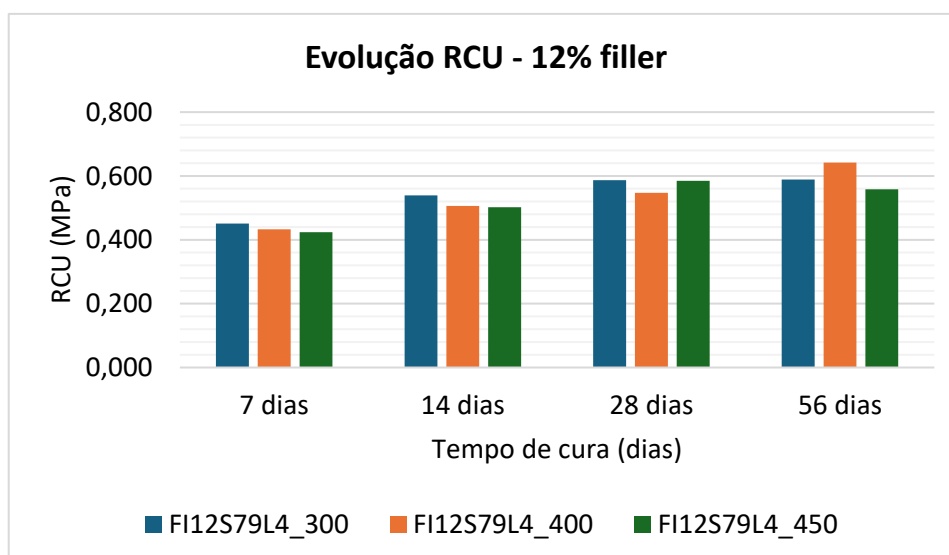
5.2.1. Resistência à compressão uniaxial (RCU)

Os provetes foram submetidos a ensaios de resistência à compressão uniaxial, de forma a verificar se atingiriam 0.800 MPa de resistência mínima aos 28 dias. Apenas as seis últimas misturas cumpriram este requisito, sendo que algumas delas já apresentavam valores satisfatórios aos 14 dias de cura.

De uma forma geral, as misturas com maior percentagem de ligante e de sólidos são as que apresentam melhores resultados de resistência, como seria de esperar. Tal como referido anteriormente, e com o objetivo de comparar a evolução da resistência à compressão uniaxial da pasta ao longo do tempo de cura, foram elaborados gráficos de barras considerando diferentes combinações. Assim, foram analisadas misturas com a mesma percentagem de filler e diferentes teores de aditivo; misturas com a mesma percentagem de filler, mas diferentes quantidades de cimento e aditivo e, ainda, misturas cujo teor de aditivo é o mesmo, mas para diferentes percentagens de filler. Para cada mistura realizada foram ensaiados 3 provetes para cada tempo de cura.

Primeiramente compararam-se as misturas com a mesma percentagem de filler, de sólidos e de cimento, mas cujos teores de aditivos são diferentes. O Gráfico 2 representa essa mesma comparação.

Gráfico 2 – Evolução RCU com 12% de filler.



A análise do gráfico permite verificar que, aos 7 dias de cura, os valores de resistência à compressão uniaxial são semelhantes para as três misturas.

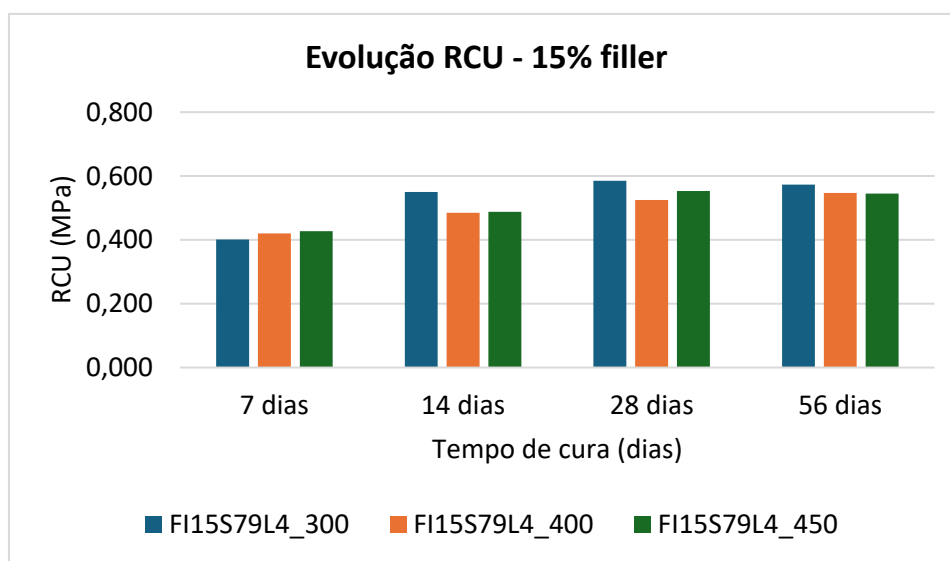
Tanto aos 14 como aos 28 dias é possível destacar a mistura com 300 ml/ton de aditivo como sendo a única que apresenta os valores mais elevados de RCU.

No entanto, aos 56 dias a mistura com 400 ml/ton de aditivo foi a que exibiu uma subida mais significativa dos valores de RCU, enquanto que a mistura com 450 ml/ton de aditivo sofreu uma queda nos valores da resistência.

De uma forma geral, observa-se uma tendência de aumento na RCU nas misturas com 300 e 400 ml/ton de aditivo, embora nenhuma delas tenha atingindo o requisito de resistência mínima de 0.800 MPa aos 28 dias.

O Gráfico 3 representa a comparação dos valores de RCU para as misturas com 15% de filler e teores crescentes de aditivo.

Gráfico 3 – Evolução RCU com 15% de filler.

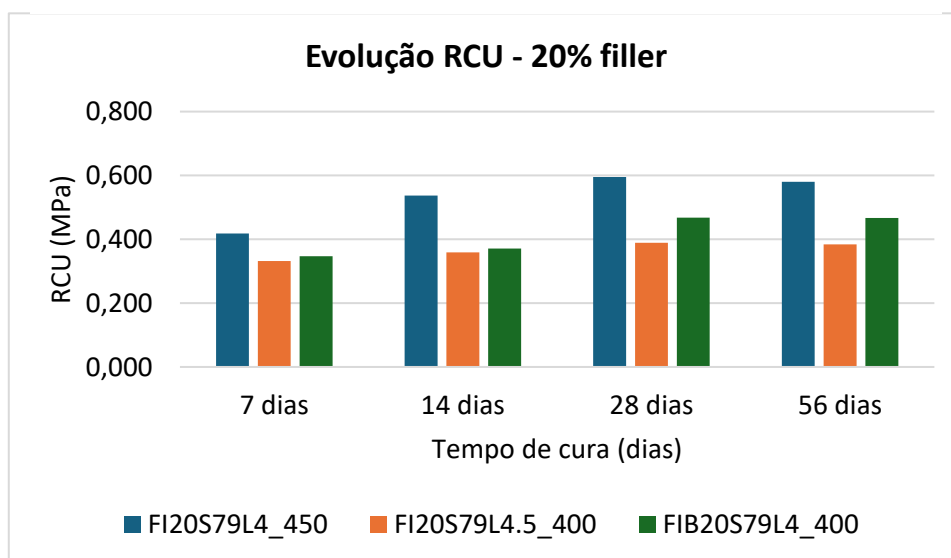


Observa-se que aos 7 dias, embora os valores de RCU não variem muito, há uma tendência de aumento com o acréscimo da quantidade de aditivo. À semelhança da mistura analisada anteriormente, também a mistura com 300 ml/ton de aditivo registou os valores mais elevados de RCU aos 14 e 28 dias em comparação com as restantes, sofrendo, no entanto, uma redução aos 56 dias de cura, ainda que pouco significativa. Já aos 56 dias de cura, tanto a mistura com 300 ml/ton de aditivo como a de 450 ml/ton revelaram uma diminuição pouco significativa nos valores de RCU. De salientar que, apesar de nenhuma das misturas tenha cumprido o valor alvo de RCU aos 28 dias,

a mistura designada “FI15S79L4_400” foi a que evidenciou um aumento contínuo ao longo do tempo de cura estudado.

