

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

CRISTIANE MELO ALVES

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO REJEITO DE MINA POLIMETÁLICA VISANDO  
SUA APLICAÇÃO COMO *PASTEFILL* EM OPERAÇÕES DE *VERTICAL RETREAT*  
*MINING*

Porto Alegre - RS

2023

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

**CRISTIANE MELO ALVES**

**Eng. de Minas**

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO REJEITO DE MINA POLIMETÁLICA VISANDO  
SUA APLICAÇÃO COMO *PASTEFILL* EM OPERAÇÕES DE *VERTICAL RETREAT*  
*MINING*

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Minas, dentro do programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, área de concentração em Tecnologia mineral, ambiental e metalurgia extrativa.

Orientador: Prof. Dr<sup>o</sup> André Cezar Zingano

Porto Alegre - RS

2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Alves, Cristiane Melo  
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO REJEITO DE MINA POLIMETÁLICA  
VISANDO SUA APLICAÇÃO COMO PASTEFILL EM OPERAÇÕES DE  
VERTICAL RETREAT MINING. / Cristiane Melo  
Alves. -- 2023.  
135 f.  
Orientador: André Cezar Zingano.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Pastefill. 2. Rejeito. 3. Aditivos.  
4. Granulometria. 5. Resistência à compressão uniaxial.  
I. Zingano, André Cezar, orient.  
II. Título.

CRISTIANE MELO ALVES

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO REJEITO DE MINA POLIMETÁLICA VISANDO  
SUA APLICAÇÃO COMO *PASTEFILL* EM OPERAÇÕES DE *VERTICAL RETREAT*  
*MINING*

Esta Dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-graduação.

Orientador: Prof. Dr<sup>o</sup>. André Cezar Zingano

Coordenador: Prof. Dr<sup>o</sup>. Rodrigo de Lemos Peroni

BANCA EXAMINADORA:

PhD. Fernando Vieira

University of New South Wales (UNSW) – Austrália

Dr<sup>o</sup>. Jair Koppe

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Brasil

Dr<sup>a</sup>. Marília Abrão Zeni

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG) - Brasil

Com grande admiração e profundo amor, dedico esta pesquisa à minha mãe, Maria de Fátima Melo, que sempre me incentivou a buscar o conhecimento e à memória do meu pai, José Osvaldo Alves. Juntos, em sua dedicação incondicional, amor e exemplo, me fizeram uma pessoa íntegra.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pela paciência, apoio, dedicação e confiança em toda a trajetória que me trouxe até aqui, amo-os profundamente.

À Marília Abrão, Gabriel Freire, Luiz Couto e Lucas Lemos pelos ensinamentos a mim transmitidos durante estes anos, que me aportaram tecnicamente, me nutriram de conhecimento e amizade verdadeira, obrigada pela fidelidade e confiança depositadas.

Ao meu orientador André Cezar Zingano e ao laboratório de Pesquisa Mineral da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de realizar este trabalho de maneira tão aprimorada, através do conhecimento que tive, da oportunidade dada e do suporte ofertado.

À Nexa Resources, em especial a unidade de Aripuanã, que foi responsável pelo objeto da pesquisa e sempre me incentivou a alcançar os objetivos.

E, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, por todo apoio durante os meus estudos.

## RESUMO

As empresas de mineração estão adotando práticas que englobam os pilares de sustentabilidade ambiental, condições sociais e governança por meio de uma gestão responsável de resíduos, como o enchimento de vazios promovido pela extração mineral. Essas empresas buscam reduzir impactos ambientais, além disso, garantem a segurança dos trabalhadores e demonstram transparência e responsabilidade em suas operações. Essas ações visam criar um setor de mineração mais sustentável, moderno e alinhado com as expectativas da sociedade. Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de caracterizar o rejeito que é processado na planta de beneficiamento de uma mina subterrânea polimetálica que realiza extração e beneficia Zinco, Cobre, Chumbo e Prata na cidade de Aripuanã-MT, com foco que seja utilizado como enchimento das escavações. Foram avaliados aspectos da qualidade da água utilizada, distribuição da curva granulométrica, umidade do rejeito, densidade, tensão de escoamento e ensaios de compressão uniaxial. Uma série de ensaios foram realizados com a confecção de corpos de prova com adição de 4% e 6% de cimento e 76% de sólidos totais, com tempo de cura de até 28 dias, também foram testados aditivos plastificantes e adição de areia. Foi possível identificar que o rejeito a ser utilizado na produção da pasta possui muitas partículas de granulometria fina, além do que é usualmente recomendado pela literatura. No entanto, não foi observada redução na resistência à compressão em decorrência desse fator. A caracterização também apresentou uma variação da tensão de escoamento entre 350Pa e 500Pa com 76% de sólidos totais nas misturas. As amostras com 4% de cimento apresentaram a média de 0,72 MPa para a idade de 28 dias de cura, as amostras com 6% de cimento apresentaram resistência média aos 28 dias com 1,04 MPa, todas sem aditivação de químicos plastificantes. Os ensaios de caracterização de resistência que utilizaram aditivos químicos plastificantes em misturas com 4% de cimento, não apresentaram ganho de resistência quando comparadas às misturas que não receberam aditivos. Para as misturas aditivadas com 6% de cimento foram observados ganhos de resistência de até 26% com relação às misturas sem aditivos.

**Palavras-chave:** *Pastefill*. Rejeito. Aditivos. Granulometria. Resistência à compressão uniaxial.

## ABSTRACT

Mining companies are adopting practices that encompass the pillars of environmental sustainability, social conditions, and governance through responsible tailing management, such as void filling promoted by mineral extraction. These companies aim to reduce environmental impacts while ensuring worker safety and demonstrating transparency and accountability in their operations. These actions aim to create a more sustainable, modern mining sector that aligns with societal expectations. This research was conducted to characterize the tailing processed in the beneficiation plant of an underground polymetallic mine that extracts and processes Zinc, Copper, Lead, and Silver in the city of Aripuanã-MT, with the focus on using it as backfill for excavations. Aspects of water quality, particle size distribution, moisture content, density, yield stress, and uniaxial compression tests were evaluated. A series of tests were performed by preparing specimens with 4% and 6% cement addition and 76% total solids, cured for up to 28 days. Plasticizing additives and sand addition were also tested. It was found that the tailing to be used in the paste production contains a significant amount of fine particles, exceeding what is typically recommended in the literature. However, no reduction in compressive strength was observed because of this factor. The characterization also revealed a yield stress variation between 350 Pa and 500 Pa with 76% total solids in the mixtures. Samples with 4% cement showed an average of 0.72 MPa at 28 days of curing, while samples with 6% cement exhibited an average strength of 1.04 MPa at 28 days, all without the use of plasticizing chemicals. Characterization tests using plasticizing chemical additives in mixtures with 4% cement did not show any strength gain compared to mixtures without additives. For mixtures with 6% cement and plasticizing additives, strength gains of up to 26% were observed compared to mixtures without additives.

**Keywords:** Pastefill. Tailings. Additions. Granulometry. Uniaxial compressive strength.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do empreendimento .....	18
Figura 2 - Principais depósitos de Aripuanã-MT.....	21
Figura 3 - Falha em testemunho de sondagem .....	22
Figura 4 - Ocorrência de sulfetos em veio de quartzo. ....	23
Figura 5 - Visão geral das minas Arex, Link e Ambrex. ....	25
Figura 6 - Vista em planta do VRM .....	26
Figura 7 – Seção típica de VRM com sequência de extração. ....	26
Figura 8 - Esquema de funcionamento <i>simplificado</i> da planta de <i>pastefill</i> .....	29
Figura 9 - Moega de descarga e esteira de transporte. ....	30
Figura 10 - Sensor de umidade instalado na correia transportadora. ....	31
Figura 11 - Silos de armazenamento de cimento. ....	32
Figura 12 - Balança para dosagem na saída do silo de cimento. ....	33
Figura 13 - Misturador da pasta. ....	34
Figura 14 - Interior do misturador com sistema de pás.....	34
Figura 15 - Bomba de deslocamento positivo (pistão).....	35
Figura 16 - Reservatório de pasta prévio ao bombeamento. ....	36
Figura 17 - Visão geral da distribuição da linha de <i>pastefill</i> para o subsolo.....	36
Figura 18 - Distribuição da linha de <i>pastefill</i> - <i>Raise</i> .....	37
Figura 19 - Modos de suporte do <i>backfill</i> .....	39
Figura 20 - Relações volumétricas .....	40
Figura 21 - Exemplo de distribuição granulométrica.....	41
Figura 22 - Foto do material no slump test. (a) Teste cilíndrico e (b) Teste com cone.....	47
Figura 23 - Resultados de testes de abatimento (slump) e modelos teóricos exibidos na forma de altura de abatimento (slump) sem dimensões versus tensão de escoamento sem dimensões.....	48
Figura 24 - (a) Efeito da adição de cimento em rejeitos de Chumbo e Zinco. (b) Chumbo/Zinco e OP <i>cement tailings</i> PSD.....	49
Figura 25 - Modelo de partículas em material de enchimento. ....	51
Figura 26 - Distribuição granulométrica típica para rejeitos conforme tipo de mineralização.....	52

Figura 27 - Raio x de amostra com presença de elementos que indicam reação de sulfatos. ....	61
Figura 28 - Perda progressiva de resistência do <i>pastefill</i> – Ataque de sulfatos	62
Figura 29 Fluxograma das etapas do desenvolvimento da metodologia. ....	63
Figura 30 - Granulômetro laser do laboratório utilizado na caracterização das partículas. ....	64
Figura 31 - Fluxo de preparação da amostra para análise. ....	65
Figura 32- Ensaio de granulometria RJ_GF_CO_00022_GR.....	66
Figura 33 - Analisador de umidade. ....	66
Figura 34 - Densímetro .....	67
Figura 35 - Calculadora da tensão de escoamento. ....	68
Figura 36 - Tipos de ruptura válidas para ensaio uniaxial. ....	72
Figura 37 - Ensaio validados – De acordo com ASTM C39 (2003).....	72
Figura 38 – Amostras do ensaio metalúrgico. ....	74
Figura 39 - Caracterização mineralógica do rejeito e proporção de pirrotita. ....	75
Figura 40 - MLA do rejeito.....	75
Figura 41 - Geometria Vane à esquerda e ensaio em andamento à direita. ....	76
Figura 42 - Resultados dos testes reológicos – Cobre .....	77
Figura 43 - Resultados dos testes reológicos – Zinco+Talco. ....	77
Figura 44 - Caracterização granulométrica dos rejeitos. ....	79
Figura 45 - Dimensões estimadas dos realces de VRM. ....	80
Figura 46 - Estabilidade do <i>pastefill</i> . ....	81
Figura 47 – Resultados dos testes de tipos de cimento – 4% de adição. ....	82
Figura 48 – Resultados dos testes de tipos de cimento – 5% e 6% de adição .	83
Figura 49 - Talco e seus efeitos na resistência .....	83
Figura 50 - Gráfico apresentando os resultados obtidos em ensaios de umidade coletados pós filtragem. ....	86
Figura 51 - Distribuição granulométrica do rejeito .....	88
Figura 52 - Configuração do ultrassom - Mastersize 3000 Hidro Ev.....	89
Figura 53 - Comparação de curvas granulométricas com uso de ultrassom. ...	90
Figura 54 - Granulometria do rejeito com referência da curva para minas polimetálicas .....	91
Figura 55 - Sulfatos totais da água recirculada .....	92
Figura 56 - pH da água recirculada. ....	93

Figura 57 - Densidade das amostras com relação ao percentual de sólidos. ...	94
Figura 58 – Correlação da tensão de escoamento e <i>slump</i> .....	95
Figura 59 – Ensaio descartado. ....	96
Figura 60 – Amostras rompidas com pouca rigidez – retardamento de cura. ...	96
Figura 61 - Plano base de amostras sem aditivos químicos.....	97
Figura 62 - Resultado dos ensaios com adição de areia. ....	98
Figura 63 - Resultado dos ensaios com adição Eltech – 4% de cimento.....	99
Figura 64 - dos ensaios com adição Eltech – 6% de cimento.....	99
Figura 65 - Resultado dos ensaios com adição de Sika – 4% e 6% de cimento .....	100
Figura 66 - Resultado dos ensaios com adição de Sika – 4% de cimento.....	100
Figura 67 - Resultado dos ensaios com adição de Sika – 6% de cimento.....	101
Figura 68 - Resumo dos melhores resultados de Compressão Uniaxial (MPa) com 4% de cimento.....	102
Figura 69 - Resumo dos melhores resultados de Compressão Uniaxial (MPa) com 6% de cimento.....	102

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição geológica do depósito. ....	24
Tabela 2 - Propriedades do rejeito/alimentação de projeto. ....	31
Tabela 3 – Mesmo <i>Slump</i> para tensão de escoamento diferentes. ....	46
Tabela 4 - Principais cimentos com adição disponíveis no mercado brasileiro. ....	54
Tabela 5 - Tipos de aditivos utilizados na pesquisa ....	59
Tabela 6 - Mix para aditivos Eltech ....	70
Tabela 7 - Mix para aditivos Sika. ....	71
Tabela 8 - Mix para adições com areia. ....	71
Tabela 9 - Análise modal de contaminantes de interesse para <i>pastefill</i> - alimentação da flotação (2019). ....	74
Tabela 10 Tensão de escoamento para ensaios de 2022. ....	78
Tabela 11 Alternativas de cimento. ....	82
Tabela 12 - Resultados - Alternativas de cimento. ....	84
Tabela 13 - Coeficiente de uniformidade do rejeito. ....	87
Tabela 14 - Estatística dos dados de distribuição granulométrica da fração fina. .....	88
Tabela 15 Resumo dos principais resultados ....	104

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1.	RELEVÂNCIA DO TEMA .....	16
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	16
1.3.	META.....	16
1.4.	OBJETIVOS.....	16
<b>2.</b>	<b>LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>18</b>
2.1.	GEOLOGIA REGIONAL.....	19
2.1.1.	<b>Geologia local e estrutural.....</b>	<b>21</b>
2.2.	LITOTIPOS .....	23
2.3.	MÉTODO DE LAVRA.....	24
2.3.1.	<b>Vertical Retreat Mining.....</b>	<b>25</b>
2.4.	QUALIDADE DO MACIÇO DA MINA .....	27
2.5.	PLANTA E DISTRIBUIÇÃO DO <i>PASTEFILL</i> .....	28
2.5.1.	<b>Alimentação do rejeito .....</b>	<b>29</b>
2.5.2.	<b>Alimentação de cimento.....</b>	<b>32</b>
2.5.3.	<b>Abastecimento de água .....</b>	<b>33</b>
2.5.4.	<b>Mistura e distribuição da pasta .....</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>38</b>
3.1.	BACKFILL.....	38
3.2.	HYDRAULIC FILL .....	43
3.3.	ROCKFILL .....	43
3.4.	PASTEFILL.....	44
3.4.1.	<b>Reologia .....</b>	<b>45</b>
3.4.2.	<b>Granulometria .....</b>	<b>50</b>
3.4.3.	<b>Cimento .....</b>	<b>52</b>
3.4.4.	<b>CP II F 32 .....</b>	<b>53</b>

3.4.4.	Água .....	55
3.4.5.	Aditivos .....	57
3.4.6.	Resistência à compressão .....	59
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>63</b>
4.1.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO REJEITO .....	64
4.2.	ANÁLISE DE UMIDADE DO REJEITO .....	66
4.3.	DETERMINAÇÃO DE DENSIDADE DO MATERIAL.....	67
4.4.	TENSÃO DE ESCOAMENTO .....	68
4.4.1.	Cimento .....	69
4.4.2.	Água utilizada no <i>pastefill</i> .....	69
4.4.3.	Resistência mínima requerida .....	69
4.5.	ENSAIO UNIAXIAL .....	72
<b>5</b>	<b>ESTUDOS DE PRÉ VIABILIDADE .....</b>	<b>73</b>
5.1.	METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA MINERALOGIA DO REJEITO E INFLUÊNCIA DE CONTAMINANTES.....	73
5.2.	TENSÃO DE ESCOAMENTO .....	76
5.3.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO REJEITO .....	78
5.4.	RESISTÊNCIA MÍNIMA REQUERIDA .....	79
5.4.1.	Determinação das dosagens de rejeito e cimento .....	81
5.5.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA .....	85
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES DA CARACTERIZAÇÃO .....</b>	<b>86</b>
6.1.	RESULTADOS DA UMIDADE DO REJEITO .....	86
6.2.	AVALIAÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	87
6.3.	ANÁLISE DA ÁGUA.....	91
6.4.	DENSIDADE DA PASTA E TENSÃO DE ESCOAMENTO.....	93
6.5.	RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL .....	95
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>

<b>8. TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>107</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>115</b>
1 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO REJEITO.....	115
2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA .....	115
3 – DENSIDADE E TENSÃO DE ESCOAMENTO.....	116
4 - ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS UNIAXIAIS AOS 28 DIAS.....	119
5 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DE MISTURAS COM AREIA .....	125
6 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL - ADITIVOS SIKA .....	127
7 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL – ADITIVOS ELTECH	129

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização do rejeito do beneficiamento mineral traz muitos benefícios do ponto de vista ambiental e econômico, quando viabiliza o aumento da extração mineral em função da retirada de pilares mineralizados e reduz consideravelmente o impacto ambiental com o retorno do passivo ambiental para o subsolo.

É extremamente importante definir uma metodologia de lavra adequada para utilização do rejeito para enchimento cimentado. Isso se deve principalmente ao fato de que a composição mineralógica e características do rejeito precisam ser apropriadas para esse tipo de uso. Porque a presença de elementos que podem provocar reações químicas como sulfetos, metais pesados ou materiais orgânicos, podem comprometer a qualidade e a resistência do enchimento cimentado.

Além das características peculiares do rejeito e suas condições, é essencial garantir a viabilidade econômica do processo. Isso envolve um alto investimento na adequação da infraestrutura, aquisição de equipamentos necessários para o sistema de transporte, distribuição e mistura, manutenção da planta e disponibilidade de fornecimento de produtos essenciais para a produção de *pastefill*, principalmente o cimento. Dependendo da localização da mina, é necessário verificar a disponibilidade de fornecedores de cimento nas proximidades, a qualidade do produto e sua compatibilidade com o tipo de rejeito utilizado. Todos esses fatores devem ser cuidadosamente avaliados.

A adequada caracterização do *pastefill* deve ser realizada, visto que os danos associados à falta de estudos prévios de caracterização podem conduzir a problemas como: instabilidade do enchimento, ineficiência da mineração, riscos de instabilidade da mina e segurança de pessoas. Uma caracterização cuidadosa e testada em nível laboratorial permite otimizar a formulação do *pastefill*, uma vez que se testam os materiais disponíveis, ajustando suas proporções para atender às necessidades específicas do projeto minimizando os impactos ambientais, tornando a mineração mais sustentável.

Este estudo de caso foi desenvolvido em uma mineradora que extrai e beneficia Zinco, Cobre, Chumbo e Prata na região de Aripuanã-MT.

A mina que motivou o estudo atua com dois métodos de lavra, o *Bench Stopping* e o *Vertical Retreat Mining*. A utilização de *pastefill* é majoritariamente destinada ao enchimento de realces lavrados pelo método *Vertical Retreat Mining* (VRM).

### 1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA

O estudo da caracterização física de rejeito para uso em operações mineiras é relevante por diversas razões. Ele permite otimizar a formulação do *pastefill*, tornando as operações de mineração mais eficientes e sustentáveis, contribui para minimizar o impacto ambiental, melhorar a estabilidade geotécnica das escavações, aproveitar recursos e impulsionar novos estudos tecnológicos na indústria.

### 1.2. JUSTIFICATIVA

Este estudo estimula avanços tecnológicos na indústria de mineração promovendo a caracterização física do rejeito para uso em operações mineiras que traz benefícios significativos em termos de eficiência, sustentabilidade e inovação para o setor, o tornando fundamental para impulsionar melhorias nessa área.

### 1.3. META

A meta deste estudo é realizar a caracterização do rejeito que é beneficiado na unidade de Aripuanã para utilização como *pastefill*.

### 1.4. OBJETIVOS

Para alcançar a meta, foram definidos os seguintes objetivos:

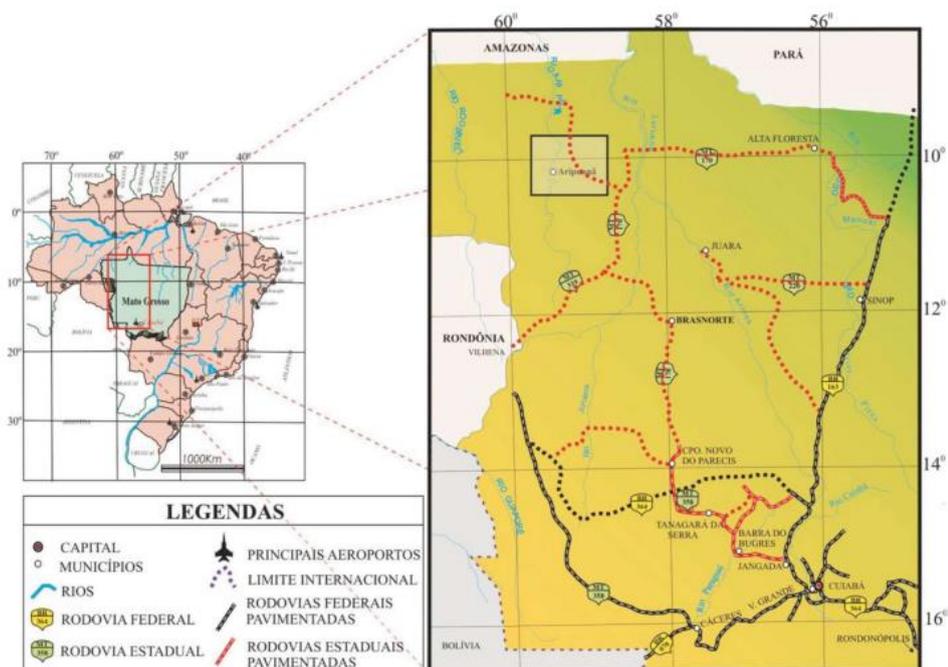
- Caracterizar o rejeito a partir da avaliação granulométrica e umidade;

- Elaborar corpos de provas com misturas para validar o percentual de sólidos e teor de cimento que garantam a resistência mínima requerida;
- Avaliar a tensão de escoamento da pasta;
- Avaliar os resultados de resistência à compressão uniaxial em tempos de cura de 3, 7 e 28 dias.

## 2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O empreendimento está localizado na região Centro-Oeste do Brasil, no estado do Mato Grosso a aproximadamente 700 km a noroeste de Cuiabá e 1.200 km a noroeste de Brasília. O centro da propriedade está localizado a aproximadamente, 10°05'00" de Latitude Sul e 59°25'00" de Longitude Oeste. A localização do projeto é mostrada na Figura 1. As coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) aproximadas do centro da mineralização são 226000 mE e 8888000 mN, fuso 21 *datum South American 1969* (SAD69), na carta topográfica de Aripuanã, na escala 1:250000 (SC.21-Y-A). O acesso terrestre à região pode ser feito a partir da capital por meio da rodovia BR-364, passando por Tangará da Serra, ao acessar a MT-170 em direção à Juína e até Castanheira, seguindo então pela MT-420 até a cidade de Aripuanã que pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Localização do empreendimento



Fonte: Leite et al. (2005).

## 2.1. GEOLOGIA REGIONAL

O depósito de Aripuanã é considerado do tipo VMS, quando sua ocorrência está relacionada à cinturões vulcânico-sedimentares submarinos, formados a partir de fluidos hidrotermais provindos de uma intrusão subvulcânica por aquecimento magmático. Esse tipo de depósito é formado a partir de sistemas hidrotermais que exalam fluidos para o assoalho oceânico com temperaturas que vão de 200 °C a 380 °C.

A região de Aripuanã foi inicialmente conhecida pelas ocorrências de ouro aluvionar. Essas ocorrências atraíram a atividade garimpeira, principalmente a partir dos anos 80. Nas décadas seguintes houve prospecção da área por grandes empresas de mineração que foram responsáveis pelo reconhecimento de três corpos mineralizados em sulfetos de metais base na Serra do Expedito: Valley, Massaranduba e Babaçu (Leite et al. 2005). A serra do Expedito, localizada a aproximadamente 14km a norte da cidade de Aripuanã, situa-se no domínio das rochas metavulcanossedimentares do Grupo Roosevelt e abriga os recursos minerais mais importantes da região: o depósito polimetálico (Zn, Pb, Ag, Cu e Au) de Aripuanã. Leite et al. (2005), propõem o termo Sequência Aripuanã para designar as rochas vulcano-plutônicas do Grupo Roosevelt, onde se encontram os corpos mineralizados. A sequência Aripuanã é dividida em duas grandes unidades, que se encontram cronologicamente entre os granitos do embasamento e as rochas graníticas e metassedimentares mesoproterozoicas. O embasamento é formado pelo Complexo Xingu, composto por biotita granitos indivisos. A sequência Aripuanã é composta por duas unidades: Unidade Vulcanossedimentar e Unidade Intrusiva.

A Unidade Vulcanossedimentar é constituída por vulcânicas ácidas, ignibritos, tufos (tufos líticos, tufos de cristal e lapilli tufos) e rochas metavulcânicas básicas. Essas rochas, em alguns casos, encontram-se associadas a lentes de cherts e depósitos de re-sedimentação. A unidade plutônica corresponde ao Granito Zé do Torno, granitos hipoabissais porfíricos de matriz fanerítica fina e granitos médios a grossos equigranulares. O conjunto ígneo mesoproterozóico é composto por biotita-granito e pelo granito Rio Branco, anteriormente definido como Granito Aripuanã. As rochas metassedimentares pertencem a Formação Dardanellos do Grupo Caiabis. As rochas apresentam

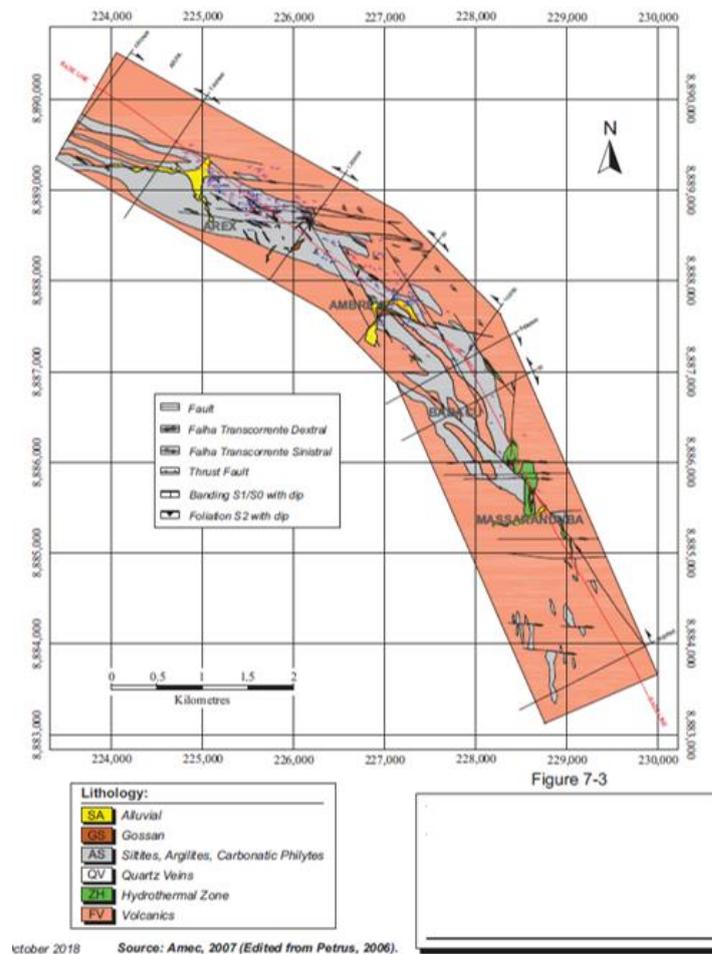
zonas de alteração hidrotermal com quantidades variadas de clorita, carbonato e tremolita. Segundo a análise geoquímica de elementos maiores, menores e Terras Raras juntamente com os estudos isotópicos apresentados por Leite et al. (2005), o ambiente de formação das rochas é interpretado como margem continental durante uma fase eminentemente extensional, a partir da fusão parcial de crosta continental de idade paleoproterozoica com pouco tempo de residência crustal.

Os metassedimentos incluem matargilito, metassiltitos e metassiltitos carbonáticos, enquanto as metavulcânicas e metapiroclásticas variam de riolito a dacito em composição.

A zona hidrotermal ocorre como *Stratabound*, quando relacionada a zona exalativas, ou *pipe*, quando relacionada à zona de alimentação. A porção *Stratabound* da zona hidrotermal possui três principais tipos de alteração: clorítica, carbonática e sericítica. A zona de alimentação, ou *Stringer*, possui três tipos de alteração: sericítica, fílica (sericita + clorita) e clorítica. Em superfície, a zona de alteração é fortemente mascarada por processos intempéricos, cuja expressão está normalmente associada a áreas de gossans. Porções do depósito possuem cobertura fanerozóica aluvionar.

A Figura 2 mostra o mapa geológico do depósito. Três corpos mineralizados principais podem ser identificados no depósito, quais sejam Arex, Ambrex e Massaranduba.

Figura 2 - Principais depósitos de Aripuanã-MT.



Fonte: Relatório Interno.

### 2.1.1. Geologia local e estrutural

Os litotipos que compõem o depósito Aripuanã estão estruturados segundo um *trend* E-W, com inflexão para NW-SE, constituindo um homoclinal com caimentos proeminentes para E-SE, e subordinadamente para W-NW.

Essas rochas são marcadas pela presença de uma foliação, mais observadas nos exemplares metapiroclásticos e metassedimentares, se tornando menos evidente nos litotipos metavulcânicos e hidrotermais. A foliação aqui exposta é predominantemente do tipo penetrativa e contínua, em alguns locais é do tipo milonítica, onde se nota a presença de cristais de quartzo e feldspato potássico estirados, gerando indicadores cinemáticos do tipo assimétrico. Esta foliação é marcada principalmente pela orientação preferencial

de micas e subordinadamente pelos cristais de quartzo, feldspato alcalino e sulfetos, apresentando caimento preferencial para N.

Uma série de falhas de empurrões são inferidas. Elas possuem caimento concordante com a foliação regional e expõem rochas mais profundas, hidrotermais, metavulcânicas e metapiroclásticas sobre rochas mais rasas, metassedimentares. As falhas de empurrão possuem comportamento lístrico, se horizontalizando em profundidade. Essas estruturas podem remobilizar sulfetos, sendo responsáveis por mineralizações tardias. Localmente, os milonitos das zonas de falha apresentam alteração hidrotermal potássica, Figura 3.

Figura 3 - Falha em testemunho de sondagem



Fonte: Relatório interno.

Dobramentos são igualmente inferidos, encaixados nas zonas de falhas. Esses dobramentos são responsáveis pela paralelização do bandamento à foliação nos flancos das dobras.

O bandamento composicional observado nas rochas da unidade dos metassedimentos bandados, é marcado pela alternância de estratos pelíticos com estratos ricos em quartzo, com feldspato alcalino subordinado e se encontra levemente deformado, materializado sob a forma de pequenas dobras suaves e abertas.

Comumente, são encontrados veios de quartzo leitoso, cortando todas as unidades de forma concordante ou discordante das superfícies. Segundo Leite et al. (2005), essas estruturas cortam particularmente a zona de alteração hidrotermal próxima aos corpos de sulfeto maciço e estão presentes menos frequentemente quando aparecem com agregados dispersos de biotita. Os veios de quartzo estão associados a uma possível reconcentração de sulfetos em zonas de cisalhamento, correspondendo ao último evento atuante na região, Figura 4.

Figura 4 - Ocorrência de sulfetos em veio de quartzo.



Fonte: Relatório interno.

## 2.2. LITOTIPOS

A distribuição dos litotipos pode ser observada ao longo do depósito, analisando a frequência do aparecimento das alterações hidrotermais e o tipo de mineralização, em percentual, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição geológica do depósito.

**UNIDADES GEOLÓGICAS LOCAIS E FREQUÊNCIA NA UNIDADE**

<b>ZONA HIDROTÉRMAL (ZHDT)</b>	<b>Frequência (%)</b>
SERICITA	35
TREMOLITA, CARBONATOS E CLORITA/BIOTITA	65
<b>MINERALIZAÇÃO STRATABOUND (M1)</b>	<b>Frequência (%)</b>
MACIÇO SEM MINERAIS DE ALTERAÇÃO	25
DISSEMINADO COM CARBONATOS	50
DISSEMINADO COM TREMOLITA	25
<b>MINERALIZAÇÃO STRINGER (M2)</b>	<b>Frequência (%)</b>
CLORITIZAÇÃO	100
CLORITIZAÇÃO COM SILICIFICAÇÃO	

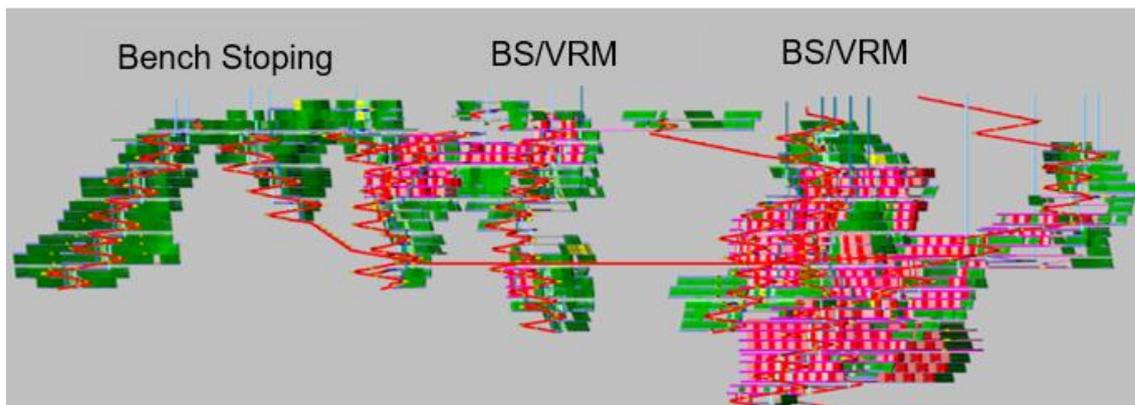
Fonte: Relatório interno, (2022).

### 2.3. MÉTODO DE LAVRA

A lavra subterrânea é realizada por dois métodos de extração, o *bench stoping* onde os corpos mineralizados possuem potência de até 15 metros e o VRM para corpos de maior potência, que variam de 20 a mais de 90 metros. A definição do tamanho dos blocos a serem executados, deriva dos cálculos de estabilidade geotécnicos. Ambos os métodos de lavra preveem o posterior preenchimento com *backfill* que preferencialmente se diferenciam em relação ao método de lavra, normalmente fazendo uso de enchimento não cimentado para as áreas de *bench stoping* e enchimento cimentado para o VRM. Majoritariamente, o método VRM está designado para os depósitos que possuem maior volume de minério, e o método de lavra tende a ser unicamente *bench stoping* em minas que a mineralização se distingue em lentes de menor potência.

Na Figura 5 é possível visualizar a reserva de cada depósito. Em verde estão as áreas de *bench stoping* e em tons rosa as áreas de VRM, em vermelho estão as rampas principais que conectam os corpos à superfície.

Figura 5 - Visão geral das minas e o método de lavra.



Fonte: Autoria própria.

