



REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS – REDEMAT
UFOP – UEMG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DEPOSITADOS EM BARRAGEM
IMPERMEABILIZADA COM VISTAS A RECUPERAÇÃO DE FERRO E
NIÓBIO E FUTURO PROCESSO DE ENVELOPAMENTO DO REJEITO**

Thiago de Souza Amaral

Orientador: Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo

Ouro Preto - MG

2021

THIAGO DE SOUZA AMARAL

**CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DEPOSITADOS EM BARRAGEM
IMPERMEABILIZADA COM VISTAS A RECUPERAÇÃO DE FERRO E
NIÓBIO E FUTURO PROCESSO DE ENVELOPAMENTO DO REJEITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação da Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT, do convênio entre a Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP e a Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Materiais e Meio Ambiente.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo

Ouro Preto - MG

2021



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thiago de Souza Amaral

Caracterização de rejeitos depositados em barragem impermeabilizada com vistas a recuperação de ferro e nióbio e futuro processo de envelopamento do rejeito

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Materiais

Aprovada em 10 de novembro de 2021.

Membros da banca

Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Romero César Gomes - Fundação Gorceix

Prof. Dr. Danton Heleno Gameiro - Universidade Federal de Ouro Preto

O Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/11/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Gabriel da Silva Araujo, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUACÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**, em 29/11/2021, às 11:16, 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 **0250971** e o código CRC **B5CDC8CD**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração - CBMM pela oportunidade e suporte oferecido para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos colegas da Gerência de Meio Ambiente e Apoio Tecnológico e Gerência de Desenvolvimento de Processos e Produtos por todo o suporte e colaboração técnica.

Ao meu orientador, Fernando Gabriel, e aos demais professores da REDEMAT e da banca, agradeço a paciência e dedicação no nosso crescimento contínuo.

À minha família, aos meus colegas de turma, pelo apoio e companheirismo durante toda essa jornada.

Muito obrigado!

RESUMO

O conhecimento dos rejeitos de processos de concentração mineral através de sua caracterização e o desenvolvimento de técnicas que visem a recuperação de minerais de interesse depositados em barragens é hoje um grande desafio. O descomissionamento seguro de estruturas de barragem é outro ponto de grande importância nas minerações e que precisa ser endereçado em todas as suas particularidades. Estas duas demandas da sociedade foram aqui discutidas como proposição futura para uma tese de doutorado que terá como objetivo a recuperação de ferro e nióbio do rejeito da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, depositado hoje em uma barragem impermeabilizada, assim como, propor alternativas para o envelopamento dos rejeitos depositados nessa estrutura que tem como grande desafio a massa de água lá aprisionada.

ABSTRACT

It is a new challenge to develop tailings knowledge through characterization of materials and design new processes aiming to recover the elements from waste. The closure of the structures in a safe way is also a very important point to be addressed by mining companies with all its particularities. These two subjects are discussed in this document and proposed as a PhD thesis that aims to recover iron and niobium from a lined tailing dam owned by Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, as well as, to design some alternatives to close the deposit confining the tailings and having the challenge to treat a high water volume imprisoned inside the structure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Minas, depósitos e ocorrências minerais de nióbio no mundo.	4
Figura 2: Fluxo de produção dos produtos de nióbio pela CBMM.	8
Figura 3: Método construtivo da barragem impermeabilizada e drenos.	13
Figura 4: Caracterização por imagem dos rejeitos magnéticos e representação dos pontos	16
Figura 5: Fluxograma hierarquizando as etapas e entregas do projeto	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade produtiva atual e futura de rejeitos da CBMM. (CBMM, 2021).....	10
Tabela 2: Estruturas utilizadas para a produção de produtos de nióbio em Araxá e suas características (Modificado de FEAM e CBMM, 2021)	11
Tabela 3: Resumo das principais características dos rejeitos da CBMM. (CBMM, 2021)	15
Tabela 4: Resultados semiquantitativos (MEV) do rejeito magnético. (CBMM, 2021)	16