O Gráfico 4 apresenta a comparação para misturas com 20% de filler. Com a intenção de avaliar o desempenho do filler utilizado, foi feita uma mistura com um outro tipo de filler, designado por filler B, do Grupo Parapedra, aumentando também a percentagem de ligante, mas mantendo a quantidade de aditivo (400 ml/ton) de modo a verificar a influência destes fatores nos valores de RCU.

Gráfico 4 – Evolução do RCU com 20% de filler.



Pela análise do gráfico, é possível aferir que, contrariamente ao que se esperava, a mistura “FI20S79L4.5_400” foi a que apresentou os resultados de RCU mais baixos ao longo de todo o tempo de cura, provavelmente influenciados pela heterogeneidade da pasta, uma vez que o valor do ensaio de espalhamento foi extremamente elevado (333 mm), podendo indicar excesso de água na mistura, dificultando a compactação da pasta. Da mesma forma, a razão água/cimento (A/C) tem influência na resistência do betão e, por consequência, na resistência da pasta. Em comparação com a mistura “FIB20S79L4_400” realizada com o outro tipo de filler, esta foi a que apresentou valores mais satisfatórios, mesmo que com uma percentagem inferior de ligante. De um modo geral a mistura “FI20S79L4_450” foi a que mostrou valores mais elevados de RCU, sofrendo apenas uma ligeira redução aos 56 dias. Contudo, tal quantidade de aditivo pode tornar o enchimento economicamente desfavorável.

Em seguida, apresentam-se os gráficos destinados à comparação das misturas com o mesmo teor de aditivo (400ml/ton), cujas percentagens de filler são iguais, variando o tipo de filler utilizado e

as percentagens de ligante e de sólidos. O Gráfico 5 representa a comparação para misturas com 12% de filler e o Gráfico 6 representa a comparação das misturas com 15% de filler.

Gráfico 5 – Comparação de misturas com 12% de filler e 400 ml/ton de aditivo.

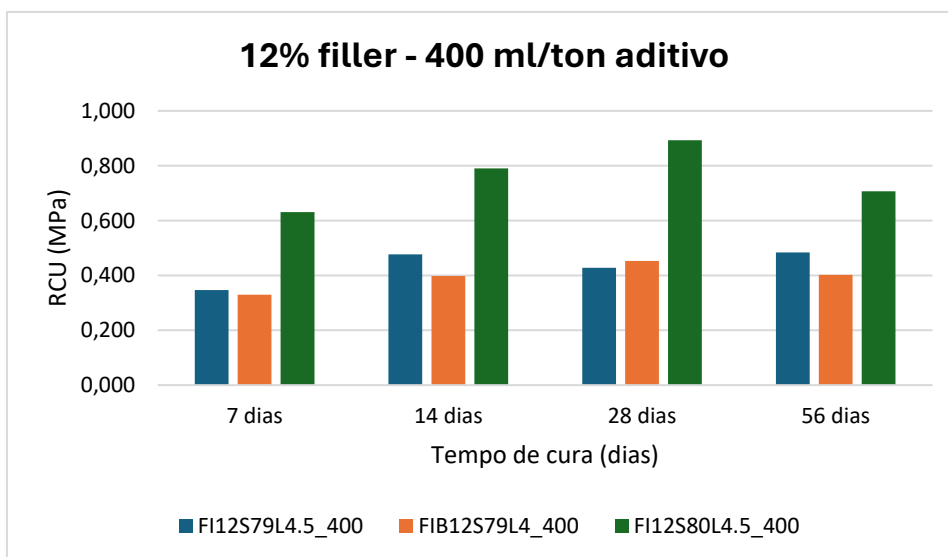
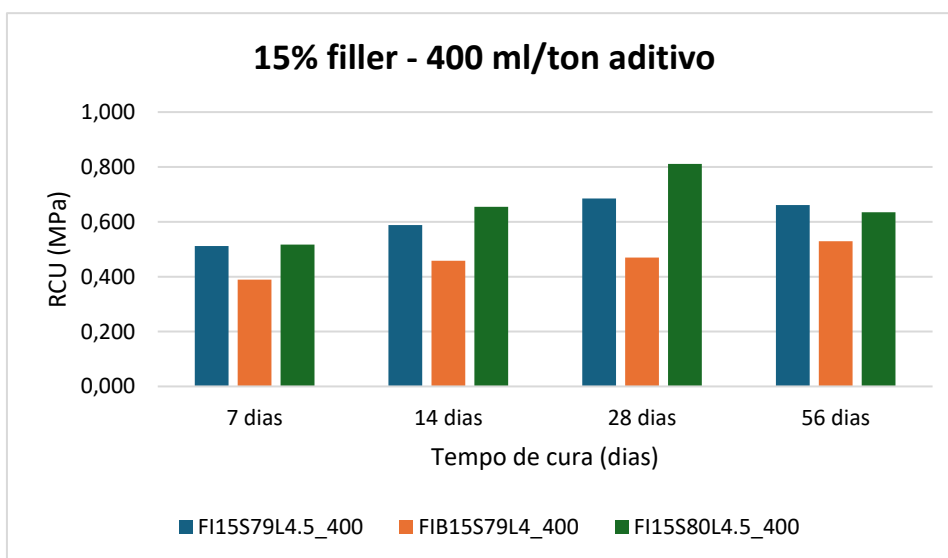
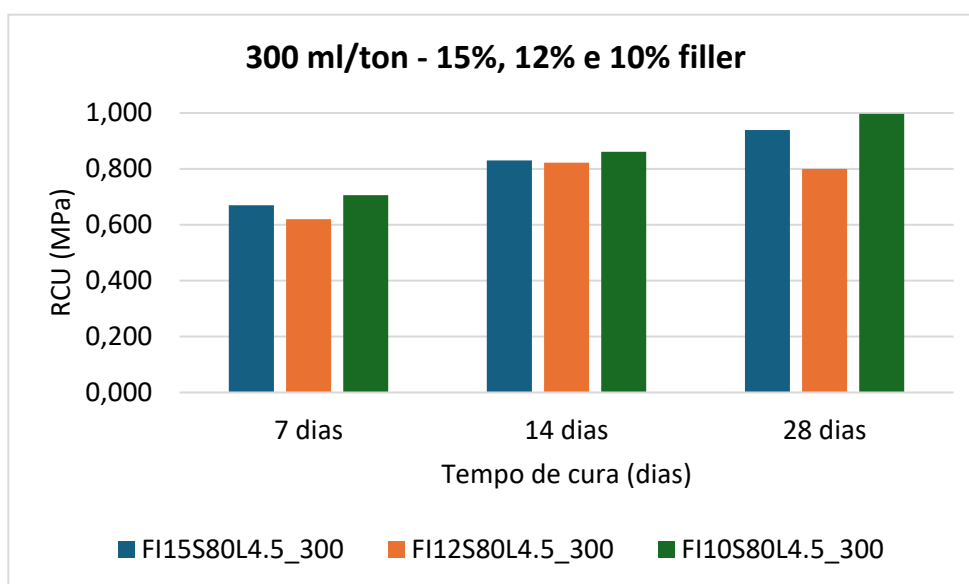


Gráfico 6 – Comparação de misturas com 15% de filler e 400 ml/ton de aditivo.