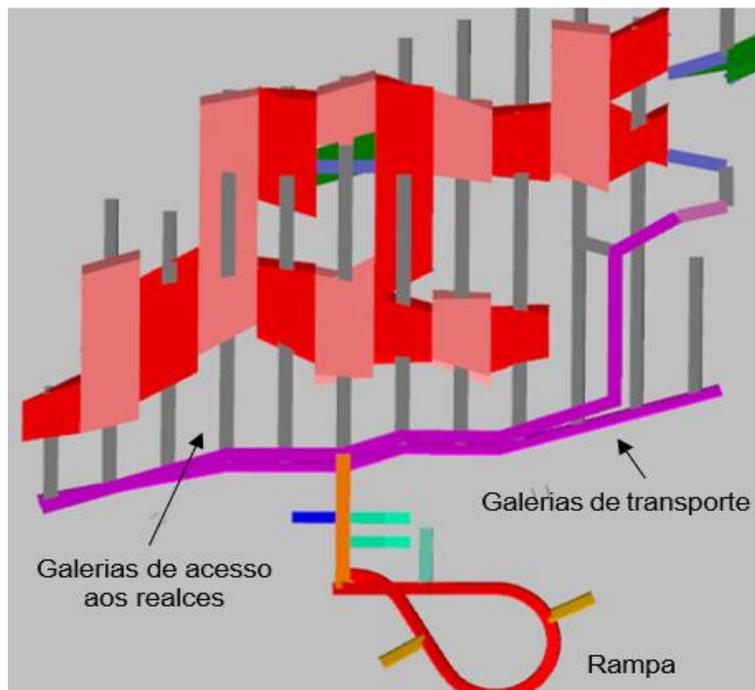
Com o objetivo de se maximizar a reserva lavrável e minimizar as diluições operacionais, há uma sequência de lavra de realces primários e secundários com ciclos de preenchimento dos vazios criados com a utilização de rejeito cimentado exclusivamente nas regiões de VRM. Para os três depósitos e, portanto, para ambos os métodos, a lavra é conduzida no sentido ascendente. Não estando prevista a exposição de teto em *pastefill*.

### 2.3.1. **Vertical Retreat Mining**

A lavra pelo método *Vertical Retreat Mining* aplicado na mineração é um método que extrairá grandes volumes de minério. Para esse método, são previstos os desenvolvimentos de acessos que serão utilizados para o escoamento do minério detonado no subnível, essas escavações são as galerias de transporte, escavadas perpendicularmente às faces dos realces. A partir das galerias de transporte são escavados paralelamente os acessos aos blocos de VRM, que são escavações que percorrem a zona mineralizada saindo do *footwall*, interceptando a mineralização e chegando até o *hangingwall*.

O método de lavra é condicionado por uma sequência em que há a divisão das porções lavráveis em blocos primários e secundários. Os blocos em tom mais ameno são primários e os de cor mais acentuada são blocos secundários. Figura 6.

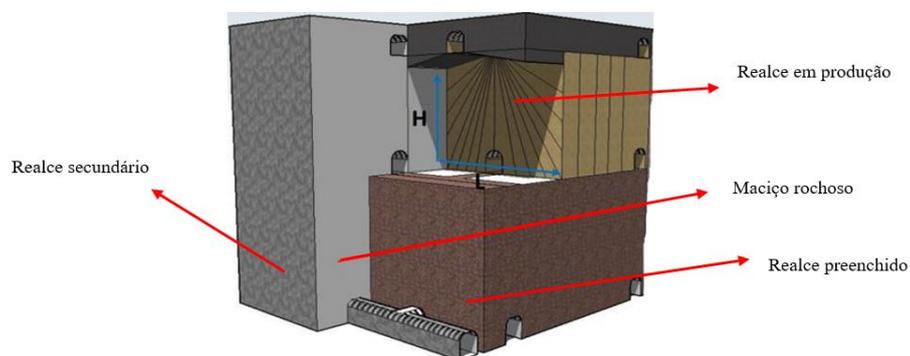
Figura 6 - Vista em planta do VRM



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 7 é possível identificar a compartimentação dos blocos dentro dos subníveis. A subdivisão dos blocos ocorre em função de dimensões previamente determinadas em estudos geotécnicos iniciais, em que apontaram um limite de exposição das lavras com um raio hidráulico de aproximadamente 6,8. Esse mesmo valor também foi considerado posteriormente para os cálculos de dimensionamento de resistência da pasta cimentada.

Figura 7 – Seção típica de VRM com sequência de extração.



Fonte: Relatório interno, (2018).

As dimensões estimadas para cada bloco de lavra do VRM, ainda serão ajustadas conforme se obtém maior conhecimento da qualidade do maciço

rochoso, para planos de médio e longo prazo, as distâncias máximas lavráveis em cada etapa de abertura, são de realces com 25m de altura 20m de largura e até 30m de comprimento.

A utilização do enchimento cimentado no VRM deriva da necessidade do sequenciamento das escavações exporem a parede lateral dos realces em pasta, exigindo do preenchimento a resistência necessária para que se mantenha estável com a dimensão proposta.

A sequência de lavra dos blocos de VRM não prevê a exposição de mais de uma face simultaneamente, uma vez que os realces secundários, se transformam em pilares temporários e sua lavra só ocorre quando a pasta alcançar a resistência necessária para exposição, uma face por vez.

Na fase de projeto da pasta, estudos iniciais da Minefill Services (Relatório interno, 2019) indicaram uma resistência de 400 kPa para um fator de segurança de 1,2, baseado nas equações de Mitchell (1983). Em função de se tratar de uma unidade de operação em *rump up* de produção e comissionamento de plantas, foi sugerido um fator de segurança de 1,5, até que a operação ganhe experiência e realize minimamente a exposição dos realces secundários, para observar o comportamento da pasta, mecanismos reológicos, comissionamento adequado dos sistemas das plantas de beneficiamento e *pastefill*. Com o amadurecimento dos processos e maior prática, os valores de resistência tendem a ser ajustados para um fator de segurança usualmente aplicado em outras operações, esse valor é sugerido em 1,2; com a pasta dimensionada adequadamente para cada tipo de exposição.

#### 2.4. QUALIDADE DO MACIÇO DA MINA

Potvin e Hudyma (2000), comentam que em um estudo em minas canadenses de lavras pelo método *open stoping* é típico que os corpos de minério tenham boa qualidade geotécnica, mas em 50% das observações são encaixados em um *hangingwall* de baixa qualidade geotécnica.

O mesmo comportamento foi observado por Moss et al. (1992), apud Potvin e Hudyma (2000), em minas do Norte do Manitoba, em que relatou que tipicamente os corpos de minério consistiam em maciços sulfetados encaixados em contatos xistosos e que esta combinação de rochas competentes na

mineralização com *hangingwall* e *footwall* com alto grau de anisotropia e baixa qualidade do maciço apresentou um número importante de problemas de estabilidade.

Os fatores mencionados por ambos os autores também encontram similaridade no depósito de Aripuanã, onde o maciço sulfetado hospedeiro da mineralização de Cobre e o *Stratabound* que aporta o Zinco, são encaixados em zonas de alteração hidrotermal com características anisotrópicas e comportamento geotécnico complexo. A variabilidade de elementos estruturais como falhas, juntas, dobras e veios que subdividem a porção não mineralizada da mina, são fatores de extrema importância para a estabilidade global do depósito.

O design da mina conta com *sill pillar* a cada painel de lavra com 10m de espessura. Em função de haver falta de continuidade de algumas porções mineralizadas ao longo do corpo, a geometria oferece *island pillars* em porções não mineralizadas, que auxiliam na estabilidade.

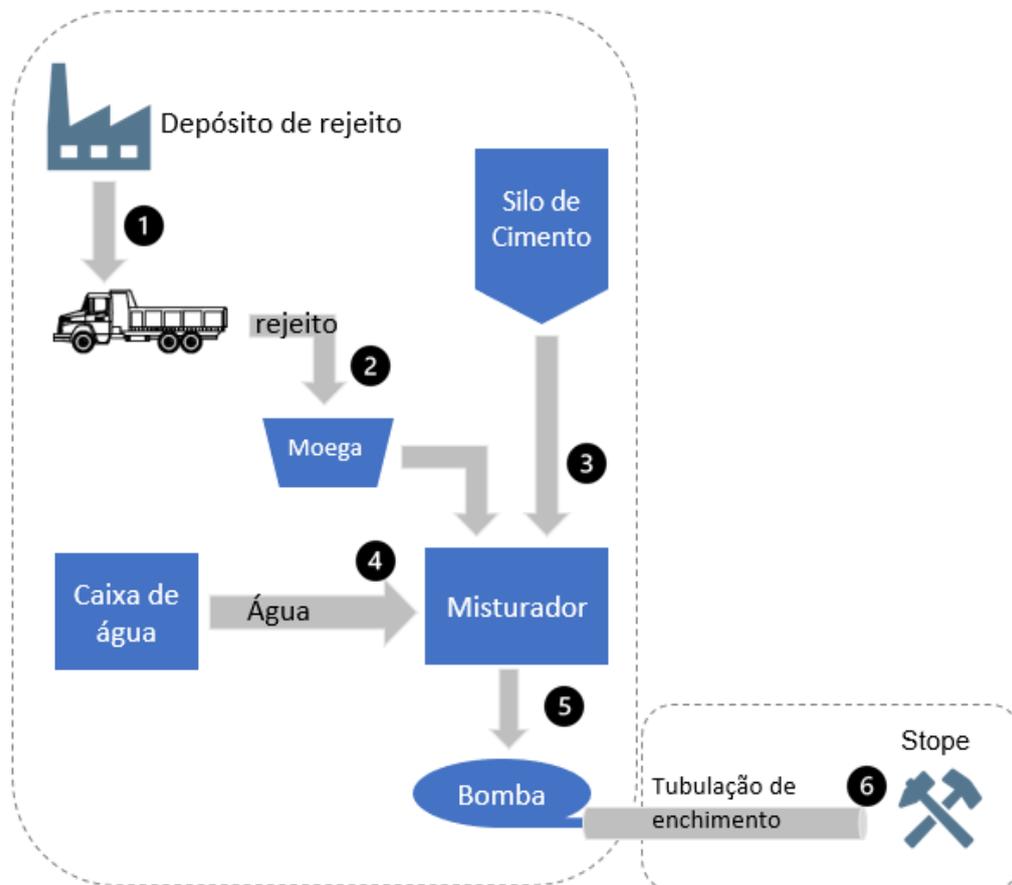
Também são esperados comportamentos favoráveis quanto à estabilização do maciço em função do preenchimento cimentado, uma vez que sua resistência e seu poder de confinamento das paredes do depósito, favorecem local e regionalmente a estabilidade da mina.

## 2.5. PLANTA E DISTRIBUIÇÃO DO PASTEFILL

A planta de *pastefill* utiliza rejeitos da unidade de filtragem da planta de processo, o rejeito é então reprocessado com adição de cimento e água para fabricar uma pasta cimentícia, projetada para preencher os vazios das minas subterrâneas com uma taxa de produção de 130 m<sup>3</sup>/h e percentual de sólidos em peso que varia de 74% a 78%.

O fluxograma da planta pode ser visualizado na Figura 8, as áreas são definidas com base na função do processo e não necessariamente na localização física dos equipamentos.

Figura 8 - Esquema de funcionamento *simplificado* da planta de *pastefill*.



Fonte: Autoria própria.

As etapas do circuito serão detalhadas nos tópicos a seguir.

### 2.5.1. Alimentação do rejeito

A operação para fabricação da pasta se inicia com a chegada da torta de rejeitos proveniente do espessamento e filtragem que é entregue à planta de *pastefill* na moega de recebimento de rejeitos, Figura 9. O rejeito é descarregado na moega e o material é movido por uma correia até o alimentador, o rejeito então é quebrado em grupos menores pela ação de um conjunto de espirais de contra rotação.

Figura 9 - Moega de descarga e esteira de transporte.



Fonte: Autoria própria.

Além dos espirais principais, um conjunto de lâminas de eixo transversal é utilizado no alimentador. As lâminas do eixo transversal são “picadores” adicionais no alimentador para fornecer quebra adicional de quaisquer aglomerados no material da torta de rejeitos antes do descarregamento na correia transportadora. O alimentador dispõe o rejeito da moega em uma correia transportadora, são utilizados dois sistemas de detecção de metais, para evitar que partes metálicas ingressem no sistema misturador. Uma balança de esteira é utilizada para medir de maneira contínua e precisa a massa úmida da torta de rejeitos que está sendo entregue ao misturador, para que os cálculos de dosagem de cimento e água possam ser realizados. Um medidor de umidade por micro-ondas monitora continuamente o teor de umidade da torta de rejeitos, Figura 10.

Figura 10 - Sensor de umidade instalado na correia transportadora.



Fonte: Autoria própria.

O rejeito transportado pela correia possui as propriedades apresentadas na Tabela 2, conforme estudos iniciais de projeto.

Tabela 2 - Propriedades do rejeito/alimentação de projeto.

DESCRIÇÃO	TORTA DE REJEITO + TALCO
REFERÊNCIA GRANULOMÉTRICA (D80) (MM)	0,149
SÓLIDOS (T/H)	200,4
UMIDADE (%)	10,0
% SÓLIDOS EM VOLUME (% V/V)	73,5
SÓLIDOS + ÁGUA (T/H)	222,7
PESO ESPECÍFICO (T/M <sup>3</sup> )	3,25
ÁGUA (M <sup>3</sup> /H)	22,3
SÓLIDOS (M <sup>3</sup> /H)	61,6
SÓLIDOS + ÁGUA (M <sup>3</sup> /H)	83,9
DENSIDADE APARENTE PARA VOLUME (T/M <sup>3</sup> )	1,83
TEOR DE CU (%)	0,01
TEOR DE PB (%)	0,29
TEOR DE ZN (%)	0,40

Fonte: Autoria própria.

### 2.5.2. Alimentação de cimento

O cimento utilizado na alimentação da planta é entregue em caminhões graneleiros e armazenado em dois silos, cada silo tem a capacidade de 839m<sup>3</sup>, Figura 11. O nível do silo é monitorado por um instrumento de nível do tipo radar que fornece uma medição de nível contínua e alarmes nos silos.

Figura 11 - Silos de armazenamento de cimento.



Fonte: Autoria própria.

O cimento é então dosado para a produção da pasta, para isso seu peso é aferido em uma balança que há sob cada silo, Figura 12. A taxa de adição do cimento é ajustada em função da vazão mássica seca de alimentação de rejeito na planta de *pastefill*.

Figura 12 - Balança para dosagem na saída do silo de cimento.



Fonte: Autoria própria.

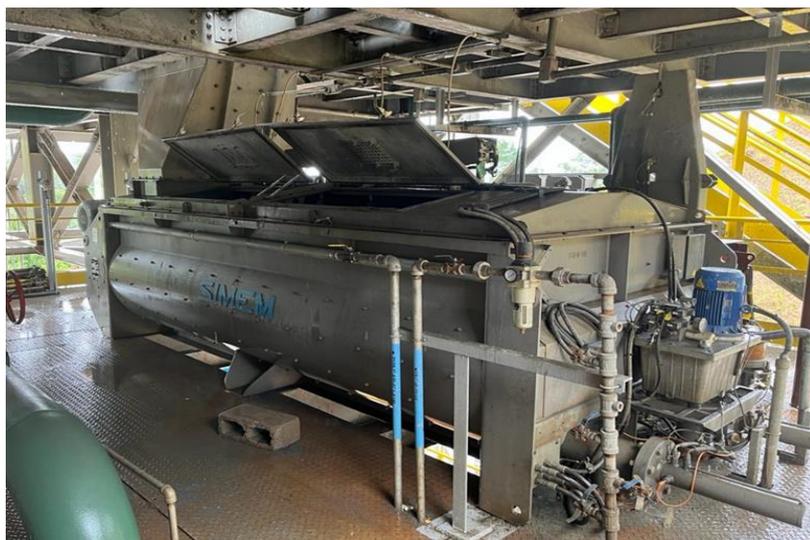
### 2.5.3. Abastecimento de água

O circuito de abastecimento do *pastefill* recebe água em um tanque, sendo ela 100% recirculada da planta de beneficiamento e da mina. O tanque conta com um compartimento utilizável de 170m<sup>3</sup>, onde 120m<sup>3</sup> é a reserva mínima necessária para garantir água para serviço, abatimento de pó na descarga do cimento no misturador, lavagem do misturador em alta pressão, *flushing* e diluição do *pastefill* (60 m<sup>3</sup>/h a 80 m<sup>3</sup>/h). A distribuição da água de diluição da pasta ocorre de forma direta através do tanque, com controle de dosagem por uma válvula de controle de fluxo. A válvula abre quando a balança da correia transportadora registra uma massa definida de rejeito e fecha quando a correia paralisa.

#### 2.5.4. Mistura e distribuição da pasta

A torta de rejeitos e o cimento anteriormente descritos seguem para o misturador de pasta, Figura 13.

Figura 13 - Misturador da pasta.



Fonte: Autoria própria.

Dois eixos equipados com pás misturadoras giram em sincronia para produzir uma pasta homogênea, Figura 14.

Figura 14 - Interior do misturador com sistema de pás.

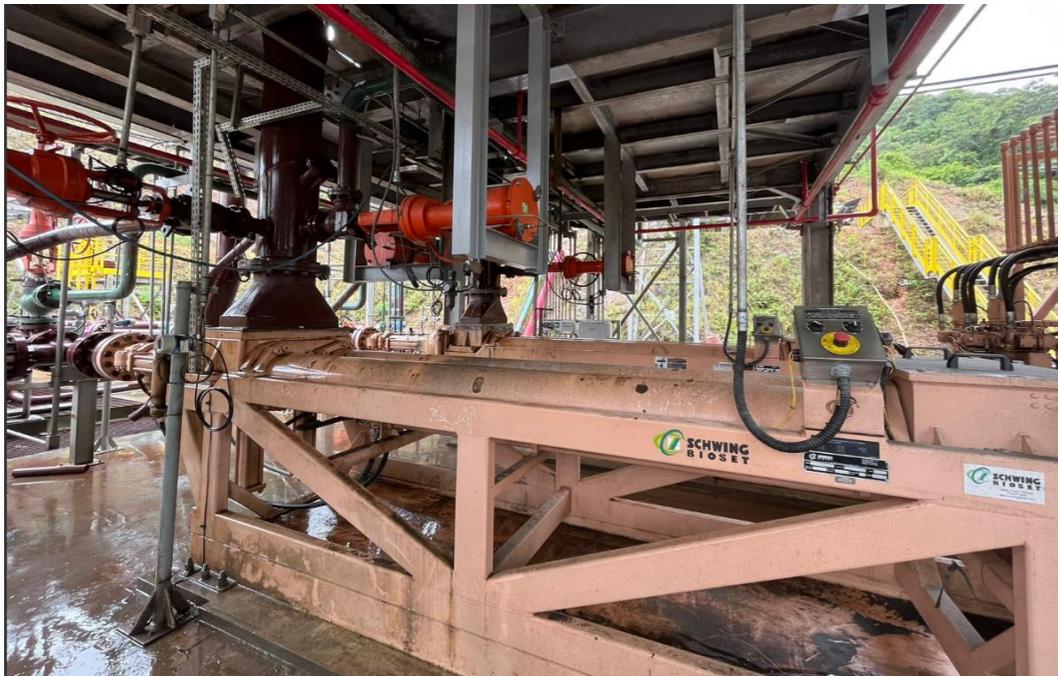


Fonte: Autoria própria.

A vazão mássica seca de rejeito na alimentação é calculada com base na vazão mássica da torta da filtragem, medida pela balança da correia transportadora, descontando a umidade da torta, mensurada pelo medidor de umidade. A vazão mássica seca de rejeito controla a vazão mássica de cimento da balança dosadora na proporção definida, que pode variar de 1% a 6% de cimento. A soma das vazões mássica seca de rejeito e de cimento, descontando o percentual de água no rejeito alimentado na planta, controla a adição de água, tendo como referência o padrão definido.

O misturador de pasta retém nominalmente 3m<sup>3</sup> de material, o que oferece cerca de 1,5 minutos de tempo de residência no misturador para homogeneizar os materiais. Uma vez misturados, um fluxo constante de pasta sai do misturador através da rampa de overflow e se comunica com a caixa cilíndrica/cônica. A caixa serve como um reservatório para quaisquer das duas bombas de polpa de deslocamento positivo Schwing KSP 220 (uma operacional e outra reserva), Figura 15.

Figura 15 - Bomba de deslocamento positivo (pistão).



Fonte: Autoria própria.

A caixa cilíndrica/cônica também permite que a pasta seja despejada em uma área de descarte da planta se houver qualquer problema com a qualidade da pasta ou com o sistema de distribuição, Figura 16.

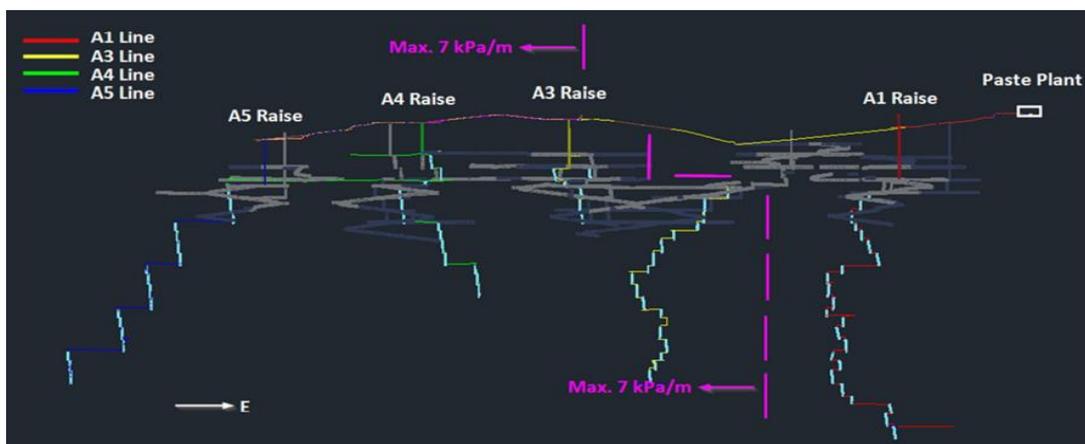
Figura 16 - Reservatório de pasta prévio ao bombeamento.



Fonte: Autoria própria.

A tubulação é disposta nos *raises* de ventilação. Para atendimento às minas Arex e Link será utilizado o sistema de distribuição composto pelas linhas dos *raises* A1, A3, A4 e A5, Figura 17. onde outra bomba de deslocamento positivo *Schwing KSP 220* faz a distribuição da pasta para os *raises* de ventilação A3, A4 e A5.

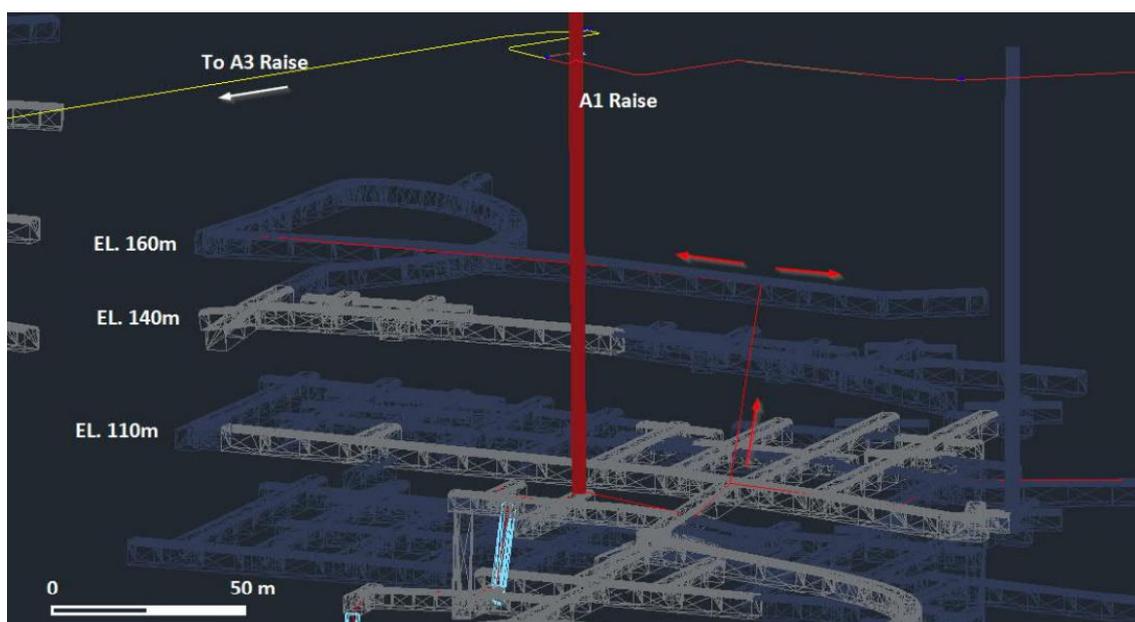
Figura 17 - Visão geral da distribuição da linha de *pastefill* para o subsolo.



Fonte: Relatório interno, (2019).

As bombas são projetadas para bombear a pasta a até 90 bar através da tubulação de distribuição de 200 mm com uma velocidade de fluxo variando entre 1,2 e 1,6 m/s para o *raise* de ventilação A1 e para a estação de reforço de bombeamento no *raise* de ventilação A3. A pasta percorre a tubulação do *raise* A1 e é redistribuída nos subníveis de topo dos realces para preenchimento dos vazios, conforme pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 - Distribuição da linha de *pastefill*- *Raise*.



Fonte: Relatório interno, (2019).

Há ainda uma estação de reforço no *raise* A3, com outra bomba *Schwing* sendo necessária pela extensão da tubulação de superfície e topografia, que provocam a perda de pressão ao longo da linha.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os argumentos teóricos utilizados para fundamentar e auxiliar na compreensão da metodologia aplicada no capítulo 3.

#### 3.1. BACKFILL

Uma das principais funções do enchimento em mineração é permitir um melhor controle geotécnico sobre os vazios criados pela lavra executada. O preenchimento dos vazios é uma das principais ferramentas utilizadas atualmente para aumentar a flexibilidade e permitir melhores estratégias para extração, maximizando a recuperação de reservas minerais.

Além dos fatores relacionados à economia e estabilidade, é importante considerar também os aspectos relacionados ao gerenciamento e uso dos rejeitos resultantes do processo de beneficiamento. Esse processo é conhecido por gerar grandes quantidades de rejeitos que podem incluir lamas, resíduos sólidos, efluentes e gases, entre outros. Portanto, é necessária atenção à gestão adequada desses resíduos a fim de minimizar seus impactos ambientais e maximizar a eficiência do processo produtivo. Quando esse rejeito não pode ser reutilizado para preenchimento das escavações por fatores econômicos, regulatórios, ambientais ou técnicos, são geralmente depositados em pilhas e atenção deve ser dada ao controle de drenagem ácida, responsável pela liberação de metais pesados que podem ser absorvidos pela água e solo, Yilmaz e Fall (2017).

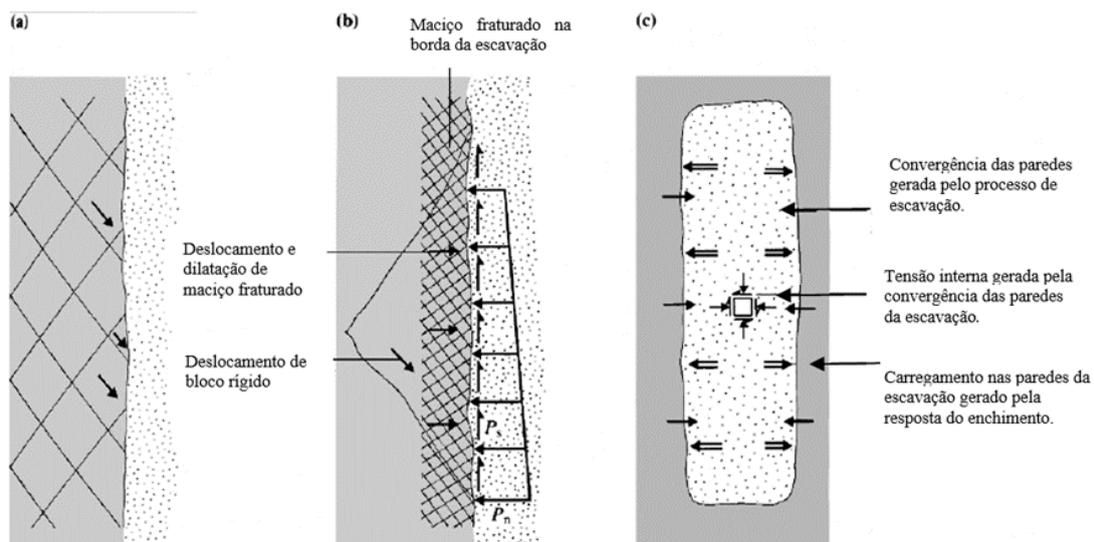
Autores como Potvin (2005) e Brady e Brown (2005) destacam a importância das ações do preenchimento para garantir a estabilidade de escavações em mineração. Basicamente, o preenchimento é considerado efetivo quando gera uma resistência cinemática que impede o deslocamento de blocos-chave nos limites das escavações. Esse preenchimento é geralmente suficiente para manter o confinamento no maciço rochoso, evitando a abertura de juntas e descontinuidades em ambientes de baixa tensão. Isso permite que um estado de atrito ao longo dos planos de fraqueza seja mantido, o que impede a mobilização desses planos, Figura 19a.

O segundo mecanismo é induzido pelos deslocamentos do maciço nos limites das escavações, que podem ser tanto pseudocontínuos quanto em corpo rígido, mobilizando a resistência passiva do enchimento, Figura 19b. A pressão de suporte imposta na interface entre o enchimento e a rocha pode permitir a geração de grandes gradientes de tensão local na interface, onde é possível que uma pequena carga superficial possa ter um efeito significativo na extensão da zona de alívio com um atrito médio.

Outro mecanismo, por fim, é de que se o enchimento estiver adequadamente confinado, ele pode atuar como um elemento de suporte global na estrutura da mina. Ou seja, deslocamentos induzidos pela escavação entre o enchimento e a rocha induzem deformações no enchimento, e esses são refletidos como reduções no estado de tensão em todo o domínio próximo à mina, Figura 19c.

Esses três mecanismos representam o desempenho do enchimento como componentes de suporte superficial, local e global na estrutura da mina. O modo de desempenho do suporte em qualquer instância pode ser considerado relacionado tanto ao modo de deformação do maciço rochoso quanto às propriedades do enchimento.

Figura 19 - Modos de suporte do *backfill*.

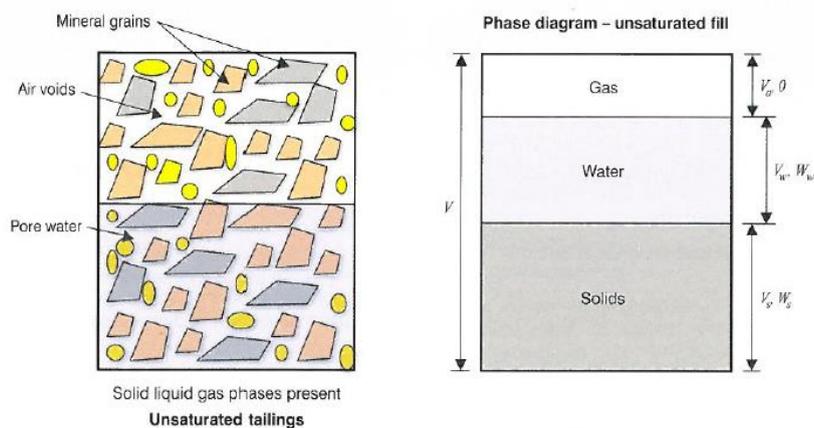


Fonte: Adaptado de Brady e Brow, (2005).

Para compreender adequadamente o funcionamento do preenchimento mineral após sua alocação nos vazios gerados, é fundamental possuir

conhecimentos em mecânica dos solos, tecnologia do concreto e mecânica dos fluidos. De acordo com Kuganathan (2005), é essencial compreender as relações volumétricas envolvidas nesse processo. O autor descreve o comportamento volumétrico do preenchimento, separando os grãos sólidos em uma massa única, os líquidos em outra massa única e os gases das câmaras em um volume separado, o rejeito original pode ser representado em três fases distintas, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Relações volumétricas



Fonte: Adaptado de Kuganathan, (2005).

O volume total do rejeito considerando as três fases distintas como mencionado por Kuganathan (2005) pode ser obtido a partir da Equação (1):

$$V = V_s + V_w + V_a \quad (1)$$

Em que:

$V$  é o volume total do rejeito;

$V_s$  é a soma de todos os grãos sólidos;

$V_w$  é a soma dos volumes de água entre grãos;

$V_a$  é a soma de todo volume de ar entre os grãos e o filme d'água.

Para mensurar os espaços existentes entre as partículas sólidas, utiliza-se a razão dos vazios, a qual é definida por Kuganathan (2005) como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra, Equação (2):

$$\text{Razão de vazios } e = \frac{\text{Volume de vazios } V_v}{\text{Volume sólidos } V_s} \quad (2)$$

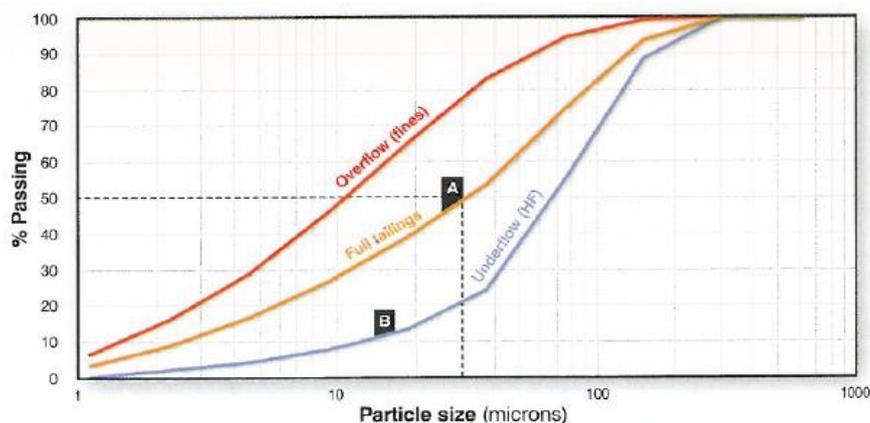
A porosidade é definida por Kuganathan (2005) como a razão entre o volume de espaço existente entre os grãos minerais e o volume total, pode ser obtida pela Equação (3):

$$\text{Porosidade } n = \frac{\text{Volume de vazios } V_v}{\text{Volume total } V} \quad (3)$$

Após o breve contexto da relação dos vazios entre os grãos minerais, deve-se observar o comportamento do tamanho desses grãos no *backfill*. Existem dois métodos que Kuganathan (2005) cita, sendo o primeiro método caracterizado pelo peneiramento com diferentes tamanhos associado com um agitador, e o segundo método utiliza uma luz de laser, produzindo uma distribuição granulométrica contínua.

As análises de granulometria supracitadas têm como objetivo gerar uma curva de distribuição granulométrica, como evidenciado na Figura 21, em um gráfico semi-log, em que o eixo vertical fornece a porcentagem de passante, e o eixo horizontal informa o tamanho da partícula, Kuganathan (2005).

Figura 21 - Exemplo de distribuição granulométrica



Fonte: Kuganathan, (2005).

A medida da propagação da distribuição granulométrica é calculada através do coeficiente de uniformidade, em que a uniformidade do tamanho da partícula de um preenchimento particular médio é expressa pela razão de  $C_u =$

P60/P10, em que os valores ficam no intervalo de 5 até 10 é de um típico *Hydraulic fill*, o  $C_u \cong 11.4$  a 14 é típico de um rejeito fino que não é economicamente viável para produção da pasta. Se recomenda um  $C_u$  maior que 14, sendo uma classificação consonante para um *pastefill* que vai exigir pouca adição de cimento para obter uma boa resistência, Kuganathan (2005).