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. Nióbio: produção e rejeitos	3
3.1.1. O elemento químico Nióbio	3
3.1.2. Industrialização dos produtos de Nióbio.....	5
3.1.3. Controles ambientais.....	7
3.2. produção e rejeitos na CBMM	8
3.2.1. Caracterização do processo produtivo da CBMM	8
3.2.2. Caracterização das Barragens de Rejeito no Complexo de Araxá.....	10
3.2.3. Caracterização dos Rejeitos da CBMM.....	14
METODOLOGIA	17
5.1. Etapas	19
4. CRONOGRAMA	21
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

1. INTRODUÇÃO

Conforme explicado por Lyu (2019) a demanda por recursos minerais tem aumentado consideravelmente nos últimos anos devido ao desenvolvimento econômico, sendo um dos resultados, o aumento do número de barragens e outras estruturas de disposição de rejeitos que nem sempre vem sendo tratada de forma adequada. A consequência é que a disposição inadequada tem causado nos últimos 6 anos entre 3 e 4 grandes colapsos por ano de barragens.

Segundo Liu (2015), muito esforço tem sido realizado na avaliação de impactos ambientais de falhas de barragens, mas concentrados apenas no monitoramento, gerenciamento e remediação. Pouco tem sido avaliado em relação aos impactos potenciais de poluição, antes da ocorrência de falhas.

No Brasil e em especial em Minas Gerais, um grande esforço regulatório foi iniciado com a publicação da Lei 23.291/2019, que trouxe uma série de novas obrigações e estudos de forma a tentar melhorar as condições de segurança dessas estruturas. Além disso, a lei trouxe de forma importante a necessidade de se imaginar a redução de disposição de materiais em barragens e de pensar no fechamento da estrutura desde o seu projeto inicial.

A CBMM vem utilizando desde 2006 conforme descrito por Lemos Jr. (2012), impermeabilização de PEAD em suas barragens como forma de prevenção de contaminação ao meio subterrâneo e também melhorar a capacidade de recirculação de água industrial no complexo. Essa técnica permite ganhos interessantes mas traz o desafio de fechamento quando do fim da vida útil da estrutura.

Conforme Lavoic (2020), as membranas de PEAD tem sido utilizada de forma frequente e em várias aplicações no mundo todo. Os motivos de suas falhas dependem de uma série de fatores desde a aplicação a eventos externos e por isso tem um tempo de vida em serviço que pode variar de alguns anos até 1000 anos. Entretanto é fato observar que estas membranas irão se degradar e permitirão a saída dos líquidos contidos ao meio, caso ainda exista potencial de mobilidade.

Os processos de recuperação dos materiais e de projeto para envelopamento, atuarão desta forma na melhoria da sustentabilidade das operações e redução de riscos de passivos futuros.

2. JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

Os processos de descomissionamento/descaracterização de barragens e reaproveitamento de rejeitos minerais tem se tornado cada dia mais importante desde a promulgação da lei estadual 23.291/2019, que institui a política estadual de segurança de barragens e determina em seu artigo 7º, item I – d, o desenvolvimento progressivo de tecnologias alternativas, com a finalidade de substituição da disposição de rejeitos ou resíduos de mineração em barragens.

A caracterização deste trabalho poderá apoiar no processo de redução do uso de barragens pelo reaproveitamento dos recursos minerais, assim como, permitirá a avaliação de envelopamento dos rejeitos em barragem impermeabilizada.

Desenvolver uma rota de recuperação mineral e reduzir os futuros riscos ambientais e de segurança nas estruturas de disposição de rejeitos são de grande importância para futuros trabalhos e como forma de atender aos anseios da comunidade, por isso este projeto se justifica.

Objetivos Gerais:

Desenvolver um processo em laboratório capaz de recuperar os elementos ferro e nióbio advindos do rejeito da concentração mineral do pirocloro e testes em campo que permitam o desenvolvimento de uma técnica de envelopamento dos rejeitos restantes colocados em barragem impermeabilizada.