Observando os gráficos, torna-se possível concluir que as misturas com maior percentagem de sólidos e ligante, isto é, as misturas “FI15S80L4.5_400” e “FI12S80L4.5_400” são as que se destacam com valores mais elevados de RCU, atingindo o valor alvo aos 28 dias de cura. No entanto, e de um ponto de vista geral, o expectável seria obter resultados mais satisfatórios nas misturas com menor percentagem de filler (12%), o que não se verifica. Tal facto pode estar associado a um possível erro aquando da execução das misturas. O mesmo se constata na comparação das misturas com 300 ml/ton de aditivo, mas com diferentes percentagens de filler (15%, 12% e 10%), como evidente no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Comparação das misturas com 300 ml/ton de aditivo para 15%, 12% e 10% de filler.



Das vinte misturas de pasta realizadas, as seis últimas revelaram-se como as mais satisfatórias, sendo que algumas delas atingiram o requisito de resistência mínima já aos 14 dias (Tabela 23). Analisando a tabela, é possível aferir que, de um ponto de vista geral, as misturas com 300 ml/ton de aditivo apresentam melhores resultados que as misturas com 400 ml/ton. À partida esperar-se-ia que uma maior quantidade de aditivo melhorasse o desempenho, sobretudo por oferecer maior trabalhabilidade à mistura. No entanto, uma quantidade excessiva de aditivo pode resultar na dispersão excessiva das partículas de cimento, aumentando a quantidade de água livre na mistura e comprometendo a coesão do material.

Vale destacar que alguns dos valores de RCU podem ter sido derivados do facto de a câmara húmida do Laboratório Geotécnico ter estado inativa durante um período de cerca de três semanas, dificultando o processo de hidratação e carbonatação do cimento. Uma outra explicação para a

descida dos valores de RCU centra-se num possível ataque de agentes corrosivos, resultando numa cura inadequada dos provetes, influenciando a sua resistência.

Tabela 23 - Valores obtidos do espalhamento e RCU das seis últimas misturas.

Data	Designação	Espalhamento (mm)	RCU			
			7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
08-04-2025	FI15S80L4.5_300	208	0.670	0.830	0.939	-
08-04-2025	FI15S80L4.5_400	250	0.517	0.655	0.811	0.635
09-04-2025	FI12S80L4.5_300	133	0.620	0.822	0.800	-
09-04-2025	FI12S80L4.5_400	195	0.631	0.790	0.893	0.707
10-04-2025	FI10S80L4.5_300	170	0.706	0.861	0.997	-
10-04-2025	FI10S80L4.5_400	223	0.588	0.778	0.847	0.632

De modo geral verificou-se um decréscimo da resistência dos 28 para os 56 dias de cura, devendo-se ao facto do rejeitado de cobre conter, na sua constituição, sulfuretos, com possível formação de sulfatos e, assim, influenciar negativamente a resistência.

Os gráficos referentes à evolução de RCU de cada mistura de pasta encontram-se no Anexo I.

No que diz respeito à comparação de custos entre o cimento e o filler, a Tabela 24 representa o custo (€/ton) consoante as proporções utilizadas de cimento e filler nas misturas.

Tabela 24 – Custo (€/ton) consoante as proporções de cimento e filler utilizadas.

Cimento (%)	Filler (%)	Custo (€/ton)
100	0	154.90
80	20	133.52
85	15	138.87
88	12	142.07
90	10	144.21

Sabendo que, atualmente, o custo do cimento Portland utilizado na ALMINA e fornecido pela Secil é de 154.90 €/ton, sendo que estão incluídos os custos de transporte e que o custo do filler utilizado (do Grupo Omya) é de 48.00 €/ton, também com os custos de transporte inclusos, conclui-se que, a nível económico, a substituição parcial de cimento por filler pode reduzir significativamente os custos da pasta de enchimento.

Capítulo VI

Conclusões e Perspetivas Futuras

[página propositadamente em branco]

6. Conclusões e Perspetivas Futuras

A presente dissertação teve como principal objetivo estudar a viabilidade da substituição parcial do cimento por filler no enchimento por pasta (pastefill) aplicado no método '*Sublevel Stopping*', nas minas de Aljustrel, geridas pela ALMINA – Minas do Alentejo S.A. Este estudo assentou na necessidade crescente da indústria mineira de adotar práticas mais sustentáveis e, assim, reduzir custos operacionais e o impacto ambiental associado à exploração subterrânea.

No que diz respeito a metodologias adotadas, foram preparadas 20 misturas de pasta, variando as percentagens de filler, sólidos, ligante (cimento) e aditivo. Os materiais utilizados incluíram rejeitado de cobre proveniente dos jazigos de Feitais e Moinho, água industrial reciclada, cimento Portland tipo II/A-L 42.5R, filler e aditivo. Estas misturas foram submetidas a ensaios de abaixamento (*slump*), espalhamento e resistência à compressão uniaxial (RCU), sendo os dados obtidos comparados entre si com base nas exigências da empresa para a pasta de enchimento.

O ensaio de espalhamento é crucial no controlo de qualidade do pastefill, cujo intervalo de referência se situa nos 180-230 mm, de forma a garantir fluidez e trabalhabilidade da pasta. Valores demasiado abaixo ou demasiado acima deste intervalo podem causar entupimentos no sistema de tubagens do reticulado ou segregação.

Os resultados demonstraram que a substituição parcial do cimento por filler é tecnicamente viável, sobretudo nas misturas com 10%, 12% e 15% de filler, que apresentaram uma boa trabalhabilidade e alcançaram o requisito de resistência à compressão uniaxial mínima de 0.800 MPa aos 28 dias (Tabela 25).

Tabela 25 – Valores de espalhamento e de RCU das misturas mais favoráveis.

Data	Designação	Cimento (%)	Filler (%)	Espalhamento (mm)	RCU			
					7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
08-04-2025	FI15S80L4.5_400	85	15	250	0.517	0.655	0.811	0.635
09-04-2025	FI12S80L4.5_300	88	12	133	0.620	0.822	0.800	-
09-04-2025	FI12S80L4.5_400	88	12	195	0.631	0.790	0.893	0.707
10-04-2025	FI10S80L4.5_300	90	10	170	0.706	0.861	0.997	-
10-04-2025	FI10S80L4.5_400	90	10	223	0.588	0.778	0.847	0.632

Estas misturas cumpriram os critérios exigidos pela ALMINA nos desmontes, garantindo a segurança dos operadores e oferecendo estabilidade estrutural ao maciço e envolvente, essencial para evitar o fenómeno de diluição aquando da exploração de blocos alternados.

As misturas com maior percentagem de ligante e sólidos exibiram, como esperado, melhores resultados de resistência. Curiosamente, a nível geral, as misturas com 300 ml/ton de aditivo apresentaram melhores valores de RCU do que as com 400 ml/ton, sugerindo que uma quantidade excessiva de aditivo pode resultar na dispersão das partículas de cimento, aumentando a quantidade de água livre e comprometendo a coesão do material.

Observou-se ainda um decréscimo da resistência dos 28 para os 56 dias de cura em praticamente todas as misturas. Este facto pode ser atribuído à presença de sulfuretos nos rejeitados de cobre, que podem formar sulfatos e influenciar negativamente a resistência da pasta ao reagir e quebrando as ligações do cimento formadas durante a sua hidratação. A inatividade da câmara húmida durante um período de 3 semanas também pode ter dificultado o processo de hidratação do cimento, contribuindo para uma cura inadequada dos provetes.

Economicamente falando, a substituição parcial de cimento por filler mostrou ser vantajosa, reduzindo significativamente os custos da pasta de enchimento, mas sem comprometer o desempenho do enchimento, desde que as proporções de cimento e filler sejam adequadas. Do ponto de vista ambiental, a produção de cimento Portland consiste numa das principais causas das emissões de CO₂, tornando esta substituição um passo importante no que diz respeito à redução dessas emissões e do consumo energético associado, assim como da quantidade de resíduos enviados para aterro, promovendo práticas mais sustentáveis na indústria mineira.