É possível perceber a escassez de um acervo histórico sobre o preenchimento em minas dos principais países no ramo da mineração, Cowling (1998). Porém, vale ressaltar a concepção apresentada por Potvin et al., (2005) sobre o surgimento do preenchimento em mina através das perspectivas de aplicações em minas da Austrália e da América do Norte. O caso da Austrália começou a partir do século XIX, tendo seu início com o preenchimento denominado como *dryfill* na mina de Broken Hill, com a finalidade de minimizar a subsidência e proteger a infraestrutura da mina subterrânea, procedimento motivado pela ocorrência acentuada de subsidência na Mina Central, que resultou na perda acessos e infraestruturas importantes nos anos de 1905 e 1906, McLeod (1992).

O *dryfill* é uma técnica de disposição de resíduos que consiste em preencher áreas subterrâneas com materiais estéreis ou rejeitos que, de outra forma, seriam descartados em superfície. O material é transportado para o subsolo e aplicado de forma seca e compactada, sem a adição de água ou ligante químico.

De acordo com Potvin et al. (2005), o *dryfill* apresentava um problema que foi observado no decorrer do desenvolvimento da técnica de preenchimento de forma geral, e consistiu na dificuldade do transporte do preenchimento e inserção adequada nos vazios das escavações. Para minimizar esse problema, especificamente na mina Mont Lyell na Tasmânia, se fez uso do rejeito proveniente de moagem com água no ano de 1993.

Cowling (1998) relata que em 1940 a mina Broken Hill, uma das maiores minas de chumbo da Austrália, realizou a implementação do *hydraulic fill* e parte do problema de bombeamento do excesso de água foi ajustado por conta da mistura se manter em um range de 70 a 75% de sólidos, considerado um parâmetro aceitável. Porém, o uso de *hydraulic fill* foi limitado para aplicação em áreas de interesse, em função da região possuir escassez de água, tornando o *dryfill* a opção mais comum em Broken Hill.

A evolução dos processos de preenchimento de vazios em minas subterrâneas na América do Norte apresentou um padrão parecido se comparado com o observado na Austrália, em que houve inicialmente a implementação do *dryfill* em vazios com enchimento em corpos de minério subverticais, e aplicação em escavações quadradas de baixa profundidade, Landriault (2001).

### 3.2. HYDRAULIC FILL

Inicialmente, o processo mais utilizado para o preenchimento de vazios criados pela extração de minério, era o *hydraulic fill* que é composto por material estéril e a água que são misturados em superfície e bombeados através de tubulações ou furos, atingindo a frente de lavra e preenchendo os espaços vazios deixados pela extração do minério.

Vale destacar que o funcionamento desse preenchimento em uma mina “*open stoping*” é caracterizado pelo fechamento do acesso utilizando barricada, dessa maneira, a barricada associada ao sistema de drenagem auxilia no controle do acúmulo de água nesse sistema de preenchimento, o que é um fator que deve ser levado em consideração desde a concepção da metodologia, pelo impacto no sistema de bombeamento da mina (Kuganathan, 2005).

O *hydraulic fill* foi implementado em 1940, nas minas metálicas norte americanas e a evolução do processo para *cemented hydraulic fill* começou na década de 50, adicionando ligantes na mistura, permitindo assim zonas de enchimento maiores, proporcionadas pelo ganho de resistência do material, mesmo que em baixa proporção, Landriault (2001).

Esse sistema de enchimento caiu em desuso pelo alto custo com consumo energético e dificuldade na gestão da água em subsolo.

### 3.3. ROCKFILL

*Rockfill* é um tipo de enchimento muito utilizado na mineração como um dos principais tipos de suporte aplicados para controle e estabilidade dos maciços.

Geralmente é composto pelo material estéril resultante do processo de escavações realizadas em áreas não mineralizadas. Quando não há a necessidade da exposição do enchimento como uma parede.

O *rockfill* é largamente utilizado nas operações de enchimento onde as escavações são preenchidas com material estéril não cimentado e a lavra dos painéis é feita em sequência “*bottom up*”, escavando inicialmente a base dos realces de um painel para cima, de modo que sempre se trabalhe sobre um piso de rocha estéril compactada.

Uma outra variação do *rockfill* é o *cemented rockfill*, que geralmente é aplicado em casos em que é solicitada alguma resistência do enchimento em função da necessidade de exposição do enchimento como uma estrutura sólida ou para os casos em que haja necessidade de algum controle estrutural local ou regional.

### 3.4. PASTEFILL

O *cemented paste backfill* é descrito em diversas bibliografias como um método apropriado para realizar o gerenciamento de resíduos produzido pela moagem de rejeitos, à medida que leva o rejeito ao subsolo da mina em operação, se revelando mais eficaz tecnicamente, economicamente e ambientalmente se comparado ao processo de preenchimento denominado como *hydraulic fill* e ao processo de preenchimento *rockfill*. De acordo com Yilmaz e Fall (2017), o *cemented pastefill* é uma mistura composta por rejeitos finos de processo (com teor sólido entre 75% e 85%), um ligante hidráulico (com proporção entre 3% e 9% do peso total do rejeito seco) e água de mistura. Compreender as características de cada componente dessa mistura é fundamental para entender o comportamento reológico dessa pasta.

Historicamente, o *pastefill* foi utilizado com sucesso pela primeira vez na mina de Bad Grund na Alemanha, em meados de 1980, executando assim, de uma forma segura, o manejo e armazenamento dos rejeitos dentro dos espaços vazios da mina subterrânea, Landriault (2006). Também foi implementado em várias minas Norte Americanas, conseguindo suprir as necessidades de um material que eliminava a drenagem, com uma cura rápida e um rápido retorno

após o preenchimento das áreas, além de estar associado com uma outra vantagem estratégica consistindo na capacidade de eliminar grandes volumes de rejeitos, e nesse caso auxiliando na redução do impacto ambiental, Potvin et al. (2005).

À medida que o tempo avançou, é possível relatar alguns empreendimentos que mais utilizam a técnica do *paste-fill*, como Mount Isa (Austrália) com uma produção anual de 9 Mt, Olympic Dam (Austrália) com 9 Mt de produção mineral por ano, KGHM (Polônia) com três operações, produzindo respectivamente 11,5 Mt/ano, 8,5 Mt/ano e 6,5 Mt/ano, Kidd Creek (Canadá) com uma produção de 3,5 Mt/ano de minério, Cannington (Austrália) com 3,0 Mt/ano e Brunswick (Canadá) com 3,0 Mt/ano de minério. Vale ressaltar propostas de operações de grande escala como Twin Metals (EUA), com uma produção de 51 Mt/ano de minério (Elko Mine *Back fill* Ws, 2022).

O comportamento desse tipo de enchimento cimentado pode ser influenciado por diversos fatores, genericamente, se pode citar: composição do rejeito, quantidade de cimento utilizado na mistura, quantidade de água adicionada, aditivos, tensão de escoamento, temperatura, umidade e juntas frias.

#### 3.4.1. Reologia

Compreender a reologia da pasta torna-se essencial, considerando que essa propriedade é determinante na transportabilidade do *paste-fill*. A capacidade de escoamento da pasta cimentada é afetada pela razão de sólidos, a relação de água/cimento, o tipo e proporção de ligante, os aditivos tanto químicos quanto minerais, a distribuição granulométrica do ligante e do rejeito, o formato das partículas, a densidade e a área de superfície, propriedade da superfície como retenção de água, a composição mineralógica e química dos rejeitos, e as propriedades químicas da mistura com água (concentração de íons e pH). (Nguyen and Boger 1998; Clayton et al. 2003; Henderson et al. 2005, Yilmaz & Fall, 2017).

Com o acréscimo de água na mistura, o valor do teste de abatimento aumenta, e o transporte da mistura através das tubulações para os espaços

vazios subterrâneos são facilitados, porém, água em excesso aumenta o tempo de cura da mistura e diminui a resistência e durabilidade Brackebusch (1994); Grabinsky et al. (2002); apud Yilmaz & Fall, (2017).

A redução da relação água/cimento resulta em um aumento da resistência da mistura do pastefill cimentado devido à melhoria das microestruturas, que se tornam menos porosas, reduzindo assim a probabilidade de ocorrência de liquefação. Essa relação foi identificada por pesquisadores como Kesimal et al. (2005); Ercikdi et al. (2008) apud Yilmaz & Fall, (2017).

A tensão de escoamento e a viscosidade de um fluido são duas propriedades importantes que afetam o comportamento de um fluido. A tensão de escoamento é a força necessária para iniciar o movimento de um fluido, superando a resistência estática dele. Já a viscosidade é a medida da resistência que um fluido apresenta quando submetido a uma tensão de cisalhamento ou tração gradual. (Yilmaz & Fall, 2017). Clayton et al. (2003) evidenciam que uma mistura com o mesmo valor do *slump test*, pode apresentar tensão de escoamento distinta.

Tabela 3 – Mesmo *Slump* para tensão de escoamento diferentes.

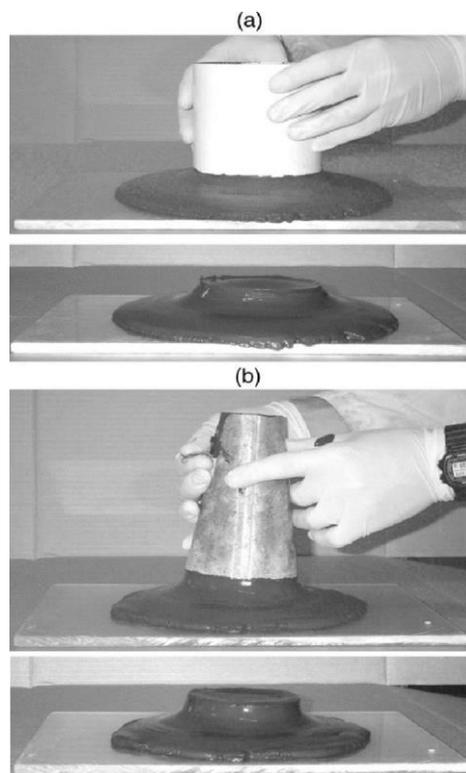
	<b>REJEITOS DE CARVÃO</b>	<b>REJEITOS DE OURO</b>	<b>REJEITOS DE COBRE E ZINCO</b>
GRAVIDADE ESPECÍFICA (KG/M <sup>3</sup> )	1450	2800	4100
CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (%)	36	75	75
DENSIDADE DA POLPA (KG/M <sup>3</sup> )	1120	1930	2310
ALTURA DO SLUMP (MM)	203	203	203
TENSÃO DE ESCOAMENTO (PA)	160	275	330

Fonte: Adaptado de Clayton et al. (2003).

Neste trabalho a capacidade de escoamento é avaliada por meio do teste de abatimento, conhecido como *slump test*, utilizando o cilindro de Boger para relacionar o abatimento com a tensão de escoamento. De acordo com Phasias e Boger (1996), esse método é particularmente vantajoso em situações em que o uso de equipamentos eletrônicos sofisticados não é viável. A medição não é influenciada pelo tipo de material utilizado no teste e a velocidade de

levantamento do cilindro, bem como a superfície em que o experimento é conduzido, não afetam a altura final do abatimento. Portanto, o teste é um método robusto e acessível para medir diretamente a tensão de escoamento, podendo ser aplicado imediatamente com confiabilidade. A medição do *slump* consiste em preencher um molde cilíndrico ou em cone com o material que se pretende medir o *slump*, depois se remove o molde, e o material moldado colapsa em função do peso, dessa forma, a altura final gerada pela deformação, fornece a medida do abatimento (*slump*). Conforme pode ser visto na Figura 22 o modelo (a) é a medida do *slump* no cilindro de Boger e o (b) no cone.

Figura 22 - Foto do material no slump test. (a) Teste cilíndrico e (b) Teste com cone.

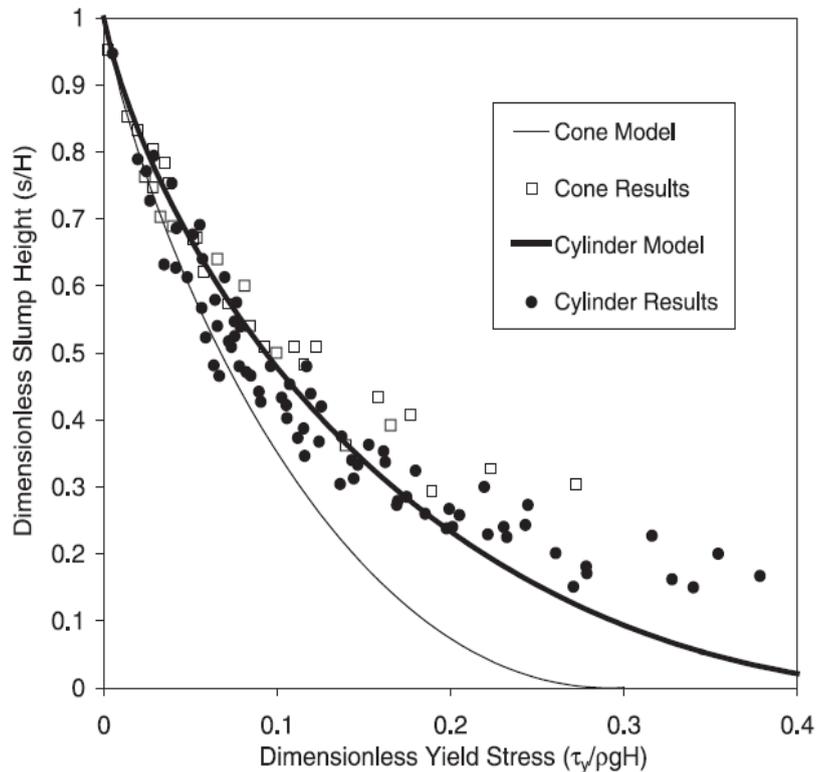


Fonte: Clayton et al. (2006).

A adaptação do teste de *slump* para a geometria cilíndrica foi primeiramente proposta por Chandler (1986) na indústria de alumina, motivado pela simplicidade matemática do modelo Pashias et al., (1996). Em seguida, Clayton et al., (2003) compararam os resultados obtidos pelo teste de *slump* em cone e em cilindro, destacando as diferenças entre o modelo cilíndrico e os resultados medidos. Eles evidenciaram que o modelo cônico não apresenta

acurácia na previsão da relação entre a altura da queda do cone e a tensão de escoamento. Figura 23.

Figura 23 - Resultados de testes de abatimento (slump) e modelos teóricos exibidos na forma de altura de abatimento (slump) sem dimensões versus tensão de escoamento sem dimensões.



Fonte: Adaptado de Clayton et al., (2003).

O modelo analítico para relacionar a tensão de escoamento com a altura de abatimento (*slump*) adotado para a geometria cilíndrica foi desenvolvido por Murata (1984) e Chandler (1986). Dessa forma, os resultados obtidos experimentalmente são comparados através das Equações (4) e (5).

$$s = 1 - 2\tau_y [1 - \ln(2\tau_y)] \quad (4)$$

$$\tau_y = \frac{1}{2} h_0 \quad (5)$$

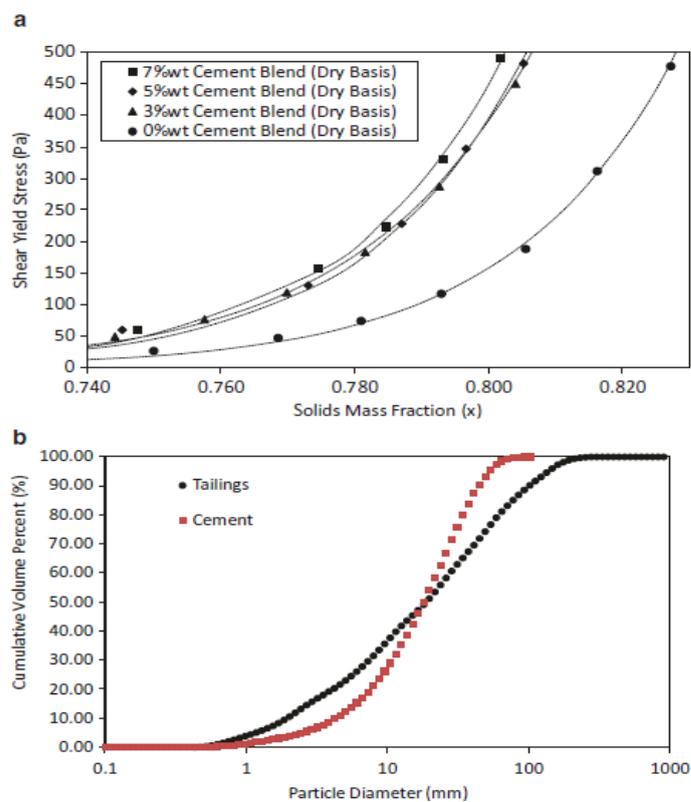
Em que:

$s$  = Variável que representa o modelo de correlação entre os dois métodos;

$\tau_y$  = Tensão cisalhante máxima;  
 $h_0$  é a altura do material não confinado.

Sofra (2017) também estabeleceu uma relação entre a tensão de escoamento e a curva de fração dos sólidos ao adicionar cimento aos rejeitos de minas de chumbo e zinco, realizando comparações com diferentes taxas de adição, Figura 24.

Figura 24 - (a) Efeito da adição de cimento em rejeitos de Chumbo e Zinco.  
 (b) Chumbo/Zinco e OP *cement tailings* PSD.



Fonte: Sofra (2017).

Os resultados obtidos permitiram constatar que as amostras de rejeito sem cimento apresentaram a menor tensão de escoamento, independentemente do percentual de sólidos presente. Além disso, o estudo evidenciou que a adição de cimento em uma concentração de 7% à mistura de rejeito resultou em uma maior tensão de escoamento, quando comparado com concentrações inferiores, Sofra (2017).

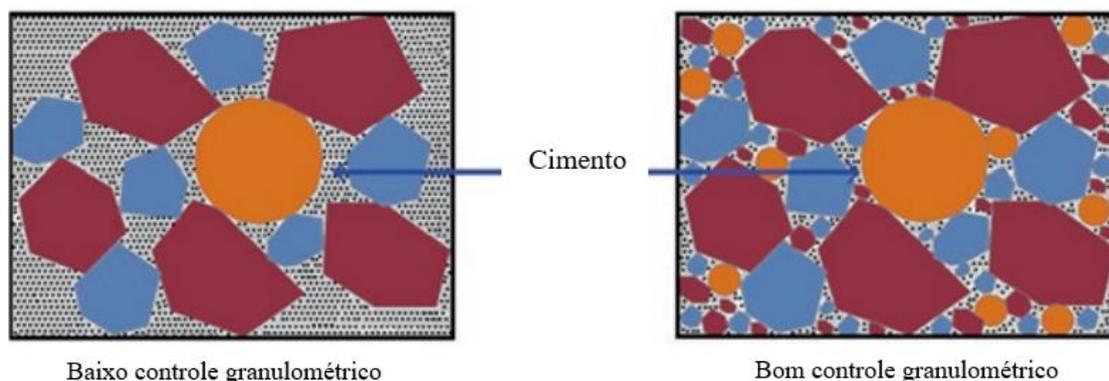
### 3.4.2. Granulometria

Nas aplicações do *pastefill*, considera-se que as partículas são classificadas como finas se tiverem 20 $\mu$ m ou menos. Portanto, a quantidade mínima de partículas finas de 20 $\mu$ m ou menos nos rejeitos para gerar *pastefill* é de aproximadamente 15%, para alcançar uma permeabilidade adequada. Aumentar a quantidade de partículas finas em um enchimento reduz o espaço entre as partículas, tornando mais difícil a passagem da água pelo espaço reduzido entre elas. Além disso, uma alta densidade pode aumentar a viscosidade da mistura, tornando-a mais espessa e difícil de transportar. Uma distribuição granulométrica adequada do material do *pastefill* é uma das características mais importantes para o sucesso da técnica. Em geral, quanto maior a quantidade de partículas finas na curva de distribuição granulométrica, maiores as dificuldades percebidas no transporte da pasta pelo sistema de distribuição (Kuganathan, 2005).

De acordo com Ercikdi et al., (2018), ainda não existe um consenso na literatura atual com relação à distribuição granulométrica ótima para materiais de enchimento por conta da variabilidade mineralógica, qualidade e quantidade do cimento necessário e das variações de cada sistema de linha e bombeamento.

Um material adequadamente constituído com distribuição granulométrica de qualidade, demonstra partículas de tamanhos distintos, com uma distribuição bem graduada. Também é possível que haja uma má distribuição granulométrica com partículas de tamanhos similares, isso causa um efeito de redução do volume em que o cimento pode ser depositado e realizar a conexão entre as partículas, Figura 25.

Figura 25 - Modelo de partículas em material de enchimento.



Fonte: Modificado após Landriault (2001).

Existem muitos estudos na literatura sobre o efeito da distribuição granulométrica dos rejeitos na resistência e estabilidade do *pastefill*. Kesimal et al., (2003) investigaram o efeito do teor de finos ( $-20\mu\text{m}$ ) de rejeitos de moinho na resistência de curto prazo do preenchimento. Ele mostrou que a redução do teor de finos por um processo de deslamagem teve um efeito positivo na resistência de suas amostras de pasta. Os resultados foram observados em amostras contendo rejeitos com até 25% de finos.

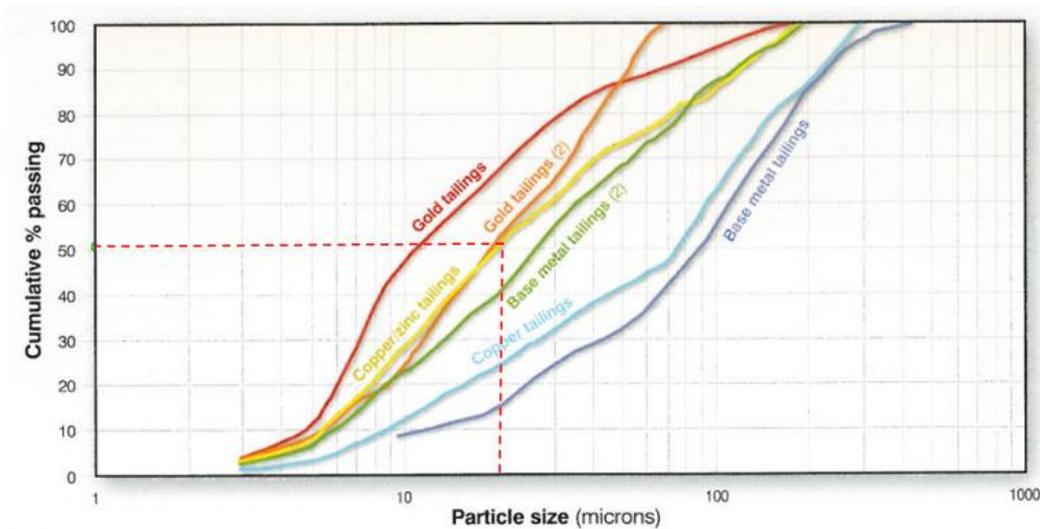
Kesimal et al. (2002) também relataram que rejeitos deslamados apresentaram 12-52% maiores resistências do que os rejeitos recebidos sem tratamento.

Fall et al. (2005) investigaram o efeito do rejeito fino no desenvolvimento de resistência a curto prazo de preenchimento de pasta produzido a partir dos rejeitos de uma mineradora de ouro. Eles observaram que a resistência da pasta apresentou picos de resistência com um teor de finos de 25-30% em peso, que foi interpretado como o teor ótimo de finos para este projeto de *pastefill*.

Em função das características de cada depósito, mineralogia do rejeito, o efeito da distribuição granulométrica na resistência, a estabilidade final da pasta será única para cada mina.

Conforme pode ser observado na Figura 26, um levantamento realizado por Henderson et al (2005), demonstra que para geração de rejeito em minas de zinco e cobre, existe uma tendência de que a curva de distribuição granulométrica contemple a fração fina de rejeito ( $<20\mu\text{m}$ ) em até cerca de 50% dos materiais avaliados.

Figura 26 - Distribuição granulométrica típica para rejeitos conforme tipo de mineralização.



Fonte: Henderson et. al. (2005).

É possível avaliar a variabilidade granulométrica intrínseca a cada tipo de mineralização e conseqüentemente os ajustes que cada tipo de projeto deverá realizar para caracterizar adequadamente a necessidade da utilização do rejeito como preenchimento.

Apesar de alguns estudos indicarem teores de finos entre 25% e 30% como os que apresentam melhores resultados em *pastefill*, não só com relação à resistência, é prático afirmar que a granulometria é um dos principais fatores que influenciam na resistência da pasta e que a composição mineralógica e a granulometria são muito particulares a cada tipo de depósito.

### 3.4.3. Cimento

Os aglutinantes são fundamentais no *backfill* para proporcionar coesão e resistência. Como o cimento (aglutinante hidráulico) fornece resistência ao *backfill*, é preciso ter conhecimento da interação química do material que constitui o rejeito e as características químicas e de hidratação do cimento. Geralmente são aplicados em razões de 1% a 10% do percentual de sólidos da mistura. Tudo depende de qual resistência se deseja alcançar.

De acordo com (Salvodi, 2022), os cimentos e ligantes mais utilizados podem ser divididos em duas categorias principais: cimentos hidráulicos e extensores de cimentos (materiais cimentícios suplementares).

Os cimentos hidráulicos são ligantes que reagem com a água para formar compostos aglutinantes, sendo o mais usual o Cimento Portland comum, que quando misturado com água forma uma pasta que endurece e ganha resistência após um certo tempo, através de uma reação química conhecida como hidratação.

Já os extensores de cimentos (materiais cimentícios suplementares) são materiais adicionados ao Cimento Portland para aumentar o volume de pasta de cimento sem afetar de maneira significativa suas propriedades físicas e químicas, sendo útil para melhorar a trabalhabilidade do cimento e reduzir a quantidade total de cimento em uma mistura, o que pode ajudar do ponto de vista econômico e ambiental associado à produção de cimento. São geralmente materiais pozolânicos como a cinza volante, sílica ativa e o metacaulim, que reagem com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos com propriedades cimentícias, podendo ainda, auxiliar na resistência à corrosão, permeabilidade e reatividade álcali-sílica

É importante ter em mente que o uso de cimentos e materiais cimentícios suplementares deve ser feito com cuidado e atenção às suas propriedades químicas e à hidratação, para garantir a efetividade do *backfill*. A resistência produzida pelo *pastefill* e sua relação com a consistência é muito dependente da relação água/cimento ou quantidade de sólidos totais na mistura.

No Brasil, as Normas ABNT NBR 5733, 12653 e 16697 atuam para especificar as propriedades do metacaulim, das cinzas volantes e escória granulada de alto-forno, respectivamente, para uso como material suplementar.

O tipo de ligante mais comum utilizado em mistura de enchimento é o cimento, pela facilidade de comercialização no mundo e por produzir resultados satisfatórios.

#### 3.4.4 CP II F 32

O cimento CP - II - F - 32 que é objeto de estudo no contexto da pasta cimentada deste estudo de caso é caracterizado por possuir uma adição de fíler calcário em sua composição, representando entre 11% e 25% do teor total. A

norma NBR 16697 estabelece os requisitos para que um cimento seja classificado como Cimento Portland, definindo-o como um ligante hidráulico obtido a partir da moagem de clínquer Portland, misturado com sulfato de cálcio e minerais em proporções estabelecidas pela norma. O clínquer Portland, por sua vez, é formado por silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas, resultantes da queima de misturas moídas de materiais calcários e argilosos em temperaturas elevadas (ABNT, 2018). O cimento Portland composto com material carbonático é designado pela sigla CP - II - F - 32, sendo que a classe 32 representa a resistência mínima à compressão após 28 dias de cura, expressa em MPa, indicando que o CP - II - F - 32 possui uma resistência mínima de 32 MPa (ABNT, 2018). A norma NBR 16697 estabelece que o limite de composição para o CP - II - F - 32 é de 75% a 89% de clínquer e sulfatos de cálcio, além de 11% a 25% de material carbonático.

Os principais tipos de cimento são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Principais cimentos com adição disponíveis no mercado brasileiro.

<b>TIPO DE CIMENTO</b>	<b>NORMA BRASILEIRA</b>	<b>ADIÇÕES</b>
<b>CP - I</b>	NBR 5.732	Sem adição
<b>CP - I S</b>		Contém 1 a 5% de gesso
<b>CP - II Z</b>	NBR 11.578	Contém 6 a 14% de material pozolânico e até 10% de material carbonático
<b>CP - II E</b>		Pode conter de 6 a 34% de escória de alto forno e até 10% de material carbonático.
<b>CP - II F</b>		Contém de 6 a 10% de material carbonático.
<b>CP - III</b>	NBR 5.735	Contém de 35 a 70% de escória granulada e até 10% de material carbonático.
<b>CP - IV</b>	NBR 5.736	Contém de 15 a 50% de material pozolânico e até 5% de material carbonático

Fonte: Adaptado de Lampert (2022).

Schiavini et al, (2021) realizaram uma análise de ataque de sulfatos à 3 tipos de cimento, CP II-F-32, CP IV-32 e CP V-ARI. Em relação à penetração de sulfatos nas amostras geradas para cada tipo de cimento foi observado que a amostra de cimento CP II-F-32 apresentou os maiores níveis de absorção de sulfatos de

magnésio e sódio, com a concentração mais alta na amostra que estava em contato com o sulfato de magnésio, devido à adição de fíler de calcário que favorece o aumento da reação de hidratação nas idades iniciais. Em análises micrográficas, se observou que as maiores alterações microestruturais ocorreram com os cimentos que estavam em contato com a solução de sulfato de magnésio, corroborando com a quantificação realizada para os teores de sulfato, onde o sulfato de magnésio age de forma agressiva nas argamassas com cimento CP II-F-32 e CP V-ARI. Para o CP II-F-32, o sulfato de sódio apresentou a menor formação de etringita, sugerindo que foi o composto menos agressivo para esse tipo de cimento.

O estudo apresenta considerações importantes sobre quais sulfatos podem agir negativamente com relação à resistência com cada tipo de cimento, além da importância de conhecer as variáveis que podem levar ao contato da pasta com substâncias que podem desencadear as reações supracitadas, tanto no contexto de elementos que irão compor a pasta cimentada quanto ao comportamento e exposição da pasta em subsolo.

#### 3.4.4. **Água**

A água para o enchimento geralmente é retirada da água do processo disponível. Se a química da água de processo for aceitável para fins de concreto, ela será aceitável para o enchimento. Se a química da água desviar disso, é importante entender qual é o efeito na hidratação do cimento, já que o custo de usar água limpa pode ser punitivo.

Análises químicas regulares na água de processo ajudam a prever e planejar técnicas de mitigação. Em certas situações, o enchimento é até usado para disposição de salmouras de forma segura. No entanto, o efeito no enchimento e na química do cimento precisa ser entendido para fazer isso de forma segura.

Assim como a reação dos sulfatos a partir de elementos como a pirrotita e calcopirita, a química da água de mistura usada para preparar a pasta pode ter um impacto direto na qualidade do produto. Normalmente os principais compostos que causam redução na resistência da pasta são os sulfatos

dissolvidos ( $\text{SO}_4$ ) da oxidação de minerais de sulfeto. Isso costuma ocorrer durante o processamento metalúrgico, onde minérios com alto teor de sulfetos, como a pirita, podem resultar em água de processo com valores de sulfato muito altos. Outro composto que pode alterar a resistência final da pasta é a hiper salinidade da água devido aos sais dissolvidos no processo.

De acordo com Jiang (2017) o consenso atual, tendo em vista a grande variabilidade do *pastefill* em diferentes operações, é de que o limite para degradação da pasta é de cerca de 2.500 ppm  $\text{SO}_4$ , que é semelhante ao limite para o concreto. A degradação do sulfato do cimento é um fenômeno bem documentado, pois pode levar a uma perda rápida e significativa de resistência da pasta após 28 dias.

Tratando-se da resistência da pasta, misturas que usam águas hipersalinas apresentam uma redução na resistência à medida que o teor de sal aumenta. É possível haver uma redução de 85% na resistência do *pastefill* de 28 dias para misturas com 100.000 mg/L de sal em comparação com misturas com salinidade zero. A perda de resistência é atribuída à substituição de  $\text{Ca}^{2+}$  por  $\text{Na}^+$  nos produtos de hidratação do cimento C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado).

As reações de hidratação do cimento ocorrem na fase aquosa. Portanto, as espécies em solução terão maior influência nas reações de hidratação. Segundo Salvodi (2022), para determinar se a água do processo é um problema, se sugere a seguinte verificação/controle:

- Concentrações de cloreto – Estabelecido pela ASTM C1580-15 no limite de 500mg/L e pela *Canadian Dam Association* (CDA), que estabelece 300 mg/L para águas utilizadas em *pastefill* e barragens. Valores elevados podem causar a aceleração ou retardamento do endurecimento da pasta;
- Metais pesados altamente reativos ou de alto estado de oxidação na água do processo (zinco, chumbo, manganês, arsênio, boro etc.);
- pH da água, deve se manter entre 8 e 10 (ABNT sugere 6 e 8,5 para concretos);
- Concentração de sulfatos deve ser inferior a 2.500ppm.

### 3.4.5. Aditivos

Os aditivos são substâncias químicas que podem ser adicionadas a uma pasta de cimento para alterar suas propriedades e melhorar seu desempenho. Como resultado, a presença de aditivos em rejeitos de pasta de cimento pode aumentar a capacidade de bombeamento, diminuir a relação água-cimento, aumentar a densidade, resistência ou até ajustar o tempo de endurecimento e hidratação de acordo com a finalidade pretendida. No entanto, a quantidade de aditivos utilizada na pasta cimentada pode variar de acordo com o tipo de aditivo e deve ser otimizada para obter um efeito positivo nas propriedades do cimento. Além disso, a adaptação dos aditivos às características físicas e químicas do cimento e dos rejeitos é uma questão relevante que precisa ser estudada (Saedi A. et al, 2021).

Com o intuito de diminuir os custos associados ao *pastefill* que utiliza cimento Portland, um aglutinante com elevado custo, tem-se utilizado materiais ricos em sílica, como Cinzas Volantes (CV) e Escória de Alto-Forno (EAF), juntamente com aditivo plastificante, superplastificante, para promover a substituição parcial do cimento ou para ajustar as características da pasta.

Uma opção mais econômica para obter maior resistência nas misturas de *pastefill* é aumentar o teor de sólidos em vez da quantidade de aglutinante, já que este último representa a maior parte do custo total da operação de preenchimento. Durante o transporte, a mistura de *pastefill* com alta concentração de sólidos e relação água/cimento mínima pode apresentar perdas significativas de pressão e entupimento da tubulação devido às mudanças em seu comportamento reológico, decorrentes da hidratação do cimento.

Para mitigar essas limitações, é possível adicionar um aditivo em dosagens específicas, a fim de otimizar o teor de sólidos para uma melhor capacidade de transporte/bombeamento.

De acordo com estudos realizados por Ercikdi et al. (2010); apud Panchal et al. (2017), a adição de plastificante resultou em uma redução de cerca de 6,6% no teor de umidade para uma determinada fluidez, além de oferecer uma maior resistência contra o ataque interno de sulfatos em comparação com o *pastefill* sem superplastificante.

Além disso, é interessante mencionar que Roshani & Fall (2020) realizaram testes com misturas de *pastefill* contendo nano sílica (NS) e superplastificante, onde observaram que o superplastificante teve um impacto significativo na transportabilidade do *pastefill* com NS. Os resultados mostraram que as amostras com 6% NS e 3% NS na presença de superplastificante apresentaram uma redução de tensão cisalhante de 16% e 40%, respectivamente, após 4 horas de mistura. Isso ocorreu porque a incorporação do superplastificante aumentou a repulsão eletrostática entre as partículas, melhorando a fluidez da mistura e facilitando o seu fluxo através da tubulação, comportamento típico de aditivos que possuem tensoativos em sua composição.

