



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



GABRIELLA DIAS PINTO ARAUJO

**DETERMINAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO E SEU IMPACTO NA
VIDA ÚTIL DE UMA SEÇÃO DE TUBULAÇÃO DE REJEITODUTO
NO PROCESSO DE MINERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO**

**OURO PRETO - MG
2022**

GABRIELLA DIAS PINTO ARAUJO
gabriella.araujo@aluno.ufop.edu.br

**DETERMINAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO E SEU IMPACTO NA
VIDA ÚTIL DE UMA SEÇÃO DE TUBULAÇÃO DE REJEITODUTO
NO PROCESSO DE MINERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheira Mecânica.

Professor orientador: MSc. Savio Sade Tayer

OURO PRETO – MG
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663d Araujo, Gabriella Dias Pinto.

Determinação do desgaste abrasivo e seu impacto na vida útil de uma seção de tubulação de rejeitoduto no processo de mineração de Minério de Ferro. [manuscrito] / Gabriella Dias Pinto Araujo. - 2022. 66 f.: il.: color., gráf., tab.. + Anexos.

Orientador: Prof. Me. Savio Tayer.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Rejeitos (Metalurgia) - Rejeitoduto. 2. Rejeitos (Metalurgia) - Polpa de Rejeito. 3. Abrasivos - Teste de abrasividade. 4. Soldagem - Máquina de Miller. I. Tayer, Savio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriela Dias Pinto Araújo

Determinação do desgaste abrasivo e seu impacto na vida útil de uma seção de tubulação de rejeitoduto no processo de mineração de minério de ferro.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de graduação.

Aprovada em 06 de outubro de 2022

Membros da banca

Msc Sávio Sade Tayer - UFOP

Dsc Washington Luis Vieira da Silva - UFOP

Dsc Diogo Antônio de Sousa - UFOP

Sávio sade Tayer, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalho de Conclusão de Curso da UFOP em 06/10/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Savio Sade Tayer, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/10/2022, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0411812** e o código CRC **6760A544**.

Essa conquista é fruto de muita dedicação, amor e apoio incondicional dos meus pais, Marli e Edraldo, para me proporcionar a melhor educação e me ajudar a alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTO

Agradeço à Deus, por me dar força em momentos tão difíceis e por me guiar sempre, me ajudando a concluir essa etapa tão importante e sonhada da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Marli e Edraldo, por todo amor, por se esforçarem tanto por mim, por me apoiarem de forma incondicional e por serem minha fonte de força para jamais desistir dos meus sonhos.

Às minhas irmãs, Marla e Mayra, por sempre torcerem pelo meu sucesso e felicidade, por me escutarem nos momentos de angústia e também de alegria, e me darem força em meio às aflições.

Ao meu namorado, Glauber, que foi meu grande amigo e companheiro ao longo de todos os anos da graduação. Por virar noite comigo não só nos rocks, mas também nas ferrações e por me mostrar que eu era capaz, todas as vezes em que duvidei de mim mesma.

Ao meu orientador Savio, pelo incentivo desde o primeiro dia, pela paciência, disponibilidade e por me orientar para que eu conseguisse desenvolver este trabalho.

À todos os professores, que ao compartilharem seus conhecimentos e experiências, me tornaram Engenheira Mecânica.

À UFOP, pelo ensino público de qualidade e por me proporcionar a experiência de morar nessa cidade linda que é Ouro Preto!

À Anglo American e, principalmente, à toda a Coordenação de Eletromecânica da Diretoria de Projetos, por me escolherem e me ensinarem tanto ao longo do ano de estágio e por confiarem em mim para continuar efetivamente fazendo parte do time.

À TNTEK Soluções de Engenharia, por me darem a oportunidade de fazer parte da equipe, de aprender e crescer junto com a empresa nos anos que estive com vocês.

À vida republicana, que me proporcionou infinitas experiências que nem sei descrever. Que me fez crescer muito, e me mostrou que sair da zona de conforto é bom demais!

À minha equipe maravilhosa do 12 Bis, que me mostrou que a gente aprende a se virar sozinho em Ouro Preto, mas que quando a gente trabalha em conjunto podemos alcançar voos muito mais altos.

À todos os amigos e colegas que participaram comigo dessa jornada! Vocês a tornaram mais leve e divertida.

Muito obrigada à todos vocês!

“Todos os homens têm medo, mas o bravo repele seu medo e avança, por vezes rumo à morte, mas sempre, rumo à vitória”.

Lema da Guarda do Rei na Antiga Grécia

RESUMO

A atividade de exploração mineral tem como consequência o grande volume de rejeitos produzidos pelo processo que, comumente, são transportados por sistemas de tubulações e bombas, denominado rejeitoduto. Por ser uma atividade que geralmente é realizada em áreas não urbanizadas repletas de biodiversidade e, também, haver geração de grandes volumes de rejeitos de diferentes tipologias, há a possibilidade de catástrofes socioambientais se houver falhas no sistema de transporte e manejo desse rejeito. Comumente na exploração de minério de ferro, partículas de quartzo são as principais constituintes do rejeito da operação de beneficiamento e, devido a sua geometria possuir ângulos obtusos, se faz necessário um estudo de abrasividade da polpa para fins de controle e cálculo de vida útil dos dutos do rejeitoduto. O objetivo deste trabalho é utilizar os resultados de um teste de abrasividade de Miller, realizado conforme norma ASTM G75, feito em uma amostra de aço API X70 em meio abrasivo composto por polpa de rejeito fornecido por uma mineradora e, assim, através do desgaste por abrasão mensurado, ser possível estipular a vida útil de um trecho de tubulação em PEAD de um rejeito duto existente. Os cálculos foram realizados de acordo com informações da norma ASTM G75 e manual técnico de fabricante de tubos PEAD para mineração. Foram estipulados o volume de perda de massa da tubulação por ano, a espessura desgastada da parede da tubulação PEAD por ano e a vida útil dos dutos do sistema. Os resultados obtidos foram compatíveis com cálculos já realizados por uma empresa de engenharia, porém, foi possível compreender que para obter resultados mais compatíveis com a situação real, se faz necessária a realização do teste com amostra de material PEAD. Foi evidenciado, também, que com o aumento da produção e com aumento somente da concentração de massa de sólidos na polpa de rejeito, não haverá aumento significativo da abrasão.

Palavras-chave: Rejeitoduto. Polpa de rejeito. Teste de abrasividade. Máquina de Miller.

ABSTRACT

The mineral exploration activities have some results, such as a large volume of tailings produced by the process, which are commonly transported by pipes and pump systems, called tailings pipeline. In the mineral activity is commonly carried out in non-urbanized areas with a lot of biodiversity and, also, there is the generation of large volumes of tailings with different types, because of it, there is the possibility of socio-environmental catastrophes if there are failures in the transport and management system of this tailings. Usually in the exploration of iron ore, quartz particles are the main constituents of the tailings of the beneficiation operation and, due to its geometry having obtuse angles, it is necessary to study the abrasiveness of the tailings pulp for the control and calculation of the useful life of the tailings pipelines. The objective of this work is to use the results of a Miller abrasiveness test, performed according to ASTM G75 standard, made on a sample of API X70 steel in an abrasive pulp composed of tailings supplied by a mining company and, with the value measured abrasion, estimate the useful life of a HDPE pipe section of a tailings pipeline. The calculations were performed in accordance with information from ASTM G75 and the HDPE pipe manufacturer's technical manual for mining. The volume of the wall thickness worn, the useful life and the HDPE tailings pipeline mass loss per year, were stipulated. The results obtained were compatible with calculations already carried out by an engineering company, however, it was possible to understand that to obtain results more compatible with the real situation, it is necessary to carry out the test with a sample of HDPE material. It was also demonstrated that the increase in production only with increase in the mass concentration of solids in the tailings pulp, there will be no significant increase in abrasion.

Key-words: Tailings pipeline. Tailings pulp. Abrasiveness test. Miller machine.

LISTA DE SIMBOLOS

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

USGS - *United States Geological Survey*

ANM - Agência Nacional de Mineração

AMB - Anuário Mineral Brasileiro

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

MRS - *Minimum Required Strenght*

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MN = número de miller

C = fator de escala (18,18 mg/h)

M' = taxa de perda de massa em mg/h.

M'(t) = taxa perda de massa (mg / h);

A = primeiro coeficiente de ajuste;

B = segundo coeficiente de ajuste;

t = tempo em horas (t =2h).

SAR = Resposta abrasiva da lama mineral;

MN = Número de Miller;

SG_s = Densidade específica do corpo de prova padrão (7,58);

SG_{t,s} = Densidade específica do corpo de prova utilizado.

A_{amostra} = área a ser desgastada da amostra

V_{desg. amostra} = volume de massa perdida em uma hora da amostra

e_{desg. amostra} = perda de espessura da amostra

e_{desg. PEAD} = perda de espessura de PEAD

e_{minima} = espessura mínima da parede da tubulação PEAD

Vida útil = vida útil estipulada da tubulação PEAD

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Reservas mundiais de ferro em 2001 | 1 |
| Figura 2: Etapas do processo de produção de minério de ferro tipo <i>pellet feed</i> | 3 |
| Figura 3: (a) imagem à esquerda: tubulação do rejeitoduto rompida; (b) imagem à direita: Rio atingido pelos rejeitos provenientes do rompimento do Rejeitoduto | 5 |
| Figura 4: Esquema típico de processamento e beneficiamento de minério de ferro | 9 |
| Figura 5: Processo de laminação para fabricação de tubos de aço sem costura..... | 10 |
| Figura 6: Processo de laminação para fabricação de tubos de aço sem costura..... | 10 |
| Figura 7: Processo de extrusão para fabricação de tubos de aço sem costura..... | 11 |
| Figura 8: Processo de fabricação por fundição de tubos de aço sem costura..... | 11 |
| Figura 9: Processo de fabricação de tubos de aço sem costura. | 12 |
| Figura 10: Tubo PEAD..... | 12 |
| Figura 11: Regime permanente..... | 16 |
| Figura 12: Regime transiente..... | 16 |
| Figura 13: Saída do Rejeitoduto. | 17 |
| Figura 14: Travessias aéreas de um rejeitoduto..... | 18 |
| Figura 15: Concentrado da Flotação..... | 19 |
| Figura 16: Rejeito da Flotação | 20 |
| Figura 17: Lascas de quartzo natural | 21 |
| Figura 18: Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos da barragem..... | 21 |
| Figura 19: Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos da barragem..... | 22 |
| Figura 20: Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos da barragem..... | 23 |
| Figura 21: Microscopia de uma superfície que sofreu desgaste abrasivo por riscamento. | 24 |
| Figura 22: Microscopia de uma superfície que sofreu desgaste abrasivo por rolamento..... | 25 |
| Figura 23: Máquina de Miller..... | 25 |
| Figura 24: Vista em corte da máquina de Miller | 26 |

| | |
|---|----|
| Figura 25: Comparação dos movimentos da partícula abrasiva..... | 27 |
| Figura 26: Fluxograma da metodologia adotada..... | 30 |
| Figura 27: Curva da perda de massa em função do tempo..... | 35 |
| Figura 28: Dimensões do corpo de prova..... | 37 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Extração de minério e reservas mundiais | 2 |
| Tabela 2: Classificação MRS de revestimento PEAD..... | 15 |
| Tabela 3: Variáveis e Indicadores | 31 |
| Tabela 4: Proporção da mistura de rejeitos | 33 |
| Tabela 5: Média da perda de massa acumulada | 34 |
| Tabela 6: Especificações da tubulação dos trechos do rejeitoduto..... | 36 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Formulação do Problema..... | 1 |
| 1.2 | Justificativa..... | 5 |
| 1.2.1 | Geral | 6 |
| 1.2.2 | Específicos..... | 6 |
| 1.3 | Estrutura do Trabalho | 6 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| 2.1 | Operação de Beneficiamento..... | 8 |
| 2.2 | Tubulações industriais | 9 |
| 2.2.1 | Revestimentos..... | 13 |
| 2.3 | Tipos de Regimes de Transporte de Fluidos | 15 |
| 2.3.1 | Permanente | 15 |
| 2.3.2 | Transiente | 16 |
| 2.4 | Rejeitoduto..... | 17 |
| 2.5 | Rejeito proveniente do processamento do minério de ferro | 18 |
| 2.5.1 | Morfologia do Quartzo (SiO ₂)..... | 20 |
| 2.6 | Abrasão..... | 23 |
| 2.6.1 | Teste de abrasividade..... | 25 |
| 2.6.2 | Indicadores..... | 27 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 29 |
| 3.1 | Tipos de pesquisa..... | 29 |
| 3.2 | Materiais e métodos | 30 |
| 3.3 | Variáveis e Indicadores | 31 |
| 3.4 | Instrumento de coleta de dados | 31 |
| 3.5 | Tabulação dos dados..... | 32 |
| 3.6 | Considerações finais do capítulo | 32 |
| 4 | RESULTADOS..... | 33 |
| 4.1 | A empresa | 33 |
| 4.2 | Amostra de rejeito | 33 |
| 4.3 | Teste de abrasividade..... | 34 |
| 4.4 | Trecho de estudo..... | 36 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.5 | Calculo do volume de perda de massa..... | 37 |
| 4.6 | Cálculo da espessura perdida..... | 37 |
| 4.7 | Cálculo da vida útil..... | 38 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 40 |
| 5.1 | Recomendações para trabalhos futuros | 40 |
| 6 | REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA..... | 42 |
| | ANEXO..... | 47 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Devido ao crescimento populacional mundial e, conseqüente avanço tecnológico, tornou-se necessário maior extração de recursos naturais para suprir as necessidades da população. Pode-se destacar a extração mineral como uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento humano, pois o aço, que é um dos principais produtos provenientes da extração do minério de ferro, é um componente importante para fabricação de diversos itens do cotidiano e, também, para o desenvolvimento de novos produtos e tecnologias.