Com o intuito de, futuramente, serem obtidos resultados mais concretos e precisos, recomenda-se aumentar o estudo da resistência dos provetes de pasta a longo prazo, de forma a verificar a variação de valores, ou seja, se aumentam ou diminuem significativamente, ou se são afetados por reações químicas ao longo do tempo de cura. Sugere-se ainda realizar ensaios para determinar a

viscosidade das misturas de pasta, de forma a caracterizar a pasta quanto às suas características de escoamento.

Para além disso, é recomendado realizar-se estudos específicos sobre a mineralogia do rejeitado, nomeadamente o impacto que os sulfuretos podem ter na durabilidade e resistência da pasta, assim como proceder a estudos mais aprofundados sobre a dosagem adequada de aditivo para otimizar a trabalhabilidade da pasta. Para terminar, sugere-se ainda explorar diferentes tipos e percentagens de filler em estudos futuros sobre este tema, avaliando o impacto que estes possam apresentar.

[página propositadamente em branco]

Capítulo VII
Referências

[página propositadamente em branco]

7. Referências

ALMINA - Minas do Alentejo, S. (s.d.). Obtido em 10 de março de 2025, de [https://www.almina.pt/Atlas Copco](https://www.almina.pt/AtlasCopco). (2007). Mining Methods in Underground Mining (2ª ed.). Obtido em 10 de março de 2025

Barriga, F.J.A.S., Carvalho, D., Ribeiro, A. (1997). Introduction to the Iberian Pyrite Belt. In: Barriga, F.J.A.S., Carvalho, D. (eds.). Geology and VMS deposits of the Iberian Pyrite Belt. Society of Economic Geologists Neves Corvo Field Conference, Guidebook Series, 27: 1-20.

Belem, T., & Benzaazoua, M. (2007). Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology. p. 29. Obtido em 10 de abril de 2025

Brady, B.H., & Brown, E.T. (2004). Rock mechanics for underground mining. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers.

Cardoso, D.J. (2024). Análise de estabilidade de bancadas subterrâneas exploradas pelo método 'Sublevel Stopping Bench & Fill'. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Dissertação de Mestrado. URI: <http://hdl.handle.net/10400.22/26525>

Carvalho, A.L. (2018). Caracterização de pasta de enchimento de desmontes numa extração de sulfuretos polimetálicos. Universidade Nova de Lisboa. Dissertação de Mestrado. URI: <http://hdl.handle.net/10362/59489>

Carvalho, J. (2014). Variação da resistência e da deformabilidade do enchimento com o tempo. Instituto Superior Técnico, Lisboa. Dissertação de Mestrado. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/megm/dissertacao/283828618788903>

Copco, A. (2007). Mining methods in underground mining. 2nd edition. Atlas Copco. [https://miningandblasting.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/09/mining_methods_underground_mining.pdf]

Costa, C.M., Naccache, M.F., Varges, P. (2017). Caracterização reológica de fluidos complexos. Revista Brasileira de Iniciação Científica, 4(7): 3–28.

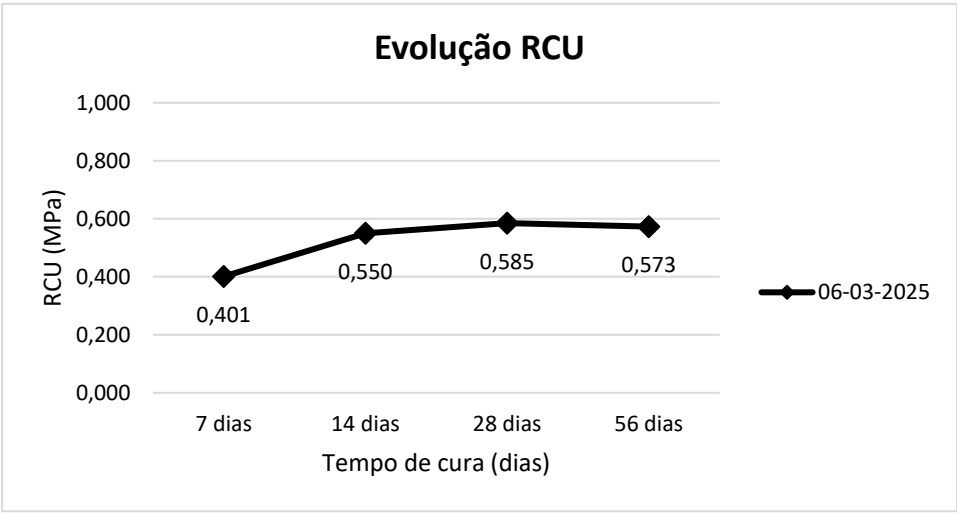
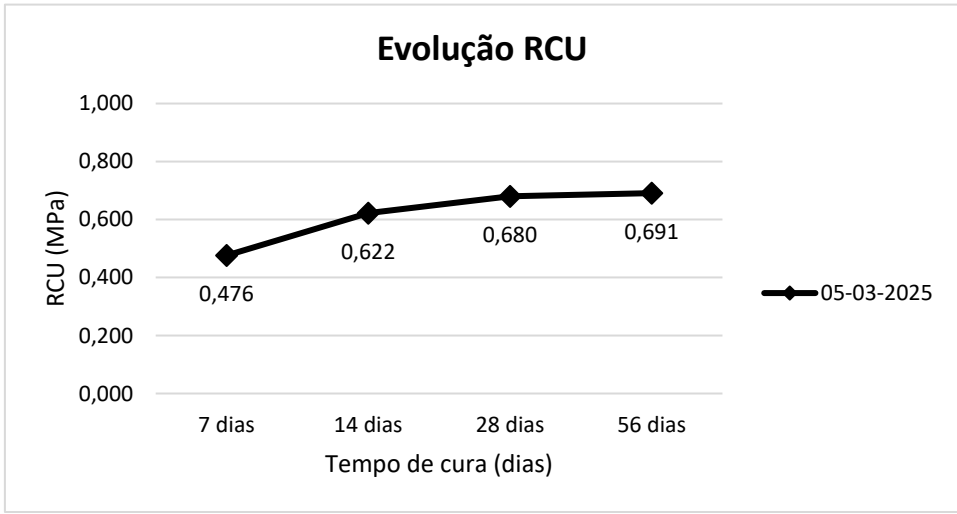
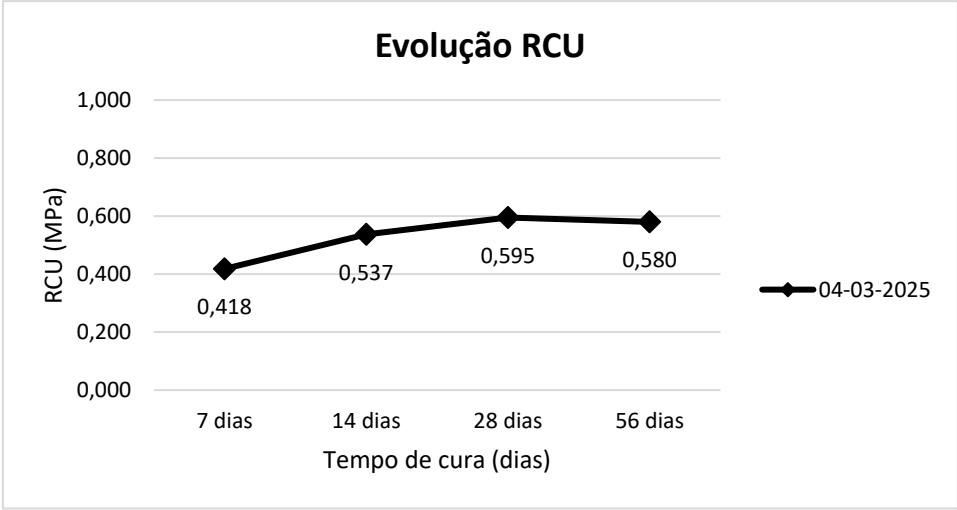
Costa, P. (2017). Modelação geológica e de teores do depósito mineral de Feitais, mina de Aljustrel. Universidade Nova de Lisboa. Dissertação de Mestrado. URI: <http://hdl.handle.net/10362/25831>