Objetivos Específicos:

- Avaliar rotas de recuperação dos elementos Fe e Nb presentes nos rejeitos minerais do pirocloro;
- Desenvolver a caracterização tecnológica dos rejeitos;
- Realizar testes nos rejeitos depositados em barragem impermeabilizada;
- Criar possíveis alternativas de envelopamento dos rejeitos depositados em barragem impermeabilizada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. NIÓBIO: PRODUÇÃO E REJEITOS

3.1.1. O ELEMENTO QUÍMICO NIÓBIO

Conforme descrição no site da CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração), o nióbio é um elemento químico de número atômico 41, da família dos metais de transição, descoberto em 1801 pelo químico inglês Charles Hatchett. Porém, apenas em meados do século XX passou a ganhar maior relevância com o desenvolvimento de aplicações diversas em campos como mobilidade, energia e infraestrutura. A empresa investe a vários anos para a produção mais sustentável dos diversos produtos industrializados de nióbio, transformando uma curiosidade de laboratório (status existente na década de 50 quando a empresa foi fundada) em uma gama de produtos industrializadas diversificada que vai de ferroligas, óxidos, óxidos especiais, ligas especiais e nióbio metálico em sua forma mais pura.

Os produtos são tratados como serviços pois a empresa fornece, além do nióbio, serviços de desenvolvimento conjunto com clientes e com suas cadeias de produção para a otimização diária das mais diversas aplicações. Veículos mais leves e resistentes são um exemplo dessa parceria vencedora.

O CETEM (2020) em seu estudo sobre materiais estratégicos para o Brasil e críticos para a União Europeia também realiza um compêndio interessante dos diversos projetos e minas, destacando o importante papel ocupado hoje pelo Brasil devido ao pioneirismo da CBMM na criação e popularização de aplicações globalmente através de suas parcerias.

Segundo o documentário a Revolução do Nióbio (Jovem Pan, 2021), o mineral de onde se extrai o nióbio é principalmente o pirocloro mas também é encontrado na columbita-tantalita, loparita, euxenita, mangano-tantalita e samarsquita. Tem ocorrências diversas no mundo todo com mais de 80 depósitos, sendo 45 casos listados no trabalho de Simandl et. al (2018), conforme apresentado na figura 1 que lista as ocorrências em relação ao tipo de depósitos (complexos carbonatíticos, pegmatitos, complexos peralcalinos, granitos de elementos raros e outros), tamanho da reserva em milhões de toneladas e teor médio de óxido de

nióbio (Nb_2O_5).