Dados do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (2001) informam que as reservas mundiais de minério de ferro estão na ordem de 310 bilhões de toneladas, o Brasil possui 6,8 % dessas reservas e encontra-se em 5º lugar conforme mostrado na Figura 1. Porém, como os minérios brasileiros possuem alto teor de ferro, o país se destaca no cenário mundial.

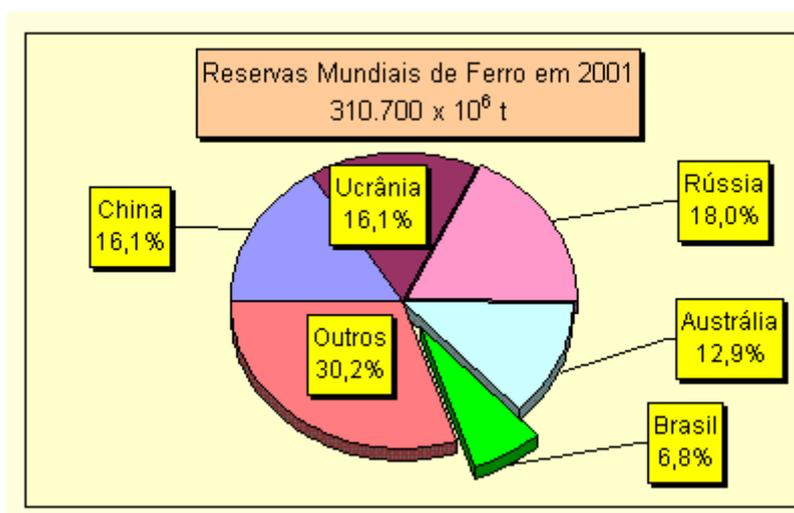


Figura 1: Reservas mundiais de ferro em 2001

Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (2001)

Um reporte feito pelo *United States Geological Survey* – USGS (2021), que é o serviço geológico dos Estados Unidos, mostra que o Brasil ocupa, atualmente, o segundo lugar mundial em extração mineral. Na Tabela 1 pode-se observar que em 2021 a produção foi de cerca de 380 milhões de toneladas, ficando atrás apenas da Austrália que produziu cerca de 900 milhões de toneladas no ano.

Tabela 1: Extração de minério e reservas mundiais

| | Produção de minério | | | | Reservas | |
|-----------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|----------------------|
| | Minério utilizável | | Teor de ferro | | (Milhões de toneladas métricas) | |
| | <u>2020</u> | <u>2021</u> | <u>2020</u> | <u>2021</u> | Minério bruto | Teor de ferro |
| Estados Unidos | 38100 | 46000 | 24100 | 29000 | 3000 | 1000 |
| Austrália | 912000 | 900000 | 565000 | 560000 | 51000 | 25000 |
| Brazil | 388000 | 380000 | 247000 | 240000 | 34000 | 15000 |
| Canada | 60100 | 68000 | 36100 | 41000 | 6000 | 2300 |
| Chile | 15600 | 19000 | 9890 | 12000 | NA | NA |
| China | 360000 | 360000 | 225000 | 220000 | 20000 | 6900 |
| India | 204000 | 240000 | 127000 | 150000 | 5500 | 3400 |
| Outros países | 495700 | 535000 | 304340 | 323900 | 59730 | 31008 |
| Total mundial | 2470000 | 2600000 | 1520000 | 1600000 | 180000 | 85000 |

Fonte: Adaptado de United States Geological Survey – USGS (2021)

O Brasil é um dos países com maior potencial mineral do mundo e possui diversas reservas com cerca de 70 tipos de substâncias minerais diferentes, de acordo com a Agência Nacional de Mineração - ANM. Segundo dados referente à fevereiro de 2021, do Ministério de Minas e Energia do governo brasileiro, o setor mineral é responsável por 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB) e é um importante setor para o fortalecimento da economia além se ser uma das principais atividades econômicas do país.

Foi divulgado no Anuário Mineral Brasileiro- AMB (2017) que, somente em 2016, foram concedidas 3.442 Autorizações de Pesquisa, 32 Concessões de Lavra e 87 Permissões de Lavra Garimpeira em todo país.

As etapas de exploração do minério de ferro utilizadas pelas grandes companhias mineradoras sofrem pequenas alterações em seus projetos conforme o tipo e litologia do corpo mineral, além de claro, outras variáveis pertinentes a atividade. Contudo, basicamente podemos descrever que as etapas de um modo geral de todo tipo de *run of mine* são (LUZ *et al*, 2010):

- Avaliação e estudo do corpo mineral;
- Prospecção;
- Lavra e desmonte do corpo mineral/geológico.
- Processamento e beneficiamento;
- Transporte e condicionamento de rejeitos e concentrados.

É apresentado na Figura 2 um modelo esquemático atualmente utilizado no processo de beneficiamento de minério de ferro do tipo *pellet feed*, desde o transporte do minério de alta granulometria para a britagem primária até o concentrado final filtrado.

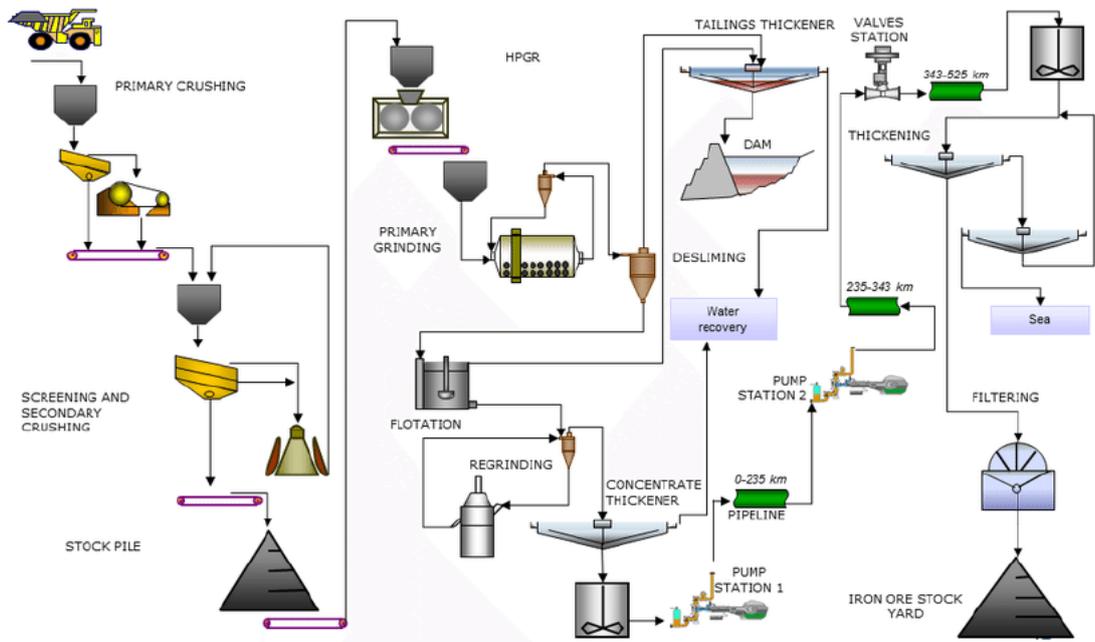


Figura 2: Etapas do processo de produção de minério de ferro tipo *pellet feed*
 Fonte: TURRER *et al*. (2017).

É dito no trabalho de Gomes *et al* (2009) que no ano de 2008 para uma produção de 6.039.597 toneladas de concentrado, foram geradas 1.479.157 toneladas de rejeitos, estimando-se em 20.000.000 toneladas, ao fim de sua vida útil previsto para 2010. Diante disso é possível perceber que a quantidade de rejeitos gerados em uma operação de mineração é muito alta, tão expressivo quanto a produção do concentrado.

Existem diversas formas de descarte de rejeitos de mineração, porém, segundo Portes (2013), as mineradoras brasileiras utilizam, em sua maioria, o método de disposição em superfície em forma de polpa, com utilização de barragem de contenção de rejeitos. Os rejeitos provenientes de todo processo de beneficiamento são bombeados e depositados na barragem.

O sistema de dutos em que os rejeitos de todo o processo circulam até chegar à barragem é chamado de Rejeitoduto. Ele consiste em um sistema de bombas, tanques e tubulações que devem ser dimensionados corretamente em seu projeto devido ao grande impacto que podem gerar os erros de cálculos após a implantação do empreendimento.

O rompimento da tubulação, além de gerar danos à produção devido à necessidade de paralisação do processo, gera grandes danos ambientais tendo em vista que todo o processo de mineração ocorre em região de matas e rios que podem ser atingidos pelos rejeitos provenientes da tubulação rompida.

Pode-se citar o exemplo do rompimento da tubulação do rejeitoduto da mineradora Vale S.A., divulgado na reportagem de Silva, que ocorreu em 2017 e contaminou rios e córregos da Região Central de Minas Gerais. Segundo o autor, a empresa informou que o incidente aconteceu na mina de Fábrica, localizada no município de Ouro Preto e, de acordo com informações do secretário de meio ambiente do município de Itabirito, os córregos Prata, das Almas e os rios Mata Porcos e Itabirito (que deságua no Rio das Velhas, um dos rios que abastecem Belo Horizonte) foram atingidos pelos rejeitos causando grandes prejuízos ambientais, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 3: (a) imagem à esquerda: tubulação do rejeitoduto rompida; (b) imagem à direita: Rio atingido pelos rejeitos provenientes do rompimento do Rejeitoduto
 Fonte: Jornal Estado de Minas. (2017).

Como evidenciado anteriormente, o processo de mineração gera um grande volume de rejeitos. Estes são abrasivos devido à sua geometria pontiaguda causada, de acordo com Espósito *apud* Portes (2013), por ter em grande parte de sua composição a Sílica, fato que favorece ao desgaste da tubulação. Dessa forma, fica evidente a importância do correto dimensionamento e cálculo de vida útil da tubulação, bem como manutenção desta e de seus componentes, para evitar acidentes e, também, evitar prejuízos financeiros da empresa devido à paradas para reparos corretivos do rejeitoduto.

Para que o projeto seja efetivo, e por se tratar de um empreendimento importante para o processo de mineração, é necessário que sejam feitos cálculos efetivos e confiáveis. Por isso, o objetivo desse trabalho é analisar o seguinte questionamento:

Quanto o desgaste abrasivo da polpa de rejeito de uma mineração de minério de ferro impacta na vida útil da tubulação de um rejeitoduto?

1.2 Justificativa

O desgaste está presente em situações em que há contato e movimento, conforme afirmado por Cozza (2006). Sendo assim, o desgaste é um dos principais motivos de parada para manutenções no setor industrial, já que os dutos e equipamentos ficam em constante movimento, sofrendo e exercendo esforços no processo produtivo.

Além do desgaste causar paradas não programadas de produção para manutenção e, com isso, gerar perda de lucros para a empresa, ele pode causar danos catastróficos.

O ambiente de estudo deste trabalho é o setor de mineração. Como é de conhecimento comum, o processo de extração mineral exige grandes maquinários e grandes extensões de dutos para transporte tanto de rejeito quanto de produto, pois o volume de produção é extremamente elevado.

Será explicado no próximo capítulo do presente trabalho que o principal dano causado em tubulações de rejeito é o desgaste abrasivo devido à geometria das suas partículas. Com isso, é preciso um maior controle desse desgaste para que sejam evitadas paradas indesejadas da produção e, principalmente, minimizar a possibilidade de danos ambientais e garantir a segurança dos colaboradores, já que, como exposto no capítulo 1.1, pequenas falhas podem gerar grandes catástrofes nesse setor.

Sabendo da importância do sistema de bombeamento de rejeitos no processo de mineração, se faz necessário um estudo para avaliar o desgaste, e assim, estipular a vida útil da tubulação de um rejeitoduto de uma mineradora para que assim, possam ser tomadas medidas preventivas para evitar falhas.

1.2.1 Geral

Determinar a vida útil para uma seção da tubulação do sistema de rejeitoduto de uma operação de extração de minério de ferro após desgaste abrasivo sofrido no processo.

1.2.2 Específicos

- Revisar a bibliografia sobre rejeitos de mineração e desgaste por abrasão;
- Elaborar a metodologia a ser utilizada no desenvolvimento do trabalho;
- Calcular a vida útil de uma seção da tubulação do sistema de bombeamento de rejeitos da extração de minério de ferro utilizando-se conhecimentos de estudos teóricos;
- Avaliar os valores obtidos e comparar com os valores fornecidos por relatório técnico da prestadora de serviços.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias à respeito do transporte de rejeitos de mineração, e trata a morfologia das partículas rejeito e a sua abrasividade, assim como os tipos de desgaste que ocorrem nas tubulações.

Sendo assim, no terceiro capítulo é apresentada a metodologia utilizada para realizar as análises para que se contemple todo o escopo do objetivo do trabalho.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões das análises realizadas e discute possíveis falhas do projeto. Com isso, podem ser sugeridas propostas de melhoria do projeto para evitar tais falhas.