De acordo com Papo, A., Piani, L. (2004); Björnström, J., Chandra, S. (2003), os aditivos que foram utilizados podem ser divididos em três mecanismos de ação principal, sendo eles:

- Aditivos que reduzem a tensão superficial da água no cimento, melhorando sua trabalhabilidade e capacidade de mistura. Eles ajudam a dispersar e estabilizar as partículas, facilitando a homogeneização da mistura.
- Retardante de tempo de pega do cimento, ou seja, o início do endurecimento. Eles permitem um tempo maior para trabalhar com a mistura e melhorar sua fluidez.
- Os aditivos superplastificantes, projetados para aumentar significativamente a trabalhabilidade do concreto, o tornando mais fluido sem a necessidade de aumentar a quantidade de água. Eles ajudam a reduzir a relação água/cimento, melhorando a resistência e a durabilidade do concreto, além de facilitar o bombeamento e a moldagem do material.

Os aditivos utilizados nesta pesquisa, se encontram resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Tipos de aditivos utilizados na pesquisa

ADITIVO	CARACTERÍSTICA PRINCIPAL	OBJETIVO	COMPOSIÇÃO
ELTECH PUMP	Incorporador de ar	MELHORAR TRABALHABILIDADE	TENSOATIVO
ELTECH FOAM	Incorporador de ar	MELHORAR TRABALHABILIDADE	TENSOATIVO
ELTECH HP 1000	Redutor de água	MELHORAR RESISTÊNCIA/TRABALHABILIDADE	CARBOXILATO
ELTECH HP 1050	Redutor de água	MELHORAR RESISTÊNCIA/TRABALHABILIDADE	POLICARBOXILATO
SIKA 17	Redutor de água	MELHORAR RESISTÊNCIA/TRABALHABILIDADE	COMPOSTO
SIKA 18	Redutor de água	MELHORAR RESISTÊNCIA/TRABALHABILIDADE	COMPOSTO

Fonte: Autoria própria.

#### 3.4.6. Resistência à compressão

A resistência do *pastefill* pode ser determinada por testes de resistência à compressão não confinada, por possuir uma facilidade de execução e baixo custo Yilmaz & Fall (2017).

Com base na literatura, para evitar riscos de liquefação e rompimento de barricadas, autores como Been et al. (2002) e Roux et al. (2004) recomendam uma resistência à compressão não confinada mínima de 0,15 MPa na fase inicial de cura. Em minas onde são utilizados métodos de lavra como *cut-and-fill* e *sublevel*, o material de *pastefill* alocado nos espaços vazios proporciona estabilidade das paredes durante a escavação. Nesse sentido, Brackebusch (1994) e Landriault (1995) recomendam uma resistência mínima de 0,7 MPa após 28 dias de cura para essa finalidade.

Cada projeto, em função da necessidade requerida para os enchimentos, deve calcular a resistência necessária, dada sua necessidade. Geralmente, quando o enchimento necessita ser aplicado para um contexto de maior especificidade de projeto ou para que atue como elemento estrutural, sua resistência tende a ser incrementada, conforme supracitado pelos autores.

Com relação à resistência de pastas cimentadas, existe um mecanismo de perda de resistência por uma reação de sulfatos, assim como no concreto, que deve ser levada em consideração para determinar adequadamente o comportamento esperado em termos de resistência a médio e longo prazo dos

projetos. Assim como, para guiar os estudos necessários para conhecer os mecanismos e produtos de mitigação que podem ser utilizados para reduzir os danos à pasta.

Investigações realizadas por Benzaazoua (1996); (Benzaazoua et al., 2004); apud Godbout et al., (2010) mostraram que a precipitação de sulfatos pode contribuir para o endurecimento do material durante o início do processo de hidratação. No entanto, a precipitação desses sulfatos hidratados, que são conhecidos por terem efeito expansivo importante, pode gerar pressões intergranulares suficientes para afetar negativamente a massa endurecida do material de preenchimento, reduzindo sua coesão e, conseqüentemente, sua resistência.

Existem duas categorias principais de ataque por sulfato, o ataque externo que geralmente é menos problemático para o *backfill* e o ataque interno que é um problema predominante para *backfill*.

Ataque externo por sulfato como resultado de água rica em sulfato penetrando o material, caracterizado por:

- Rachaduras gerais na camada externa do cimento;
- Expansão geral dos produtos de hidratação.

Ataque interno por sulfato como resultado de uma mineralogia rica em sulfeto dentro da matriz do enchimento, caracterizado por:

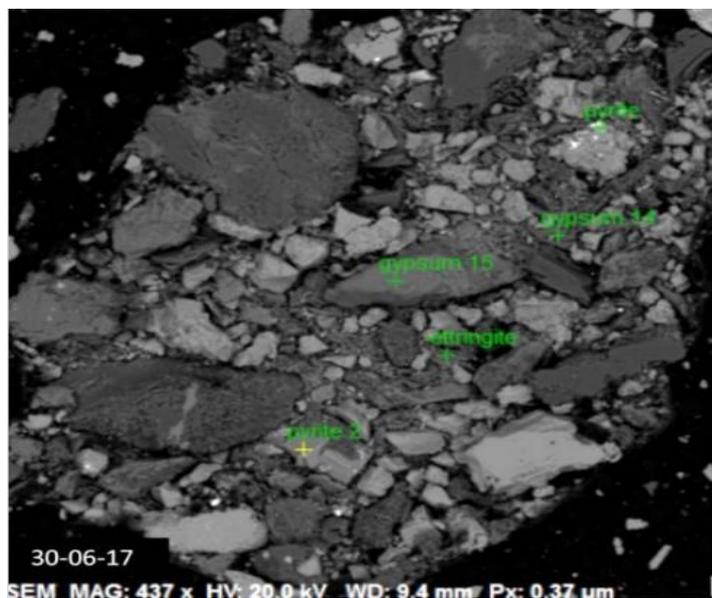
- A formação tardia de materiais expansivos;
- Rachaduras extensas nas estruturas cimentícias internas;
- Degradação severa da resistência à compressão não confinada.

Os Sulfetos na mineralogia sofrem reações de oxidação e produzem ácido sulfúrico. O hidróxido de cálcio disponível no cimento então reage com o ácido sulfúrico e produz gesso. Este gesso está livre para reagir com fases de aluminato tricálcico (C3A) para formar etringita (produto expansivo) na estrutura de cimento já endurecida;

A decomposição das fases de aluminato também favorece a formação de um produto monossulfato instável que pode novamente formar etringita retardada, Figura 27.

A resistência coesiva, a densidade e a porcentagem de sólidos são os fatores determinantes no *paste backfill*, dessa forma a coesão está atrelada diretamente com a qualidade do ligante e do potencial de resistir às reações químicas prejudiciais como ataque de sulfato e inibição da hidratação, que ocorrem em enchimentos cimentados com rejeito rico em sulfeto e/ou sulfato (Benzaazoua & Bussièrè, 2002).

Figura 27 - Raio x de amostra com presença de elementos que indicam reação de sulfatos.

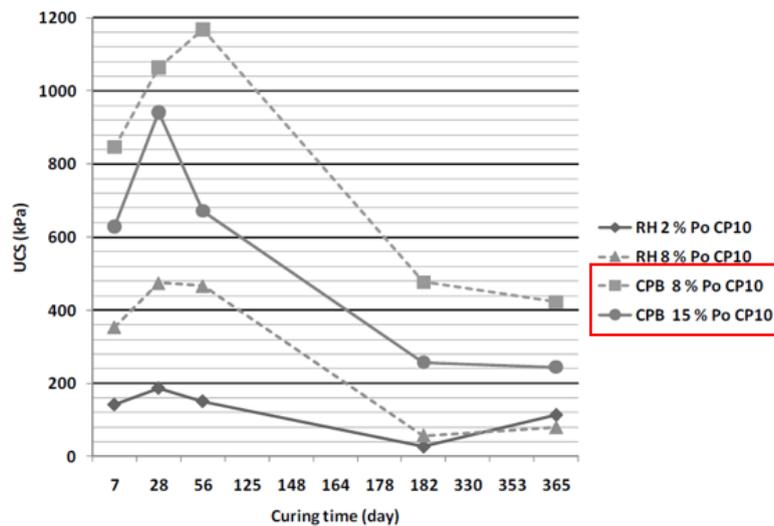


Fonte: Adaptado de Paterson & Cooke 2022.

Estudos realizados por Godbout et al. (2010), avaliaram o impacto da quantidade de pirrotita em misturas de *pastefill* e a resistência à compressão desde o 7º dia de cura até o 365º dia.

Conforme pode ser visualizado na Figura 28, os autores concluíram que as perdas de resistência contendo de 8% a 15% de pirrotita ocorrem de maneira exponencial após os primeiros 60 dias.

Figura 28 - Perda progressiva de resistência do *pastefill* – Ataque de sulfatos



Fonte: Adaptado de Godbout et al. (2010).

Notadamente, o efeito da pirrotita no rejeito de minas polimetálicas e aplicados ao *pastefill*, é um componente que deve ser avaliado cuidadosamente.

Os resultados do estudo apresentam resultados bastante coesivos com relação à perda de resistência da pasta sob o ataque de sulfatos (pirrotita), embora os resultados da concentração de pirrotita no rejeito tenham apresentado concentração média de 5%, é possível que as reações acarretem perda de resistência.

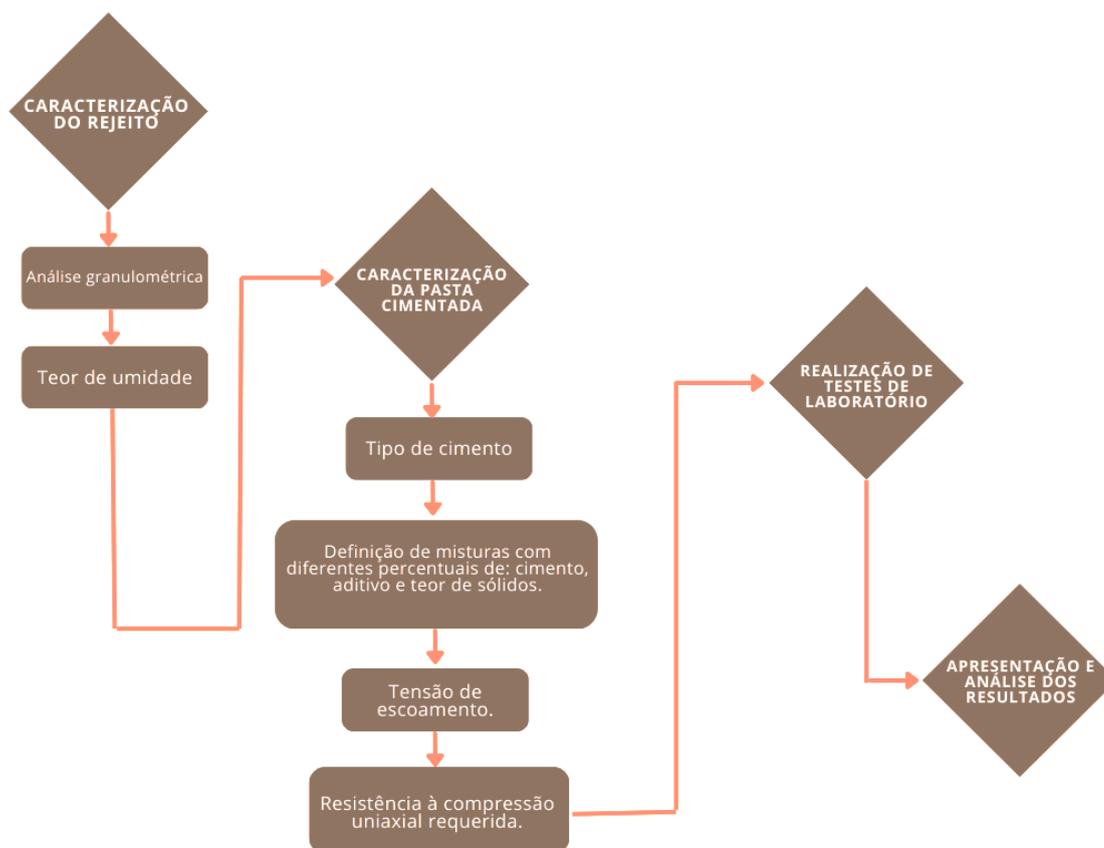
A perda de resistência poderá causar diluições acima do planejado quando houver a exposição da pasta, podem ocorrer falhas estruturais inesperadas colocando em perigo a segurança dos trabalhadores, dificuldade na extração e movimentação do minério, reduzindo a eficiência operacional.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo apresentará os estudos que foram realizados para obter os parâmetros iniciais definidos para entrega e comissionamento da planta de *pastefill* da unidade em Aripuanã-MT.

O fluxograma, detalha as etapas realizadas da análise do presente trabalho.

Figura 29 Fluxograma das etapas do desenvolvimento da metodologia.



Fonte: Autoria própria.

Para a execução de todo o programa de ensaios, foram utilizados aproximadamente 800kg de rejeito, mais de 40kg de cimento e cerca de 130 litros de água.

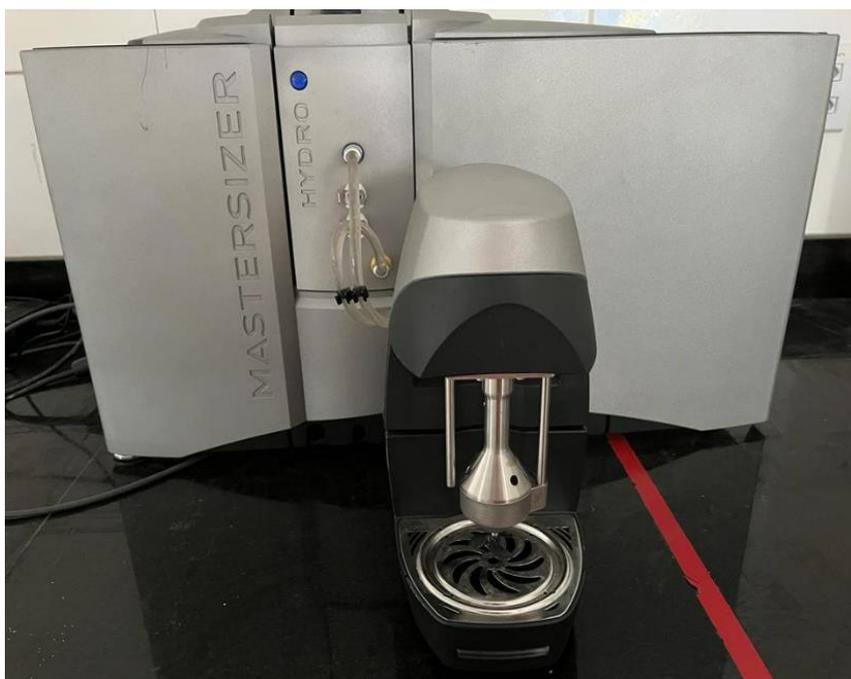
Foram realizados mais de 300 ensaios de compressão uniaxial entre os meses de dezembro de 2022 a fevereiro de 2023, 14 análises via laser para caracterização granulométrica, 96 amostragens de teor de umidade e 83 testes

de *Slump* Boger para compor esse estudo e seus resultados serão detalhados nesse capítulo.

#### 4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO REJEITO

Para a determinação da curva granulométrica, o rejeito foi analisado no equipamento Mastersizer 3000 da Malvern Panalytical da Figura 30. Com o intuito de determinar o tamanho das partículas presentes na amostra, é utilizada uma técnica que mede a intensidade da luz dispersa quando um feixe de laser interage com as partículas dispersas. A análise desses dados permite o cálculo preciso do tamanho das partículas responsáveis pelo padrão de dispersão observado.

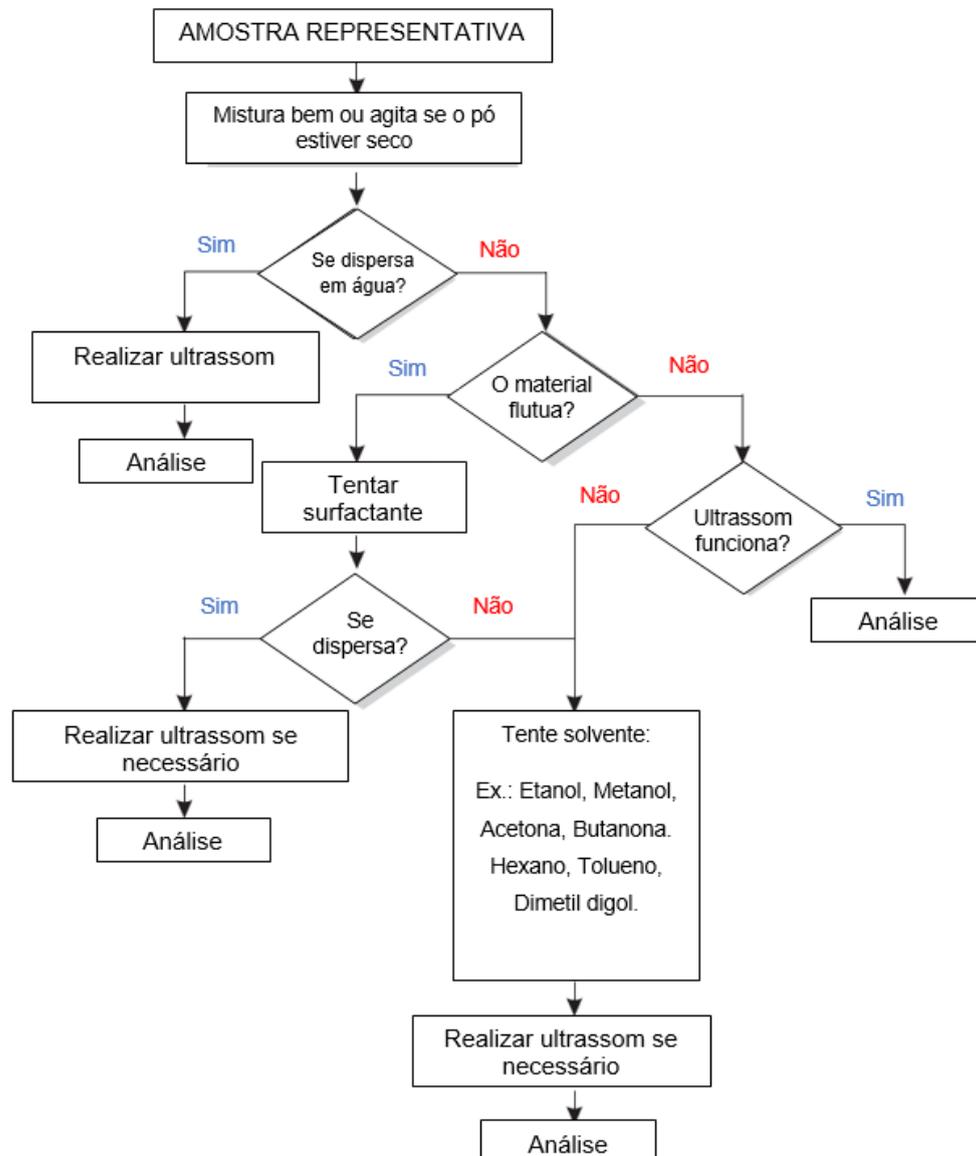
Figura 30 - Granulômetro laser do laboratório utilizado na caracterização das partículas.



Fonte: Autoria própria.

Cada ensaio é realizado em uma coleta de material, cada coleta é homogeneizada e quarteada para gerar uma amostra de 20kg (suficiente para aproximadamente 7 moldes 10x20cm), representativa para a caracterização. No fluxograma abaixo é possível visualizar o caminho da preparação da amostra até o ensaio.

Figura 31 - Fluxo de preparação da amostra para análise.



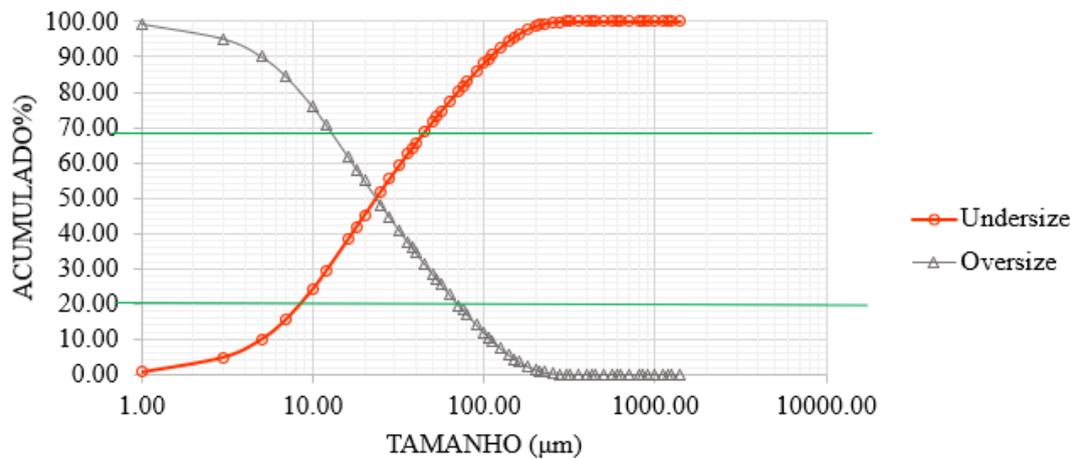
FONTE: Adaptado de Malvern Panalytical, (2022).

As amostras foram coletadas no galpão de filtragem e após terem sido quarteadas foram colocadas no desagregador de partículas e analisadas. É procedimento do laboratório utilizar o ultrassom para ajudar na dispersão das partículas. As amostras passam por um banho ultrassônico no Hydro Ev por 20 segundos previamente ao processo de leitura óptica.

Cada amostra passa pelo processo de varredura óptica 5 vezes e a curva considerada para o banco de dados é a média das 5 avaliações realizadas.

Para o exemplo da Figura 32, é possível visualizar o padrão do resultado obtido a partir do tratamento da informação gerada pelo equipamento.

Figura 32- Ensaio de granulometria RJ\_GF\_CO\_00022\_GR.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.2. ANÁLISE DE UMIDADE DO REJEITO

Para a avaliação da umidade presente no rejeito é utilizado o equipamento MB25 da OHAUS que determina a umidade a partir da perda de peso de uma amostra seca por calor, Figura 33.

Figura 33 - Analisador de umidade.



Fonte: Autoria própria.

As amostras são colocadas dentro do equipamento e inicia a elevação de temperatura em modo automático que encerra o processo de secagem quando for detectada perda inferior a 1mg em 60 segundos.

#### 4.3. DETERMINAÇÃO DE DENSIDADE DO MATERIAL

Previamente a realização do teste de *slump* Boger, as amostras passam pela caracterização de densidade a partir de um densímetro digital modelo: Maxxdp, Figura 34.

Após a mistura da pasta, é feito o enchimento do recipiente de 1L e tomada a medida de densidade.

Figura 34 - Densímetro



Fonte: Autoria própria.

#### 4.4. TENSÃO DE ESCOAMENTO

Para estimar a tensão de escoamento das amostras ensaiadas, foi utilizado o *slump test* com o cilindro de Boger. A correlação do valor de *slump* com a tensão de escoamento foi realizada a partir do cálculo de escoamento da pasta.

Foi utilizada a metodologia de Phasias e Boger (1996) para obtenção das correlações de *slump* e tensão de escoamento, conforme apresentado nas Equações 4 e 5.

Na Figura 35 é possível visualizar os dados de entrada para cálculo da tensão de escoamento, de modo que:

**Densidade da Mistura:** a relação entre a massa da mistura e o volume ocupado pela mistura, expressa em quilogramas por metro cúbico.

**Altura do Cilindro:** A altura vertical do cilindro em milímetros. Observe que a altura e o diâmetro interno do cilindro devem ser iguais (10x10 cm).

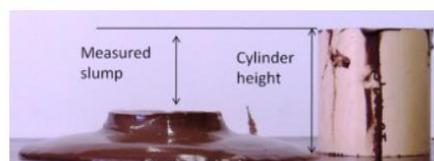
**Abatimento Medido:** A altura medida do topo do cilindro até o topo do material abatido, expressa em milímetros.

Figura 35 - Calculadora da tensão de escoamento.

### Slump yield stress calculator

Calculate yield stress using Boger cylinder

INPUT PARAMETERS	A	B	C	
Mixture Density	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	kg/m <sup>3</sup>
Cylinder Height	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	mm
Measured Slump	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	mm
<b>OUTPUT</b>				
Yield Stress	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Pa



Fonte: <https://www.patersoncooke.com/tools/>

Acesso em abril/2023.

#### 4.4.1. Cimento

O cimento que está sendo utilizado é denominado como CP II-F-32 de Nobres-MT, utilizado em rejeitos com pirrotita, apresentou menor perda de resistência em torno de 4 a 5%, destacando que em 28 dias, a resistência obtida foi de 494 kPa com adição de 5% de cimento sob o rejeito seco. Obtendo 480 kPa em 28 dias com 4% de cimento.

O cimento CP II-F-32 normalmente tem adição de filer calcário, de acordo com NBR 11.578 – Cimento Portland composto. Outro dado importante sobre o cimento é que segundo a norma ABNT NBR 5733 estabelece um limite máximo de 0.6% de Na<sub>2</sub>O (óxido de sódio). Um cimento que possui baixo teor de álcalis pode favorecer a não reação álcali-silica (RAS). Um fator que pode ser relevante para o rejeito utilizado na pesquisa, que é composto por cerca de 45% de quartzo e 17% de micas.

Ainda não foi evidenciado em testes para o rejeito alvo da pesquisa, uma vez que não foram realizados testes com mais de 28 dias de cura qual o potencial da reação de ataque de sulfatos ao cimento. De acordo com Godbout et al. (2010), a separação magnética da pirrotita pode ser uma alternativa no processo para reduzir o efeito de perda de resistência a longo prazo.

#### 4.4.2. Água utilizada no *pastefill*

São realizados testes mensais de controle total de contaminantes e variáveis legais que necessitam de controle ambiental. Para controle de curto prazo são aferidos hora a hora parâmetros da água de recirculação, sendo: pH, turbidez e cor.

Nos relatórios mensais, são coletadas amostras de água e aferidos vários parâmetros e comparados segundo a Resolução CONAMA nº 430/2011.

#### 4.4.3. Resistência mínima requerida

Com o objetivo de alcançar os valores de resistência mínima de 480 KPa, foram preparados diversas misturas, a partir de um percentual de sólidos fixado em 76%, variando a concentração de cimento em 4% e 6% e se considerou a

adição de aditivos das marcas Eltech e Sika para os testes iniciais. Os aditivos foram adicionados em percentual relativo ao peso do cimento, conforme recomendação do fabricante.

As misturas com 4% e 6% de cimento para aditivos Eltech e seu respectivo tempo mínimo de cura foram os correspondentes à Tabela 6.

Tabela 6 - Mix para aditivos Eltech

<b>Sólidos %</b>	<b>Cimento %</b>	<b>Aditivo Foam (%)</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Total amostras</b>
76%	4%	1.0%	3	2	2	7
76%	6%	1.0%	3	2	2	7
76%	4%	1.5%	3	2	2	7
76%	6%	1.5%	3	2	2	7
76%	4%	2.0%	3	2	2	7
76%	6%	2.0%	3	2	2	7
<b>Sólidos %</b>	<b>Cimento %</b>	<b>Aditivo HP1000 (%)</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Total amostras</b>
76%	4%	1.0%	3	2	2	7
76%	6%	1.0%	3	2	2	7
76%	4%	1.5%	3	2	2	7
76%	6%	1.5%	3	2	2	7
76%	4%	1.8%	3	2	2	7
76%	6%	1.8%	3	2	2	7
<b>Sólidos %</b>	<b>Cimento %</b>	<b>Aditivo HP1050 (%)</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Total amostras</b>
76%	4%	1.0%	3	2	2	7
76%	6%	1.0%	3	2	2	7
76%	4%	1.5%	3	2	2	7
76%	6%	1.5%	3	2	2	7
76%	4%	1.8%	3	2	2	7
76%	6%	1.8%	3	2	2	7
<b>Sólidos %</b>	<b>Cimento %</b>	<b>Aditivo Pump %</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Total amostras</b>
76%	4%	1.0%	3	2	2	7
76%	6%	1.0%	3	2	2	7
76%	4%	2.0%	3	2	2	7
76%	6%	2.0%	3	2	2	7
76%	4%	3.0%	3	2	2	7
76%	6%	3.0%	3	2	2	7
76%	4%	4.0%	3	2	2	7
76%	6%	4.0%	3	2	2	7

Fonte: Autoria própria.

Para as misturas com aditivos Sika, com as variações também em 4% e 6% de cimento, foram correspondentes à Tabela 7.

Tabela 7 - Mix para aditivos Sika.

<b>Sólidos %</b>	<b>Cimento %</b>	<b>Aditivo Sika 17 (%)</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Total amostras</b>
76%	4%	2%	3	2	2	7
76%	6%	2%	3	2	2	7
76%	4%	3%	3	2	2	7
76%	6%	3%	3	2	2	7
76%	4%	4%	2	2	2	6
76%	6%	4%	3	2	2	7
<b>Sólidos %</b>	<b>Cimento %</b>	<b>Aditivo Sika 18 (%)</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Total amostras</b>
76%	4%	2%	3	2	2	7
76%	6%	2%	3	2	2	7
76%	4%	3%	3	2	2	7
76%	6%	3%	3	2	2	7

Fonte: Autoria própria.

Amostras com adição de areia média também foram confeccionadas de acordo com a estimativa de ensaios da Tabela 8.

Tabela 8 - Mix para adições com areia.

<b>Sólidos %</b>	<b>Areia %</b>	<b>Cimento %</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Total amostras</b>
76%	5%	4%	3	2	2	7
76%	5%	6%	3	2	2	7
76%	7.5%	4%	3	2	2	7
76%	7.5%	6%	3	2	2	7
76%	10%	4%	3	2	2	7
76%	10%	6%	3	2	2	7

Fonte: Autoria própria.

Após a definição das misturas, se dá início ao processo de mistura da pasta com a pesagem dos agregados e rejeito em balança, seguido do direcionamento do material para a argamassadeira. Depois de 3 minutos de mistura, os corpos de prova de 10x20cm são moldados de acordo com a norma ABNT NBR 5738. Após a moldagem, os corpos de prova são identificados com etiquetas padrão e são encaminhados para a câmara úmida e aguardam o tempo definido para os ensaios em seus moldes.

#### 4.5. ENSAIO UNIAXIAL

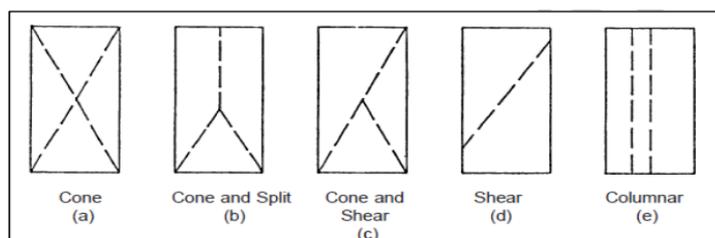
Os corpos de prova moldados, são retirados da câmara úmida e levados ao laboratório.

As amostras após serem retiradas dos moldes, passam pelo processo de retificação, são pesadas e tomadas as medidas finais para configuração dos ensaios.

A amostra é colocada na prensa servo hidráulica para rompimento e é aplicada uma carga axial progressiva até seu rompimento.

Os ensaios são validados após a análise e consideração do tipo de ruptura, Figura 36, conforme recomendado pela Norma ASTM C39. Os dados são coletados pelo software do equipamento e consolidados em um banco de dados após avaliação técnica do ensaio.

Figura 36 - Tipos de ruptura válidas para ensaio uniaxial.



Fonte: ASTM C39, (2003).

Na Figura 37, podem ser visualizados exemplos de ensaios realizados e validados na campanha de testes da pesquisa.

Figura 37 - Ensaios validados – De acordo com ASTM C39 (2003).



Fonte: Autoria própria.

## 5 ESTUDOS DE PRÉ VIABILIDADE

Diversos estudos foram conduzidos inicialmente para buscar parâmetros mínimos de direcionamento para o enchimento com *pastefill* na unidade de Aripuanã. Estudos que derivaram desde a fase de *pre feasibility*. Estas informações foram segmentadas nesse capítulo, uma vez que sua consideração nesta pesquisa acrescenta incerteza, podendo distorcer os resultados apresentados ao final da metodologia e as conclusões.

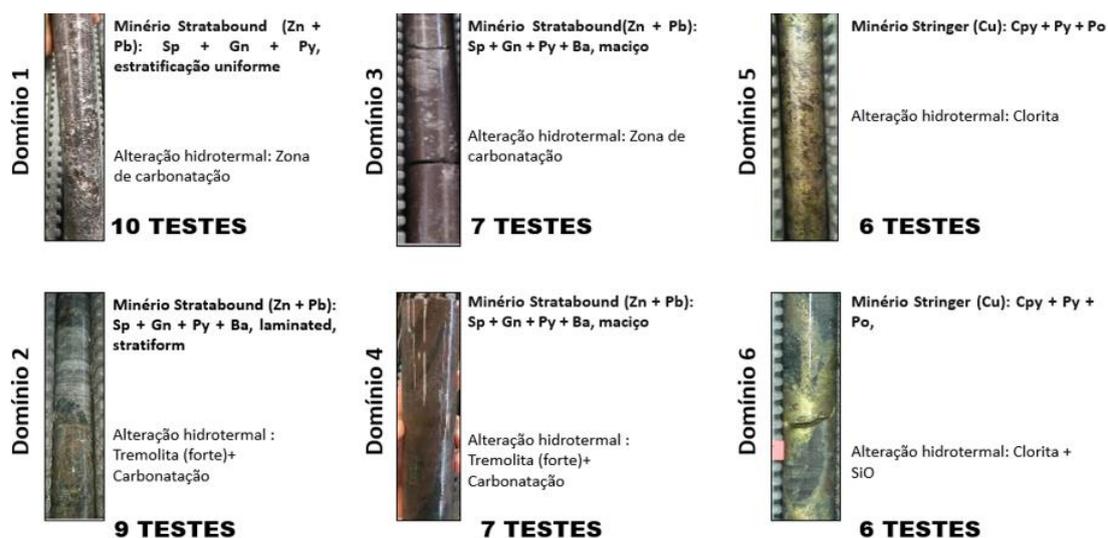
### 5.1. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA MINERALOGIA DO REJEITO E INFLUÊNCIA DE CONTAMINANTES

Ensaio metalúrgicos iniciais executados na planta piloto em uma unidade industrial foram realizados nos anos de 2019 e 2020 com o fim de caracterizar os processos necessários para obtenção de parâmetros iniciais para realizar a flotação e recuperação do concentrado de interesse. Nas campanhas, também foi possível identificar a presença dos contaminantes que podem provocar efeitos indesejados a longo prazo na resistência da pasta, em função das reações de sulfetos com o cimento.

A campanha de geometalurgia do ano de 2019 teve como objetivo avaliar o provável material que alimentará a planta nos dois primeiros anos de operação e auxiliou na definição das melhores estratégias operacionais em função da variação dos contaminantes. Os testes metalúrgicos buscaram abranger amostras compostas de várias litologias e teores dos materiais de interesse e de ganga para auxiliar na construção das estratégias de controle do sistema da planta.

Foram realizadas composições em amostras de 7 diferentes litologias, também foram considerados misturas de minérios *Stringer* e *Stratabound*. Variações de teores de Cobre e contaminantes para o *Stringer*, minério *Stratabound* maciço com altos teores de sulfetos e o minério disseminado com teores moderados de sulfeto e elevado conteúdo de talco, litologias com baixos teores metálicos e altos conteúdos de contaminantes, Figura 38.