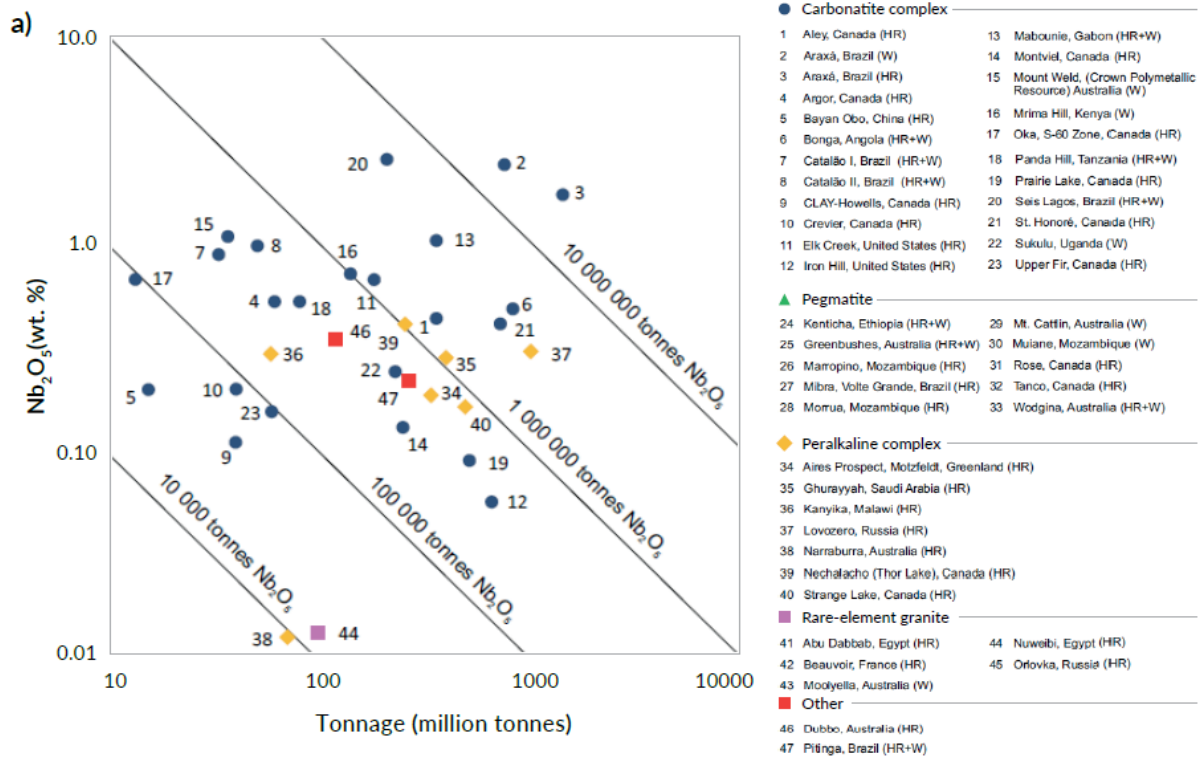


Figura 1: Minas, depósitos e ocorrências minerais de nióbio no mundo.

Fonte: Peiter et al. apud Simandl et al. (2018).

Em Araxá, existe um depósito mineral no Complexo Alcalino do Barreiro (representado pelos números 2 e 3 da Figura 1) com ocorrência de material na forma intemperizada (número 2 com profundidade mais superficial) e em rocha (número 3 mais profundo e de menor teor médio). Esse depósito corresponde aos direitos de lavra da CBMM e da CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, empresa estatal que cuida do direito minerário e que tem um acordo de participação com a CBMM). Para a exploração desse minério a empresa COMIPA (Companhia Mineradora do Pirocloro de Araxá) foi fundada com a participação societária das empresas CBMM e CODEMIG e faz a movimentação igualitária das duas áreas de lavra. (CBMM, 2020).

O material caracterizado para os estudos corresponde ao rejeito do beneficiamento mineral realizado nessa mina em suas unidades de concentração. Trata-se hoje exclusivamente do material intemperizado que está sendo lavrado. Importante aqui destacar que os rejeitos minerais e a gestão das estruturas de barragens de rejeito, por acordo, são da CBMM por fazerem parte material já transferido pela COMIPA à CBMM. O estéril gerado permanece de posse da

COMIPA e é por ela gerenciado.

Conforme Tither (2001), o consumo mundial de nióbio tem crescido de forma importante, principalmente desde a década de 90, com a evolução da aplicação dos aços de alta resistência que são responsáveis pelo grande volume de uso do elemento. Apesar de representar percentuais pequenos em peso no produto final com médias de 200 gramas de nióbio por tonelada de aço, o nióbio através da formação de carbonetos e carbonitreto permite a redução do tamanho dos grãos do aço com aumento conjunto de resistência e tenacidade.

As propriedades do nióbio em outras aplicações podem conter ainda a estabilização de fases no aço inox ferrítico, aumento da resistência à fluência em ligas INCONEL, supercondutividade em seu estado puro entre outras diversas possibilidades (CBMM, 2020).

Por fim, o nióbio tem em boa parte de suas aplicações substitutos como o Manganês, Vanádio, Titânio entre outros elementos químicos, sendo, entretanto, muito comum o design conjunto de elementos de liga para permitir o melhor desempenho dos materiais. Com isso, o preço do nióbio é definido por uma relação oferta-demanda de mercado que gera um equilíbrio natural dos preços pela competição com os outros elementos, sem, contudo, ser negociado como commodities por bolsas ou compradores. A venda do nióbio é realizada em sua maior parte através de produtores ou fornecedores exclusivos diretamente aos clientes finais (CBMM, 2020).