Por fim, o último capítulo apresenta as conclusões dos estudos e mostra os principais pontos analisados e as considerações feitas para evitar as falhas constatadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Operação de Beneficiamento

De acordo com o Centro de Tecnologia Mineral – CETEM (2010), uma substância mineral é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre. Conforme explicado pela mesma fonte, o minério é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais que contém um ou mais minerais com valor econômico que são utilizados pelos ser humano em uma ampla gama de aplicações na indústria e na sociedade como um todo, podendo ser citados finalidades como a produção de aço ou até mesmo a produção de joias. O mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério é denominado ganga, rejeito ou contaminante (CETEM, 2010).

Considera-se tratamento ou beneficiamento de minérios as operações que aplicadas aos bens minerais no intuito de modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, contudo, sem modificar a identidade química ou física dos minerais (CETEM, 2010).

O CETEM também aponta que as operações de concentração, consideradas como uma separação seletiva de minerais, baseiam-se nas diferenças de propriedades entre os minerais que constituem o minério (como densidade, propriedades químicas de superfície, cor, radioatividade, dureza, tenacidade à fratura, suscetibilidade magnética, estrutura cristalográfica, etc), onde tem-se o mineral de interesse e os minerais de ganga. Normalmente, o minério com teor e pureza desejada é obtido através de uma separação seletiva entre diversos tipos de minerais, tornando assim, na maioria das vezes, o processo de produção mais complexo e mais caro (CETEM, 2010).

Pode-se compreender que o termo concentração significa remover a maior parte da ganga, presente em grande proporção no minério, já a purificação consiste em remover do minério, pré-concentrado ou não, os minerais contaminantes que ocorrem em pequena proporção (CETEM, 2010).

As operações de concentração e purificação do minério, na maioria das vezes, são realizadas a úmido, ou seja, ocorrem através do manuseio de polpa, conforme informado pela mesma fonte citada anteriormente. Existem dois tipos de polpa quando falamos em beneficiamento mineral: a polpa de concentrado contendo o material com atributo econômico

e de interesse, e a polpa de rejeitos, material que não contém atributo econômico e é disposto na forma de barragens, preenchimento de galerias subterrâneas ou pilhas secas (CETEM, 2010).

Na Figura 4 tem-se um esquema típico de processamento e beneficiamento para minério de ferro.

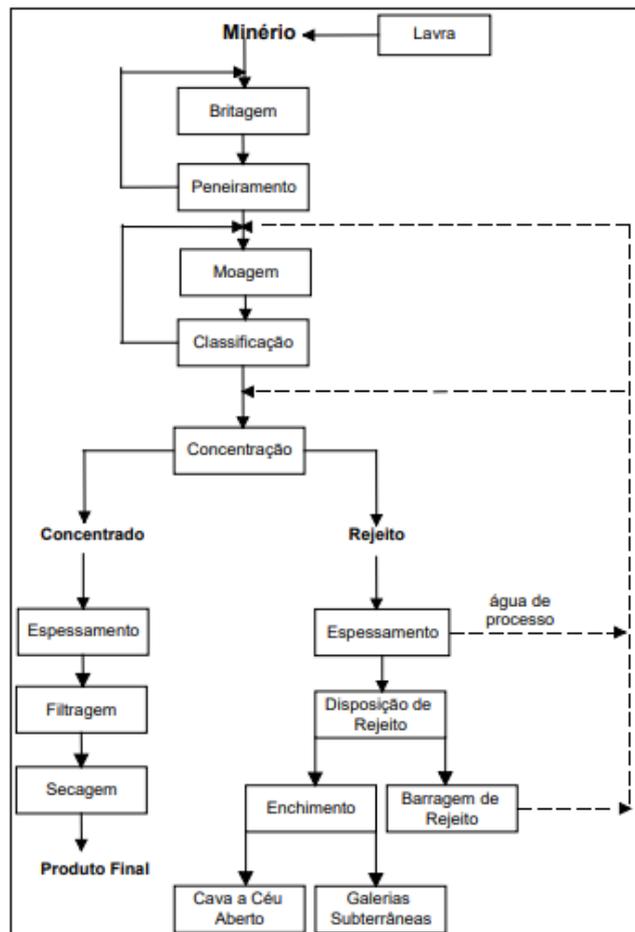


Figura 4: Esquema típico de processamento e beneficiamento de minério de ferro
Fonte: CETEM (2010).

2.2 Tubulações industriais

Os dutos e tubulações estão presentes na maioria das indústrias e processos de produção, como: petroquímicas, mineração, farmacêutica, alimentícia, entre outras. São empregadas em transportes desde fluidos simples e que não exigem requisitos específicos, até tubulações estruturais e usadas para trocas térmicas em elevadas temperaturas que exigem maior estudo para sua utilização (BENTES, 2007).

Os dutos industriais normalmente são fabricados a partir de materiais metálicos, principalmente de aço carbono. O seu processo de fabricação é feito por conformação mecânica e pode ser produzidos tubos com costura e sem costura.

O processo de fabricação de tubos sem costura, pode ser feito de três formas:

- Laminação: processo mostrado na Figura 6 e na Figura 5, no qual um lingote de aço maciço é aquecido em temperatura elevada, posteriormente é empurrado pois dois rolos oblíquos que rotacionam à mesma velocidade e transladam contra um mandril fixo (DORES, 2018).



Figura 5: Processo de laminação para fabricação de tubos de aço sem costura. Fonte: Navarro (2019).

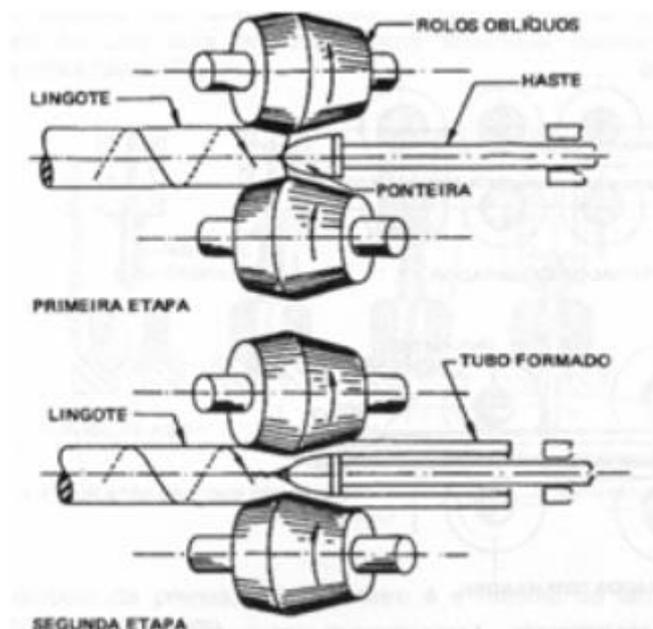


Figura 6: Processo de laminação para fabricação de tubos de aço sem costura. Fonte: Navarro (2019).

- Extrusão: processo de passagem de um tarugo que é “empurrado” contra a matriz conformadora de diâmetro menor do que o produto em questão. A parte não extrusada fica retida em um recipiente cilíndrico conforme mostrado na Figura 7 (CIMM, 2010).

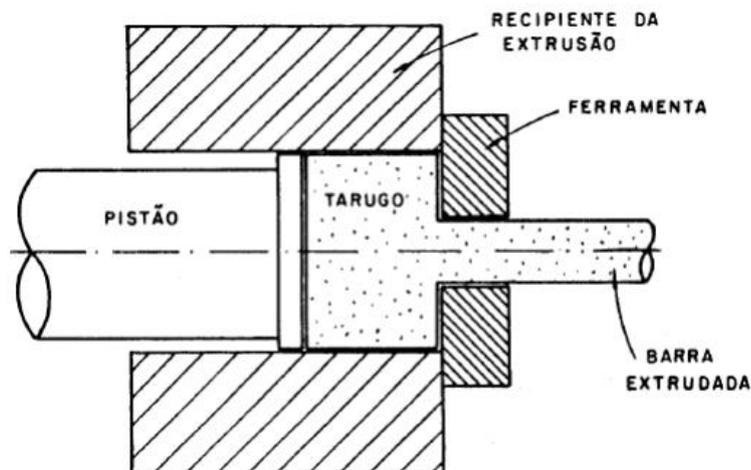


Figura 7: Processo de extrusão para fabricação de tubos de aço sem costura.
Fonte: Krelling ([s.d]).

- Fundição: para fabricação de tubos, comumente se usa a fundição centrífuga. Esse processo consiste em fazer o envase do metal fundido dentro de um molde rotativo, onde a força centrífuga posiciona o metal no molde, conforme mostrado na Figura 8 (MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS, 2018).

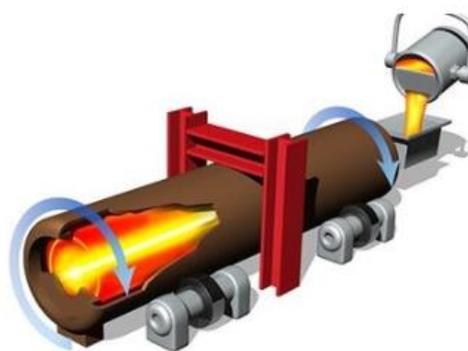


Figura 8: Processo de fabricação por fundição de tubos de aço sem costura.
Fonte: Tecinox ([s.d]).

De acordo com Alves (2017), os tubos com costura são produzidos através de chapas metálicas que são conformadas também por laminação e, posteriormente, as extremidades que passam a se encontrar da chapa, são soldadas. O processo é mostrado na Figura 9.

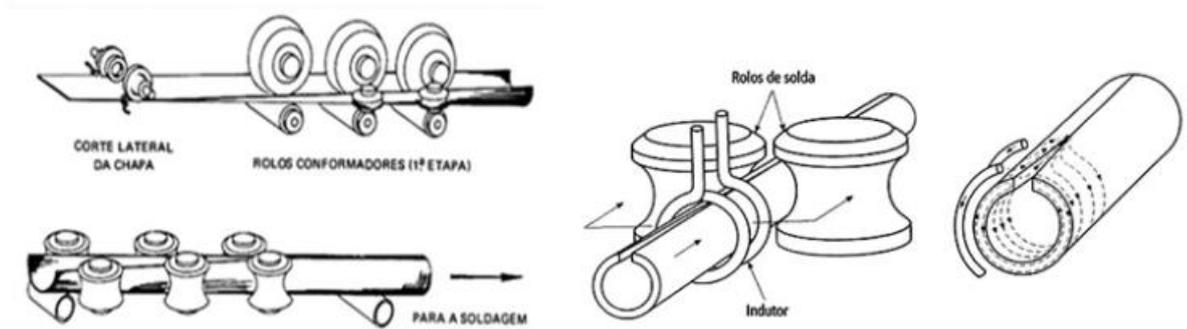


Figura 9: Processo de fabricação de tubos de aço sem costura.
Fonte: Alves (2017).

Há também um crescente uso de tubos de Polietileno de Alta Densidade – PEAD. Esse material vem sendo muito usado na mineração, e alguns dos motivos é devido ao fato de ele ser mais flexível, e por isso, se adaptar em terrenos com grandes irregularidades rochosas, permitem um raio de curvatura de até 30 vezes o seu diâmetro externo, e com isso, economiza-se com conexões e emendas. (AFLON, 2018)

A Figura 10 exhibe um exemplo de tubo PEAD e evidencia a sua flexibilidade:



Figura 10: Tubo PEAD.
Fonte: Armco Staco (2013).

Os tubos PEAD são excelentes para serem usados em transportes de sólidos, pois sua resistência à abrasão é muito elevada e, assim, sua vida útil pode chegar à até dez vezes a vida útil do aço. (MINERIOS E MINERAIS, 2020)

Em temperaturas de 20°C e em pressão de até 25 bar, a vida útil de tubulações em PEAD pode chegar a 50 anos, fazendo com que tenha bastante economia com manutenções.

A malha de dutos vem crescendo consideravelmente por se tratar de um meio de transporte rápido, eficiente e seguro de acordo com Bentes. Esse crescimento associado à uma maior preocupação com o meio ambiente, fez com que as empresas passassem a investir mais em segurança operacional para esse tipo de transporte, dessa forma, a tecnologia é uma importante aliada nesse quesito, pois permite que se utilizem sistemas para detecção de vazamentos de forma ágil e precisa, e também proporciona maior rapidez de reparo pelas equipes de manutenção (BENTES, 2007).

2.2.1 Revestimentos

Um dos maiores problemas para tubulações metálicas é a corrosão e desgaste. Para mitigar esses problemas são aplicados revestimentos internos nas tubulações.

Segundo Silva Telles (2003), os revestimentos internos em tubulações podem ter as seguintes finalidades:

- Revestimento anticorrosivo ou para evitar a contaminação do fluido;
- Revestimento antiabrasivo ou antierosivo;
- Revestimento antiincrustante: podem ser empregados quando se é exigido uma superfície de escoamento do fluido perfeitamente lisa;
- Revestimento refratário: usado em equipamentos submetidos à elevadas temperaturas, promovendo um isolamento térmico e permitindo que a parede do tubo fique dentro dos limites admissíveis para o aço carbono, e assim, evitando o uso de materiais especiais para a fabricação da tubulação.