Figura 38 – Amostras do ensaio metalúrgico.



Fonte: Autoria própria.

A primeira caracterização mineralógica foi realizada no ano de 2019, onde foram definidos três principais contaminantes que poderiam trazer algum efeito indesejado como elemento da pasta, quantificados em percentuais conforme a Tabela 9. Conforme pode ser observado, a média de proporção de pirrotita na alimentação varia consideravelmente.

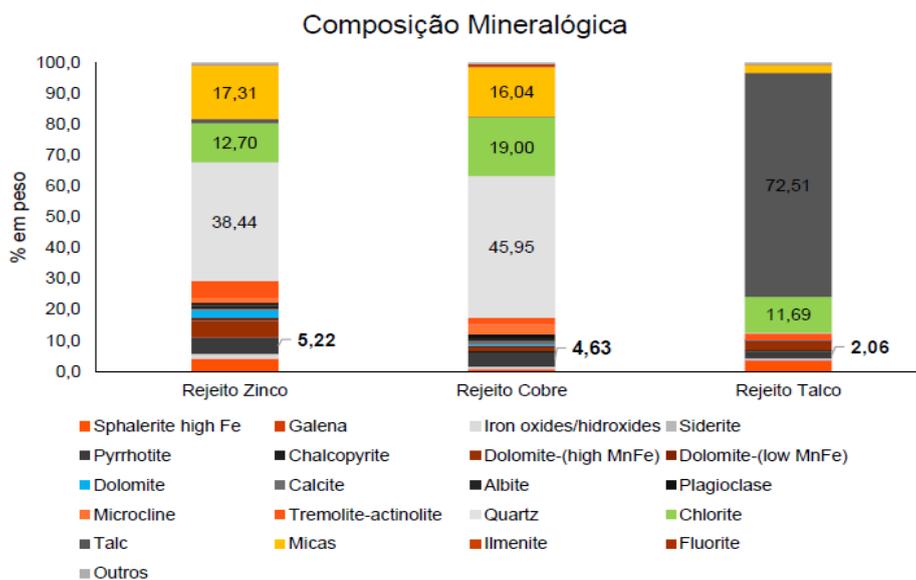
Tabela 9 - Análise modal de contaminantes de interesse para *pastefIII* - alimentação da flotação (2019).

AMOSTRA	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA - GEOMETALURGIA									
	20- Q4- LCT	21- Q1- LCT	21- Q2- LCT	21- Q3- LCT	21- Q4- LCT	22- Q1- LCT	22- Q2- LCT	22- Q3- LCT	22- Q4- LCT	COMPOSTA LCT10-11
PIRROTITA	5.09	2.98	8.40	2.76	0.93	6.13	2.29	1.74	5.45	4.84
PIRITA	2.95	0.60	0.26	1.92	0.45	9.37	0.85	2.32	4.06	5.91
ARSENOPIRITA	1.44	0.00	0.05	0.00	0.00	1.11	0.00	0.00	0.00	0.77
CALCOPIRITA	3.59	0.34	2.46	0.95	0.77	1.03	1.01	0.46	0.60	1.00
TALCO	1.06	6.04	1.43	5.00	0.00	3.28	1.79	0.02	2.25	4.32

Fonte: Autoria própria.

Em 2020 foi realizado o teste na planta piloto em outra unidade de beneficiamento, abaixo se apresenta a composição mineralógica gerada após o todo o processo de flotação realizado, Figura 39.

Figura 39 - Caracterização mineralógica do rejeito e proporção de pirrotita.

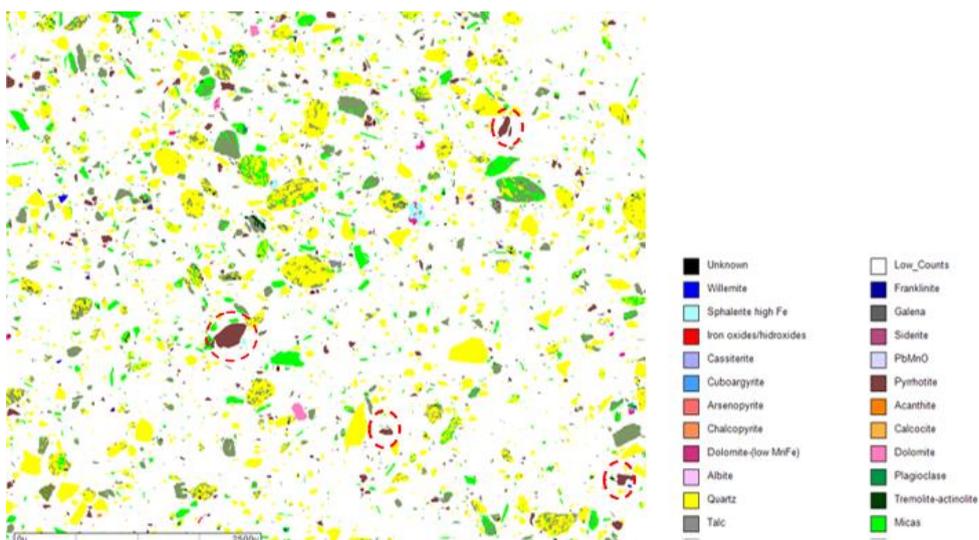


Fonte: Relatório interno, (2020).

Como pode ser observado na composição mineralógica do rejeito, a pirrotita fica compreendida em uma proporção aproximada de 5% para o rejeito gerado no processo de flotação.

A caracterização mineralógica foi realizada pela metodologia *Mineral Liberation Analyse* (MLA). Na Figura 40 é possível identificar as partículas de pirrotita em roxo.

Figura 40 - MLA do rejeito.



Fonte: Relatório interno, (2020).

Pirrotita e calcopirita são minerais presentes na mineralogia do depósito Aripuanã-MT, sendo assim, estão também presentes no rejeito que é utilizado na produção de *pastefill*.

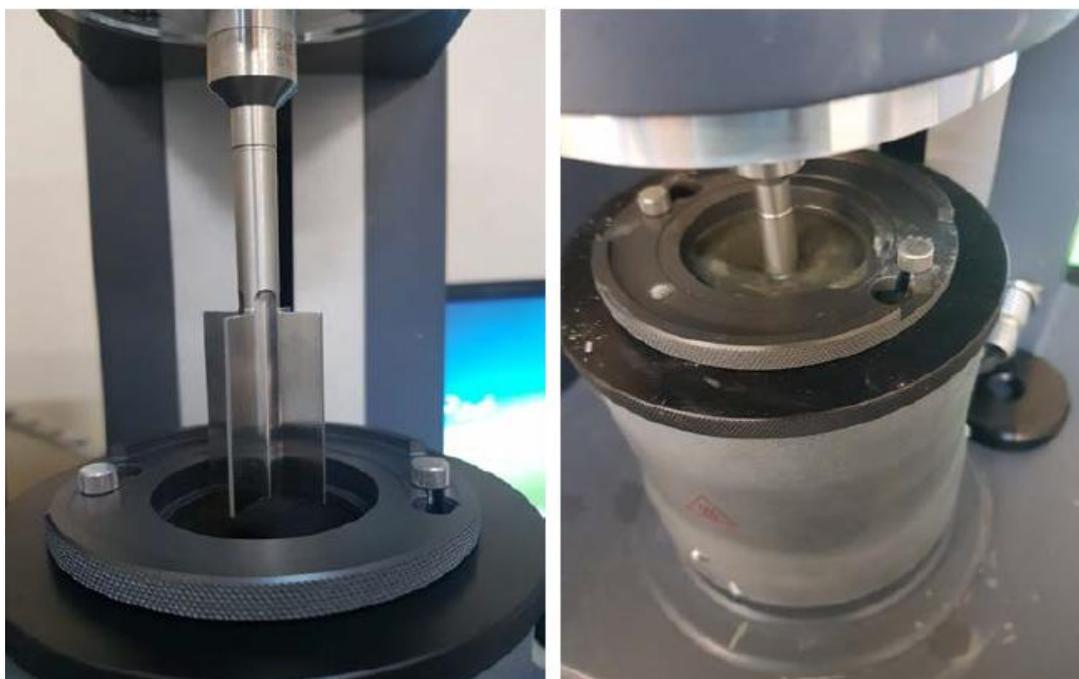
## 5.2. TENSÃO DE ESCOAMENTO

Foram realizados testes iniciais no ano de 2019 com a ruptura de corpos de prova e uma correlação para a tensão de escoamento, através da metodologia do cilindro de Boger e reômetro.

Utilizou-se rejeitos da flotação do *Stringer* (cobre) + 2%, 4% e 6% de cimento (adicionados sob o peso seco do rejeito). Rejeito da flotação do *Stratabound* (zinco) + 6% do concentrado final de talco e 2%, 4% e 6% de cimento tipo CP III.

Para a realização das análises na pasta foi utilizado o reômetro modelo ARG2, fabricado pela TA *Instruments* e utilizada a geometria tipo Vane, conforme Figura 41.

Figura 41 - Geometria Vane à esquerda e ensaio em andamento à direita.

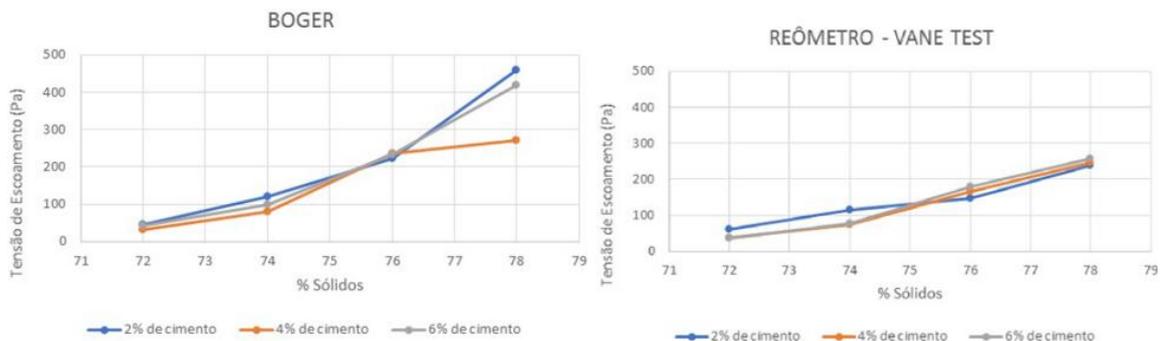


Fonte: Relatório interno, (2019).

Também foi utilizado o cilindro Boger para o cálculo da tensão de escoamento, com dimensões: 100x100 mm.

Os resultados obtidos para as misturas com 2%, 4% e 6% de cimento para as misturas com rejeito da flotação de Stringer estão resumidas na Figura 42.

Figura 42 - Resultados dos testes reológicos – Cobre

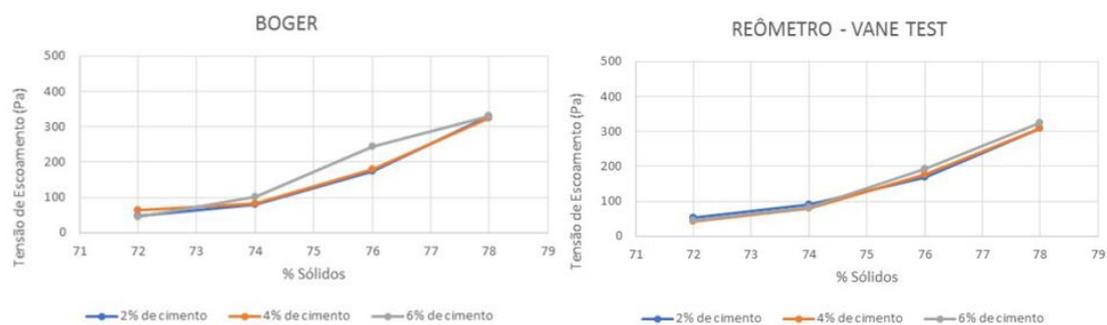


Fonte: Relatório interno, (2019).

É possível identificar, que embora haja uma boa correlação entre as duas metodologias, se nota uma divergência quando as situações envolvem maior viscosidade para todos os teores de cimento a partir de misturas com mais de 76% de sólidos.

Para os ensaios com o rejeito da flotação de Zinco com talco, se observa uma correlação maior entre as duas metodologias. Conforme Figura 43.

Figura 43 - Resultados dos testes reológicos – Zinco+Talco.



Fonte: Relatório interno, (2019).

Pelos resultados demonstrados na campanha, a tensão de escoamento da pasta, está compreendida em no máximo 250Pa para misturas, com até 6% de teor de cimento.

Na campanha de ensaios de 2022, os resultados obtidos com relação à tensão de escoamento foram bem distintos dos que foram apresentados no relatório de 2019.

A campanha de 2022 realizou os testes de tensão de escoamento somente com o cilindro Boger, e obteve resultados para misturas com teor de 4% e 5% de cimento para um percentual de sólidos fixo de 76% os valores conforme Tabela 10.

Tabela 10 Tensão de escoamento para ensaios de 2022.

TENSÃO DE ESCOAMENTO - 4% CIMENTO			5% CIMENTO	
VALOR	SEM PIRROTITA	COM PIRROTITA	SEM PIRROTITA	COM PIRROTITA
MÁXIMO (Pa)	940.9	880.3	1494.0	1617.0
MÉDIA (Pa)	412.9	401.9	569.8	451.1
MÍNIMO (Pa)	169.7	136.2	251.4	106.7
MEDIANA (Pa)	348.1	381.1	451.9	425.0

Fonte: Relatório interno, (2022).

Com relação aos dados listados acima, os maiores valores de tensão de escoamento foram observados para a mistura com o mesmo cimento, CP III 40 RS- Santa Helena – 4% e 5% correspondentes a valores muito acima da média.

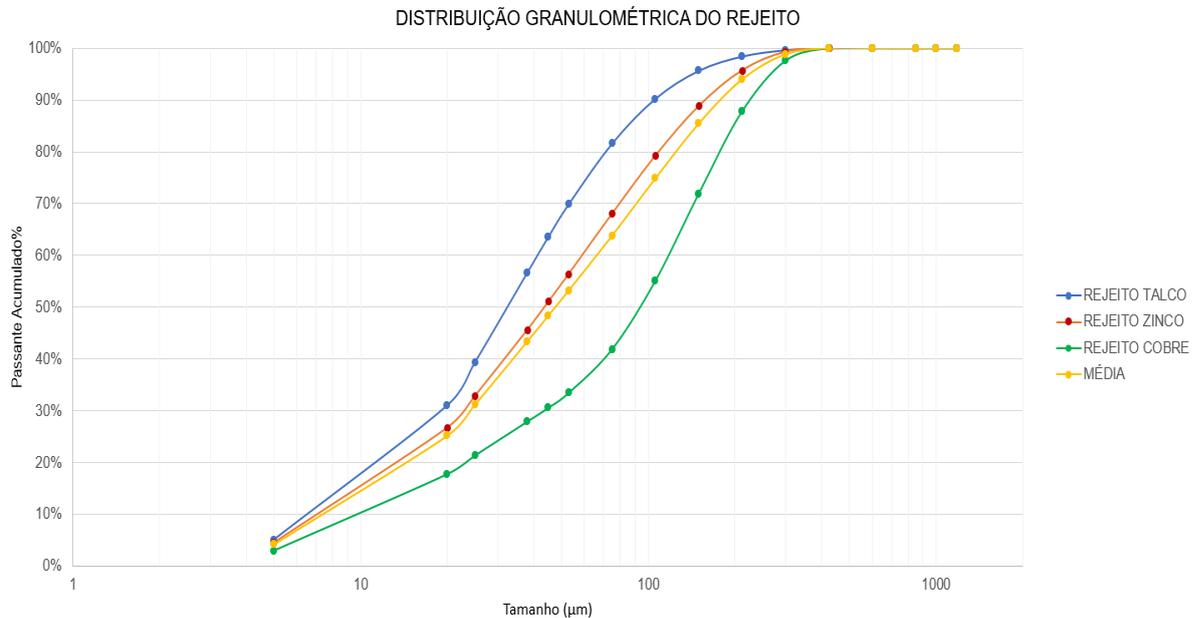
Com relação aos valores mínimos, na mistura com ambos os percentuais de cimento, dois valores muito abaixo da média foram identificados para o cimento CP II Z 32 - Cuiabá- Polím e para a mistura com 5% de cimento também com um valor baixo CP IV 32 RS – Nobres.

### 5.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO REJEITO

A caracterização granulométrica do rejeito foi realizada com o equipamento Mastersize 3000 pela equipe de processos da unidade de Aripuanã com o rejeito que foi processado em outra unidade de beneficiamento. A metodologia utilizada para caracterização é similar à utilizada no laboratório de Mecânica de Rochas e *Pastefill* da unidade.

As curvas granulométricas conforme Figura 44, abaixo, foram obtidas a partir da análise.

Figura 44 - Caracterização granulométrica dos rejeitos.



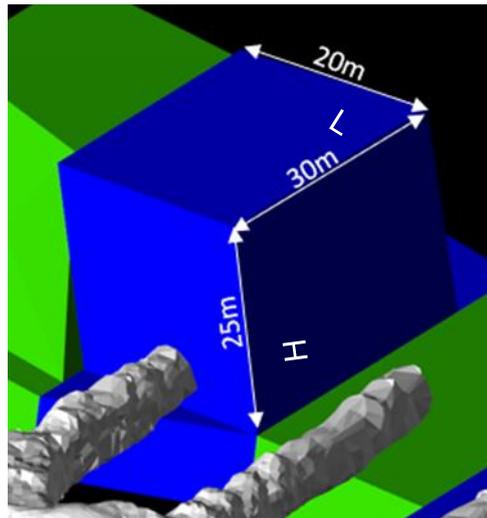
Fonte: Autoria própria.

A obtenção das curvas granulométricas foi conduzida com o rejeito de cada tipo de recuperação isoladamente, comportamento que não reflete um contexto prático de operacionalização, uma vez que a filtragem e o processo de estocagem e empilhamento provocam a mistura dos rejeitos, de modo a impossibilitar a separação do material para avaliação similar.

#### 5.4. RESISTÊNCIA MÍNIMA REQUERIDA

A determinação da resistência mínima da pasta de Aripuanã foi baseada no dimensionamento de estabilidade de Mitchell (1983), considerando o raio hidráulico a ser exposto no projeto inicial adotado para a mina, em que os realces secundários realizarão a exposição da pasta dos realces primários, as medidas do realce considerando um vão composto pela altura de 25m e comprimento de 30m foi utilizado como padrão.

Figura 45 - Dimensões estimadas dos realces de VRM.



Fonte: Autoria própria.

O Cálculo para dimensionamento da resistência da pasta é obtido a partir da Equação (6) de Mitchell (1983):

$$\sigma_{UCS} = F \gamma H / (1 + \frac{H}{L}) \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_{UCS}$  = Resistência à compressão UCS (MPa);

F = Fator de segurança;

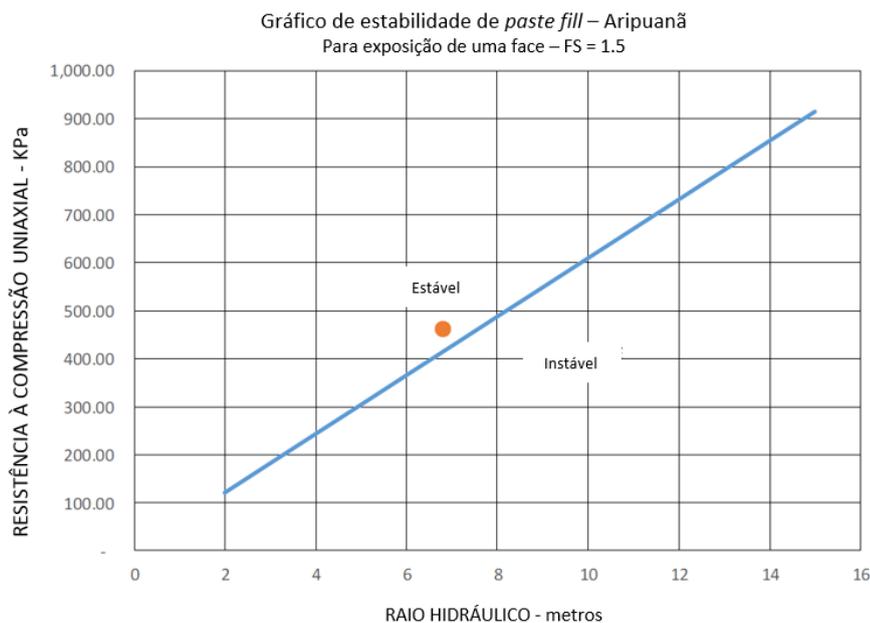
$\gamma$  = Densidade da pasta em MN/m<sup>3</sup>;

H – Altura da exposição, m;

L = Face da exposição.

Após uma revisão pela Minefill Services (2019), foi recomendada a adoção de um fator de segurança, não inferior a 1,5 com resistência estimada em 480 kPa. Recomendação prudente em função do início das operações, ganho de experiência e exposição das primeiras paredes em pasta para verificar os resultados de diluição, o gráfico abaixo apresenta o gráfico criado para a mina, Figura 46.

Figura 46 - Estabilidade do *pastefill*.



Fonte: Adaptado de relatório interno, (2019).

A partir da informação da necessidade de resistência mínima da pasta em função da parede a ser exposta, foram direcionados os ensaios de resistência à compressão uniaxial com o objetivo de alcançar a resistência recomendada.

#### 5.4.1. Determinação das dosagens de rejeito e cimento

Campanhas iniciais para determinação dos parâmetros da pasta foram conduzidas no ano de 2019 e 2022 nos laboratórios de Furnas e Pattrol. Foram realizados diversos testes com variação de percentual de sólidos (72% a 78%) e cimento (1% a 6%) para definição do tipo de cimento e a dosagem do mesmo em relação ao percentual de sólidos. As avaliações foram necessárias para entender que tipo de cimento poderia alcançar melhores resultados, visto as particularidades que já eram conhecidas a respeito da presença de pirrotita no rejeito, que se oxida em sulfato reagindo com a Cal presente no Cimento Portland.

Nos resultados a seguir, veremos o resumo dos ensaios que foram realizados com o percentual de 76% de sólidos, por terem sido as misturas que atingiram os resultados mais adequados quanto à resistência mínima requerida e menores percentuais de sólidos.

Foram testadas as alternativas de cimento conforme Tabela 11.

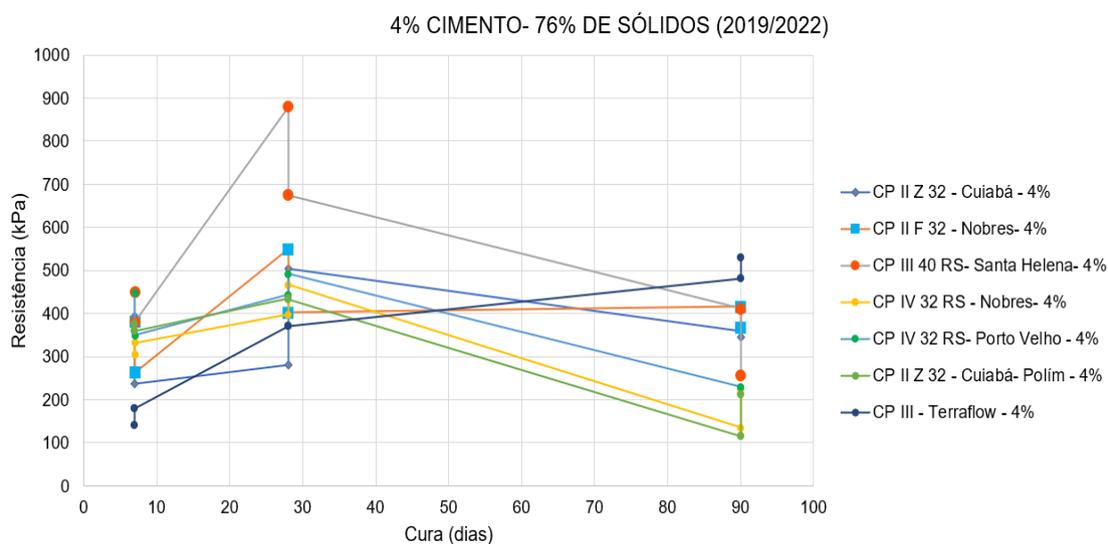
Tabela 11 Alternativas de cimento.

Rejeito com Pirrotita	Rejeito sem Pirrotita
CP II Z 32 - Cuiabá	CP II Z 32 - Cuiabá
CP II F 32 - Nobres	CP II F 32 - Nobres
CP II Z 32 – Cuiabá - Polím	CP II Z 32 – Cuiabá - Polím
CP III 40 RS – Santa Helena	CP III 40 RS – Santa Helena
CP IV 32 RS - Nobres	CP IV 32 RS - Nobres
CP IV 32 RS – Porto Velho	CP IV 32 RS – Porto Velho
CP III 40 - Terraflow	NA

Fonte: Relatório interno, (2019).

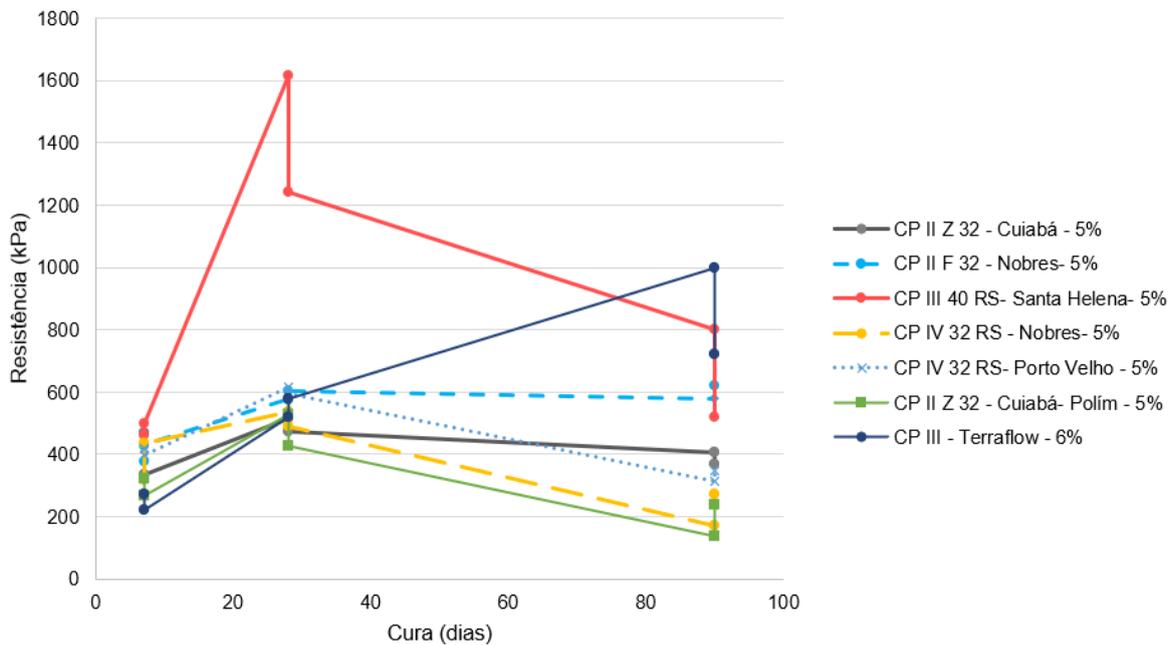
Os testes foram conduzidos em amostras com e sem pirrotita, com cimento nas concentrações de 1% a 5% e tempos de cura de 7, 28 e 90 dias.

Figura 47 – Resultados dos testes de tipos de cimento – 4% de adição.



Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Resultados dos testes de tipos de cimento – 5% e 6% de adição  
5% E 6% DE CIMENTO 76% DE SÓLIDOS - (2019/2022)

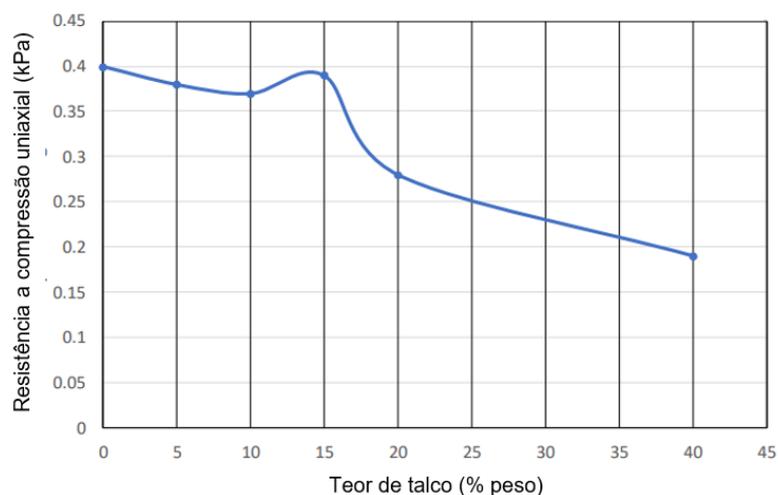


Fonte: Autoria própria.

Também foram avaliados os resultados e o impacto na resistência quanto ao percentual de talco incluso no rejeito, na Figura 49, abaixo, podem ser vistas as perdas de resistência associadas ao maior percentual de talco no rejeito, indicando uma perda de resistência da ordem de 50% ao se comparar 0% de Talco com 40% de Talco.

Figura 49 - Talco e seus efeitos na resistência

Impacto do Teor de Talco na Resistência  
28 Dias de cura – 4% de cimento



Fonte: Adaptado de relatório interno, (2019).

Os principais resultados derivados da campanha de ensaios, estão resumidos na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados - Alternativas de cimento.

<b>Rejeito com Pirrotita</b>	<b>Rejeito sem Pirrotita</b>
<b>CP II Z 32 - Nobres</b>	<b>CP II Z 32 – Cuiabá</b>
Perda de resistência de 18% com 4% de cimento	Sem perda de resistência
Aos 28d resistência de 590 kPa com 5%	Aos 28d resistência de 401 kPa com 5%
<b>CP II F 32 - Cuiabá</b>	<b>CP II F 32 – Nobres</b>
Menores perdas de resistência com 4%/5%	Perda significativa de resistência – 43%
Aos 28d resistência de 494 kPa com 5% de cimento	Aos 28d resistência de 466 kPa com 5%
<b>CP II Z 32 – Cuiabá - Polím</b>	<b>CP II Z 32 – Cuiabá- Polím</b>
Não obteve resistência com 1% de adição	Não obteve resistência com 1% de adição
Perda significativa de resistência - 60%	Sem perda de resistência
Aos 28d resistência de 477 kPa com 5%	Aos 28d resistência de 471 kPa com 5%
<b>CP III 40 RS – Santa Helena</b>	<b>CP III 40 RS- Santa Helena</b>
Perda significativa de resistência – 54%	Sem perda de resistência
Aos 28d resistência de 1430 kPa com 5%	Aos 28d resistência de 957 kPa com 5%
<b>CP IV 32 RS – Nobres</b>	<b>CP IV 32 RS – Nobres</b>
Perda significativa de resistência – 57%	Sem perda de resistência
Aos 28d resistência de 514 kPa com 5%	Aos 28d resistência de 430 kPa com 5%
<b>CP IV 32 RS – Porto Velho</b>	<b>CP II 32 RS- Porto Velho</b>
Perda significativa de resistência – 46%	Pequena perda de resistência – 9%
Aos 28d resistência de 605 kPa com 5%	Aos 28d resistência de 675 kPa com 5%
<b>CP III 40 - Terraflow</b>	NA
Apresentou boas resistências em ambas as opções. Mistura com 4% atende necessidade	

Fonte: Autoria própria.

Em função do rejeito não ter um processo específico de separação no circuito de filtragem e estocagem, não é possível assegurar que o *pastefill* será executado com rejeitos sem concentrações de pirrotita, pirita ou talco. Neste

contexto, três opções de cimento com adição de 4% e 5% de cimento adicionados ao rejeito atingiram os resultados esperados aos 28 dias e mantiveram o valor esperado de aproximadamente 480 kPa após esse período, foram:

- CP III 40 RS – Santa Helena – 5%
- CP II-F-32– Nobres – 5%
- CP III 40 – Terraflow – 4%

É possível identificar que os resultados foram satisfatórios para os tipos supracitados, com exceção do cimento CP III 40 RS – Santa Helena que apresentou resistência adequada à necessidade com 4%, embora com grande perda de resistência. Por razões de logística, custo/t e em função de alcançar um resultado satisfatório com menor variação de resistência após os 28 dias, o cimento escolhido para o *pastefill* foi o CP II-F-32– Nobres-MT.

É importante salientar que o cimento CP II-F-32 não possui características de resistência a ataque de sulfatos, embora tenha apresentado bons resultados iniciais, mesmo havendo probabilidade apresentada pela literatura de haver quedas de resistência após o período de até 60 dias.

## 5.5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA

As avaliações de água para utilização só foram realizadas a partir do comissionamento e entrega da planta de pastefill da unidade, que ocorreu em 2022.

Todos os ensaios dos anos de 2019 e 2022 foram realizados fora da cidade de Aripuanã e os laboratórios receberam somente o rejeito e cimentos como constituintes principais da pasta. As campanhas referentes aos anos supracitados não analisaram a água utilizada.

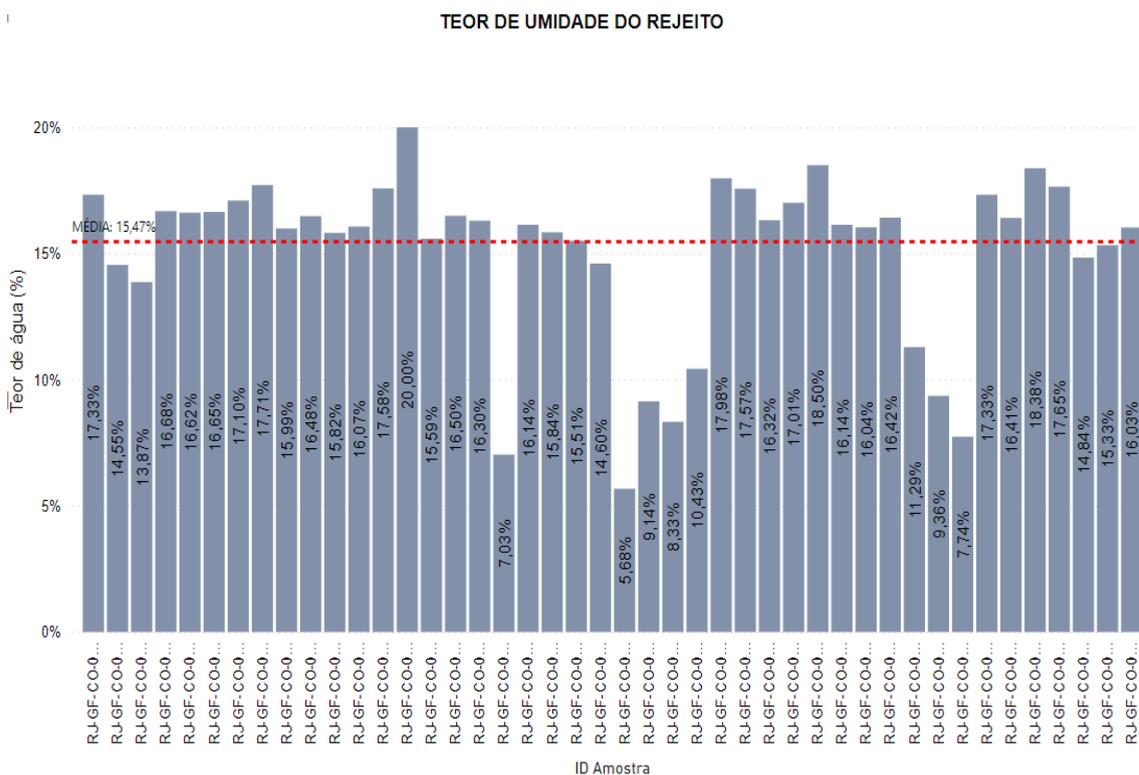
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA CARACTERIZAÇÃO

No presente capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da metodologia proposta.