3.1.2. INDUSTRIALIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE NIÓBIO

O nióbio tem sua lavra ocorrendo através de minas a céu aberto e também subterrâneas, sendo a ocorrência natural na forma de óxidos (principalmente sua forma mais estável o Nb_2O_5) e em quantidades pequenas quando comparado por exemplo a minérios de ferro ou apatita, ficando normalmente entre 0,5 e 3,0% de teores médios (Peiter et al., 2020). Após a extração do minério, é realizada, em sua maior parte, uma etapa de concentração mineral no qual as impurezas, principalmente ferro, silicato e outras lamas, são retiradas através de processos de separação magnética e flotação.

Normalmente os minérios não estão associados a altos índices de estéril e por isso a operação de retirada da camada superficial é consideravelmente menor do que a que ocorre com a produção de outros bens minerais, mas também ocorre e por isso são gerados estéreis que precisam de disposição adequada.

Outra possível fonte do nióbio é como um subproduto de outros minerais, sendo, neste caso, a fonte dos óxidos de nióbio normalmente um resíduo de processos químicos.

Independente da fonte dos óxidos, ocorre a purificação dos óxidos de nióbio através de uma rota química (lixiviação) ou pirometalúrgica para redução dos níveis dos contaminantes, principalmente fósforo, chumbo, enxofre e alguns outros elementos.

Após o processo de purificação ocorre a produção de produtos finais por redução, sendo:

- Redução carbotérmica, através da adição de uma fonte de carbono (normalmente coque) que é utilizada em alguns locais para produção de carbeto de nióbio com posterior purificação ou comercialização do carbeto em aplicações de desgaste.
- Redução metalotérmica, através da adição e reação principalmente com alumínio em pó em uma reação altamente exotérmica para a produção de ligas em reatores ou fornos elétricos.
- Purificação química, onde pode ocorrer a purificação dos óxidos por processos de extração por coluna ou abertura/precipitação dos óxidos em ambientes controlados.

Para cada uma dessas opções é importante observar que as emissões, efluentes e resíduos sólidos divergem e tem diferentes riscos e impactos ambientais. Os resíduos variam nos processos convencionais de classe I (resíduos perigosos), classe IIA (resíduos não perigosos e não inertes) e classe IIB (resíduos não perigosos e inertes), conforme classificação da ABNT NBR 10.004. (CBMM, 2021)

Outros processos de purificação como a utilização de fornos a vácuo com feixes de elétrons, também são possíveis para a formação de produtos de maior valor agregado, mas que correspondem a volumes menores em aplicações principalmente de supercondutividade. (CBMM, 2020)

3.1.3. CONTROLES AMBIENTAIS

A produção de nióbio necessita em todas as suas etapas de controles ambientais adequados para evitar a contaminação do solo, ar e água. Destaca-se entre os controles, as seguintes medidas:

- Pilhas de estéril: aterros controlados com geometria e compactação que garanta estabilidade geotécnica, vegetação de taludes e controle de umidade das vias de forma a controlar emissões de particulados e monitoramento de águas de drenagem superficiais e subterrâneas através da análise de águas de corpos hídricos e poços tubulares.
- Barragens de rejeitos/resíduos: reservatórios normalmente impermeabilizados que permitem a disposição de materiais na forma polpas ou pastas, isolados do meio ambiente por membranas de polietileno de alta densidade (PEAD). São realizados os monitoramentos geotécnicos, de águas de nascente e drenantes, além da qualidade da água que normalmente é reutilizada para fins industriais permitindo altos níveis de recirculação e baixo consumo específico. Em alguns processos como a lixiviação pode ser necessário a neutralização e precipitação de elementos antes da disposição do material em barragens.
- Células de resíduos: estruturas de aterro onde é possível dispor resíduos classe I e classe IIA de forma segura e com monitoramento principalmente de possíveis contaminações de água subterrânea.
- Lavadores de gases, filtros de manga, ciclones: para o controle de particulados e elementos químicos gasosos gerados nos processos, são utilizadas as tecnologias convencionais a depender do nível de abatimento necessário, processos e volumes produtivos.