O mesmo autor explica que devido ao elevado custo, é preferível aplicar um revestimento robusto em tubulações de aço carbono com material anticorrosivo à fabricá-las com o material. Quando o revestimento é usado para essa finalidade, é fundamental que ele seja aplicado perfeitamente e de forma contínua, abrangendo todas as partes da tubulação pois qualquer defeito pode gerar pontos de corrosão e, conseqüentemente, acarretará em vazamentos (SILVA TELLES, 2003).

Os revestimentos contra abrasão, erosão e refratários geralmente são aplicados de forma pontual, isto é, não há necessidade de aplicar em todas as partes da tubulação. Quanto à

qualidade da sua aplicação, pequenos defeitos não afetam a tubulação e, conseqüentemente, não desencadeiam vazamentos (SILVA TELLES, 2003).

Há diversos tipos de revestimentos para diversos fluidos de trabalho e diversas finalidades. Eles são escolhidos de acordo com o fluido, sua granulometria e a sua velocidade de transporte. Para o transporte de polpa e rejeitos de mineração, podemos destacar de forma sucinta:

i. Revestimento em Poliuretano:

Possui excelente resistência mecânica, resistência à corrosão, flexibilidade, rigidez, dureza e resistência a produtos químicos, solventes e durabilidade (GONÇALVES *apud* VIEIRA, 2013).

Proporciona boa resiliência e alta resistência à abrasão, tração, compressão. É aplicado em tubulações de aço que são usadas na alimentação e transporte em hidrociclones, bombas de polpa e fluidos abrasivos e é utilizado para fluidos com velocidade de escoamento de 5m/s e granulometria inferior a 6mm (REVEST-BOR, [s.d]).

ii. Revestimento em Polietileno de alta densidade - PEAD:

É feito um encamisamento interno do tubo de aço com um revestimento de PEAD que protege as paredes da tubulação contra a corrosão e abrasão. Podem ser usados em tubos de pressão de diâmetro de 2” a 48” (ARAUJO *et al*, 2019).

O revestimento em PEAD, comparado à materiais convencionais, possui resistência à abrasão muito mais elevada, segundo testes desenvolvidos por pesquisadores. Também possui baixo coeficiente de atrito (COMPLASTEC, [s.d]).

Os tubos PEAD são classificados de duas formas:

- De acordo com a resistência mínima requerida - MRS (*Minimum Required Strength*). Os dois tipos usados, são mostrados na Tabela 2:

Tabela 2: Classificação MRS de revestimento PEAD.

| Tensão circunferencial (MRS) MPa | |
|----------------------------------|-----------------|
| PE80 | 8,0 a 9,9 |
| PE100 | Superior a 10,0 |

Fonte: FGS Brasil ([s.d]).

- De acordo com a pressão máxima que o tubo pode suportar a 20 °C, considerando uma vida útil de 50 anos transportando água:

Tabela 2: Tubos de PEAD, pressão nominal -PN

| Classe de Pressão (PN) | Pressão Nominal dos Tubos de Polietileno | | | | | | | |
|----------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | PN 8 | PN 10 | PN 20 | PN 30 | PN 50 | PN 63 | PN 80 | PN 100 |
| Bar ou Kgf/cm ² | 8 | 10 | 20 | 30 | 50 | 63 | 80 | 100 |
| Megapascal (Mpa) | 0,8 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 5,0 | 6,3 | 8,0 | 10,0 |

Fonte: Araujo *et al* (2019)

2.3 Tipos de Regimes de Transporte de Fluidos

2.3.1 Permanente

Regime permanente é aquele em que o fluido pode estar em movimento, porém as configurações de suas propriedades (como velocidade, massa específica e pressão) não se alteram em qualquer instante de tempo analisado, conforme afirmado por legni (2008). As propriedades podem variar de ponto a ponto, porém não pode haver variação com o tempo (BRUNETTI, 2008).

É o caso de um reservatório que está recebendo água de uma tubulação, e ao mesmo tempo, descartando água para outro ponto, conforme mostrado na Figura 11. A vazão de fluido na entrada e saída são idênticas.

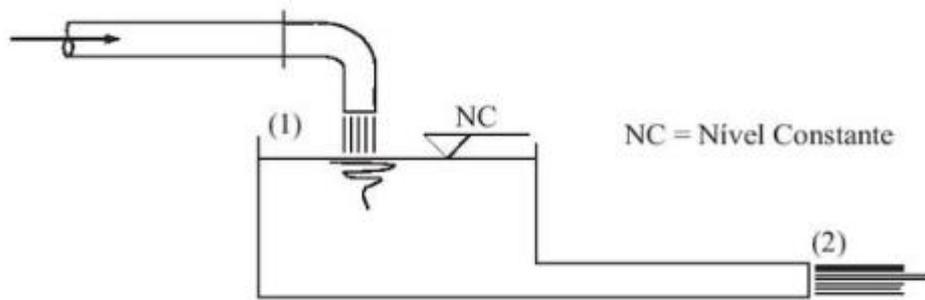


Figura 11: Regime permanente.
Fonte: Brunetti (2008).

Em grandes reservatórios em que apesar do escoamento de fluido não ocorre variação considerável de seu nível com o passar do tempo, considera-se que o regime é permanente.

2.3.2 Transiente

Regime transiente, ou variado, é aquele aonde há variação das configurações do fluido em alguns pontos analisados, com o passar do tempo (BRUNETTI, 2008).

Na Figura 12, mostra um reservatório de pequena dimensão aonde o descarte de fluido é maior do que sua seção transversal, fazendo com que a variação de nível do reservatório seja percebida, ou seja, o fluido possui comportamento dinâmico (BRUNETTI, 2008).

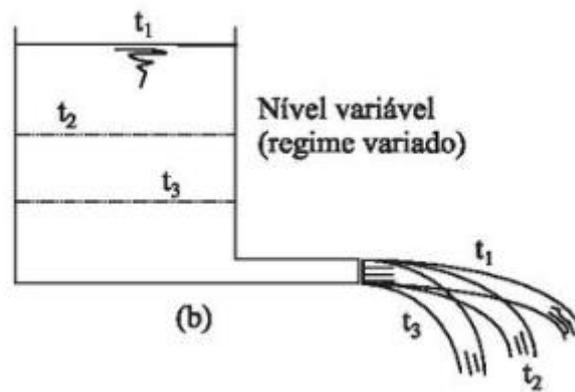


Figura 12: Regime transiente.
Fonte: Brunetti (2008).

2.3.2.1 Transientes hidráulicos

Legner explica que em sistemas hidráulicos reais, podem haver variação de escoamento dos fluidos devido à alguns fatores, como partida e desligamento de bombas de recalque ou

manobras de válvulas. Sendo assim, ocorre um estado transitório até que o fluido retorne novamente para o estado permanente, que causam ondas de pressões. Dependendo da magnitude das ondas, pode romper as tubulações em casos extremos de altas pressões (sobrepessão), ou achatamento das tubulações em casos de subpressões, em que a pressão interna da tubulação fica menor que a atmosférica (LEGNER, 2017).

Assim, percebe-se que a análise de transientes hidráulicos é de extrema importância quando se trata de cálculos e dimensionamento de tubulações.

2.4 Rejeitoduto

Os resíduos da mineração podem ser classificados como estéreis (sólidos de extração), e rejeitos (tratamento/beneficiamento) (LUZ *et al*, 2010).

Os estéreis são resíduos sem valor econômico proveniente do processo que é realizado para expor o corpo mineralizado a fim de se tornar possível a etapa de lavra. Já os rejeitos, são resíduos provenientes do processo de beneficiamento, pois no minério extraído da lavra podem haver minerais que não são aproveitados no produto final (LUZ *et al*, 2010).

Os estéreis são dispostos em pilhas, já os rejeitos são armazenados em barragens de rejeitos (SANTOS, 2018). Os rejeitos são bombeados e o seu transporte, desde a etapa de beneficiamento até o destino final, é feito por tubulações conforme mostrado na Figura 13 que nos mostra o rejeito sendo despejado na barragem. Esse sistema é chamado de Rejeitoduto.



Figura 13: Saida do Rejeitoduto.
Fonte: Minérios e Minerais (2021).

As tubulações do rejeitoduto passam por vários pontos da planta de beneficiamento até chegar à barragem. Dessa forma, para que seja possível esse transporte dos rejeitos, muitas

vezes a tubulação deve ter travessia aérea, sobre rios, vias férreas e etc, como exemplificado na Figura 14:



Figura 14: Travessias aéreas de um rejeitoduto.
Fonte: Minérios e Minerais (2021).

2.5 Rejeito proveniente do processamento do minério de ferro

Tem-se que os minérios de ferro produzidos pelas diversas mineradoras no Brasil, são principalmente obtidos a partir da hematita (Fe_2O_3), que é um dos principais minerais para obtenção do minério de ferro mundialmente, e também o itabirito, que são formações ferríferas compostas de hematita e quartzo (SiO_2) (IBRAM, 2012).

No Brasil a hematita é extraída principalmente no estado do Pará, e apresenta teor médio de ferro em torno de 60%. Já o itabirito é extraído principalmente na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, com teor de ferro em torno de 50%. Apesar deste valor médio, já estão sendo extraídos itabiritos com teores mais baixos de ferro chegando a estar entre 25 e 30% (ANDRADE *apud* ALLORE MINERAÇÃO, 2014).

Na Figura 15 tem-se a imagem do material considerado como concentrado do processo de flotação do minério de ferro, procedimento amplamente empregado para o aumento do teor

final do produto comercializado e retirada de impurezas (rejeito). É possível sua diferenciação do rejeito da flotação principalmente pela sua coloração cinzenta escura característica.



Figura 15: Concentrado da Flotação
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Contudo, conforme explicado por Wolff, vale ressaltar que o minério de ferro é o produto enriquecido da exploração mineral ferrífera, ou seja, a hematita ou qualquer outro tipo de mineral que contenha ferro, contém também outros minerais contaminantes em sua jazida. Neste sentido, quando processado o material retirado da lavra do minério de ferro com objetivo de aumentar o teor de ferro contido no produto final, podem gerar diferentes quantidades de rejeitos que contêm diferentes minerais em sua composição. Normalmente, os principais minerais associados aos rejeitos da mineração de ferro são caulinita, gibbsita, goethita, hematita, magnetita e quartzo (WOLFF, 2009).

Na Figura 16 tem-se a imagem do material considerado como rejeito do processo de flotação do minério de ferro. É possível sua diferenciação para o concentrado da flotação principalmente pela sua coloração e formação arenosa/silicosa característica.



Figura 16: Rejeito da Flotação
Fonte: Pesquisa direta (2021).

2.5.1 Morfologia do Quartzo (SiO_2)

Os rejeitos de minério de ferro são principalmente constituídos por hematita (de 10 a 15% dos sólidos), sendo o restante formado por quartzo (ESPÓSITO *apud* PORTES, 2013). Ao realizar uma caracterização mineralógica dos rejeitos de uma exploração mineral de minério de ferro em Minas Gerais, verificou que praticamente todo o ferro presente era proveniente da hematita e o quartzo era responsável por praticamente toda sílica existente nas amostras estudadas, sendo os demais minerais presentes em baixos teores (GOMES *apud* PORTES, 2013).

A fase estável da sílica (SiO_2) à temperatura ambiente, conhecida como quartzo- α , é um dos minerais mais abundantes da crosta terrestre, cerca de 12%. e ocorre na composição de rochas magmáticas, sedimentares e metamórficas, na forma monocristalina (quartzo hialino, ametista, citrino, etc.), na forma policristalina (quartzito, calcedônia e ágata) e amorfa (opala). O quartzo- α ocupa posição de destaque na geologia estrutural e na mineralogia (FRONDEL *apud* GUZZO, 2008).

É dito por Guzzo (2008) que o quartzo é um mineral duro cuja dureza na escala Mohs é 7,0, além de ser um mineral de fratura frágil, justificada principalmente pela sua elevada dureza, e não tem plano de clivagem. Sendo assim, é possível presumir que o material granulado de

quartzo que se compreende no rejeito da exploração de minério de ferro seja um material extremamente abrasivo em tubulações, revestimentos, bombas e demais equipamentos envolvidos no transporte do rejeito até a sua disposição física em barragens ou em pilhas, que ainda são os destinos mais comuns utilizados no setor mineral.

Pode-se observar na Figura 17 que mostra o que três exemplos do que é o granulado de quartzo, um dos principais constituintes do rejeito de minério de ferro.

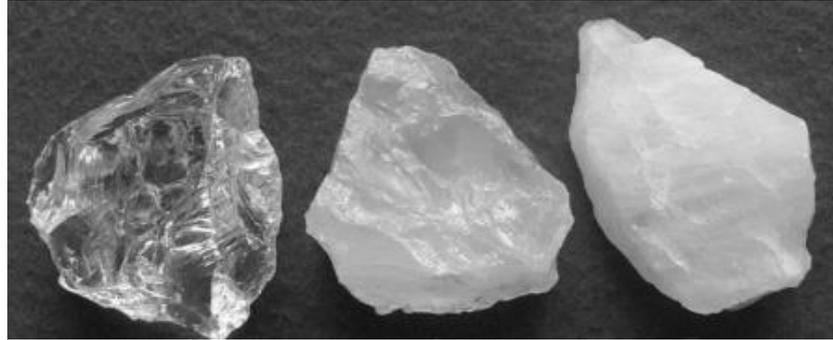


Figura 17: Lascas de quartzo natural
Fonte: Adaptado de Guzzo (2006).