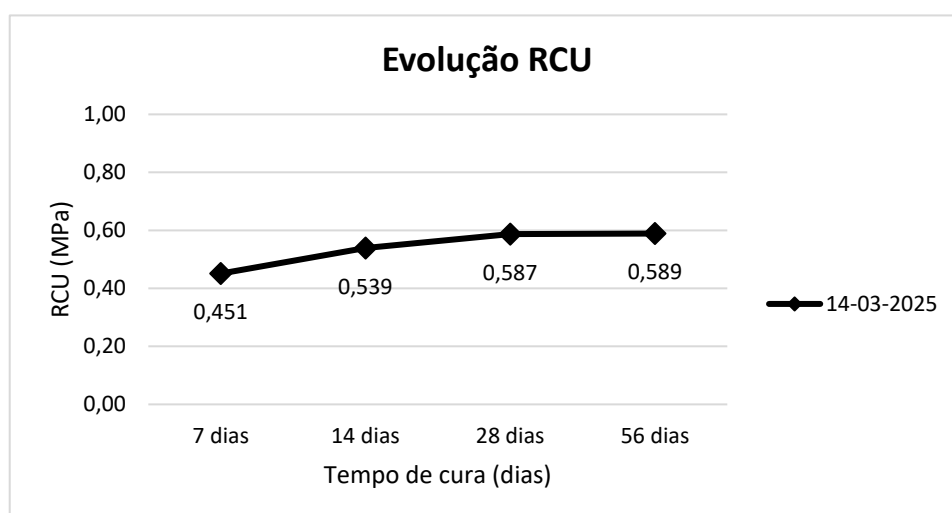
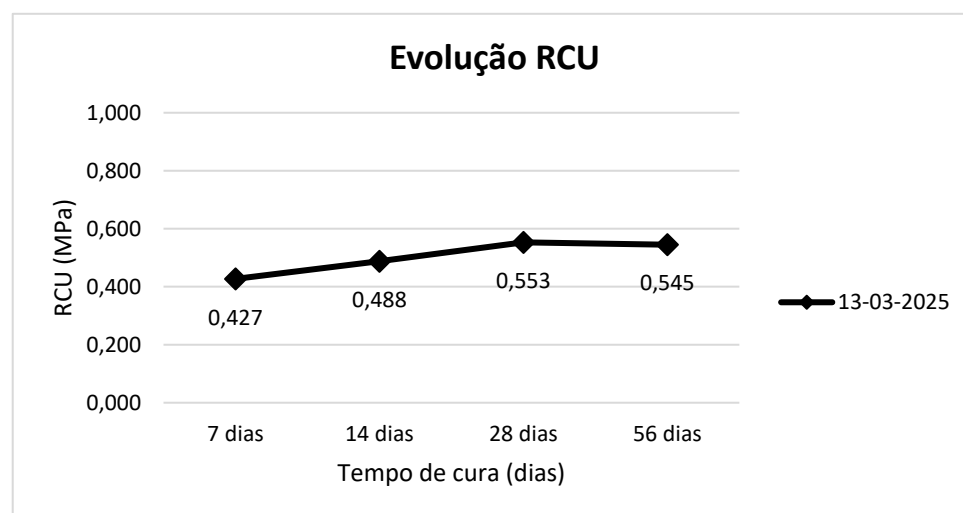
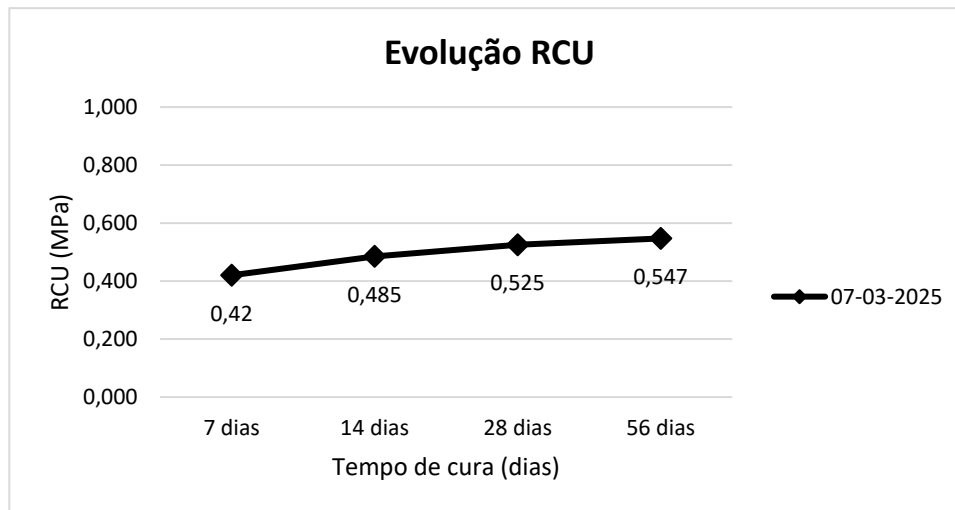
- Ferreira, T.E. (2015). Geomecânica aplicada à estabilidade de explorações mineiras 'bench and fill': o caso do jazigo de Feitais, Minas de Aljustrel. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Dissertação de Mestrado. URI: <http://hdl.handle.net/10400.22/7075>
- Fortunato, M.; Martins, B.; Casali, J.M.; Collodetti, G.; Betioli, A.M. (2019). Estudo da substituição de cimento Portland pelo fino de britagem em argamassa auto-adensável. Revista Técnico-Científica CREA-PR, Brasil, p. 1-10.
- Gomes, M.A. (2019). Caracterização e propostas de otimização de operações do método de desmonte 'up-hole & fill' na mina de Neves-Corvo. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Mestrado.
- Gomes, T. (2016). Estudo da estabilidade de portas de enchimento: Caso de estudo da mina da Somincor. Instituto Superior Técnico, Lisboa. Dissertação de Mestrado. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/megm/dissertacao/846778572211663>
- Hu, J.; Ding, X.; Ren, Q.; Luo, Z.; Jiang, Q. (2019). Effect of Incorporating Waste Limestone Powder into Solid Waste Cemented Paste Backfill Material. Applied Sciences, MDPI, 9:2076. <https://doi.org/10.3390/app9102076>
- Maia, L. (2019). Estudo de melhoria da resistência à compressão uniaxial de enchimento de mina tipo pastefill da mineração Caraíba S/A. Recife, Brasil. Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. Dissertação de Mestrado. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/38327>
- Miranda, M. (2016). Contribuição para a determinação do estado de tensão no enchimento mineiro através da medição das ondas sísmicas. Instituto Superior Técnico, Lisboa. Dissertação de Mestrado. https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/JoXiUcxQ3YtK2ky8Fr7F00zVbw_eFlprE3XJ?lang=pt
- Nascimento, I.C. (2020). Otimização do avanço de frentes (ou galerias) em desmontes subterrâneos. Instituto Superior Técnico, Lisboa. Dissertação de Mestrado.
- Sá, C. (2011). Métodos elétricos para estudo da presa do cimento. Universidade de Aveiro. Dissertação de Mestrado (Engenharia Física).
- Santos, L.M. (2020). Caracterização geoquímica, mineralógica, textural e paragenética da alteração hidrotermal e mineralização na massa de Estação (Aljustrel) e sua comparação com a massa de Feitais. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Dissertação de Mestrado. URI: <http://hdl.handle.net/10451/45266>
- Sequeira, E.M., Ghisleni, G. (2020). A influência da adição de filler calcário em substituição parcial ao cimento em argamassa estabilizada de revestimento de paredes e tetos. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, 9: 20-38. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e0202020-38>
- Sheshpari, M. (2015). A review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 20(13):5183-5208.
- Tamrock (1997). Underground drilling and loading handbook. Tamrock.
- Villaroel, M.A. (2015). Método de explotación 'bench & fill' y su aplicación en minera Michilla. Universidade de Chile Santiago de Chile. Memória para optar al título ingeniero civil e minas. URI: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134586>