### 6.1. RESULTADOS DA UMIDADE DO REJEITO

Com relação aos valores máximos e mínimos, os resultados chegaram a apontar uma diferença de 287% quando se analisa as amostras que apresentaram seus respectivos picos de umidade em 22% na amostra RJ-GF-CO-00020-UM-8 e 5,68% na amostra RJ-GF-CO-00018-UM-7.

Figura 50 - Gráfico apresentando os resultados obtidos em ensaios de umidade coletados pós filtragem.



Os dados apresentaram um desvio padrão de 3%, a mediana de 16,25% e uma variância muito baixa, menor que 0.01. Os desvios observados na umidade podem estar relacionados ao efeito pilha, onde o material recém-saído do filtro prensa apresenta alto teor de água, enquanto o material da base da pilha

também é afetado, mesmo que visualmente. O mesmo se aplica ao material com baixa umidade, que pode ter passado por um processo de perda de água ao longo do tempo em que esteve armazenado. Esse processo é influenciado pelos parâmetros de ajuste da planta de beneficiamento, onde as paradas de manutenção e ajustes do processo levam a intervalos de armazenamento de rejeitos por vários dias, o que faz com que o material superficial da pilha perca água devido à baixa umidade do ar e ao carreamento da água para a base da pilha.

## 6.2. AVALIAÇÃO GRANULOMÉTRICA

O coeficiente de uniformidade foi medido a partir das granulometrias nas faixas P60/P10. Na Tabela 13 é possível identificar que o coeficiente de uniformidade da maioria das amostras ensaiadas apresenta um baixo valor, indicando, segundo a literatura, que o coeficiente apresentaria adequação para misturas do tipo *hydraulic fill*.

Tabela 13 - Coeficiente de uniformidade do rejeito.

P60 (µm)	P10 (µm)	COEF. UNIFORMIDADE	ID AMOSTRA
27.37	4.03	6.8	RJ-GF-CO-00013-GR
24.09	3.55	6.8	RJ-GF-CO-00018-GR
25	5	5	RJ-GF-CO-00020-GR
45	5	9	RJ-GF-CO-00017-GR
100	5	20	RJ-GF-CO-00019-GR
28	5	5.6	RJ-GF-CO-00021-GR
32	5	6.4	RJ-GF-CO-00022-GR-1
45	5	9	RJ-GF-CO-00024-GR-1
125	7	17.9	RJ-PF-CO-00001-GR
40	5	8	RJ-PF-CO-00003-GR
40	5	8	RJ-PF-CO-00002-GR
32	5	6.4	RJ-PF-CO-00005-GR
63	5	12.6	RJ-GF-CO-00025-GR-1

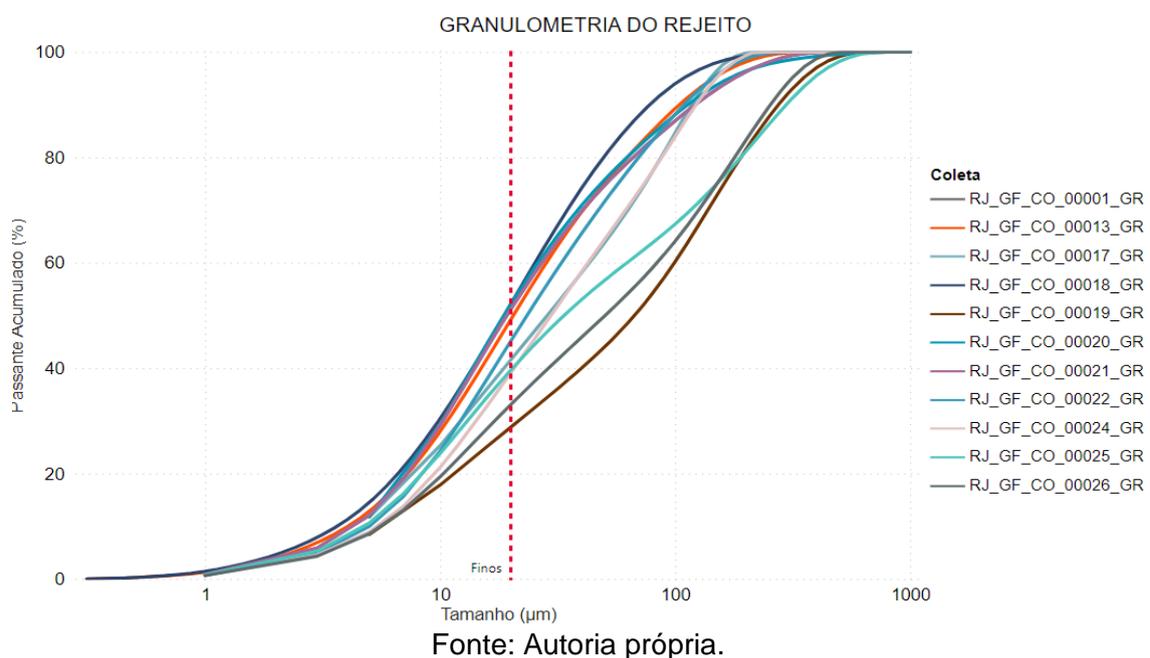
Fonte: Autoria própria.

Os dados apresentaram um desvio padrão de 5,38, uma variância de 28,9 e uma mediana de 7,9. Com relação à média do coeficiente de uniformidade da

granulometria que o rejeito tem apresentado, temos os valores de aproximadamente 9,1. O que indica uma fração de finos ainda alta, porém cada curva granulométrica deve ser adaptada para cada tipo de projeto. Então, esse valor não necessariamente indica uma curva inadequada, devem ser avaliadas todas as particularidades do rejeito.

Na Figura 51 é possível identificar a variabilidade da fração fina em todas as curvas, apresentando valores de 25% a 55%, aproximadamente.

Figura 51 - Distribuição granulométrica do rejeito



Considerando os dados da faixa de interesse, que dividem os grãos finos, foi realizada uma análise estatística do seu comportamento e apresentaram como resultado os dados da Tabela 14.

Tabela 14 - Estatística dos dados de distribuição granulométrica da fração fina.

DADOS ESTATÍSTICOS	UNDERSIZE (µM)
MÉDIA	44,3%
MEDIANA	45,2%
MÁXIMO	54,1%
MÍNIMO	28,8%
DESVIO PADRÃO	8,1
VARIAÇÃO	0,7%

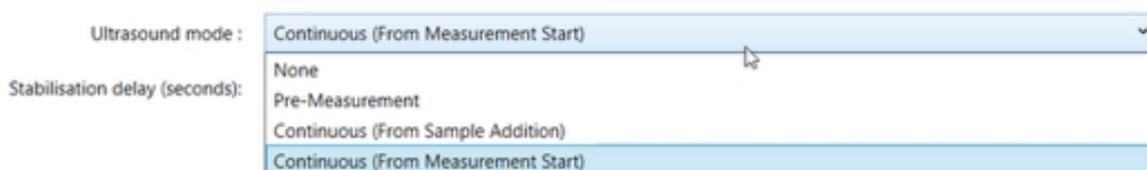
Fonte: Autoria própria.

Os dados apresentados mostram uma distribuição simétrica em torno da média, com uma pequena diferença entre a média e a mediana. Há uma dispersão dos dados em relação à média, como indicado pelo desvio padrão. Embora o desvio padrão de 8,10 sugira uma distância significativa da média para a maioria dos valores, a variação de apenas 0,66% indica que os valores individuais têm pouca alteração em relação à média. Em geral, esses dados têm uma tendência central clara, com alguma oscilação em torno dessa tendência. Apesar da grande dispersão, os valores tendem a se agrupar em torno da média. Em conjunto, esses padrões indicam que os dados têm uma alta variabilidade, mas são relativamente estáveis em relação à média.

Com relação à metodologia aplicada na pesquisa, foi realizada a análise de sensibilidade quanto ao uso do ultrassom para liberação de partículas agregadas onde o fabricante do equipamento recomenda cautela em partículas muito frágeis, pois a ação ultrassônica pode quebrá-las, sendo necessária uma avaliação microscópica antes e depois da utilização do equipamento para estabelecer o impacto na amostra. Para esse trabalho, não foi feito o uso de observação microscópica, e sim apenas a avaliação comparativa da liberação de finos em cada estágio de ultrassom.

Para entender o efeito do ultrassom nas partículas de rejeito e como a classificação granulométrica pode sofrer variação, foi realizada a análise com amostras que apresentavam a mesma composição granulométrica, sendo submetidas a tempos de ultrassom distintos.

Figura 52 - Configuração do ultrassom - Mastersize 3000 Hidro Ev.

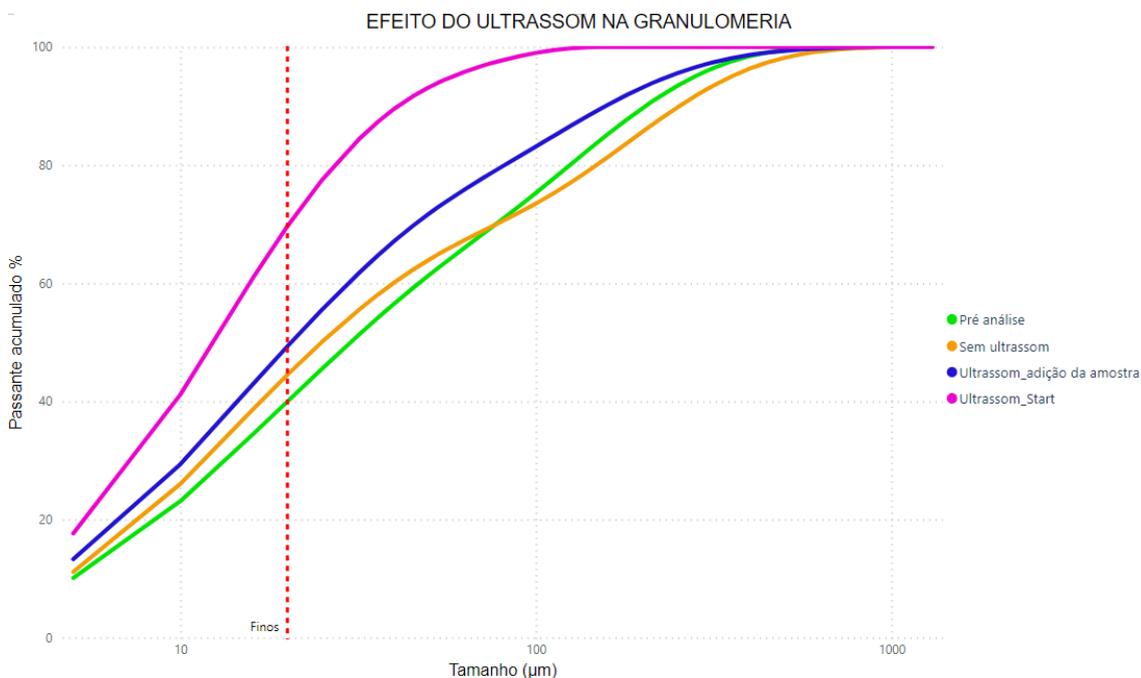


Fonte: Autoria própria.

Foram aplicadas as configurações conforme Figura 52, onde se estabelece o momento em que o ultrassom inicia a sua atuação no processo de análise. Dentre as opções disponíveis, temos: não aplicação, aplicado previamente à análise, aplicado continuamente após a adição da amostra e aplicado desde o início do processo.

É possível identificar pela Figura 53 que há um incremento considerável de partículas finas quando o ultrassom é iniciado antes mesmo da adição da amostra ao dispersor.

Figura 53 - Comparação de curvas granulométricas com uso de ultrassom.



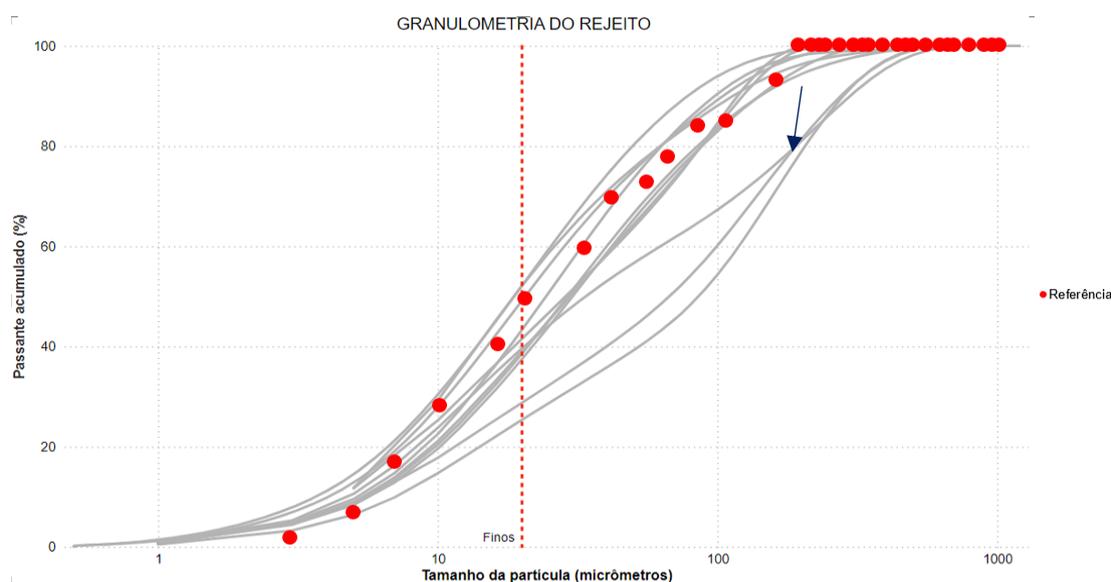
Fonte: Autoria própria.

O efeito causado pelo ultrassom pode representar uma desagregação de partículas muito finas que estão aglomeradas, como também pode representar a quebra de partículas frágeis que podem estar presentes no rejeito, a segunda hipótese, só poderia ser validada caso fosse realizada análise microscópica do material antes e após a análise.

Porém, é importante ressaltar que, mesmo que as partículas apresentem desagregação em escala laboratorial, pode não se refletir em uma mistura em escala operacional. Isso pode resultar em efeitos microscópicos não relacionados à reação do cimento com contaminantes, como possíveis rupturas no enchimento entre partículas, o que pode afetar a qualidade final do material produzido. Por isso, é fundamental considerar não apenas os resultados obtidos em laboratório, mas também as condições reais de produção para avaliar o desempenho da mistura de pasta. Caso esse efeito não seja observado, é possível que o ultrassom possa estar rompendo as partículas a um nível de micro fragmentação, que pode não ocorrer em escala operacional.

Também foi verificada a distribuição granulométrica de acordo com os valores sugeridos por Potvin (2005) para a ocorrência usual em rejeitos de mineração polimetálica como cobre e zinco. Na Figura 54 é possível identificar em vermelho, os pontos da curva bibliográfica (Referência) sugerida por Henderson et al. (2005) e se percebe que há uma aderência muito similar, com exceção de 3 medidas que apresentaram maior dispersão das linhas centrais, destacada no gráfico pela seta indicativa.

Figura 54 - Granulometria do rejeito com referência da curva para minas polimetálicas



Fonte: Autoria própria.

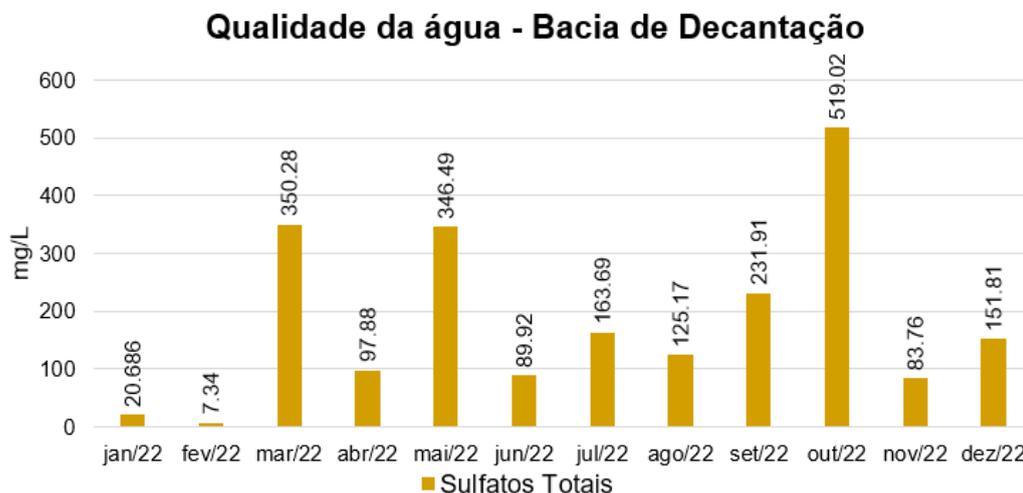
É de grande importância continuar o acompanhamento do comportamento granulométrico do rejeito mesmo após a estabilização da planta de beneficiamento. Um dos efeitos possíveis de um alto teor de material de fração fina é a ocorrência de problemas nas taxas de remoagem e manutenção da planta, resultantes de um processo ainda não otimizado, principalmente por se tratar de uma planta que está em fase inicial de operação.

### 6.3. ANÁLISE DA ÁGUA

Os testes realizados para controle de qualidade da água utilizada no *pastefill*, indicam valores de Sulfato total de no máximo 520mg/L, estando bem abaixo do

limite de degradação indicado na bibliografia, que seria de 2500mg/L, conforme pode ser visualizado na Figura 55.

Figura 55 - Sulfatos totais da água recirculada

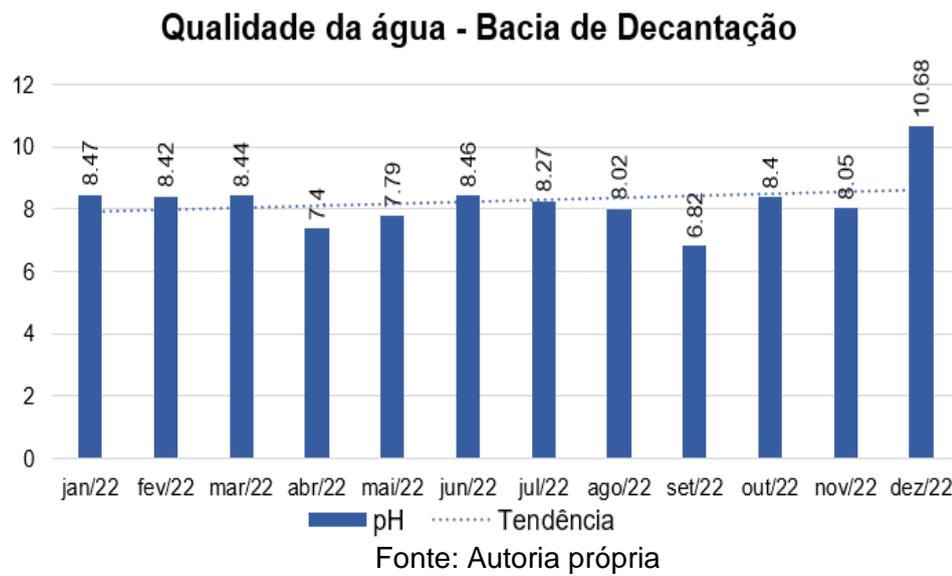


Fonte: Autoria própria.

Outro parâmetro importante que é aferido para determinar a qualidade da água para a utilização como integrante da mistura de *pastefill* é o pH da água. Conforme pode ser avaliado, Figura 56.

O gráfico demonstra um controle de pH em torno de 8,5. A Nexa possui um monitoramento da água hora a hora, com aferição de parâmetros básicos e um relatório mais detalhado acerca da qualidade da água recirculada nas minas, das barragens e demais áreas de controle ambiental que é gerado mês a mês. A Norma Brasileira ABNT NBR 15900-2:2011 sobre aditivos para concreto estabelece que a água utilizada em concretos deve se manter em pH entre 6 e 8,5.

Figura 56 - pH da água recirculada.



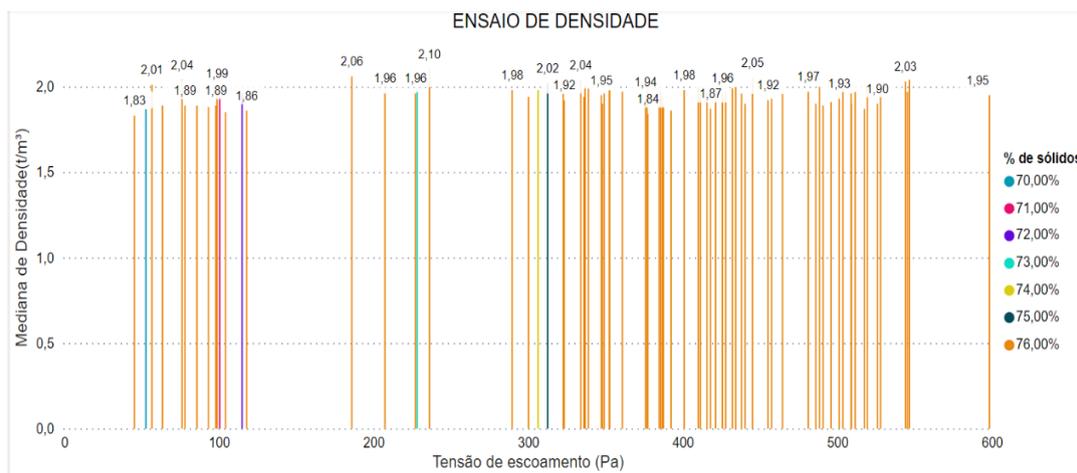
Com relação a análise dos cloretos totais, a média dos 12 meses foi de 11.31mg/L, estando bem abaixo das normas internacionais, que sugerem uma quantidade prejudicial para a resistência da pasta a partir de 300mg/L.

#### 6.4. DENSIDADE DA PASTA E TENSÃO DE ESCOAMENTO

Os dados referentes à densidade da pasta podem ser observados na Figura 57. É possível concluir que a pasta sofre pouca alteração de densidade e aparentemente não é a causadora do aumento da tensão de escoamento.

Os dados apresentam um desvio padrão de 0,076, sugerindo pouca variabilidade dos dados com relação à média que foi de 1.95t/m<sup>3</sup>, a mediana dos dados foi de 1.96t/m<sup>3</sup>.

Figura 57 - Densidade das amostras com relação ao percentual de sólidos.



Fonte: Autoria própria.

As variações entre aditivos Eltech com 4% de cimento permaneceram com um desvio padrão de 0.044 e variância de 0.002, demonstrando a baixa variabilidade da densidade, média e mediana iguais em 1.96t/m<sup>3</sup>. Os resultados com 6% de cimento apresentaram desvio padrão de 0.053 e variância de 0.003, média de 1.95t/m<sup>3</sup> e mediana de 1.96t/m<sup>3</sup>.

Para os aditivos Sika com 4% de cimento, o desvio padrão também foi baixo, de 0.028 e média e mediana praticamente iguais em 1.99t/m<sup>3</sup>. Para amostras com 6% de cimento é notada uma sutil elevação da densidade com desvio padrão de 0.036 e mediana de 2.01t/m<sup>3</sup>, com uma variância de apenas 0.001.

A densidade também não se altera significativamente em função do percentual de cimento nas amostras sem adição de aditivos, as misturas com 4% de cimento apresentaram 1.98t/m<sup>3</sup> de densidade, e uma densidade de 2.0t/m<sup>3</sup> foi medida nas amostras com 6% de cimento.

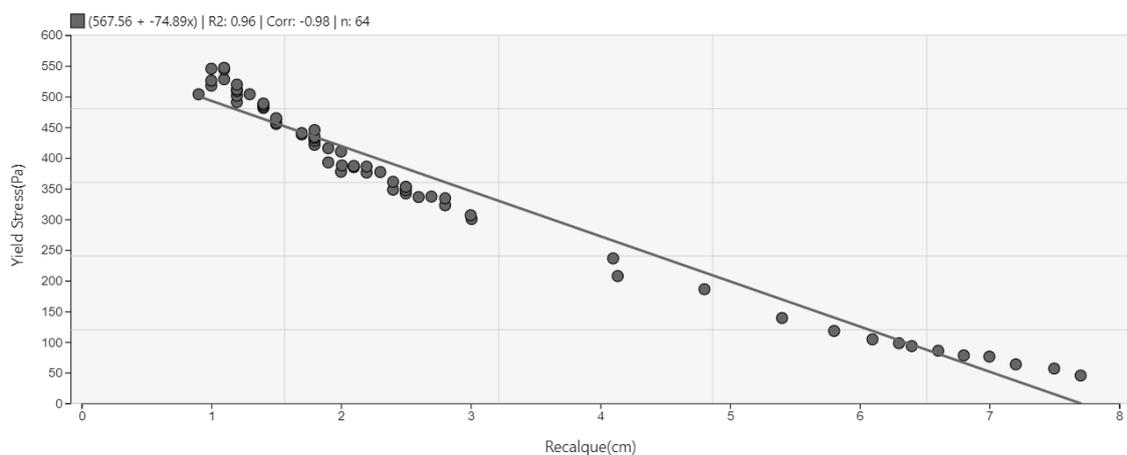
As menores densidades foram percebidas nas misturas que continham areia em sua composição, apresentando com adição de 4% de cimento desvio padrão de 0.029 e mediana de 1.89t/m<sup>3</sup> e uma média de 1.87t/m<sup>3</sup>. Nas misturas com 6% de cimento o desvio padrão foi de 0.012 e mediana de 1.86t/m<sup>3</sup>.

Diferenças de densidade também podem não estar sendo significativas ou muito aparentes, em função da precisão do equipamento não diagnosticar a alteração em uma massa de sólido tão pequena.

O Gráfico abaixo apresenta a correlação obtida a partir do cálculo do slump Boger e da tensão de escoamento pela metodologia de Phasias e Boger (1996). Foi possível avaliar que efetivamente, as tensões de escoamento são mais elevadas quanto menor seu abatimento.

Os dados apresentam uma boa correlação com  $R^2$  de 0.96, conforme pode ser visto na Figura 58.

Figura 58 – Correlação da tensão de escoamento e *slump*.



Fonte: Autoria própria.

## 6.5. RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Análise dos resultados atuais de UCS dos ensaios de laboratório foi realizada a partir da definição de misturas.

Foram planejados e moldados aproximadamente 46 amostras de cada mistura proposta, foram realizados 147 ensaios de compressão uniaxial com misturas de 4% de cimento e 154 ensaios de compressão uniaxial em corpos de prova moldados com 6% de cimento.

Foram descartadas das análises finais mais de 19 ensaios que não puderam ser incorporados em função de falta de cura das amostras no tempo preestabelecido, danos ao retirar a amostra do molde e com muita frequência as amostras em curas iniciais com aditivos plastificantes não tiveram o rompimento atingido por alcançar o limite de deslocamento do pistão da prensa hidráulica, apresentando elevada deformação, como pode ser visualizado na Figura 59.

Figura 59 – Ensaio descartado.



Fonte: Autoria própria.

Algumas amostras romperam na prensa, mas não possuíam rigidez. Ainda aparentavam estar em processo de cura, com o aditivo atuando no retardamento da cura do cimento, Figura 60. Aditivos Sika e Eltech apresentaram o comportamento abaixo em diferentes concentrações.

Figura 60 – Amostras rompidas com pouca rigidez – retardamento de cura.

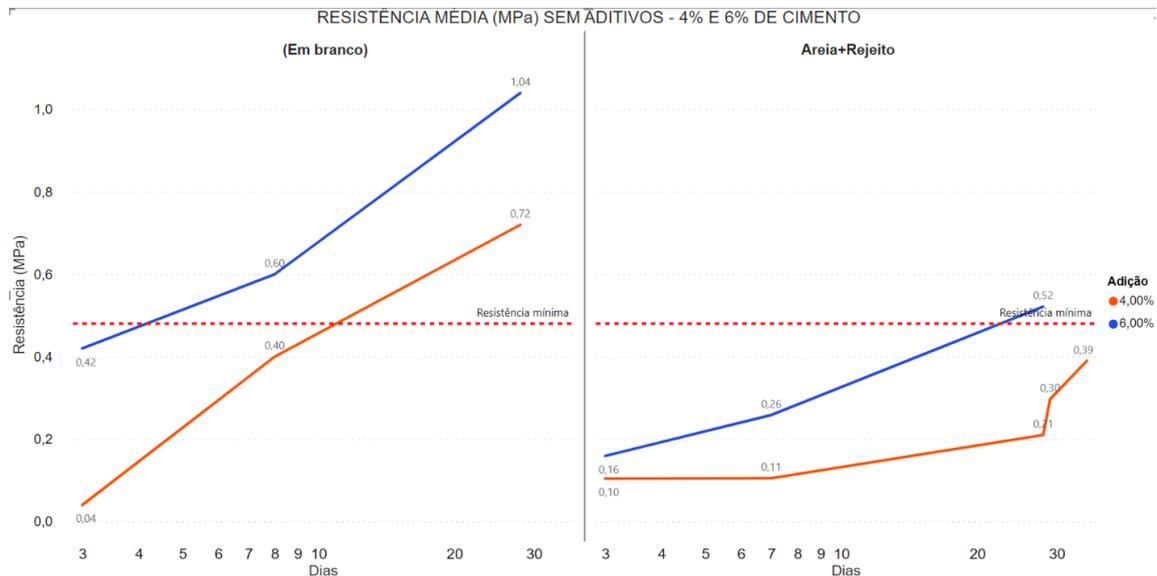


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 61, são apresentados os valores de 4% e 6% de adição de cimento com relação à resistência mínima requerida nas amostras sem aditivos químicos plastificantes. O material com 4% de cimento apresentou a média de 0,72 MPa o que equivale a uma resistência 50% maior do que o esperado para

a idade de 28 dias de cura, as amostras com 6% de cimento apresentaram resistência média aos 28 dias com 1,04 MPa de resistência, 117% maior do que o esperado para o tempo de cura.

Figura 61 - Plano base de amostras sem aditivos químicos.

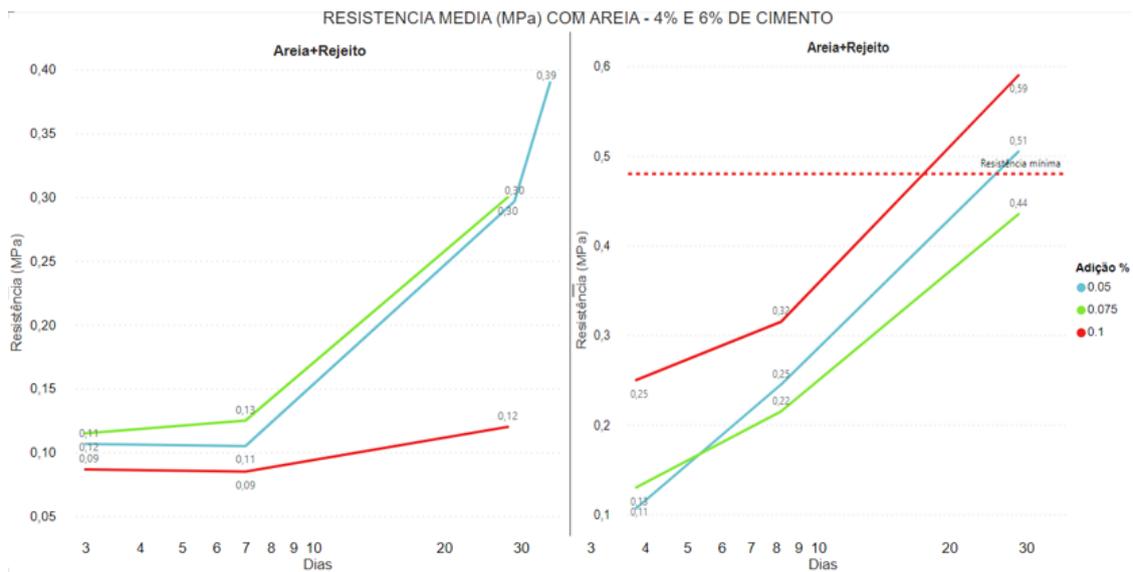


Fonte: Autoria própria.

A areia, assim como os aditivos plastificantes, foi utilizada nessa fase da pesquisa com a intenção de reduzir a tensão de escoamento reduzindo o consumo energético necessário para levar a pasta pela tubulação e para ter o conhecimento dos efeitos das adições perante a resistência à compressão da pasta.

A Figura 62, representa os dados com adição de cimento de 4% e 6% nas misturas com o percentual de adição de areia variando em 5%, 7,5% e 10% do peso do cimento. É possível identificar que não houve resultado satisfatório quanto à resistência mínima requerida para misturas com 4% de cimento, apesar de ter sido uma mistura que apresentou baixos valores correspondentes à tensão de escoamento.

Figura 62 - Resultado dos ensaios com adição de areia.



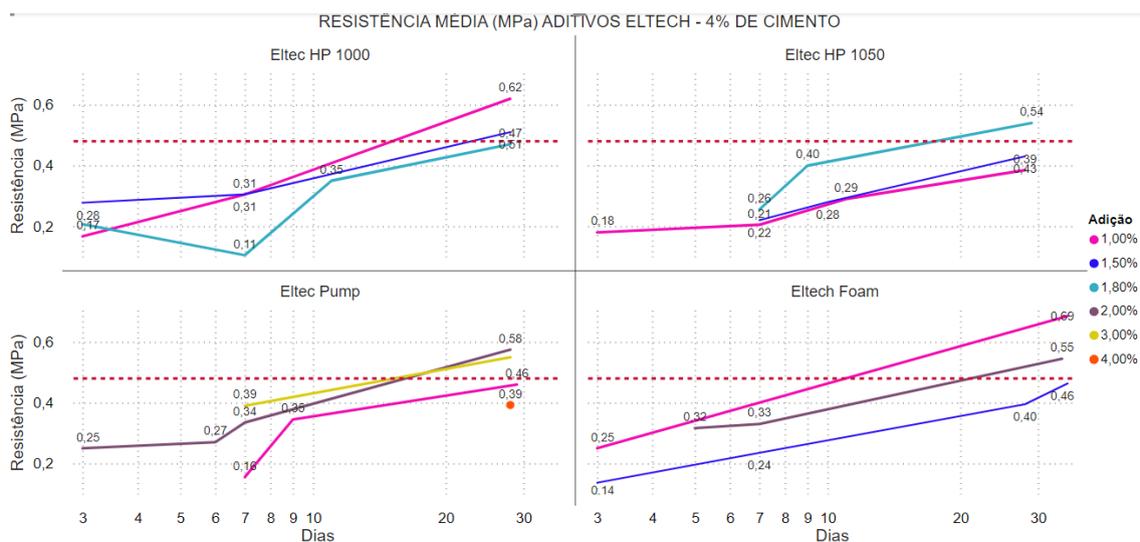
Fonte: Autoria própria

As adições contendo 10% de areia a 6% de cimento obtiveram os melhores valores de compressão uniaxial da série, atingindo a média de 0,59Mpa, 23% acima da resistência mínima esperada para os 28 dias de cura. As amostras com adição de 5% de areia com 6% de cimento obtiveram resultados satisfatórios.

Válido discutir os resultados do rejeito com adição de 10% de areia e a discrepância de valores obtidos nos ensaios com 4% de cimento e 6% de cimento. A coleta que foi realizada da mistura para percentual de 4% de cimento e 10% de areia apresentou um baixo valor de umidade do rejeito, levando a adição de mais água para mistura, o que pode refletir na baixa resistência adquirida para essa série.