Na Figura 18 temos imagem adaptada do trabalho desenvolvido por Andrade (2014), onde, através do uso de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) fez-se uma análise dos rejeitos de um processamento de minério de ferro dispostos em barragem. Pode-se observar na imagem a geometria do rejeito, com ângulos obtusos conforme explicado anteriormente:

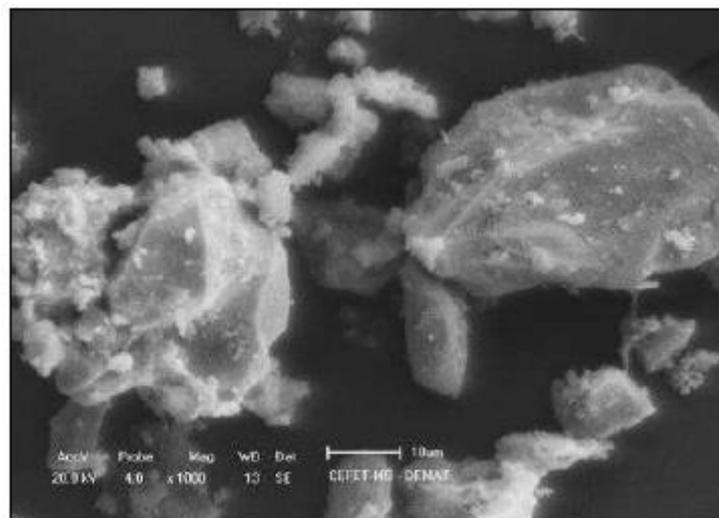


Figura 18: Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos da barragem
Fonte: Adaptado de (ANDRADE, 2014).

Tem-se que anterior ao trabalho demonstrado por Andrade (2014), D'Agostino (2008) com o uso também do MEV, fez diversas análises dos rejeitos provenientes do processamento do minério de ferro e também dispostos em barragem de rejeitos. Na Figura 19 e na Figura 20, encontra-se algumas imagens adaptadas do trabalho apresentado por D'Agostino aonde pode-se observar com nitidez a geometria das partículas de rejeito:

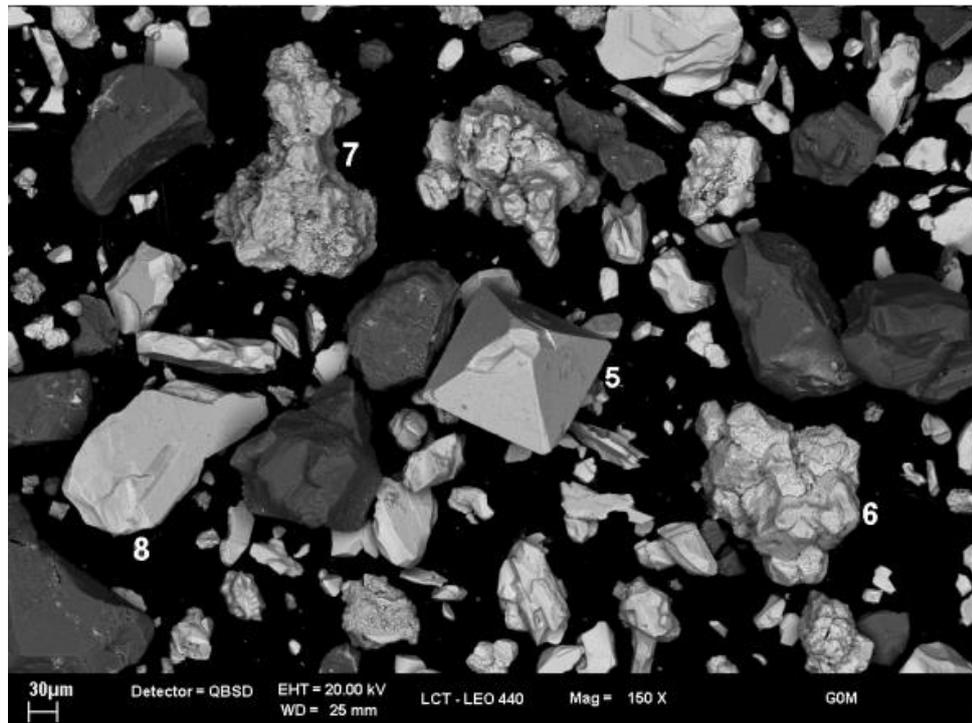


Figura 19: Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos da barragem
Fonte: Adaptado de D'AGOSTINO (2008).

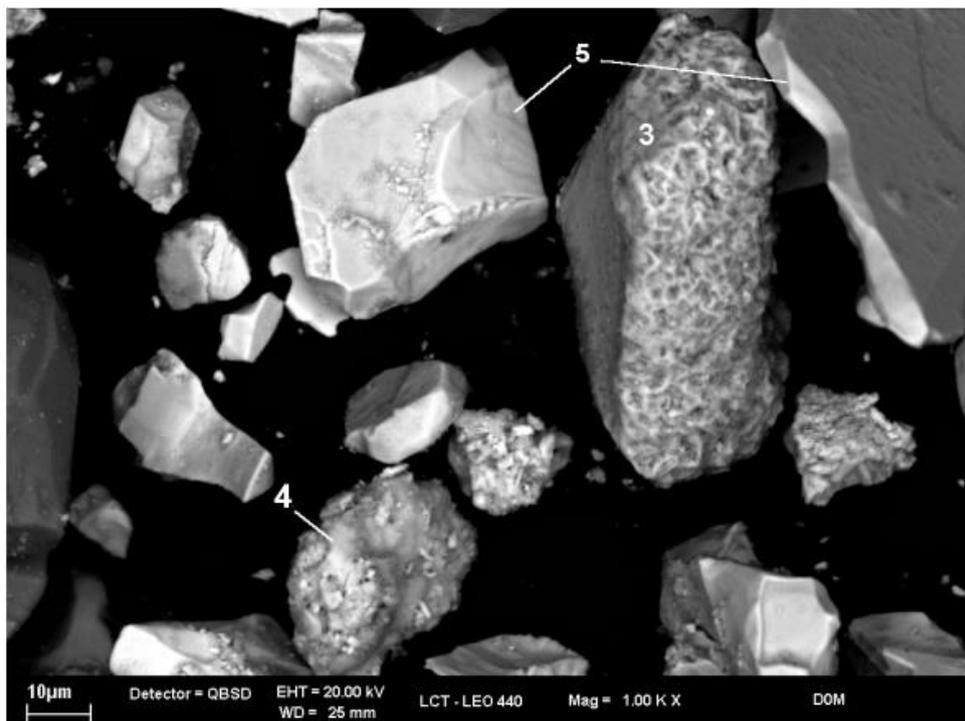


Figura 20: Microscopia eletrônica de varredura dos rejeitos da barragem
 Fonte: Adaptado de D'AGOSTINO (2008).

Nas imagens mostradas por Andrade (2014) e D'Agostino (2008) é possível perceber que a maioria das partículas do rejeito não tem forma esferoidal, reforçando a ideia de que, provavelmente, o material ao ser bombeado ou impulsionado por pressão manométrica terá um alto índice de abrasividade, ocasionando um provável desgaste abrasivo por riscamento ou o desgaste abrasivo por rolamento que serão melhores explicados no capítulo 2.5 desse trabalho.

2.6 Abrasão

A abrasão é o dano ocasionado em uma superfície sólida, envolvendo perda progressiva de massa, devido ao movimento relativo entre a superfície e o contato com outro material de partículas duras e/ou protuberâncias duras. Ou seja, a abrasividade pode ser compreendida como a capacidade de um determinado tipo de material desgastar e/ou polir a superfície de outros materiais (ASTM G77 – 96 *apud* COZZA, 2006).

Podemos citar dois tipos de desgastes abrasivos: O “*grooving abrasion*” e o “*rolling abrasion*” onde podemos compreender na língua portuguesa como sendo desgaste abrasivo por riscamento e desgaste abrasivo por rolamento respectivamente (HUTCHINGS *apud* COZZA, 2006).

Considerando o movimento relativo entre duas superfícies no desgaste abrasivo por riscamento, as partículas abrasivas estarão incrustadas em uma das superfícies, logo elas só podem deslizar sobre o contra-corpo, riscando-o, conforme explicação de Cozza (2006). Na Figura 21, é possível observar as ranhuras formadas de forma paralela durante o processo de desgaste abrasivo por riscamento, indicando, neste caso, um provável sentido único de fluxo de abrasão.

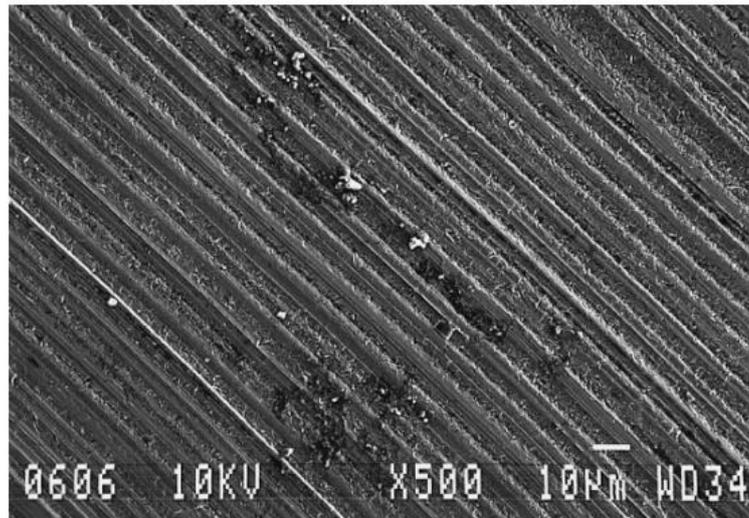


Figura 21: Microscopia de uma superfície que sofreu desgaste abrasivo por riscamento.
Fonte: COZZA (2006).

Ainda citando o mesmo autor, no desgaste abrasivo por rolamento, as partículas abrasivas estarão livres pois não há o aprisionamento entre duas superfícies, logo, elas só podem rolar sobre a superfície, e com isso desgastando-a pela sua movimentação. Na Figura 22, é possível observar que não há um padrão para as marcas do desgaste, indicando, neste caso, que houve o desgaste abrasivo por rolamento em que as partículas permaneceram livres durante a abrasão.

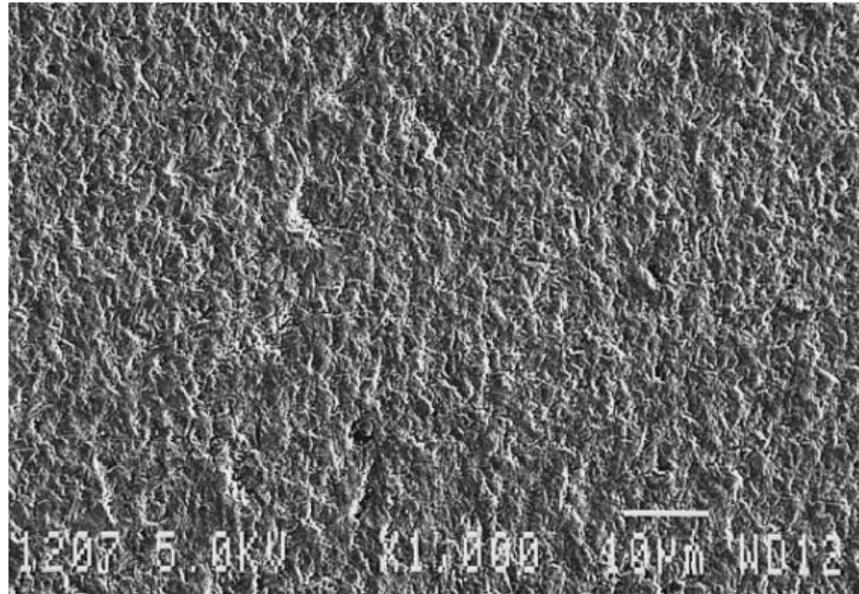


Figura 22: Microscopia de uma superfície que sofreu desgaste abrasivo por rolamento
Fonte: COZZA (2006).

2.6.1 Teste de abrasividade

Para quantificar a abrasividade da polpa, pode ser feito o teste de abrasividade. De acordo com Siqueira (2018), o método de Miller se destaca devido à sua produtividade e praticidade.

Segundo Uggioni (2017), o teste consiste em movimentar continuamente um corpo de prova em uma solução abrasiva por um determinado período de tempo. O equipamento utilizado para realizar o experimento é denominado máquina de Miller, e está representado na Figura 23:

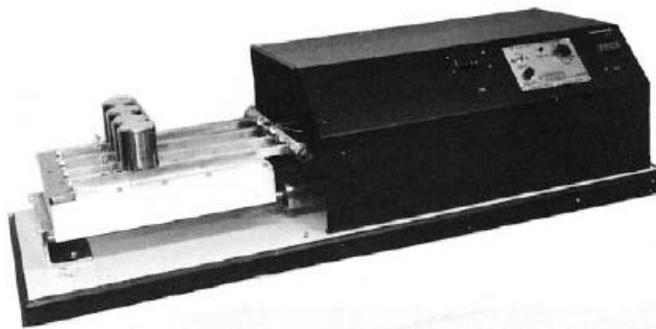


Figura 23: Máquina de Miller
Fonte: ASTM G75 (2013).