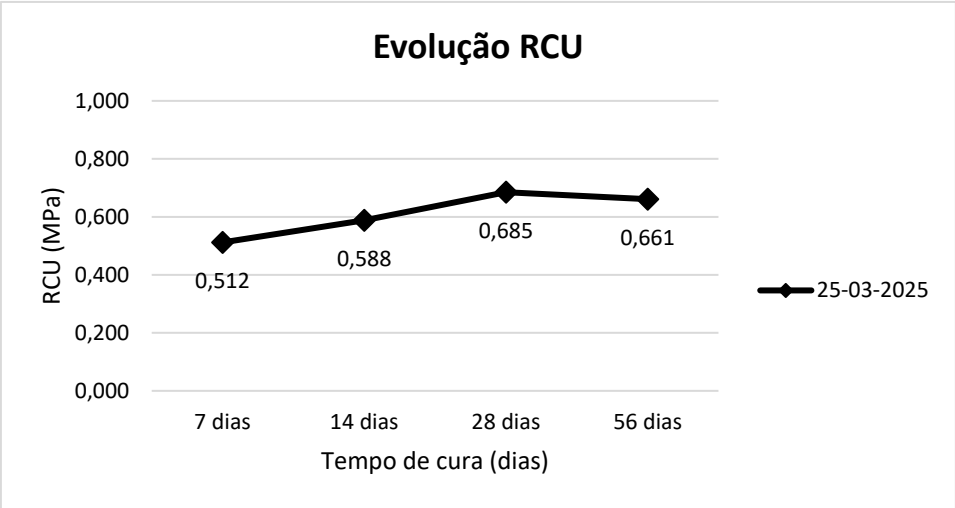
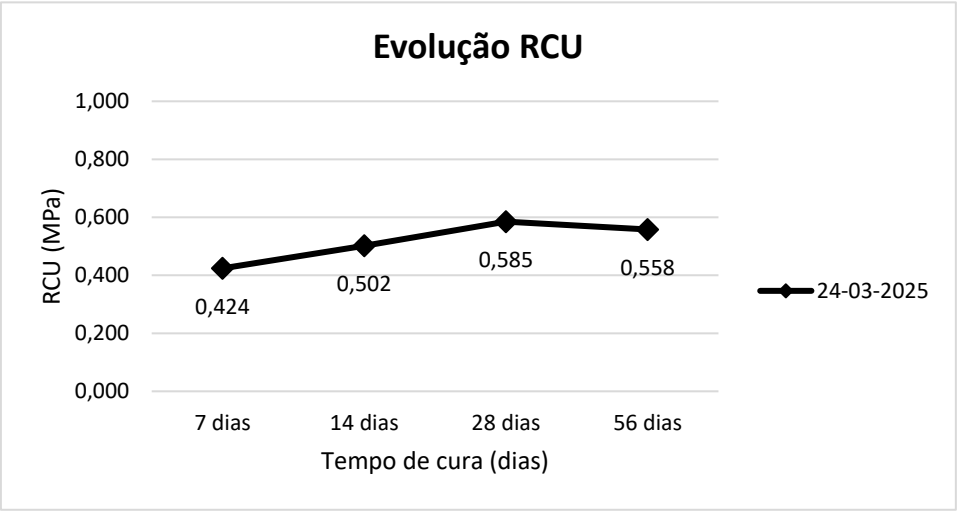
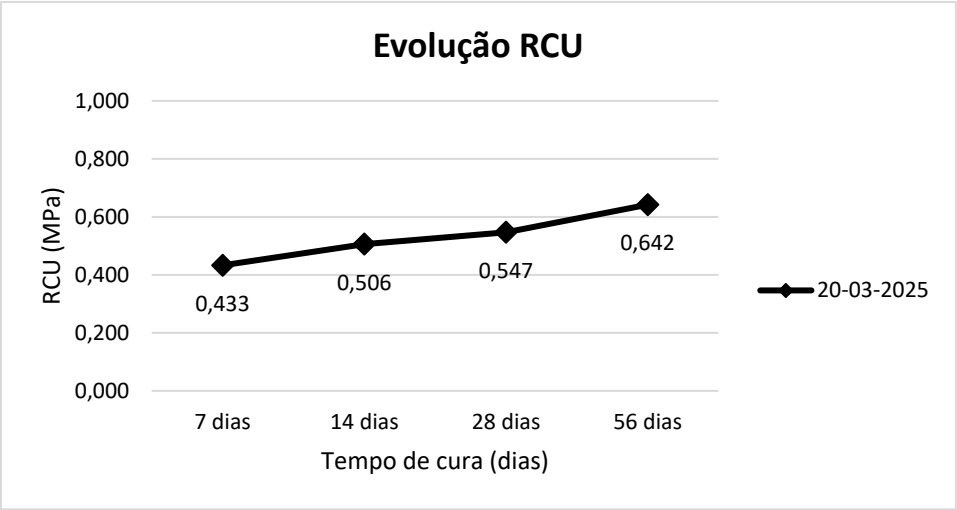
[página propositadamente em branco]

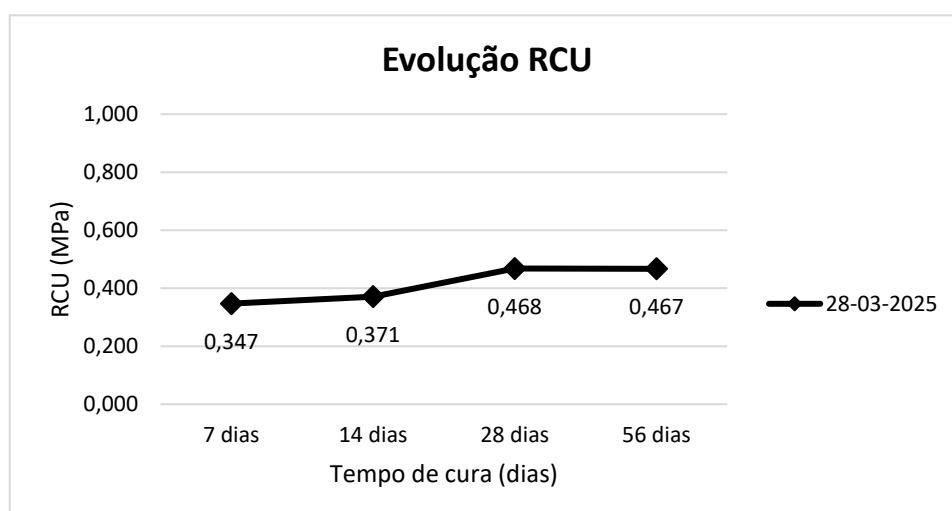
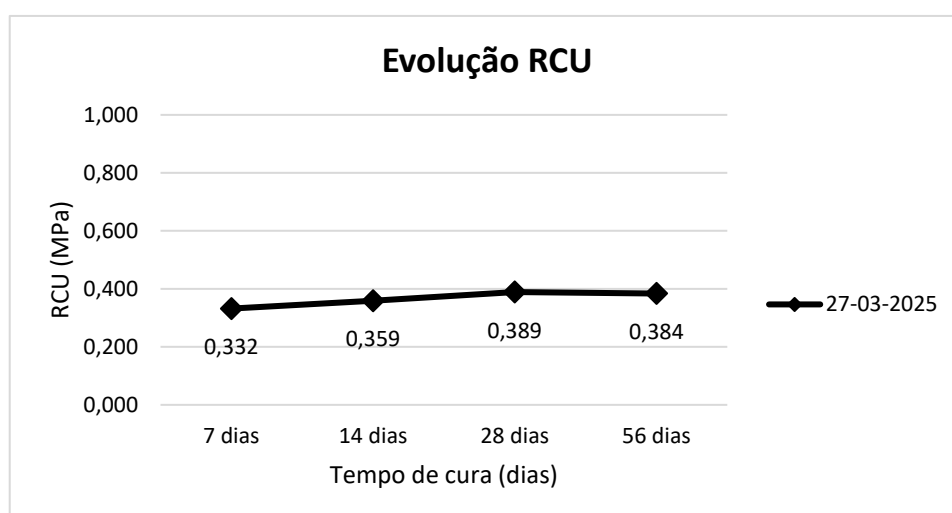
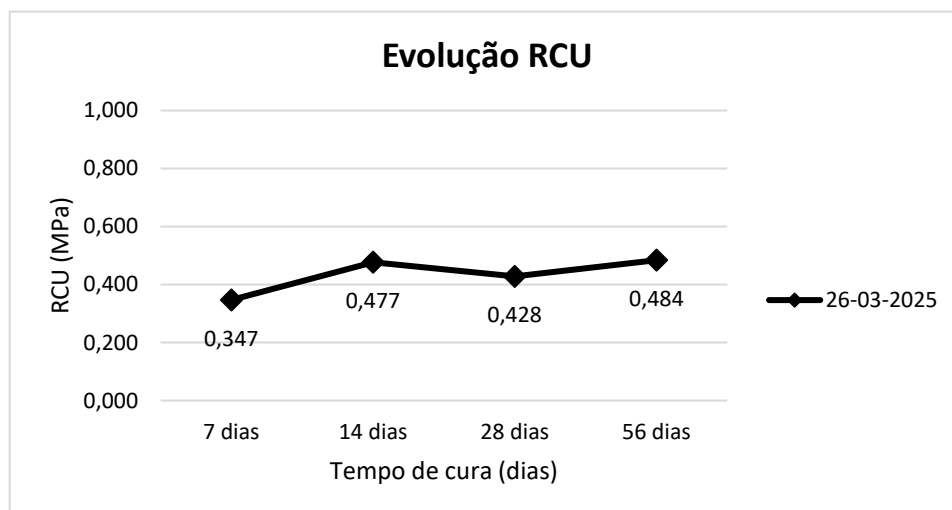
Anexo 1