Para o gráfico abaixo, se pode avaliar no contexto de 4% de adição de cimento e a variação de adição de aditivos Eltech. Se observa que em 28 dias as amostras se apresentam em maioria, próximas da resistência mínima requerida.

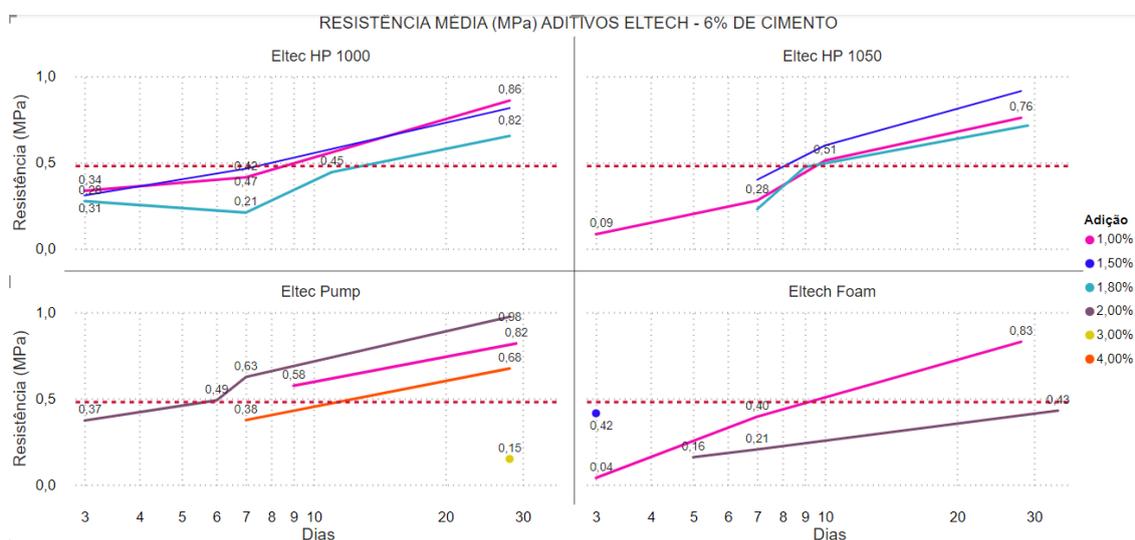
Figura 63 - Resultado dos ensaios com adição Eltech – 4% de cimento



Fonte: Autoria própria.

Para as amostras realizadas com aditivos Eltech com 6% de cimento, todos os aditivos alcançaram a resistência mínima aos 28 dias de cura, considerando a média dos dados com exceção do aditivo com 3% de adição (Pump) e 1,5% (Foam).

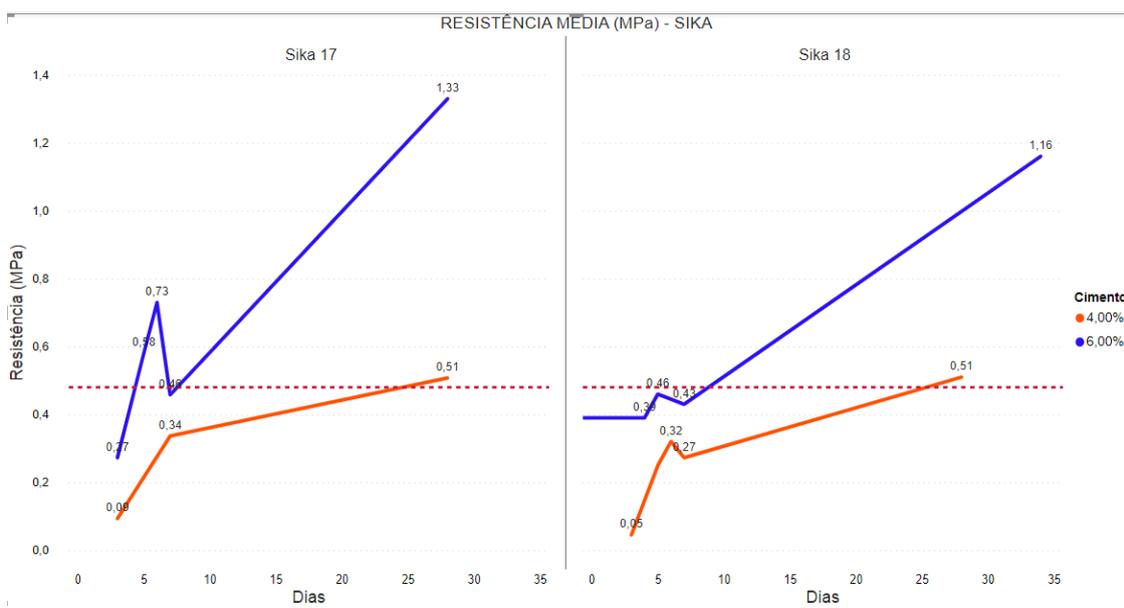
Figura 64 - dos ensaios com adição Eltech – 6% de cimento



Fonte: Autoria própria.

Para os aditivos Sika 17 e 18, o gráfico abaixo apresenta os resultados gerais para 4% e 6% de concentração de cimento e os percentuais de aditivo que foram utilizados na confecção das misturas, serão detalhadas.

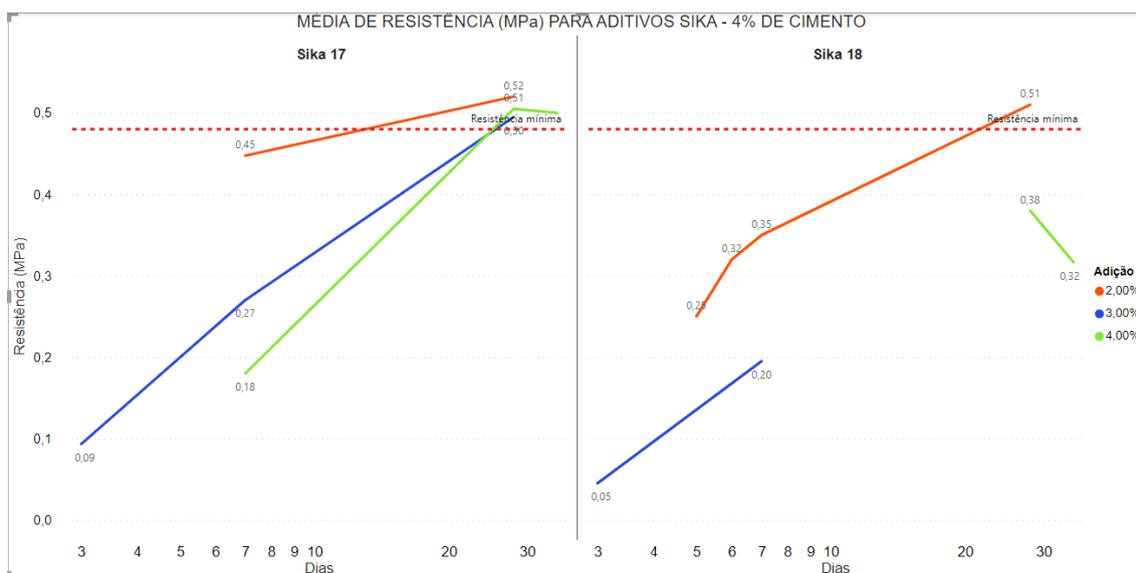
Figura 65 - Resultado dos ensaios com adição de Sika – 4% e 6% de cimento



Fonte: Autoria própria

Se observam valores de resistência final aos 28 dias com 4% de cimento bem próximas da linha que indica a resistência mínima para todas as frações de adição do Sika 17, para o Sika 18 somente a mistura com 2% de aditivo obteve resultados satisfatórios.

Figura 66 - Resultado dos ensaios com adição de Sika – 4% de cimento

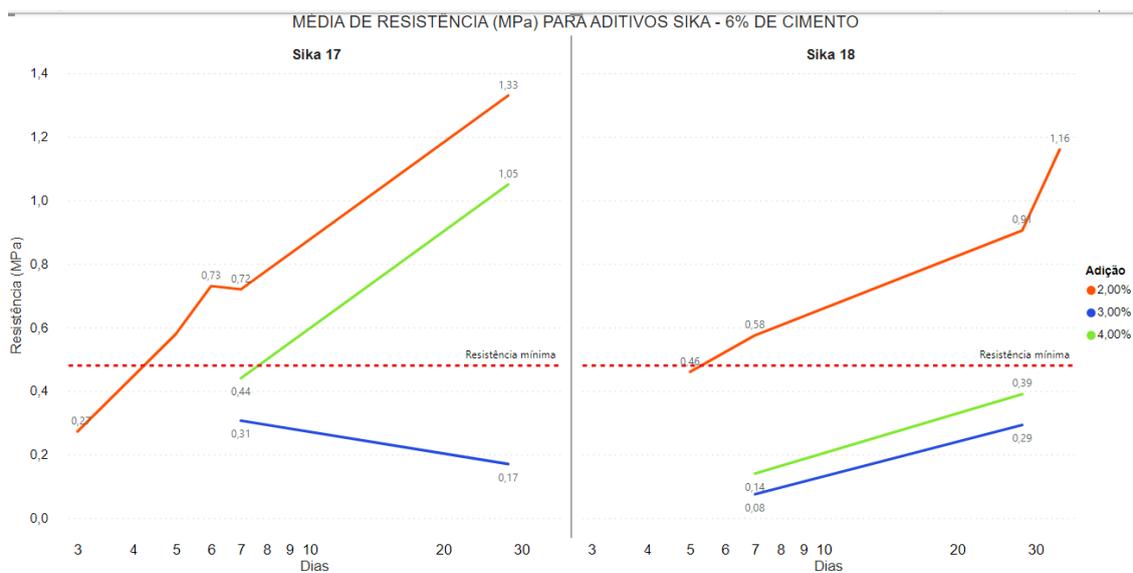


Fonte: Autoria própria

Para as adições de 6% de cimento, a Figura 67 apresenta seus respectivos resultados. O aditivo que ficou abaixo da linha de referência foi o Sika 18 na concentração de 4% e 3% de aditivo aos 28 dias de cura.

Na concentração de 3% e 4% o aditivo Sika 18 não apresentou resistência mínima aos 28 dias. Os aditivos foram efetivos em concentrações não superiores a 2%.

Figura 67 - Resultado dos ensaios com adição de Sika – 6% de cimento.



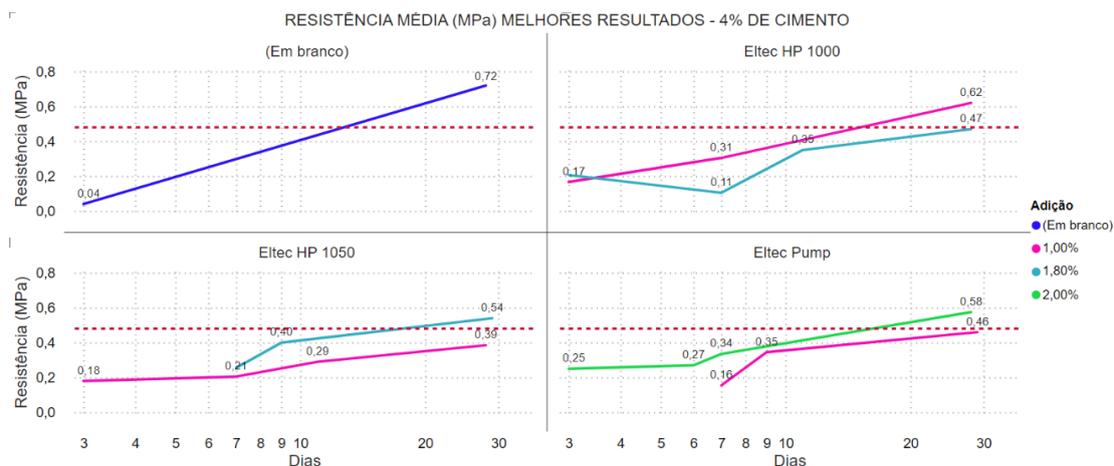
Fonte: Autoria própria.

O aditivo Sika 17 foi o que obteve os melhores resultados nas concentrações de 2% e 4%, elevando consideravelmente a resistência em relação ao mínimo requerido.

Com relação às misturas ensaiadas com adição de 4% de cimento até os 28 dias de cura apresentaram sutis variações positivas com relação à resistência mínima requerida com adição de aditivos, foram até inferiores aos resultados sem adição de aditivos. Conforme pode ser visto no gráfico abaixo.

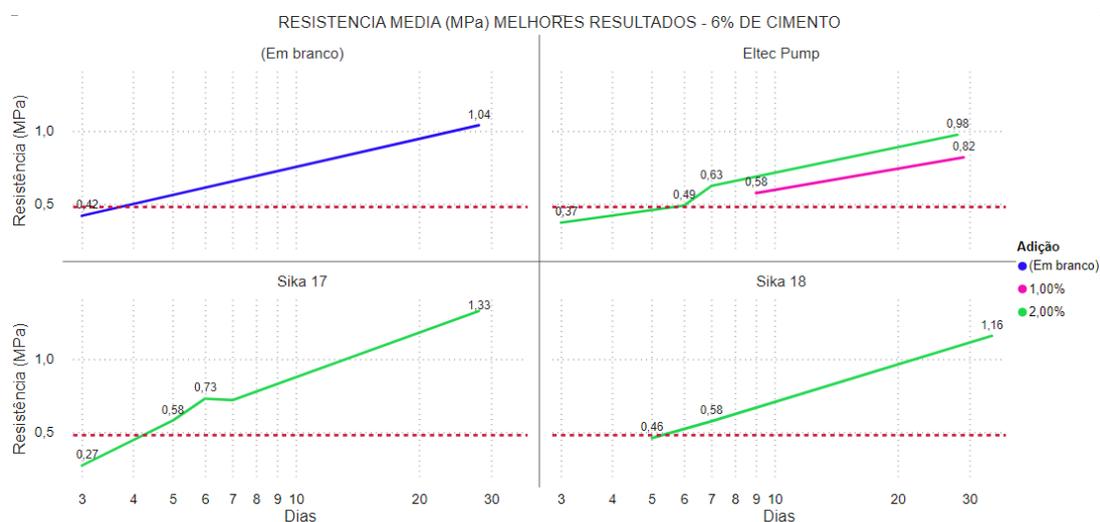
A variação positiva com o uso de aditivos foi observada no aditivo Eltech HP1000 a concentração de 1% alcançando 27% a mais de resistência com relação aos 0,48 Mpa desejados, assim como os aditivos HP1050 e Pump que alcançaram ganho de resistência de 13% e 21%, respectivamente.

Figura 68 - Resumo dos melhores resultados de Compressão Uniaxial (MPa) com 4% de cimento.



Para ensaios com adição de 6% de cimento até os 28 dias de cura, estão representadas no gráfico abaixo os resultados em que a pasta sem adição de aditivos alcançou um valor 117% maior que o mínimo requerido, acompanhado dos aditivos Eltec Pump com uma variação positiva da resistência de 71% a 104% com misturas adicionadas em 1% e 2% de aditivo sob o peso do cimento. Os aditivos Sika 17 e 18 obtiveram os melhores resultados de resistência para a série com variações positivas em relação aos 0,48 MPa requeridos, em 177% e 142% para adições de 2% de ambos os aditivos. Conforme pode ser visualizada na Figura 69.

Figura 69 - Resumo dos melhores resultados de Compressão Uniaxial (MPa) com 6% de cimento



Com os resultados apresentados, cabe entender se é prática a utilização do aditivo com algum ganho associado a outra variável, uma vez que não houve impacto positivo de ganho de resistência para misturas com 4% de adição de cimento, que é o alvo principal dessa pesquisa, em função de ser a mistura mais econômica. Para os ensaios com as respectivas misturas, todas apresentaram variação positiva de tensão de escoamento, quando comparada à mistura sem aditivos.

As variações de aumento de tensão de escoamento foram de 15% a 70%, considerando o valor de referência de 306,5Pa do material sem aditivo químico.

Para os materiais compostos com 6% de adição de cimento, foi observado um aumento expressivo da resistência, as tensões de escoamento também sofreram variações com relação ao material sem aditivos, as adições tiveram redução da tensão de escoamento para os aditivos Eltech Pump e Sika 17 em 13% e 19%, respectivamente, quando comparado ao valor de referência de 434,3Pa. Na Tabela 15, se apresentam os resultados resumidamente, levando em consideração as médias dos resultados em no mínimo 28 dias de cura e seus respectivos impactos com relação ao comportamento reológico avaliado e de resistência.

Tabela 15 Resumo dos principais resultados

ADITIVO	ADIÇÃO	CIMENTO %	DENSIDADE (t/m <sup>3</sup> )	YIELD STRESS (Pa)	AREIA (%)	VAR. YIELD STRESS	VAR. UCS
S/AD	0.0%	4.0%	1.98	306.5	0.0	REF	50%
SIKA 18	2.0%	4.0%	2.04	334.1	0.0	9%	6%
AREIA+REJEITO	0.0%	4.0%	1.89	78.1	5.0	-75%	-38%
AREIA+REJEITO	0.0%	4.0%	1.89	85.8	7.5	-72%	-38%
AREIA+REJEITO	0.0%	4.0%	1.83	45.4	10.0	-85%	-81%
S/AD	0%	6%	2	434.3	0.0	REF	117%
AREIA+REJEITO	0%	6%	1.86	118	5.0	-73%	4%
AREIA+REJEITO	0%	6%	1.85	104.3	7.5	-76%	-8%
AREIA+REJEITO	0%	6%	1.88	93.3	10.0	-79%	23%
ELTECH HP 1050	1%	6%	1.94	421.3	0.0	-3%	58%
ELTECH PUMP	1%	6%	1.94	421.3	0.0	-3%	71%
ELTECH HP 1050	2%	6%	1.93	384.8	0.0	-11%	63%
ELTECH HP 1000	2%	6%	1.94	300.3	0.0	-31%	38%
ELTECH PUMP	2%	6%	2	376.9	0.0	-13%	104%
SIKA 18	2%	6%	1.97	352.6	0.0	-19%	142%
SIKA 17	2%	6%	2,03	544,1	0,0	25%	177%
ELTECH FOAM	2%	6%	1.86	392.5	0.0	-10%	-10%

Fonte: Autoria própria.

As linhas destacadas na Tabela 15, se referem aos valores tomados como referência para o cálculo de variação positiva ou negativa das tensões de escoamento. Para a variação da resistência, foi adotado o valor de referência mínimo de 0,48MPa.

## 7. CONCLUSÕES

A composição granulométrica do rejeito apesar de indicar um teor de finos maior do que o recomendado em literatura, não aparenta afetar a resistência à compressão uniaxial negativamente, visto que, como esperado, com o cimento CPIIF32-Nobres as resistências foram alcançadas para 28 dias de cura da pasta cimentada.

O cimento CP II-F-32 não possui características específicas para resistir ao ataque de sulfatos. Portanto, é fundamental acompanhar os resultados durante a produção da pasta e sua aplicação nos realces. Isso permitirá validar e fazer o cruzamento das informações, além de compreender a acurácia entre os resultados obtidos em laboratório e em campo.

A análise da água de recirculação da mina que será utilizada para alimentação da planta de *pastefill* não apresentou valores que indiquem possíveis problemas com relação à concentração de Sulfatos Totais, metais pesados e pH nas análises avaliadas, embora sejam muito espaçadas, uma vez que a amostragem uma vez por mês possa não ser fidedigna ao processo.

Os testes realizados com adição de 10% de areia e 6% de cimento se mostraram adequados para alcançar a resistência requerida aos 28 dias com uma tensão de escoamento de aproximadamente 100Pa.

As amostras sem adição de areia e aditivos atingiram a resistência mínima requerida aos 28 dias com 4% e 6% de cimento com tensão de escoamento média de 300Pa e 450Pa, respectivamente.

A tensão de escoamento se encontra acima da tensão que foi utilizada para validar o sistema de reticulação, são estimados impactos da não aderência, que podem variar desde o aumento do consumo energético para o bombeamento às reações químicas e comportamento reológico durante o transporte que ainda são desconhecidos.

Em função do tempo de cura das amostras ser até os 28 dias, não é possível afirmar ou mensurar o impacto de possíveis ataques à matriz cimentícia da pasta com as misturas do rejeito atual, seja pela presença de sulfetos ou pela quantidade de talco presente no rejeito.

A adição de aditivos químicos plastificantes apresentou ganhos de resistência significativos com 6% de cimento, podendo ser uma opção para

aplicações específicas em que a pasta necessitar de maior resistência. Para misturas de 4% de cimento, não foram identificadas vantagens econômicas na utilização de aditivos por não apresentar ganho de resistência nem redução de tensão de escoamento. Cenário que pode ser modificado ao analisar o comportamento da pasta com maior tempo de cura.

Esta dissertação não realizou avaliação de impacto econômico relativo aos custos do cimento, por se tratar de um trabalho de caráter técnico voltado à caracterização. O custo relacionado ao processo de ajuste de componentes, caso seja necessário, pode ser executado pela companhia.

## 8. TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que seja realizada uma fase de testes de compressão uniaxial utilizando menores percentuais de sólidos para misturas com aditivos. Também se recomenda que sejam feitos ensaios triaxiais.

Realizar testes de resistência estimando maiores tempos de cura para verificar possibilidade de ataque de sulfatos, se sugere 60, 90, 120 dias.

Utilizar possíveis efeitos dinâmicos e modelagem numérica para validar a resistência da pasta além da geometria para exposição.

Reavaliar o sistema de reticulação da planta de *pastefill* considerando variações da tensão de escoamento da pasta e estabelecer um intervalo aceitável de tensão de escoamento para operação economicamente viável.

Avaliar os riscos de perda de fricção e entupimento de tubulação em função da mudança da reologia da pasta durante o transporte pela tubulação, simulando condições de temperatura e misturas para entender seu impacto com a redução gradual do teor de água causada pela reação de hidratação do cimento e conseqüentemente, maior resistência das ligações inter partículas na matriz da pasta.

Deve-se analisar a granulometria do rejeito por outra metodologia, para que se possa entender qual a influência do ultrassom na metodologia de difração laser e avaliar qual se encontra mais representativa.

Também é importante validar as tensões de escoamento e viscosidade por meio de outra metodologia, uma vez que os resultados tiveram uma diferença considerável dos ensaios de 2019, procedimento importante para análise e comparação dos resultados.

Avaliar se há impacto da permeabilidade e comportamento do fluxo de água para os painéis que se encontram dispostos mais superficialmente.

Realizar em momento oportuno, testes de compressão triaxial para entender a contribuição que o rejeito pode fornecer com relação à estabilidade global e conhecimento de parâmetros específicos.

Desenvolver um traço ideal para a unidade em função das caracterizações posteriores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5733: Concreto - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738: Materiais de construção - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697: Rejeito de mineração – Terminologia. Rio de Janeiro, 2018.

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. Guia básico de utilização de cimento Portland – boletim técnico. São Paulo: ABCP, 2002.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C39/C39M-03: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA, 2003. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/334327041\\_Standard\\_Test\\_Method\\_f\\_or\\_Compressive\\_Strength\\_of\\_Cylindrical\\_Concrete\\_Specimens\\_1](https://www.researchgate.net/publication/334327041_Standard_Test_Method_f_or_Compressive_Strength_of_Cylindrical_Concrete_Specimens_1).  
Acesso em: 04/02/2023.

BEEN, K; BROWN E. T; HEPWORTH, N. Liquefaction potential of *pastefill* at Neves Corvo Mine, Portugal. IMM Transact Sect A 111(1):47–58. 2002.

BRACKEBUSCH, F. W. Basics of Paste *Back fill* Systems. Mining Engineering. October 1994: pp. 1175-1178, 1994.

BRADY, B. H., & BROWN, E. T. Rock mechanics: for underground mining. Springer science & business media. 2006

BJÖRNSTRÖM, J., CHANDRA, S. Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements. *Mat. Struct.* 36, 685–692 (2003).

CLAYTON, S; GRICE, T; BOGER D, V. Analysis of the *slump* test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. *Int J Miner Process* 70(1–4):3–21, 2003.

COWLING, R. 25 Years of Mine Filling: Developments and Directions. MINEFILL. “98 Sixth International Symposium on Mining with *Back fill*, Brisbane, Australia, 1998.

ERCIKDI, B.; CIHANGIR, F; KESIMAL, A.; DEVECI, H.; ALP, I. Effect of drainage conditions on the strength of paste *back fill*. *J Mining in Turkish*. p.15-24, 2008.

FRANKY B. W. Propriedades de Concretos Estruturais Contendo Cinza Volante em Substituição Parcial ao Cimento Portland. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018.

GODBOUT, J., BUSSIÈRE, B., BENZAAZOUA, M., & AUBERTIN, M. Influence of pyrrhotite content on the mechanical and chemical behaviour of cemented paste backfill. In R. J. Jewell & A. B. Fourie (Eds.), Perth: Australian Centre for Geomechanics, pp. 163, 2010.

GRABINSKY, M. W; THERIAULT, J; WELCH, D. An Overview of Paste and Thickened Tailings Disposal on Surface. In: Proceedings of the symposium sur l'environnement et les mines: Defis et perspectives. Canada, p. 8, 2002.

GRICE, A. G. Introduction to *Hydraulic fill*. In: POTVIN Y., THOMAS E. & FOURIE A. Handbook on Mine Fill. 1 ed. Australia: Australian Centre for Geomechanics, p. 67-80, 2005.

GRICE, T. Underground mining with *back fill*. In: The Second Annual Summit on Mine Tailings Disposal Systems, Brisbane, Australia, p 5-15, 1998.

HENDERSON, A.; COXON, J. REVELL, M.B. *Paste Fill*. In: POTVIN Y., THOMAS E. & FOURIE A. Handbook on Mine Fill. Australian Centre for Geomechanics, Cap. 6, 2005.

HENDERSON, A.; REVELL, M. B. Basic mine fill materials. In: Handbook on Mine Fill, Australian Centre for Geomechanics, p. 179, 2005.

HUYNH L., BEATTIE DA, FORNASIERO D., RALSTON J. Effect of polyphosphate and naphthalene sulfonate formaldehyde condensate on the rheological properties of dewatered tailings and *cemented paste back fill*. Miner Eng 19, 28–36, 2006.

JIANG, H., FALL, M. Yield stress and strength of saline *cemented* tailings in subzero environments: Portland cement paste *back fill*. International Journal of Mineral Processing. Vol. 60, Elsevier, pp 68–75, 2017.

KESIMAL, A., YILMAZ, E., ERÇIKDI, B., DEVECI, H., ALP, I. Effect of properties of tailings and binder on the short- and long-term strength and stability of *cemented paste back fill*. Mater Lett 59(28):3703–3709, 2006.

KUGANATHAN, K. Geomechanics of Mine Fill. In: POTVIN Y., THOMAS E. & FOURIE A. Handbook on Mine Fill. 1 ed. Australia: Australian Centre for Geomechanics (ACG), 2005, Cap. 3, p. 23-47.

KUMAR, R. Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. Construction and Building Materials. vol. 124, n. 11, 2017.

LAMPERT, V. Propriedades físicas e mecânicas de concreto com utilização de cinzas leves, 2022.

LANDRIAULT, D 'They Said "It Will Never Work" – 25 Years of Paste *Back fill* 1981 – 2006', in R Jewell, S Lawson & P Newman (eds), *Paste 2006: Proceedings of the Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 277-292, 2006.

LANDRIAULT, D. *Back fill* in Underground Mining. *Underground Mining Methods, Engineering Fundamentals and International Case Studies*, W.A Hustrulid and R. L. Bullock (eds) SME. Chapter 69, pp. 601-614, 2001.

LEITE, D. R., RIBEIRO-RODRIGUES, L. C., XAVIER, R. P., MONTEIRO, L. V. S., LADEIRA, E. A. Caracterização do Depósito Polimetálico (Zn, Pb, Ag, Cu-Au) de Aripuanã, Mato Grosso. In *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 4. Anais (pp. 459-462), 2005.

LERCHM R. & RENEZEDER, H. G. The Development of Pumped Fill at Ground Mine. 9th International Conference on the Hydraulic Transportation of Solids in Pipes, Italy, 1984.

MCLEOD. Arnold Black and *Hydraulic fill*, Mineral Heritage Oration, a usIMM Annual Conference, Broken Hill, Australia, p.17-21, 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO. PAULO J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do concreto*. 2 ed. São Paulo: BOOKMAN, 2013.

NGUYEN QD, BOGER D.V Application of rheology to solving tailings disposal problems. *Int J Miner Process* 54: p 217–233, 1998.

PAPO, A, PIANI, L. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, volume 34, Issue 11, 2004, p. 2097-2101.

PHASIAS, N. – BOGER, D.V. SUMMERS, J. GLENISTER, D.J. A fifty cent rheometer for yield stress measurement. *Journal of Rheology*, 40(6): 1179–1189, 1996.

POTVIN, Y., THOMAS, E., & FOURIE, A. Handbook on Mine Fill. Australian Centre for Geomechanics. Cap.5, 2005.

POTVIN, Y., HUDYMA, M. Open Stope Mining in Canada. Conference: Massmin, Brisbane, Australia, 2000.

RAO, S. K.; SRAVANA, P.; RAO, T. C. Abrasion resistance and mechanical properties of roller compacted concrete with GGBS. *Construction and Building Materials*. v. 114, n. 13, 2016.

RELATÓRIO WETLANDS - Controle Interno Votorantim (relatório de ensaio N° 22131624 – A). Relatório Wetlands Votorantim ago-2022 (relatório de ensaio N° 22131616 – A).

RELATÓRIO - Resultados Projeto CM419 (2019). Relatório de controle interno.

RELATÓRIO - Caracterização\_Rejeito\_Pattrol\_MLA (2019). Relatório de controle interno.

RELATÓRIO – Binder Alternatives\_Novos estudos Pattrol (2019). 21003-MEM-0001. Minefill Services Relatório de controle interno.

RELATÓRIO – Aripuanã Retic Report (2021). 21014-RPT-0001. Minefill Services Relatório de controle interno.

RELATÓRIO – Laudo mineralógico\_GeometARP2019-2022. (2019 – 2020) Relatório de controle interno.

SGS Geosol – Final Report – Geomet 2019 Aripuanã. Relatório de controle interno, 2020.

SHIAVINI, D. N, MAZER, W, FERREIRA, E. O., FONSECA, J.M.M. (2021). Analisis of the influence os diferente types of cement on the resistance to attack by sulfates. *Semina: Ciênc. Ex. Tech.*, Londrina, v.42, n.2, p. 181-192.

ROUX, L.K., BAWDEN, W.F., GRABINSKY, M.W., (2004) Liquefaction analysis of early age *cemented paste back fill*. In: 8th international symposia on mining with *back fill*, Beijing, China, p 233–241.

ROSHANI ANIS, MAMADOU FALL, Flow ability of cemented pastefill material that contains nano-silica particles, *Powder Technology*, Vol. 373,2020, p 289-300.

SAEDI A. (2021), Jamshidi-Zanjani A, Darban AK. A review of additives used in the cemented paste tailings: Environmental aspects and application. *J Environ Manage.* 2021 Jul.

PANCHAL S. (2022), DEBASIS DEB, T. SREENIVAS. Variability in rheology of cemented paste backfill with hydration age, binder and superplasticizer dosages, *Advanced Powder Technology*, Volume 29, Issue 9, 2018, Pages 2211-2220.

SALVODI (2022), Bruno. Backfill Constitutive Materials. Australian Center of Geomechanics, Mine Fill Seminar, April 2022.

SHAN, Jingsong; ZHANG, Yuan, et al. Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. *Construction and Building Materials*, vol. 327, 11 April 2022.

SOFRA, F. Rheological Properties of Fresh *Cemented Paste Tailings* in: YILMAZ, EROL & FALL, MAMADOU. (2017). *Paste tailings management*, 2017.

THOMPSON B.D; BAWDEN W.F., AND GRABINSKY M.W; (2012). In situ measurements of *cemented paste back fill* at the Cayeli Mine. *Canadian Geotechnical Journal.* 49(7): 755-772.

YILMAZ, EROL & FALL, MAMADOU. (2017). Paste tailings management.

ZHANG, JINRUI, SUN, MING, HOU, DONGSHUAI, & LI, ZONGJIN. External sulfate attack to reinforced concrete under drying-wetting cycles and loading condition: Numerical simulation and experimental validation by ultrasonic array method. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, 139, 365-373. 2017.