O procedimento para realização do teste de abrasividade de Miller é definido pela norma ASTM G75 – 2013. A máquina de Miller e seus componentes são mostrados com mais detalhes na Figura 24 e o procedimento pode ser resumido da seguinte forma: o corpo de prova (6) é fixado no suporte ajustável (8) e dentro de uma região aonde é colocado o meio abrasivo (10), ele desliza horizontalmente sobre um tapete plástico (1) que fica acima do tapete de Neopreno (2) (SIQUEIRA, 2018).

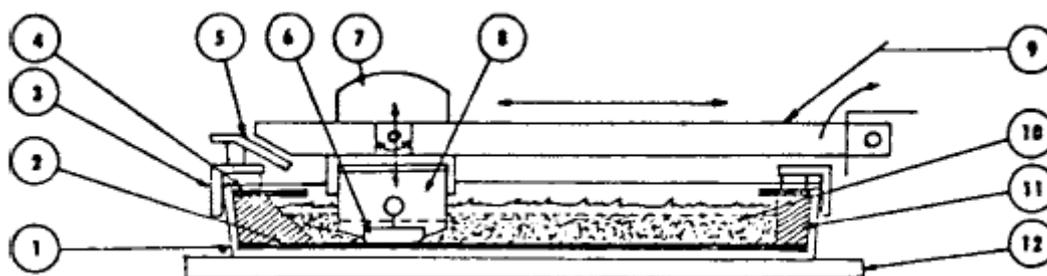


Figura 24: Vista em corte da máquina de Miller
Fonte: ASTM G75 (2013).

Legenda:

- (1) Suporte plástico
- (2) Tapete de Neopreno
- (3) Dispositivo amortecimento de impacto
- (4) Reservatório de espuma
- (5) Guia do movimento
- (6) Bloco padrão de desgaste
- (7) Peso morto
- (8) Suporte ajustável de corpo de prova
- (9) Braço pivô recíproco
- (10) Lama mineral
- (11) Filamento plástico em “V”
- (12) Placa suporte da máquina

A máquina possui um mecanismo que garante um movimento horizontal harmônico do corpo de provas no meio abrasivo, em deve possuir um curso de 203,2 mm. Esse movimento é

feito através de uma manivela que gira em uma velocidade de 48 rotações por minuto (ASTM G75 – 2013).

O tapete de Neopreno possui grande importância no teste, pois é utilizado para absorver impacto, e assim, evitar a fragmentação das partículas abrasivas, além do fato de garantir maior superfície de contato entre as partículas e o corpo de provas o que proporciona maior desgaste abrasivo nestes conforme exemplificado na Figura 25 (BAYER et al.; SASADA et al.; TORRANCE; STACHOWIAK *apud* SIQUEIRA, 2018).

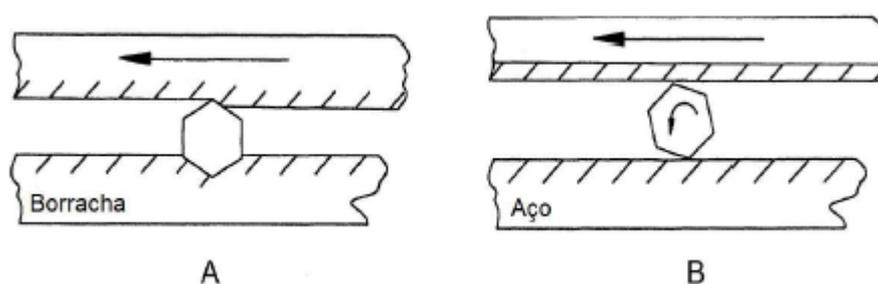


Figura 25: Comparação dos movimentos da partícula abrasiva.
Fonte: Siqueira (2018).

Para se extrair o resultado do teste, é feita a medição da perda de massa do corpo de prova de 2 em 2 horas, durante um período de 6 horas (ASTM G75 – 2013).

2.6.2 Indicadores

O número de Miller e o índice de SAR são importantes indicadores para a indústria mineral e são obtidos através do resultado do teste de abrasividade de Miller (SIQUEIRA, 2018).

O número de Miller indica a abrasividade relativa de uma lama mineral qualquer, classificando em termos do desgaste e perda de massa de um corpo de prova padrão. Quanto maior o número de Miller, maior a perda de massa e, assim, maior a abrasividade da lama. (ASTM G75 - 2013). Ele é calculado conforme equação (1):

$$MN = C \cdot M' \quad (1)$$

Aonde:

MN = Número de Miller;

C = fator de escala (18,18 mg/h);

M' = taxa de perda de massa em mg/h.

Sendo que o M' é calculado por uma função exponencial a cada intervalo do teste abrasivo, e gera a curva do teste de Miller, conforme equação (2):

$$M'(t) = A \cdot B \cdot t^{(B-1)} \quad (2)$$

Aonde:

M'(t) = taxa perda de massa (mg / h);

A = primeiro coeficiente de ajuste;

B = segundo coeficiente de ajuste;

t = tempo em horas (t = 2h).

Já o número de SAR é uma generalização do número de Miller, porém pode ser aplicado à qualquer tipo de material (ASTM G75 - 2013). Ele é calculado conforme equação (3):

$$SAR = MN \cdot \frac{SG_{S,S}}{SG_{T,S}} \quad (3)$$

Aonde:

SAR = Resposta abrasiva da lama mineral;

MN = Número de Miller;

SG_{S,S} = Densidade específica do corpo de prova padrão (7,58);

SG_{T,S} = Densidade específica do corpo de prova utilizado.

Finalmente, fica evidente a importância de se ter conhecimento da abrasividade do fluido que escoar na tubulação para se ter controle do desgaste abrasivo sofrido, e com isso, tomar medidas preventivas e, assim, minimizar as chances de possíveis falhas ou danos que podem comprometer tanto a lucratividade da empresa quanto a segurança dos colaboradores e do meio ambiente.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipos de pesquisa

Pesquisa é um procedimento que usa base científica para investigar fatos e problemas teóricos ou práticos (LAKATUS *apud* ANDER-EGG, 2021).

Os tipos de pesquisas são classificados de três formas: quanto a abordagem, quanto ao objetivo e quanto aos procedimentos técnicos.

Quanto aos objetivos, enquadra-se em uma pesquisa exploratória, pois segundo Gil (2007) é um tipo que visa construir hipóteses realizando levantamento bibliográfico, com um planejamento flexível.

Quanto à abordagem utilizada nesse trabalho, define-se a pesquisa como:

- Qualitativa: baseada em investigar o porquê das coisas, não se preocupa com a representatividade numérica. Os dados analisados não possuem relação com equações matemáticas, e possuem diferentes abordagens (GERHARDT & SILVEIRA, 2008).
- Quantitativa: procura utilizar regras lógicas e faz análises com dados matemáticos, centrando na objetividade e de forma neutra. (GERHARDT & SILVEIRA, 2008).

Quanto aos procedimentos técnicos, são apresentadas pesquisas:

- Experimental: consiste essencialmente em definir o objeto de estudo, determinar variáveis que influenciam no caso a ser estudado e observar os efeitos das variações, definir formas de controle (GIL, 2002).
- Documental: utiliza de diversos tipos de fontes como relatórios, gráficos, tabelas, estatísticas, fotografias, cartas, e etc. (GERHARDT *apud* FONSECA, 2008)
- Bibliográfica: utiliza materiais livros, artigos científicos e páginas de web sites, assim como o estudo de caso, pois segundo Gerhardt *apud* Fonseca (2008, p37), “visa conhecer em profundidade o como e o porquê de uma determinada situação que se supõe ser única em muitos aspectos, procurando descobrir o que há nela de mais essencial e característico”.

Por fim, de acordo com o explicado, a presente pesquisa se enquadra nas seguintes definições referentes às classificações mencionadas: exploratória pois realiza levantamento bibliográfico e análise de exemplos para compreensão; qualitativa pois investiga o porquê das coisas; quantitativa pois se baseia em cálculos; documental pois utiliza documentos como base de dados; experimental pois utiliza um experimento como coleta de dados; e bibliográfica pois utiliza de pesquisas bibliográficas.

3.2 Materiais e métodos

A metodologia do trabalho é apresentada na Figura 26:

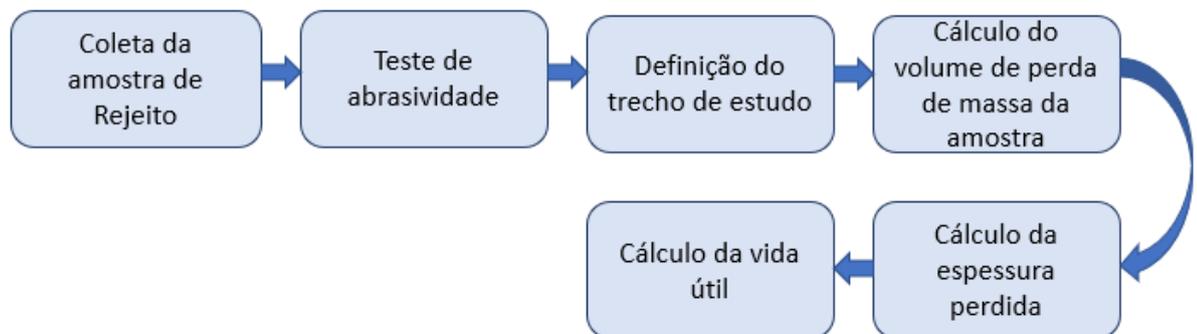


Figura 26: Fluxograma da metodologia adotada
Fonte: Pesquisa direta (2022)

Os materiais utilizados na presente pesquisa são amostras de rejeitos provenientes da flotação e do espessador de rejeito do processo de beneficiamento de *pellet feed* fornecidos por uma empresa de mineração.

A seção de tubulação analisada, também se trata de um duto de um rejeitoduto existente de uma empresa de mineração. Os dados da seção são obtidos através de um relatório técnico fornecido por uma empresa terceirizada contratada para fazer uma análise de todo o sistema de bombeamento de rejeito da mineradora.

Para a análise da amostra de rejeito, é feito o peneiramento do rejeito analisado, para que se possa determinar a sua granulometria, assim como é feito um ensaio de raio-x para se definir a sua composição química.

Os cálculos realizados para a definição de vida útil foram extraídos de artigos e experimentos realizados por outros autores, com os quais será possível fazer uma análise comparativa com os valores obtidos no relatório fornecido pela empresa terceirizada à mineradora.

3.3 Variáveis e Indicadores

Uma variável pode ser considerada uma medida ou um conceito operacional que podem ser mensurados e identificados em um objeto de estudo (MARCONI e LAKATUS, 2003).

Os indicadores são usados para mensurar as variáveis, dessa forma é importante definir ambos para a pesquisa abordada conforme mostrado na

Tabela 3:

Tabela 3: Variáveis e Indicadores

| Variáveis | Indicadores |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Teste de abrasividade | <ul style="list-style-type: none"> • Abrasividade da amostra • Taxa de desgaste da tubulação |
| <ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros de processo | <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de escoamento da polpa • Percentual de sólidos em massa na polpa de rejeitos |

Fonte: Pesquisa direta (2022)

3.4 Instrumento de coleta de dados

Os dados coletados para a pesquisa são provenientes de:

- Artigos publicados;
- Relatório técnico disponibilizado pela empresa;
- Dados de experimentos de processo disponibilizados pela mineradora

3.5 Tabulação dos dados

Os dados apresentados foram organizados através do Microsoft Word e em planilhas e gráficos elaborados no Microsoft Excel.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as ferramentas utilizadas para a concretização desta pesquisa, cujos instrumentos escolhidos, estão de acordo com o objeto proposto na mesma.

No capítulo seguinte, serão apresentadas as análises dos resultados de acordo com o método utilizado para a pesquisa.

4 RESULTADOS

4.1 A empresa

O presente trabalho é baseado em dados de uma empresa do ramo de mineração, do estado de Minas Gerais. São utilizados dados do rejeito gerado pelo processo de extração mineral, e que são transportados pelo sistema de dutos, denominado rejeitoduto, até a barragem de rejeitos.

A mineradora contratou uma empresa de projetos de engenharia para avaliar a tubulação do rejeitoduto, e emitir um relatório concretizando suas análises. O resultado das análises de desgaste será comparado ao resultado encontrado posteriormente.

4.2 Amostra de rejeito

Para fazer o cálculo de abrasividade do rejeito, a empresa de projetos contratou uma empresa de engenharia pra realizar o teste abrasivo, e a amostra da polpa de rejeito utilizada foi disponibilizada pela mineradora.

A polpa de rejeito utilizada no teste foi extraída do *underflow* do espessador de rejeito e da caixa de transferência de rejeito do processo de flotação mecânica na planta de beneficiamento da mineradora. Trata-se de uma mistura que representa o rejeito total que é transportado pelo rejeitoduto até a barragem de rejeitos, e seguiu as seguintes proporções, exibidas na Tabela 4, para ser utilizada no experimento:

Tabela 4: Proporção da mistura de rejeitos

| Cenário de Operação (mistura de rejeitos) | |
|--|--------------------|
| Rejeito | Porcentagem |
| <i>Underflow</i> do espessador | 65,7% |
| Flotação mecânica | 34,3% |

Fonte: Pesquisa direta (2022)

4.3 Teste de abrasividade

A empresa terceirizada contratada para realizar o teste, usou uma máquina de Miller calibrada. O relatório disponibilizado se encontra nos anexos do presente trabalho.