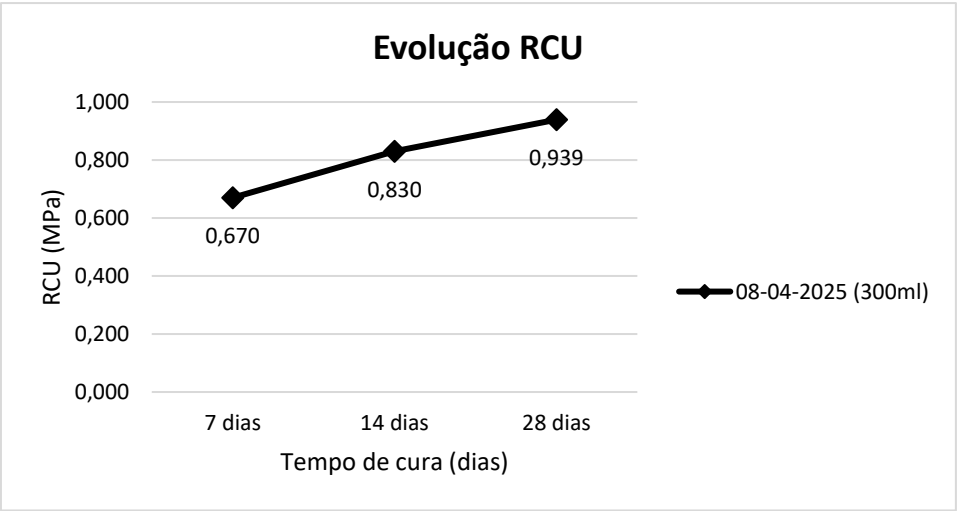
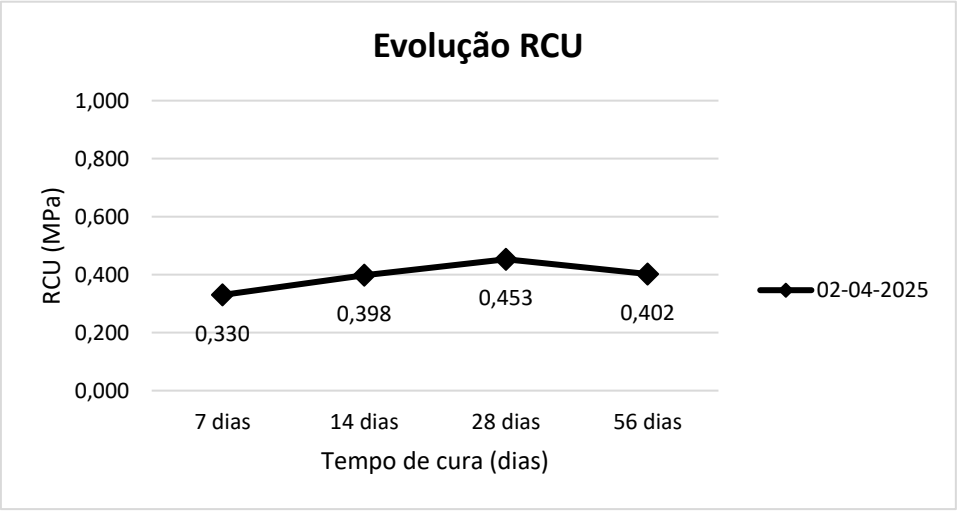
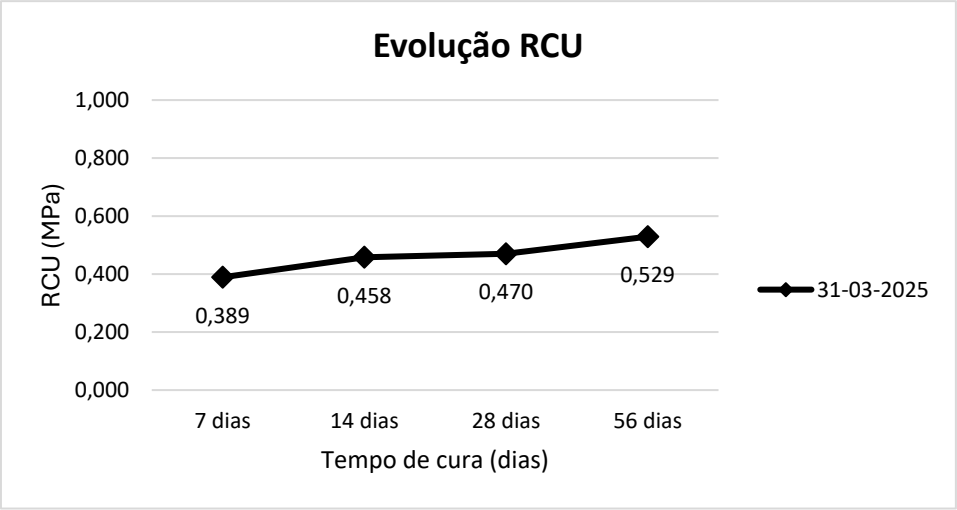
Evolução de RCU de todas as misturas de pasta realizadas