## ANEXOS

### 1 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO REJEITO

TIPO	AMOSTRAGEM	P80	P60	P10	C <sub>u</sub>	IDENTIFICAÇÃO
Rejeito	Galpão de Filtragem	66.9	27.4	4.03	6.8	RJ-GF-CO-00013-GR
Rejeito	Galpão de Filtragem	51.8	24.1	3.55	6.8	RJ-GF-CO-00018-GR
Rejeito	Galpão de Filtragem	63	25	5	5	RJ-GF-CO-00020-GR
Rejeito	Galpão de Filtragem	90	45	5	9	RJ-GF-CO-00017-GR-2
Rejeito	Galpão de Filtragem	200	100	5	20	RJ-GF-CO-00019-GR
Rejeito	Galpão de Filtragem	63	28	5	5.6	RJ-GF-CO-00021-GR
Rejeito	Galpão de Filtragem	71	32	5	6.4	RJ-GF-CO-00022-GR-1
Rejeito	Galpão de Filtragem	90	45	5	9	RJ-GF-CO-00024-GR-1
Rejeito	Planta de PF	200	125	7	17.9	RJ-PF-CO-00001-GR-1-
Rejeito	Planta de PF	90	40	5	8	RJ-PF-CO-00003-GR-1-
Rejeito	Planta de PF	90	40	5	8	RJ-PF-CO-00002-GR-1-
Rejeito	Planta de PF	63	32	5	6.4	RJ-PF-CO-00005-GR-1-
Rejeito	Galpão de Filtragem	200	63	5	12.6	RJ-GF-CO-00025-GR-1
Rejeito	Galpão de Filtragem	180	80	5	16	RJ-GF-CO-00026-GR-1

### 2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA

Laboratório	Data do Ensaio	Hora do Ensaio	Origem do Material	Tipo do Material	COMPLEMENTARES		
					Diametro Max."mm"	Módulo de Finura	Umidade (%)
ARIPU	08/12/2022	9:14		AREIA MÉDIA	4,75	2,76	2,77
AREIA MÉDIA							
Peneira	Massa Retida (g)	Porcentagem Retida					
Nº - mm		Individual	Acumulada				
1" - 25	0,0	0,0	0,0				
3/4" - 19	0,0	0,0	0,0				
1/2" - 12,5	0,0	0,0	0,0				
3/8" - 9,5	0,0	0,0	0,0				
1/4" - 6,3	0,0	0,0	0,0				
Nº4 - 4,8	0,0	0,0	0,0				
Nº8 - 2,4	38,4	11,1	11,1				
Nº16 - 1,2	69,9	20,2	31,3				
Nº30 - 0,6	69,0	20,0	51,3				
Nº50 - 0,3	112,6	32,6	83,9				
Nº100 - 0,15	50,3	14,6	98,4				
Nº200 - 0,07	1,5	0,4	98,9				
Fundo	3,9	1,1	100,0				
Total	345,6	100,0	100,0				

Abertura das peneiras

300µm 600µm 1,2mm 2,4mm 4,8mm 6,3mm 9,52mm 12,7mm

Porcentagem que Passa

Porcentagem Retida Acumulada

Nota:

1 - O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

2 - O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

3 - O módulo de finura utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

\*\* A NBR 7211 não proíbi o uso de material fora da faixa, desde que Estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

## 3 – DENSIDADE E TENSÃO DE ESCOAMENTO

<b>Aditivo</b>	<b>% de cimento</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Densidade (t/m³)</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>
	1%	76%	1.99	339
	0%	76%	1.92	323.4
	4%	76%	1.98	306.5
	6%	76%	2	434.3
<b>ELTECH Pump</b>	4%	76%	1.98	352.7
<b>ELTECH Pump</b>	6%	76%	2	376.9
<b>Sika 17</b>	4%	76%	1.95	347.4
<b>Sika 17</b>	6%	76%	2.03	544.1
<b>Sika 18</b>	4%	76%	2.04	334.1
<b>Sika 18</b>	4%	76%	1.97	352.6
<b>ELTECH Foam</b>	4%	76%	1.89	387.6
<b>ELTECH Foam</b>	6%	76%	1.86	392.5
<b>ELTECH Pump</b>	4%	76%	1.95	462.3
<b>ELTECH Pump</b>	6%	76%	2	503.6
<b>Sika 17</b>	6%	76%	1.96	207.4
<b>Areia+Rejeito</b>	4%	76%	1.89	78.1
<b>ELTECH FOAM</b>	4%	76%	1.96	509
<b>ELTECh FOAM</b>	6%	76%	1.92	455.2
<b>ELTECh FOAM</b>	4%	76%	1.9	486.1
<b>ELTECh FOAM</b>	6%	76%	1.93	501.2
<b>Areia+Rejeito</b>	4%	76%	2.5	445.4
<b>Areia+Rejeito</b>	6%	76%	1.86	118
<b>Areia+Rejeito</b>	4%	76%	1.89	85.8
<b>Areia+Rejeito</b>	6%	76%	1.85	104.3
<b>Areia+Rejeito</b>	4%	76%	1.89	98
<b>Areia+Rejeito</b>	6%	76%	1.89	63.5
<b>Areia+Rejeito</b>	4%	76%	1.83	45.4
<b>Areia+Rejeito</b>	6%	76%	1.88	93.3
<b>ELTECH FOAM</b>	4%	76%	1.97	528
<b>ELTECH FOAM</b>	6%	76%	1.84	377.4
<b>ELTECH HP 1000</b>	4%	76%	1.97	545.3

<b>Aditivo</b>	<b>Cimento%</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Densidade (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>
<b>ELTECH HP 1000</b>	6%	76%	1.87	517.6
<b>ELTECH HP 1000</b>	4%	76%	1.9	525.9
<b>ELTECH HP 1000</b>	6%	76%	1.93	457.5
<b>ELTECH HP 1000</b>	4%	76%	1.96	438.1
<b>ELTECH HP 1000</b>	6%	76%	1.9	348.1
<b>ELTECH HP 1000</b>	4%	76%	2	488.5
<b>ELTECH HP 1000</b>	6%	76%	1.94	300.3
<b>ELTECH HP 1050</b>	4%	76%	2.05	445.2
<b>ELTECH HP 1050</b>	6%	76%	1.94	421.3
<b>ELTECH HP 1050</b>	4%	76%	1.94	336.1
<b>ELTECH HP 1050</b>	6%	76%	1.93	384.8
<b>ELTECH HP 1050</b>	4%	76%	2	434.3
<b>ELTECH HP 1050</b>	6%	76%	1.94	386.8
<b>ELTECH Pump</b>	4%	76%	1.97	415.7
<b>ELTECH Pump</b>	6%	76%	1.94	421.3
<b>ELTECH Pump</b>	4%	76%	1.97	511.6
<b>ELTECH Pump</b>	6%	76%	2.04	546.7
<b>ELTECH Pump</b>	4%	76%	1.94	376
<b>ELTECH Pump</b>	6%	76%	1.9	440.4
<b>Sika 17</b>	4%	76%	1.99	385.7
<b>Sika 17</b>	4%	76%	1.97	322.7
<b>Sika 17</b>	6%	76%	2.04	76.2
<b>Sika 18</b>	4%	76%	2	410.2
<b>Sika 18</b>	6%	76%	2	336.9
<b>ELTECH HP 1000</b>	4%	76%	1.97	427.8
<b>ELTECH HP 1000</b>	4%	76%	1.97	361
<b>ELTECH HP 1050</b>	4%	76%	2	488.5
<b>ELTECH HP 1050</b>	6%	76%	1.96	464.6
<b>ELTECH HP 1050</b>	4%	76%	1.76	503.6
<b>ELTECH HP 1050</b>	6%	76%	1.97	481.2
<b>ELTECH HP 1050</b>	4%	76%	2	503.6
<b>ELTECH HP 1050</b>	6%	76%	1.97	427.8
<b>ELTECH HP 1050</b>	6%	76%	1.99	432.2

<b>Aditivo</b>	<b>Cimento%</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Densidade (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>
<b>Sika 18</b>	4%	76%	2	336.9
<b>Sika 18</b>	6%	76%	2.01	56.7
<b>Sika 18</b>	6%	76%	2	434.3
<b>Sika 17</b>	6%	76%	2.1	236.2
<b>ELTECH Pump</b>	4%	76%	2	519.4
<b>ELTECH Foam</b>	6%	76%	1.89	490.8
<b>ELTECH Foam</b>	6%	76%	1.87	418
<b>ELTECH Foam</b>	4%	76%	1.95	598.4
<b>ELTECH Foam</b>	6%	76%	1.91	496
<b>ELTECH Foam</b>	4%	76%	1.9	509.2
<b>ELTECH HP 1000</b>	4%	76%	1.98	401
<b>ELTECH HP 1000</b>	6%	76%	1.96	349.2
<b>ELTECH HP 1000</b>	4%	76%	1.99	385.7
<b>ELTECH HP 1000</b>	6%	76%	1.98	289.7
<b>ELTECH HP 1000</b>	4%	76%	1.96	227.2
<b>ELTECH HP 1000</b>	6%	76%	1.99	98.8
<b>ELTECH HP 1050</b>	4%	76%	1.96	509
<b>ELTECH HP 1050</b>	6%	76%	1.95	411.5

## 4 - ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS UNIAXIAIS AOS 28 DIAS

## Resumo estatístico com areia

Dias	Tipo de mistura	Resistência pico (Mpa)	Cimento (%)	Areia média (%)	Média	Mediana	Desvio Pad.	Varição
28	Areia+Rejeito	0.33						
28	Areia+Rejeito	0.29		5%	0.30	0.29	0.02	0.00
28	Areia+Rejeito	0.27						
28	Areia+Rejeito	0.31	4%	7.5%	0.30	0.30	0.01	0.00
28	Areia+Rejeito	0.29						
28	Areia+Rejeito	0.19						
28	Areia+Rejeito	0.05		10%	0.09	0.05	0.07	0.00
28	Areia+Rejeito	0.04						
	MÉDIA	0.22						
	MEDIANA	0.28						
	DESVIO P.	0.12						
	VARIÂNCIA	0.01						

## Resumo estatístico com areia

Dias	Tipo de mistura	Resistência pico (Mpa)	Cimento (%)	Areia média (%)	Média	Mediana	Desvio Pad.	Varição
28	Areia+Rejeito	0.52						
28	Areia+Rejeito	0.49		5%	0.51	0.51	0.02	0.00
28	Areia+Rejeito	0.43	6%	8%	0.44	0.44	0.01	0.00
28	Areia+Rejeito	0.44						
28	Areia+Rejeito	0.59						
28	Areia+Rejeito	0.65		10%	0.59	0.59	0.05	0.00
28	Areia+Rejeito	0.53						
	MÉDIA	0.52						
	MEDIANA	0.52						
	DESVIO P.	0.08						
	VARIÂNCIA	0.01						

## Resumo estatístico sem aditivos

Dias	Tipo de mistura	Resistência pico (Mpa)	Cimento (%)
28	Rejeito + Cimento	0.76	4%
28	Rejeito + Cimento	0.68	
	MÉDIA	0.72	
	MEDIANA	0.72	
	DESVIO P.	0.06	
	VARIÂNCIA	0.00	

## Resumo estatístico sem aditivos

Dias	Tipo de mistura	Resistência pico (Mpa)	Cimento (%)
28	Rejeito + Cimento	1.09	6%
28	Rejeito + Cimento	0.99	
	MÉDIA	1.04	
	MEDIANA	1.04	
	DESVIO P.	0.07	
	VARIÂNCIA	0.01	

## Resumo estatístico Aditivos Sika

Dias	Tipo de mistura	Resistência pico (Mpa)	Aditivo (%)	Cimento (%)	Média	Mediana	Desvio Pad.	Variação
28	Sika 17+Rejeito	0.59						
28	Sika 17+Rejeito	0.45	2%		0.52	0.51	0.05172	0.00
28	Sika 18+Rejeito	0.49						
28	Sika 18+Rejeito	0.53						
28	Sika 17+Rejeito	0.53	3%		0.50	0.50	0.04	0.00
28	Sika 17+Rejeito	0.46						
28	Sika 18+Rejeito	0.53		4.00%				
28	Sika 18+Rejeito	0.48						
28	Sika 18+Rejeito	0.46	4%		0.42	0.47	0.10	0.01
28	Sika 18+Rejeito	0.5						
29	Sika 18+Rejeito	0.31						
30	Sika 18+Rejeito	0.25						
	MÉDIA	0.47						
	MEDIANA	0.49						
	DESV. PAD	0.09						
	VARIÂNCIA	0.01						

## Resumo estatístico Aditivos Sika

Dias	Tipo de mistura	Resistência pico (MPa)	Aditivo (%)	Cimento (%)	Média	Mediana	Desvio Pad.	Varição
28	Sika 17+Rejeito	1.31						
28	Sika 17+Rejeito	1.35						
34	Sika 18+Rejeito	1.14	2%		1.13	1.16	0.18	0.03
34	Sika 18+Rejeito	1.18						
28	Sika 18+Rejeito	0.91						
28	Sika 18+Rejeito	0.9						
28	Sika 18+Rejeito	0.32						
28	Sika 18+Rejeito	0.32						
28	Sika 18+Rejeito	0.24	3%	6%	0.24	0.24	0.07	0.00
28	Sika 17+Rejeito	0.17						
28	Sika 17+Rejeito	0.17						
28	Sika 17+Rejeito	1						
28	Sika 17+Rejeito	1.06			1.05	1.06	0.04	0.00
28	Sika 17+Rejeito	1.09						
28	Sika 18+Rejeito	0.42	4%		0.39	0.39	0.02	0.00
28	Sika 18+Rejeito	0.39						
28	Sika 18+Rejeito	0.36						
	MÉDIA	0.73						
	MEDIANA	0.90						
	DESVIO P.	0.43						
	VARIÂNCIA	0.18						

## Resumo estatístico Aditivos Eltech

Dias	Tipo de mistura	Resistência pico (MPa)	Aditivo (%)	Cimento (%)	Média	Mediana	Desvio Pad.	Varição
28	HP 1000+Rejeito	0.61						
28	HP 1000+Rejeito	0.63			0.62	0.62	0.01	0.00
29	Pump+Rejeito	0.49	1%	4%				
29	Pump+Rejeito	0.43			0.46	0.46	0.03	0.00
28	HP 1000+Rejeito	0.47						
28	HP 1000+Rejeito	0.53	1,5%	4%	0.51	0.53	0.03	0.00
28	HP 1000+Rejeito	0.53						
28	Pump+Rejeito	0.50						
28	Pump+Rejeito	0.65						
28	Foam+Rejeito	0.39						
28	Foam+Rejeito	0.40	2%	4%	0.49	0.47	0.08	0.01
28	HP 1000+Rejeito	0.47						
28	HP 1000+Rejeito	0.47						
29	HP 1050+Rejeito	0.54						
34	Foam+Rejeito	0.51	2%	4%	0.55	0.55	0.04	0.00
34	Foam+Rejeito	0.58						
28	Pump+Rejeito	0.52	3%	4%	0.55	0.55	0.03	0.00
28	Pump+Rejeito	0.58						
28	Pump+Rejeito	0.40						
28	Pump+Rejeito	0.40	4%	4%	0.39	0.40	0.02	0.00
28	Pump+Rejeito	0.36						
28	Pump+Rejeito	0.41						
	MÉDIA	0.49						
TOTAL	MEDIANA	0.50						
	DESVIO P.	0.08						
	VARIÂNCIA	0.01						

## Resumo estatístico Aditivos Eltech

Dias	Tipo de mistura	Resistência pico (MPa)	Aditivo (%)	Cimento (%)	Média	Mediana	Desvio pad.	Var.
28	Foam+Rejeito	0.77						
28	Foam+Rejeito	0.89						
28	HP 1050+Rejeito	0.7						
28	HP 1050+Rejeito	0.82	1%	6%	0.82	0.82	0.06	0.00
28	HP 1000+Rejeito	0.91						
28	HP 1000+Rejeito	0.81						
29	Pump+Rejeito	0.83						
29	Pump+Rejeito	0.81						
28	HP 1050+Rejeito	0.97						
28	HP 1050+Rejeito	0.86						
28	Foam+Rejeito	0.87						
28	Foam+Rejeito	0.91						
28	HP 1000+Rejeito	0.62						
28	HP 1000+Rejeito	0.69	2%	6%	0.79	0.86	0.17	0.03
29	HP 1050+Rejeito	0.74						
29	HP 1050+Rejeito	0.69						
28	Pump+Rejeito	1.06						
28	Pump+Rejeito	0.89						
34	Foam+Rejeito	0.43						
28	Pump+Rejeito	0.16						
28	Pump+Rejeito	0.17	3%	6%	0.15	0.15	0.02	0.00
28	Pump+Rejeito	0.14						
28	Pump+Rejeito	0.13						
28	Pump+Rejeito	0.65	4%	6%	0.68	0.68	0.03	0.00
28	Pump+Rejeito	0.7						
28	HP 1000+Rejeito	0.81						
28	HP 1000+Rejeito	0.79	1,5%	6%	0.82	0.81	0.02	0.00
28	HP 1000+Rejeito	0.85						
<b>TOTAL</b>	MÉDIA	0.70						
	MEDIANA	0.80						
	DESVIO P.	0.26						
	VARIÂNCIA	0.06						

## 5 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL SEM ADITIVOS

<b>DIAS</b>	<b>Tipo de mistura</b>	<b>Cimento%</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>	<b>Resistência pico (MPa)</b>
<b>3</b>	Rejeito	4%	76%	306.5	0.05
<b>3</b>	Rejeito	4%	76%	306.5	0.05
<b>3</b>	Rejeito	4%	76%	306.5	0.02
<b>8</b>	Rejeito	4%	76%	306.5	0.44
<b>8</b>	Rejeito	4%	76%	306.5	0.36
<b>28</b>	Rejeito	4%	76%	306.5	0.76
<b>28</b>	Rejeito	4%	76%	306.5	0.68
<b>3</b>	Rejeito	6%	76%	434.3	0.46
<b>3</b>	Rejeito	6%	76%	434.3	0.36
<b>3</b>	Rejeito	6%	76%	434.3	0.44
<b>8</b>	Rejeito	6%	76%	434.3	0.55
<b>8</b>	Rejeito	6%	76%	434.3	0.65
<b>28</b>	Rejeito	6%	76%	434.3	1.09
<b>28</b>	Rejeito	6%	76%	434.3	0.99

## 5 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DE MISTURAS COM AREIA

DIAS	Tipo de mistura	Cimento%	% de sólidos	Yield Stress (Pa)	%Areia média	Resistência pico (MPa)
3	Areia+Rejeito	4%	76%	445.4	5.0%	0.1
3	Areia+Rejeito	4%	76%	445.4	5.0%	0.11
3	Areia+Rejeito	4%	76%	445.4	5.0%	0.11
3	Areia+Rejeito	6%	76%	118	5.0%	0.03
3	Areia+Rejeito	6%	76%	118	5.0%	0.16
3	Areia+Rejeito	6%	76%	118	5.0%	0.13
3	Areia+Rejeito	4%	76%	98	7.5%	0.09
3	Areia+Rejeito	4%	76%	98	7.5%	0.1
3	Areia+Rejeito	4%	76%	98	7.5%	0.19
3	Areia+Rejeito	4%	76%	98	7.5%	0.08
3	Areia+Rejeito	6%	76%	63.5	7.5%	0.06
3	Areia+Rejeito	6%	76%	63.5	7.5%	0.13
3	Areia+Rejeito	6%	76%	63.5	7.5%	0.17
3	Areia+Rejeito	6%	76%	63.5	7.5%	0.16
3	Areia+Rejeito	4%	76%	45.4	10%	0.1
3	Areia+Rejeito	4%	76%	45.4	10%	0.08
3	Areia+Rejeito	4%	76%	45.4	10%	0.08
3	Areia+Rejeito	6%	76%	93.3	10%	0.28
3	Areia+Rejeito	6%	76%	93.3	10%	0.25
3	Areia+Rejeito	6%	76%	93.3	10%	0.22
7	Areia+Rejeito	4%	76%	78.1	5%	0.12
7	Areia+Rejeito	4%	76%	78.1	5%	0.09
7	Areia+Rejeito	6%	76%	118	5.0%	0.25
7	Areia+Rejeito	6%	76%	118	5.0%	0.24
7	Areia+Rejeito	4%	76%	85.8	7.5%	0.12
7	Areia+Rejeito	4%	76%	85.8	7.5%	0.13
7	Areia+Rejeito	6%	76%	104.3	7.5%	0.19
7	Areia+Rejeito	6%	76%	104.3	7.5%	0.24
7	Areia+Rejeito	4%	76%	45.4	10%	0.1

<b>DIAS</b>	<b>Tipo de mistura</b>	<b>Cimento%</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>	<b>% Areia média</b>	<b>Resistência pico (MPa)</b>
7	Areia+Rejeito	4%	76%	45.4	10%	0.07
7	Areia+Rejeito	6%	76%	93.3	10%	0.32
7	Areia+Rejeito	6%	76%	93.3	10%	0.31
28	Areia+Rejeito	4%	76%	78.1	5%	0.33
28	Areia+Rejeito	4%	76%	78.1	5%	0.29
28	Areia+Rejeito	4%	76%	78.1	5%	0.27
28	Areia+Rejeito	6%	76%	118	5.0%	0.52
28	Areia+Rejeito	6%	76%	118	5.0%	0.49
28	Areia+Rejeito	4%	76%	85.8	7.5%	0.31
28	Areia+Rejeito	4%	76%	85.8	7.5%	0.29
28	Areia+Rejeito	6%	76%	104.3	7.5%	0.43
28	Areia+Rejeito	6%	76%	104.3	7.5%	0.44
28	Areia+Rejeito	4%	76%	45.4	10%	0.19
28	Areia+Rejeito	4%	76%	45.4	10%	0.05
28	Areia+Rejeito	4%	76%	45.4	10%	0.04
28	Areia+Rejeito	6%	76%	93.3	10%	0.59
28	Areia+Rejeito	6%	76%	93.3	10%	0.65
28	Areia+Rejeito	6%	76%	93.3	10%	0.53

## 6 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL - ADITIVOS SIKA

DIAS	Tipo de mistura	Cimento %	% de sólidos	Yield Stress (Pa)	%Adição aditivo	Resistência pico (MPa)
3	Sika 17+Rejeito	6%	76%	483.6	2%	0.3
3	Sika 17+Rejeito	6%	76%	483.6	2%	0.23
3	Sika 17+Rejeito	6%	76%	483.6	2%	0.27
3	Sika 17+Rejeito	6%	76%	483.6	2%	0.29
3	Sika 18+Rejeito	4%	76%	410.2	3%	0.05
3	Sika 18+Rejeito	4%	76%	410.2	3%	0.04
4	Sika 18+Rejeito	6%	76%	352.6	2%	0.39
5	Sika 17+Rejeito	6%	76%	544.1	2%	0.58
5	Sika 18+Rejeito	4%	76%	334.1	2%	0.25
5	Sika 18+Rejeito	6%	76%	352.6	2%	0.43
5	Sika 18+Rejeito	6%	76%	352.6	2%	0.49
6	Sika 17+Rejeito	6%	76%	544.1	2%	0.73
6	Sika 18+Rejeito	4%	76%	334.1	2%	0.32
7	Sika 17+Rejeito	4%	76%	347.4	2%	0.43
7	Sika 17+Rejeito	4%	76%	347.4	2%	0.43
7	Sika 17+Rejeito	4%	76%	347.4	2%	0.49
7	Sika 17+Rejeito	4%	76%	347.4	2%	0.44
7	Sika 17+Rejeito	6%	76%	544.1	2%	0.76
7	Sika 17+Rejeito	6%	76%	544.1	2%	0.68
7	Sika 18+Rejeito	4%	76%	334.1	2%	0.38
7	Sika 18+Rejeito	4%	76%	334.1	2%	0.32
7	Sika 18+Rejeito	6%	76%	352.6	2%	0.6
7	Sika 18+Rejeito	6%	76%	352.6	2%	0.55
7	Sika 17+Rejeito	6%	76%	207.4	3%	0.14
7	Sika 17+Rejeito	6%	76%	207.4	3%	0.7
7	Sika 17+Rejeito	6%	76%	207.4	3%	0.08
7	Sika 17+Rejeito	4%	76%	322.7	4%	0.16
7	Sika 17+Rejeito	4%	76%	322.7	4%	0.2
7	Sika 17+Rejeito	6%	76%	76.2	4%	0.42
7	Sika 17+Rejeito	6%	76%	76.2	4%	0.47
7	Sika 17+Rejeito	6%	76%	76.2	4%	0.49

<b>DIAS</b>	<b>Tipo de mistura</b>	<b>Cimento %</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>	<b>%Adição aditivo</b>	<b>Resistência pico (MPa)</b>
7	Sika 17+Rejeito	6%	76%	76.2	4%	0.38
7	Sika 18+Rejeito	4%	76%	410.2	3%	0.19
7	Sika 18+Rejeito	4%	76%	410.2	3%	0.2
7	Sika 18+Rejeito	6%	76%	336.9	3%	0.06
7	Sika 18+Rejeito	6%	76%	336.9	3%	0.09
7	Sika 18+Rejeito	6%	76%	56.7	4%	0.14
28	Sika 17+Rejeito	4%	76%	347.4	2%	0.59
28	Sika 17+Rejeito	4%	76%	347.4	2%	0.45
28	Sika 17+Rejeito	6%	76%	544.1	2%	1.31
28	Sika 17+Rejeito	6%	76%	544.1	2%	1.35
28	Sika 18+Rejeito	4%	76%	334.1	2%	0.49
28	Sika 18+Rejeito	4%	76%	334.1	2%	0.53
28	Sika 17+Rejeito	4%	76%	322.7	4%	0.53
28	Sika 17+Rejeito	4%	76%	322.7	4%	0.48
28	Sika 17+Rejeito	6%	76%	76.2	4%	1
28	Sika 17+Rejeito	6%	76%	76.2	4%	1.06
28	Sika 17+Rejeito	6%	76%	76.2	4%	1.09
28	Sika 18+Rejeito	4%	76%	410.2	4%	0.46
28	Sika 18+Rejeito	4%	76%	410.2	4%	0.5
28	Sika 18+Rejeito	6%	76%	336.9	3%	0.32
28	Sika 18+Rejeito	6%	76%	336.9	3%	0.32
28	Sika 18+Rejeito	6%	76%	336.9	3%	0.24
28	Sika 18+Rejeito	4%	76%	336.9	4%	0.31
28	Sika 18+Rejeito	4%	76%	336.9	4%	0.25
28	Sika 18+Rejeito	6%	76%	56.7	4%	0.42
28	Sika 18+Rejeito	6%	76%	56.7	4%	0.39
28	Sika 18+Rejeito	6%	76%	56.7	4%	0.36
28	Sika 18+Rejeito	6%	76%	434.3	2%	0.91
28	Sika 18+Rejeito	6%	76%	434.3	2%	0.9
28	Sika 17+Rejeito	6%	76%	236.2	3%	0.17
28	Sika 17+Rejeito	6%	76%	236.2	3%	0.17
34	Sika 18+Rejeito	6%	76%	352.6	2%	1.14
34	Sika 18+Rejeito	6%	76%	352.6	2%	1.18

## 7 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL – ADITIVOS ELTECH

<b>DIAS</b>	<b>Tipo de mistura</b>	<b>Cimento %</b>	<b>% sólidos</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>	<b>%Adição aditivo</b>	<b>Resistência pico (MPa)</b>
3	Pump+Rejeito	4%	76	462.3	2%	0.26
3	Pump+Rejeito	4%	76	462.3	2%	0.24
3	Pump+Rejeito	4%	76	462.3	2%	0.24
3	Pump+Rejeito	4%	76	462.3	2%	0.26
3	Pump+Rejeito	6%	76	503.6	2%	0.37
3	Pump+Rejeito	6%	76	503.6	2%	0.42
3	Pump+Rejeito	6%	76	503.6	2%	0.43
3	Pump+Rejeito	6%	76	503.6	2%	0.27
3	Foam+Rejeito	4%	76	486.1	1.5%	0.26
3	Foam+Rejeito	4%	76	486.1	1.5%	0.08
3	Foam+Rejeito	4%	76	486.1	1.5%	0.07
3	Foam+Rejeito	6%	76	501.2	1.5%	0.35
3	Foam+Rejeito	6%	76	501.2	1.5%	0.38
3	Foam+Rejeito	6%	76	501.2	1.5%	0.41
3	Foam+Rejeito	6%	76	501.2	1.5%	0.52
3	Foam+Rejeito	4%	76	528	1%	0.28
3	Foam+Rejeito	4%	76	528	1%	0.23
3	Foam+Rejeito	4%	76	528	1%	0.24
3	Foam+Rejeito	6%	76	377.4	1%	0.04
3	Foam+Rejeito	6%	76	377.4	1%	0.04
3	Foam+Rejeito	6%	76	377.4	1%	0.04
3	Foam+Rejeito	6%	76	377.4	1%	0.04
3	HP 1050+Rejeito	6%	76	432.2	1%	0.1
3	HP 1050+Rejeito	6%	76	432.2	1%	0.07
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	545.3	1%	0.17
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	545.3	1%	0.18
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	545.3	1%	0.15
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	517.6	1%	0.3
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	517.6	1%	0.37
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	517.6	1%	0.34

<b>DIAS</b>	<b>Tipo de mistura</b>	<b>Cimento %</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>	<b>%Adição aditivo</b>	<b>Resistência pico (MPa)</b>
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	438.1	1.5%	0.3
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	438.1	1.5%	0.26
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	438.1	1.5%	0.24
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	438.1	1.5%	0.31
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	348.1	1.5%	0.31
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	348.1	1.5%	0.3
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	348.1	1.5%	0.29
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	348.1	1.5%	0.34
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	488.5	1.8%	0.22
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	488.5	1.8%	0.2
3	HP 1000+Rejeito	4%	76	488.5	1.8%	0.2
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	300.3	1.8%	0.28
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	300.3	1.8%	0.27
3	HP 1000+Rejeito	6%	76	300.3	1.8%	0.28
5	Foam+Rejeito	4%	76	387.6	2%	0.29
5	Foam+Rejeito	4%	76	387.6	2%	0.33
5	Foam+Rejeito	4%	76	387.6	2%	0.33
5	Foam+Rejeito	6%	76	392.5	2%	0.13
5	Foam+Rejeito	6%	76	392.5	2%	0.19
6	Pump+Rejeito	4%	76	352.7	2%	0.27
6	Pump+Rejeito	6%	76	376.9	2%	0.5
6	Pump+Rejeito	6%	76	376.9	2%	0.57
6	Pump+Rejeito	6%	76	376.9	2%	0.4
7	Pump+Rejeito	4%	76	352.7	2%	0.41
7	Pump+Rejeito	4%	76	352.7	2%	0.34
7	Pump+Rejeito	4%	76	352.7	2%	0.18
7	Pump+Rejeito	4%	76	352.7	2%	0.41
7	Pump+Rejeito	6%	76	376.9	2%	0.64
7	Pump+Rejeito	6%	76	376.9	2%	0.61
7	Foam+Rejeito	4%	76	387.6	2%	0.37
7	Foam+Rejeito	4%	76	387.6	2%	0.29
7	Foam+Rejeito	6%	76	392.5	2%	0.2
7	Foam+Rejeito	6%	76	392.5	2%	0.21

<b>DIAS</b>	<b>Tipo de mistura</b>	<b>Cimento %</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>	<b>%Adição aditivo</b>	<b>Resistência pico (MPa)</b>
7	Foam+Rejeito	6%	76	455.2	1%	0.29
7	Foam+Rejeito	6%	76	455.2	1%	0.5
7	Foam+Rejeito	4%	76	486.1	1.5%	0.23
7	Foam+Rejeito	4%	76	486.1	1.5%	0.24
7	Pump+Rejeito	4%	76	511.6	3%	0.39
7	Pump+Rejeito	4%	76	511.6	3%	0.39
7	Pump+Rejeito	6%	76	440.4	4%	0.38
7	Pump+Rejeito	6%	76	440.4	4%	0.37
7	HP 1050+Rejeito	4%	76	503.6	1.5%	0.21
7	HP 1050+Rejeito	4%	76	503.6	1.5%	0.23
7	HP 1050+Rejeito	6%	76	481.2	1.5%	0.45
7	HP 1050+Rejeito	6%	76	481.2	1.5%	0.35
7	HP 1050+Rejeito	4%	76	503.6	1.8%	0.23
7	HP 1050+Rejeito	4%	76	503.6	1.8%	0.28
7	HP 1050+Rejeito	6%	76	427.8	1.8%	0.22
7	HP 1050+Rejeito	6%	76	427.8	1.8%	0.24
7	Pump+Rejeito	4%	76	519.4	1%	0.14
7	Pump+Rejeito	4%	76	519.4	1%	0.17
7	Foam+Rejeito	6%	76	490.8	1.5%	0.31
7	Foam+Rejeito	6%	76	490.8	1.5%	0.28
7	HP 1000+Rejeito	4%	76	545.3	1%	0.29
7	HP 1000+Rejeito	4%	76	545.3	1%	0.32
7	HP 1000+Rejeito	6%	76	517.6	1%	0.46
7	HP 1000+Rejeito	6%	76	517.6	1%	0.37
7	HP 1000+Rejeito	4%	76	525.9	1,5%	0.27
7	HP 1000+Rejeito	4%	76	525.9	1,5%	0.34
7	HP 1000+Rejeito	6%	76	457.5	1,5%	0.43
7	HP 1000+Rejeito	6%	76	457.5	1,5%	0.5
7	HP 1000+Rejeito	4%	76	427.8	1.8%	0.1
7	HP 1000+Rejeito	4%	76	427.8	1.8%	0.11
7	HP 1000+Rejeito	6%	76	361	1.8%	0.23
7	HP 1000+Rejeito	6%	76	361	1.8%	0.19
9	HP 1050+Rejeito	4%	76	434.3	1.8%	0.38

<b>DIAS</b>	<b>Tipo de mistura</b>	<b>Cimento %</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>	<b>%Adição aditivo</b>	<b>Resistência pico (MPa)</b>
9	HP 1050+Rejeito	4%	76	434.3	1.8%	0.34
9	HP 1050+Rejeito	4%	76	434.3	1.8%	0.46
9	HP 1050+Rejeito	4%	76	434.3	1.8%	0.43
9	HP 1050+Rejeito	4%	76	434.3	1.8%	0.39
9	HP 1050+Rejeito	6%	76	386.8	1.8%	0.44
9	HP 1050+Rejeito	6%	76	386.8	1.8%	0.51
9	Pump+Rejeito	4%	76	415.7	1%	0.36
9	Pump+Rejeito	4%	76	415.7	1%	0.33
9	Pump+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.58
9	Pump+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.57
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.45
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.51
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.5
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.71
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.39
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	384.8	1.5%	0.66
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	384.8	1.5%	0.57
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	384.8	1.5%	0.59
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	384.8	1.5%	0.61
10	HP 1050+Rejeito	6%	76	384.8	1.5%	0.57
11	HP 1000+Rejeito	4%	76	488.5	1.8%	0.38
11	HP 1000+Rejeito	4%	76	488.5	1.8%	0.32
11	HP 1000+Rejeito	6%	76	300.3	1.8%	0.43
11	HP 1000+Rejeito	6%	76	300.3	1.8%	0.46
28	Pump+Rejeito	4%	76	352.7	2%	0.5
28	Pump+Rejeito	4%	76	352.7	2%	0.65
28	Pump+Rejeito	6%	76	376.9	2%	1.06
28	Pump+Rejeito	6%	76	376.9	2%	0.89
28	Foam+Rejeito	6%	76	455.2	1%	0.77
28	Foam+Rejeito	6%	76	455.2	1%	0.89
28	Foam+Rejeito	4%	76	486.1	2%	0.39
28	Foam+Rejeito	4%	76	486.1	2%	0.4
28	HP 1050+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.7

<b>DIAS</b>	<b>Tipo de mistura</b>	<b>Cimento %</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>	<b>%Adição aditivo</b>	<b>Resistência pico (MPa)</b>
28	HP 1050+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.82
28	HP 1050+Rejeito	6%	76	384.8	1.5%	0.97
28	HP 1050+Rejeito	6%	76	384.8	1.5%	0.86
28	Pump+Rejeito	4%	76	511.6	3%	0.52
28	Pump+Rejeito	4%	76	511.6	3%	0.58
28	Pump+Rejeito	6%	76	546.7	3%	0.16
28	Pump+Rejeito	6%	76	546.7	3%	0.17
28	Pump+Rejeito	6%	76	546.7	3%	0.14
28	Pump+Rejeito	6%	76	546.7	3%	0.13
28	Pump+Rejeito	4%	76	376	4%	0.4
28	Pump+Rejeito	4%	76	376	4%	0.4
28	Pump+Rejeito	4%	76	376	4%	0.36
28	Pump+Rejeito	4%	76	376	4%	0.41
28	Pump+Rejeito	6%	76	440.4	4%	0.65
28	Pump+Rejeito	6%	76	440.4	4%	0.7
28	Foam+Rejeito	6%	76	490.8	1.5%	0.87
28	Foam+Rejeito	6%	76	490.8	1.5%	0.91
28	HP 1000+Rejeito	4%	76	545.3	1%	0.61
28	HP 1000+Rejeito	4%	76	545.3	1%	0.63
28	HP 1000+Rejeito	6%	76	517.6	1%	0.91
28	HP 1000+Rejeito	6%	76	517.6	1%	0.81
28	HP 1000+Rejeito	4%	76	525.9	1,5%	0.47
28	HP 1000+Rejeito	4%	76	525.9	1,5%	0.53
28	HP 1000+Rejeito	4%	76	525.9	1,5%	0.53
28	HP 1000+Rejeito	6%	76	457.5	1,5%	0.81
28	HP 1000+Rejeito	6%	76	457.5	1,5%	0.79
28	HP 1000+Rejeito	6%	76	457.5	1,5%	0.85
28	HP 1000+Rejeito	4%	76	488.5	1.8%	0.47
28	HP 1000+Rejeito	4%	76	488.5	1.8%	0.47
28	HP 1000+Rejeito	6%	76	300.3	1.8%	0.62
28	HP 1000+Rejeito	6%	76	300.3	1.8%	0.69
29	HP 1050+Rejeito	4%	76	434.3	1.8%	0.54
29	HP 1050+Rejeito	6%	76	386.8	1.8%	0.74

<b>DIAS</b>	<b>Tipo de mistura</b>	<b>Cimento %</b>	<b>% de sólidos</b>	<b>Yield Stress (Pa)</b>	<b>%Adição aditivo</b>	<b>Resistência pico (MPa)</b>
<b>29</b>	HP 1050+Rejeito	6%	76	386.8	1.8%	0.69
<b>29</b>	Pump+Rejeito	4%	76	415.7	1%	0.49
<b>29</b>	Pump+Rejeito	4%	76	415.7	1%	0.43
<b>29</b>	Pump+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.83
<b>29</b>	Pump+Rejeito	6%	76	421.3	1%	0.81
<b>34</b>	Foam+Rejeito	4%	76	387.6	2%	0.51
<b>34</b>	Foam+Rejeito	4%	76	387.6	2%	0.58
<b>34</b>	Foam+Rejeito	6%	76	392.5	2%	0.43