A amostra de desgaste utilizada foi de aço API X70. Esse tipo de aço, é comumente utilizado em dutos de óleo e gás nas indústrias petrolíferas e em mineroduto devido às suas boas propriedades mecânicas.

A polpa foi fornecida pela mineradora, possuía as seguintes propriedades:

- Concentração aproximada de sólidos por volume: 40%
- pH da polpa: 6,78
- Condutividade da Polpa: 964 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) da Polpa: 482 ppm
- Densidade dos sólidos (picnômetro): 3,02 g/cm^3

Foram utilizadas três amostras metálicas para o teste, e conforme norma ASTM G75, foram feitas 3 medições de cada amostra em intervalos de 2 horas. A média da perda de massa acumulada nas três amostras foi a mostrada na Tabela 5:

Tabela 5: Média da perda de massa acumulada

| Média Da Perda de Massa Acumulada | |
|-----------------------------------|---------|
| (g) | (mg) |
| 0,0000 | 0,0000 |
| 0,0249 | 24,9333 |
| 0,0509 | 50,8667 |
| 0,0728 | 72,8333 |

Fonte: Relatório anexo - Spectrum Engenharia (2021)

Com os resultados obtidos em cada medição, foi gerada a função exponencial mostrada na Figura 27 de onde se extrai a perda de massa acumulada e, assim, calcula-se a taxa de perda de massa em mg/h (M') para que seja possível calcular o número e Miller:

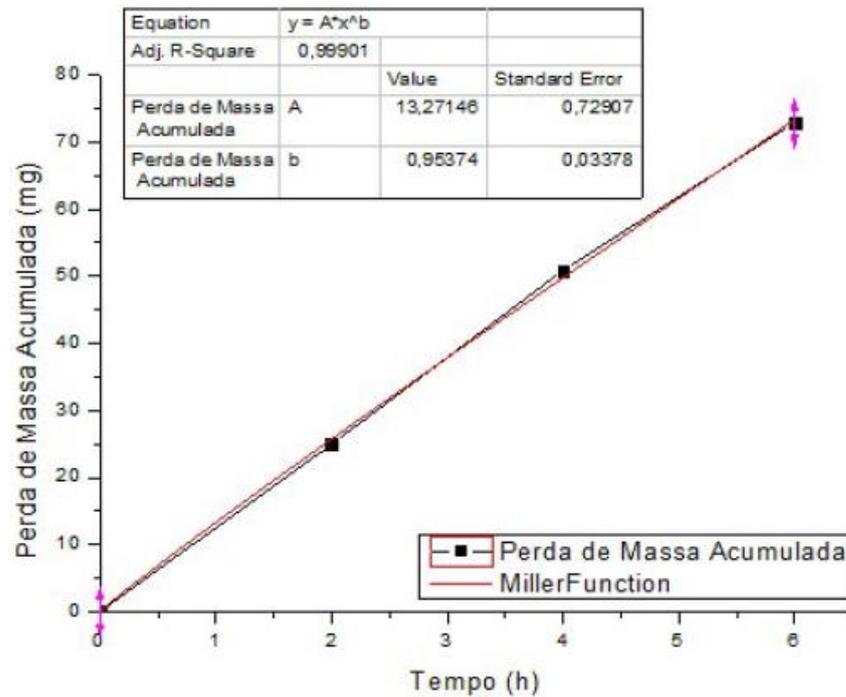


Figura 27: Curva da perda de massa em função do tempo.
 Fonte: Relatório anexo - Spectrum Engenharia (2021)

A taxa é calculada com equação (4):

$$M' = 13,27146 \cdot 0,95374 \cdot 2^{(0,95374-1)} \quad (4)$$

$$M' = 12,25810 \frac{mg}{h}$$

Calculando o número de Miller com equação (5):

$$MN = 18,18 \cdot 12,25810 \quad (5)$$

$$MN = 222,85220$$

Posteriormente, calcula-se o número de SAR com a equação (6):

$$SAR = 222,85220 \cdot \frac{7,58}{7,8} \quad (6)$$

$$SAR = 216,57$$

A desgaste do suporte foi moderado, com perda de massa relativa de 0,04%.

4.4 Trecho de estudo

No trecho de estudo o escoamento ocorre por gravidade, e portanto, não sofre com interferências de transientes hidráulicos, e dessa forma, a pressão de escoamento das partículas de rejeito não sofre alterações. Ele está sujeito a velocidades superiores, visto que o escoamento ocorre por seção parcial. Segundo os dados de processo fornecidos pela mineradora, a velocidade de escoamento do fluido pode chegar à 11,4 m/s.

Desse modo, o desgaste é o mais crítico nesse trecho da tubulação, fazendo com que seja necessário executar a sua rotação, uma vez que, devido à operação por seção parcial, a parte superior da tubulação não será desgastada.

O trecho por gravidade é o trecho final do rejeitoduto (1,459 km – 2,282 km), por onde a polpa de rejeito escoar até entregar na barragem de rejeitos.

A Tabela 6 mostra as especificações de cada trecho do rejeitoduto:

Tabela 6: Especificações da tubulação dos trechos do rejeitoduto

| Trecho (km) | Tubo | | Revestimento Interno | |
|---------------|---|-------------------------------------|----------------------|-----------|
| | Material | Diâmetro/ Espessura de parede | Material | Espessura |
| 0,00 – 0,314 | Aço carbono ASTM A 139 Gr.B – Costura helicoidal | 26”/ 9,53 mm | PU | 12,0 mm |
| 0,314 – 1,459 | PEAD com malha de aço – PE100 PN16 | 600mm / 20mm | - | - |
| 1,459 – 2,282 | PEAD PE100 PN10 | 710mm/ 42,10 mm | - | - |

Fonte: Pesquisa direta (2022)

4.5 Cálculo do volume de perda de massa

De acordo com a norma ASTM G75, as dimensões da amostra a ser inserida na máquina de Miller são padrão. Devem seguir as dimensões (em mm) mostradas na Figura 28 :

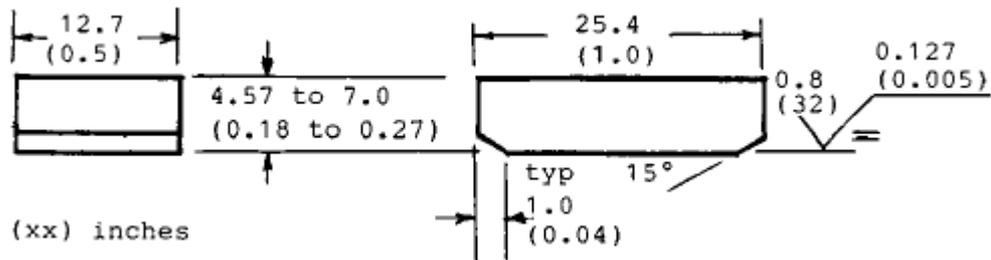


Figura 28: Dimensões do corpo de prova.
Fonte: ASTM G75 (2013).

Sendo assim, a área a ser desgastada do corpo de prova será calculada conforme equação (7):

$$A_{amostra} = \frac{25,4 \times 12,7}{100} = 3,2258 \text{ cm}^2 \quad (7)$$

Como evidenciado anteriormente pelo teste abrasivo, a taxa de perda de massa do corpo de prova (M') é de 12,25810 mg/h. Desse modo, podemos calcular, de acordo com a equação 8, o volume de massa perdida em uma hora, considerando os dados devido ao desgaste abrasivo do teste:

$$\begin{aligned} 7,8 \quad g & \rightarrow 1 \quad \text{cm}^3 \\ 0,0122581 \quad g & \rightarrow V_{desg. amostra} \\ \therefore V_{desg. amostra} & = 0,001571551 \quad \frac{\text{cm}^3}{h} \end{aligned}$$

4.6 Cálculo da espessura perdida

Para calcular a diminuição da espessura da tubulação por hora, devemos calcular a perda de espessura da amostra conforme equação 8, considerando que o rejeitoduto opera 24 horas por dia, 365 dias no ano:

$$e_{desg. amostra/h} = \frac{V_{desg. amostra}}{A_{amostra}} = 0,000487182 \frac{\text{cm}}{h} = 42,67713197 \frac{\text{mm}}{\text{ano}} \quad (8)$$

Porém, a tubulação utilizada em situação real no rejeitoduto é em PEAD, conforme evidenciado no item 4.2. Dessa forma, devemos fazer um comparativo do aço com o PEAD para que o cálculo de desgaste seja mais próximo da situação real.

De acordo com o manual técnico de uma fabricante de tubos PEAD para o setor de extração mineral, os tubos de PEAD, possuem um coeficiente de resistência à abrasão 5 vezes maior que o do aço. (AFLON, 2018)

Com base na informação acima, pode-se inferir que o desgaste sofrido pelo tubo PEAD em comparação ao desgaste sofrido pelo aço, será 5 vezes menor. Sendo assim, tem-se o desgaste sofrido por tubo PEAD com a equação 9:

$$e_{desg. PEAD} = \frac{e_{desg. amostra/h}}{5} = \frac{42,67713197}{5} = 8,535426394 \frac{mm}{ano} \quad (9)$$

Dessa forma, o resultado obtido confirma o valor de 8,5 mm/ano constatado no relatório da empresa de engenharia que solicitou o teste abrasivo para calcular o desgaste da tubulação do rejeitoduto.

4.7 Cálculo da vida útil

Como não há norma que defina a espessura mínima de parede de uma tubulação para garantir sua integridade, as empresas de projetos adotam um critério de acordo com históricos obtidos de desgastes de dutos em operações. Para garantir que a tubulação não sofra rompimentos e nem ocorram vazamentos, o limite máximo de comprometimento da seção pode ser de 40% de acordo com históricos obtidos. Ultrapassando esse valor, deve-se fazer a troca do duto ou, como no caso que está sendo estudado, deve-se rotacionar a tubulação para usar a parte da seção que não foi desgastada.

Sendo assim, sabendo que a parede da tubulação tem espessura de 42,1 mm, temos que a espessura mínima que poderá atingir após sofrer desgaste, será calculada de acordo com a equação 10:

$$e_{minima} = 42,1 \times 0,6 = 25,26mm \quad (10)$$

Dessa forma, o desgaste sofrido pode ser no máximo de 16,84 sabendo que a tubulação sofre um desgaste de 8,53mm/ano:

$$Vida \text{ útil} = \frac{16,84}{8,53} = 1,97 \text{ anos} \cong 24 \text{ meses} \quad (11)$$

Conclui-se que após 48 meses, a tubulação deve ser rotacionada, como justificado no item 4.2. Portanto, sua vida útil total, será de 4 anos.

5 CONCLUSÃO

O desgaste abrasivo sofrido pelos dutos do rejeitoduto, mesmo que a tubulação seja em PEAD, que se trata de um material com alta resistência à abrasão, é elevado. Como mostrado no capítulo 2, tubulações em PEAD são projetadas para durar até 50 anos, e como evidenciado pelos cálculos e pelo teste de abrasividade, em um sistema de rejeitoduto duraria cerca de 4 anos.

O teste de abrasividade pela máquina de Miller, é uma das melhores alternativas para se mensurar a abrasividade de polpas minerais, segundo pesquisas em literaturas sobre o assunto. Um dos fatores para tal afirmação, é o fato do teste ser feito com a própria amostra de polpa. Porém, o teste possui limitações por não considerar determinadas variáveis de processo, como a velocidade de escoamento, que são significativas para mensurar a abrasão sofrida pela tubulação.

Os cálculos realizados no presente trabalho foram baseados na norma ASTM G75, porém são estimativas, tendo em vista que o teste abrasivo não foi realizado em uma amostra de PEAD que é o material utilizado no trecho de estudo da tubulação existente do rejeitoduto.

De acordo com os cálculos evidenciados, o desgaste anual de 8,53 mm está de acordo com o estipulado pela empresa de engenharia contratada pela mineradora para realizar os cálculos.

A vida útil estimada segue o critério de acordo com histórico obtido de empresas de projetos. O ideal seria realizar testes para se padronizar a espessura mínima de parede em tubulações de PEAD.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Para futuros trabalhos o ideal seria realizar teste abrasivo em amostra de PEAD, para que assim, os resultados obtidos pelo teste abrasivo sejam mais fiéis à realidade e os cálculos de desgaste sejam mais assertivos.

Outras recomendações seriam:

- Realizar um teste comparativo entre uma amostra de aço e uma amostra em PEAD nas mesmas condições de meio abrasivo, para se determinar a diferença de coeficientes de resistência à abrasão.

- Realizar testes para se determinar a espessura mínima que garanta a integridade de tubos PEAD.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AFLON PLÁSTICOS INDUSTRIAIS - AFLON. **Tubos e conexões de PEAD, PP e PVDF – Catálogo Técnico.** Cabreúva: [s.d], 51p. Disponível em: http://www.aflon.com.br/imagens/catalogo_tec/tubos_conexoes.pdf. Acesso em: 20 set.2022

ALVES, F. **Diferença entre Tubos de Aço com Costura e Sem Costura.** Industria Hoje, 2017. Disponível em: <https://industria hoje.com.br/diferenca-tubos-de-aco-com-costura-sem-costura>. Acesso em: 27 mar.2022

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. **ASTM G75: Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number).** West Conshohocken: ASTM, 2013. 21p.

ANDRADE, L.C.R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil.** 2014. (96f). Tese. Doutorado em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, 2014.