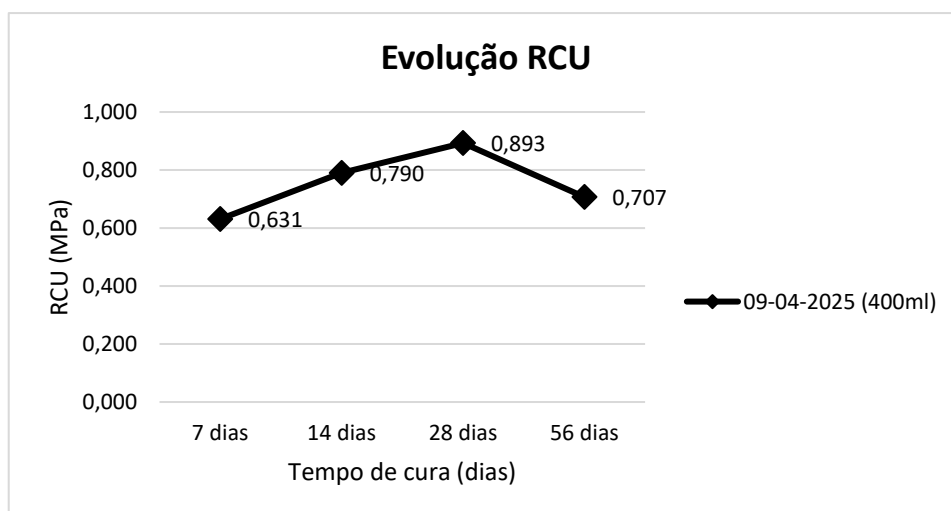
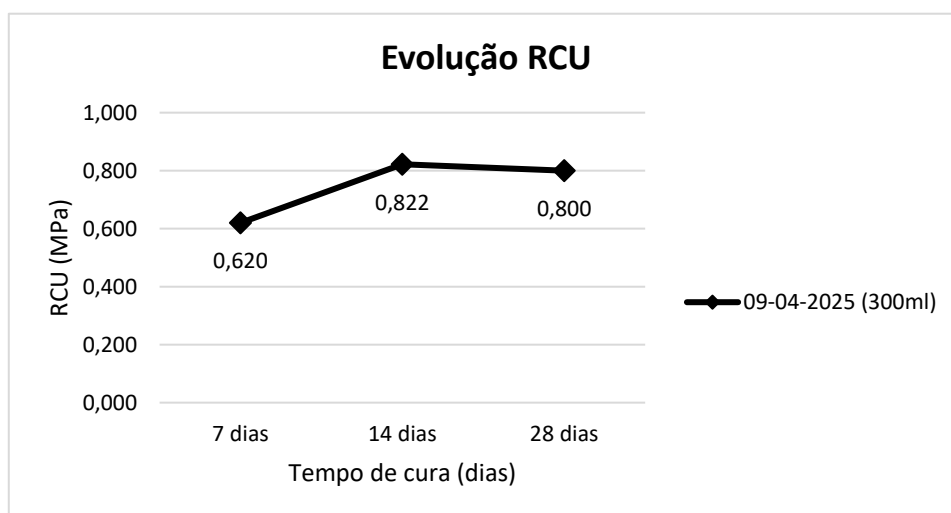
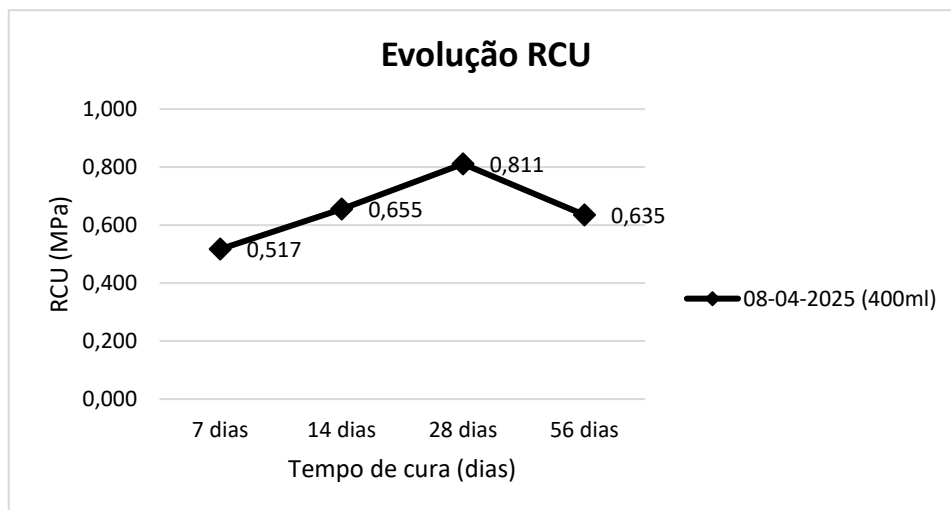


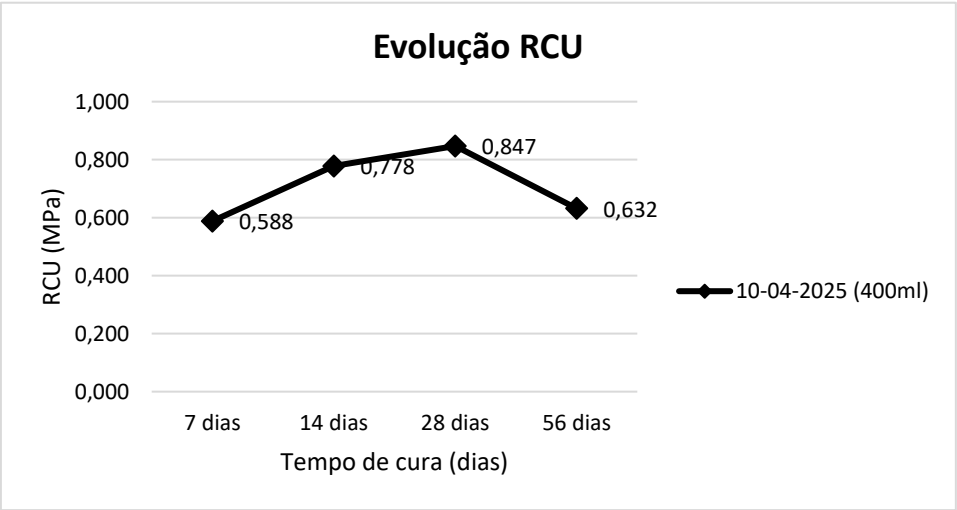
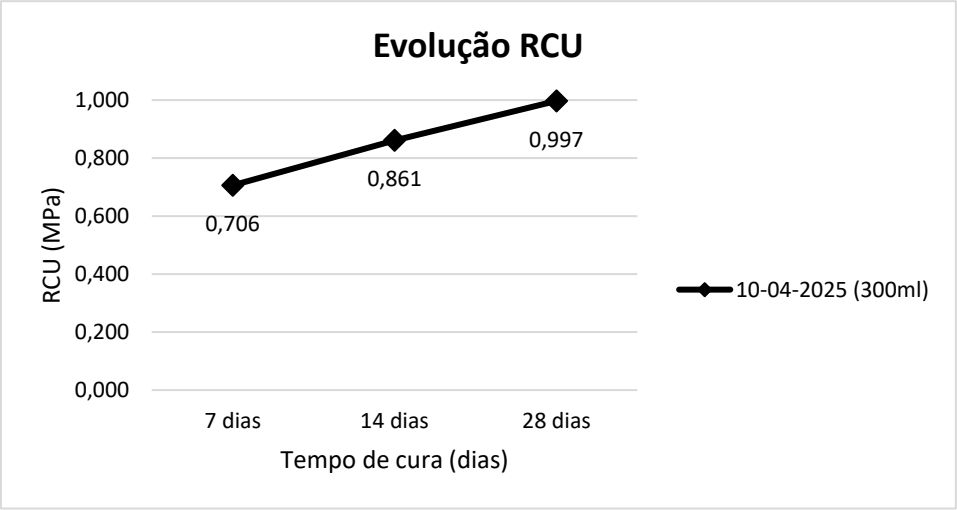












DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Eu, **MARIANA BASTOS SANTOS SILVA**, N.º CC: 15186081,

Declaro ter conduzido e desenvolvido este trabalho académico com integridade e ética. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à elaboração da dissertação/projeto/estágio.

Declaro ainda que não recorri a ferramentas de inteligência artificial (IA) — texto, imagem, vídeo ou outro formato — para fins académicos de pesquisa avançada de tópico específico e ainda fiz devida citação dos recursos bibliográficos sem colocar em causa os direitos de autor ou uso indevido de informações ou falsificação de conteúdos.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

MARIANA BASTOS SANTOS SILVA

ISEP, Porto, 1 de Julho de 2025