ARAÚJO, T.T.A; CUNHA, J.D e BARBOSA, A.F.F. **Revestimento de polietileno de alta densidade (PEAD) como sistema de proteção contra corrosão em oleodutos no RN.** 2019. (13f). Trabalho de conclusão de curso. Ciência e Tecnologia – Centro de Engenharia da UFERSA, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, Brasil, 2019.

ARMCO STACO. **Weholite: Tubos em PEAD – Catálogo Técnico.** [s.l]: 2013, 8p. Disponível em: https://www.armcostaco.com.br/armco/upload/download/folder_Weholite_PEAD_novaID2_rev05jun.pdf. Acesso em: 10 set.2022

BENTES, F.M. **Programa de gestão de riscos para tubulações industriais.** 2007. (163f). Tese. Mestrado em Ciências Mecânicas – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2007.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos.** 2 ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2008. 448p.

CIMM. **Fabricação de tubos industriais.** 2010. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7355-fabricacao-de-tubos-industriais. Acesso em: 20 mar.2022

COMPLASTEC. **5 Motivos para usar o PEAD nos mais variados tipos de tubulações.** [s.d]. Disponível em: <https://complastec.com.br/aplicacoes-do-pead/5-motivos-para-usar-o-pead-nos-mais-variados-tipos-de-tubulacoes/>. Acesso em: 27 mar.2022

COZZA, R.C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo.** 2006. (217f). Tese. Mestrado em Engenharia – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2006.

D'AGOSTINO, L.F. **Praias de barragens de rejeitos de mineração: características e análise da sedimentação.** 2008. (244f). Tese. Doutorado em Engenharia – Escola Politécnica, Universidade São Paulo, SP, Brasil, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. - DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro - 2017.** Brasília: 2017, 43p. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_metalicos2017. Acesso em: 20 mar.2022

DNPM. **Reservas e Produção Mundial de Ferro em 2001. Departamento Nacional da Produção Mineral.** Brasília. Disponível em: <https://www.dnmp-pe.gov.br/Detalhes/Ferro.htm#:~:text=Reservas%20e%20Produ%C3%A7%C3%A3o%3A,de%20maiores%20volumes%20de%20min%C3%A9rio>. Acesso em: 10 mar.2022

DORES, A.C.L. **Simulação numérica do crescimento de diâmetro externo de tubos de aço sem costura durante têmpera em tanque na Vallourec Soluções Tubulares do Brasil (VSB).** 2018. (106f). Tese. Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2018.

FGS BRASIL. **Tubos de Polietileno – PEAD.** Disponível em: <https://fgsbrasil.com.br/categoria-produto/tubos/tubos-de-polietileno-pead/>. Acesso 10 abr.2022

Fundição Centrífuga. Manutenção e Suprimentos, 2018. Disponível em: <https://www.manutencaoesuprimentos.com.br/fundicao-centrifuga/#gsc.tab=0%20fonte>. Acesso em: 25 mar.2022

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 1192p.

GERHARDT, T.E e SILVEIRA, D.T. **Métodos de Pesquisa.** 1 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. 120p.

GOMES, M.A. **Caracterização Tecnológica no Aproveitamento do Rejeito de Minério de Ferro**. 2009. (88f). Tese. Mestrado – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2009.

GONÇALVES, J.C.C. **Estudo da influência de nanotubos de carbono nas propriedades de revestimentos de poliuretano**. 2013. (155f). Tese. Mestrado em Engenharia de Materiais – Escola de Engenharia, Universidade do Moinho, Braga, Portugal, 2013.

GUZZO, P.L. **Quartzo. In: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 681-721.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 7 ed. 2012. Disponível em: <https://www.dnmpmpe.gov.br/Detalhes/Ferro.htm#:~:text=Reservas%20e%20Produ%C3%A7%C3%A3o%3A,de%20maiores%20volumes%20de%20min%C3%A9rio>. Acesso em: 05 abr.2022

KLRELLING, Anael. **Extrusão**. Instituto Federal de Santa Catarina, [s.d]. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/tubos-com-ou-sem-costura-airton-carrion-navarro>. Acesso 10.abr.2022

LEGNER, Carla. **A importância de cálculos de transiente hidráulico em tubulações**. Revista TAE, 2017. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/4/a-importancia-de-calculos-de-transiente-hidraulico-em-tubulacoes>. Acesso em: 20 abr.2022

LINS, F.A.F e LUZ, A.B. **Introdução ao Tratamento de Minérios. In: Tratamento de Minérios**. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2010. p.03-20.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. [S.l: s.n.], 2003.

MINÉRIOS E MINERAIS. **Tubo de Ferro Dúctil aplicado em linha de rejeito de minério de ferro**. Disponível em: <https://revistaminerios.com.br/tubo-de-ferro-ductil-aplicado-em-linha-de-rejeito-de-minerio-de-ferro/>. Acesso 12 abr.2022

MINÉRIOS E MINERAIS. **Tubos PEAD oferecem vantagens para a indústria de mineração**. 2020. Disponível em: <https://revistaminerios.com.br/tubos-pead/>. Acesso em: 20 set.2022

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Desempenho do setor mineral em 2020 supera expectativas e contribui para impulsionar a retomada da economia**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/desempenho-do-setor-mineral-em-2020->

supera-expectativas-e-contribui-para-impulsionar-a-retomada-da-economia. Acesso em: 10 mar.2022

NAVARRO, A.C. **Tubos com ou sem costura**. LinkedIn, 2019. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/tubos-com-ou-sem-costura-airton-carrion-navarro>. Acesso 10.abr.2022

NERY, Pedro. **Os Segredos na Montagem de um Rejeitoduto**. LinkedIn, 2018. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/os-segredos-na-montagem-de-um-rejeitoduto-pedro-nery-pmp>. Acesso em: 20 mar.2022

PORTES, A.M.C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. (180f). Tese. Mestrado em Geotecnia e Transportes – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2013.

REVEST-BOR. **Revestimento em Poliuretano**. [s.d]. Disponível em: <https://www.revestbor.com.br/artigo/revestimento-poliuretano>. Acesso em: 27 mar.2022

SANTOS, T.G. **Reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro e ouro com base em uma caracterização tecnológica e geoambiental**. 2018. (110f). Tese. Mestrado em Geotecnia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2018.

SILVA, Cristiane. **Vazamento de duto de rejeitos da Vale atinge rios na Região Central de Minas**. Estado de Minas, 2017. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2017/03/15/interna_gerais,854418/vazamento-de-duto-de-rejeitos-da-vale-atinge-rios-na-regiao-central-de.shtml. Acesso 20.mar.2022

SIQUEIRA, F.S. **Abrasividade de polpas minerais associadas às propriedades do abrasivo: Morfologia, concentração, tamanho médio e natureza das partículas**. 2018. (90f). Tese. Mestrado em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, Brasil, 2018.

TECINOX. **O que é fundição centrífuga**. Disponível em: <https://tcinox.com.br/o-que-e-fundicao-centrifuga/>. Acesso 10.abr.2022

TELLES, Silva. **Tubulações Industriais**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 163p.

TRANSPOL INDUSTRIA. **Tubos de PEAD para mineração**. [s.d]. Disponível em: <https://www.transpolindustria.com.br/tubos-de-pead-para->

ANEXO

**Projeto: ENSAIOS DE ABRASIVIDADE DE POLPAS
NÚMERO SAR E ÍNDICE DE MILLER**

Contratada: Spectrum Engenheiros Consultores Reunidos Ltda



www.spectrum-engenharia.com

Objetivo: Determinar o índice SAR. Este índice é um indicador da agressividade abrasiva de uma polpa em relação a um determinado material. Permite selecionar o material mais adequado para uma aplicação específica, por isso é utilizado nos processos de decisão para seleção de materiais. De posse deste índice pode-se, também, adequar as características da polpa de modo a diminuir a sua abrasividade atuando nas variáveis intrínsecas: distribuição granulométrica, pH, diluição, etc.

Número do teste: 01

Data de Recebimento da Amostra: 21/05/2021

Data do Ensaio: 25/05/2021

Lama: Amostra de polpa enviada pela Empresa:

- Rejeito Total (mistura) -

Temperatura média durante os ensaios: 22°C ± 1°C (Temperatura ambiente do Laboratório)

Umidade relativa (média) no Laboratório: 72%

Concentração aproximada de sólidos por volume: 40%

pH da polpa: 6,78

Condutividade da Polpa: 964 µS/cm

Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) da Polpa: 482 ppm

Densidade dos sólidos (picnômetro): 3,02 g/cm³

Amostra de desgaste:

Descrição: API X70

Densidade: 7,8g/cm³

Material de suporte:

Descrição: Neopreno

Dureza "Shore A": 83

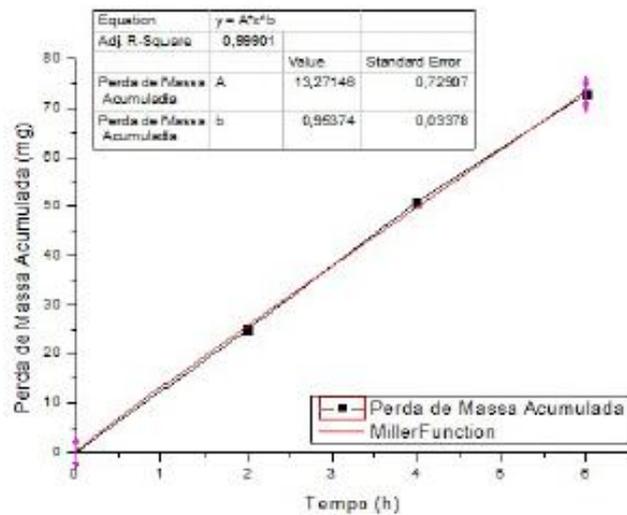
Módulo de Elasticidade (MPa): 6,38

RESULTADOS

| Tempo (h) | Amostra Metálica 1 | | Amostra Metálica 2 | | Amostra Metálica 3 | |
|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Massa (g) | Perda de Massa (g) | Massa (g) | Perda de Massa (g) | Massa (g) | Perda de Massa (g) |
| 0 | 5,3690 | 0,0000 | 5,4997 | 0,0000 | 5,2575 | 0,0000 |
| 2 | 5,3502 | 0,0188 | 5,4769 | 0,0228 | 5,2243 | 0,0332 |
| 4 | 5,3150 | 0,0352 | 5,4519 | 0,0250 | 5,2067 | 0,0176 |
| 6 | 5,2865 | 0,0285 | 5,4297 | 0,0222 | 5,1915 | 0,0152 |

| Média Da Perda de Massa Acumulada | |
|-----------------------------------|---------|
| (g) | (mg) |
| 0,0000 | 0,0000 |
| 0,0249 | 24,9333 |
| 0,0509 | 50,8667 |
| 0,0728 | 72,8333 |

Gráfico: Perda de Massa em função do Tempo



Calculos
 $y = A \cdot t^n$
 $y = 13,27146 \cdot t^{0,95374}$
 $y'(2) = 13,27146 \cdot 0,95374 \cdot 2^{(0,95374 - 1)}$
 $y'(2) = 12,25810$
Miller: 18.18. 12,25810
Miller = 222,85220
SAR = (7,58/7,80) . 222,85
SAR = 216,57

SAR (Slurry Abrasiveness Response) = 217

ANEXOS

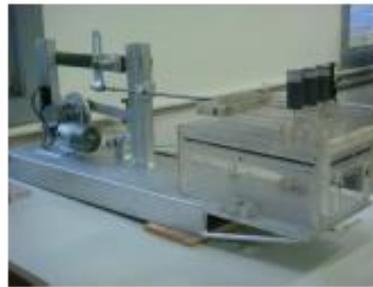


Figura 1 : Aparato experimental



Figura 2 : Aparato experimental e porta-amostras

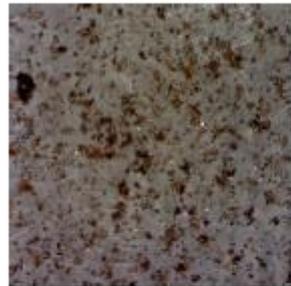


Figura 3 : Suporte após ensaio – Neopreno

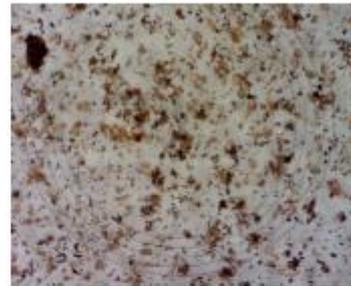
Desgaste do suporte

| Traços | Leve | Moderado | Forte | Severo |
|--------|------|----------|-------|--------|
|--------|------|----------|-------|--------|

Perda absoluta de massa do material suporte : 0.0445 g
Perda Relativa = 0.04%



(a)

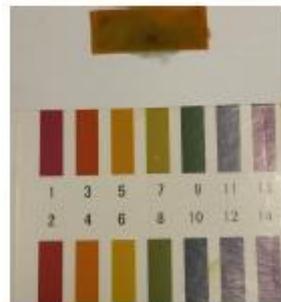


(b)

Figura 4 : Granulometria do abrasivo. Fotomicrografia óptica. (a) Luz branca (b) Luz polarizada.
Escala 1/100mm



(a)



(b)

Figura 5: Medição (pHmetro) (a) e avaliação do pH da polpa (Método da fita) (b).

Ouro Preto, 29 de Maio de 2021

Adriano D. C.
Eng. Met., D. Sc. CREA: MG24391D
spectrom.