Com esses processos é possível realizar a produção de forma sustentável com segurança, qualidade, baixos impactos ambientais e eficiência econômica. (CBMM, 2021)

3.2. PRODUÇÃO E REJEITOS NA CBMM

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DA CBMM

Conforme descrição em apresentação institucional da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM, 2020), o processo de transformação do minério de pirocloro com teor médio de 2,3% de Nb_2O_5 até os diferentes produtos industrializados de nióbio conta com 15 diferentes etapas e mais de 150 processos unitários. A Figura 2 representa de forma resumida esse fluxo produtivo.

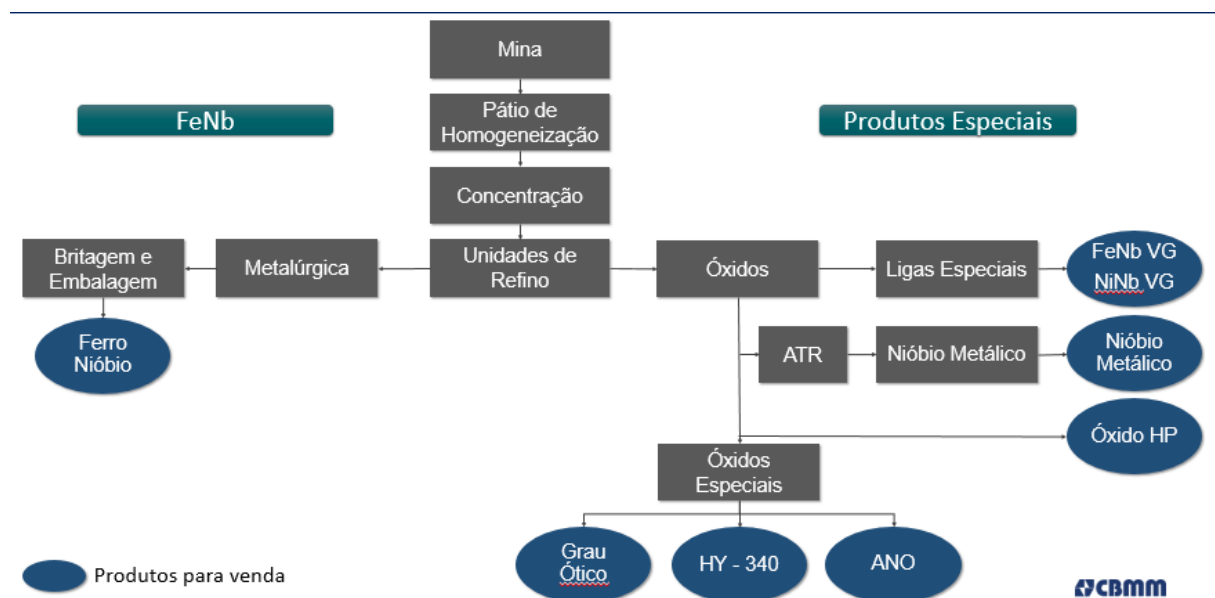


Figura 2: Fluxo de produção dos produtos de nióbio pela CBMM.

Fonte: CBMM (2020).

O nióbio encontra-se em sua fase mineral de pirocloro (óxidos de nióbio) entre as etapas de exploração mineral até a saída do refino, sendo que a principal fase é a concentração, na qual o minério que se encontra com um teor médio de 2,3% é separado de outras formas minerais, da qual se destacam a barita e magnetita que são depositados atualmente em barragens de rejeito. Chega ao final dessa etapa a um teor médio de 52% de Nb_2O_5 no concentrado flutuado. A etapa é realizada atualmente em duas unidades de concentração (existe já o projeto de uma terceira unidade tendo em consideração o crescimento estimado do mercado) e tem como principais etapas a separação magnética e a flotação. (CBMM, 2020)

A separação magnética se caracteriza pela utilização de ímãs que permitem a separação de partículas magnéticas do minério a úmido, sendo o principal cuidado a correta moagem para liberação das partículas minimizando o envio de partículas ricas em nióbio para os rejeitos. O arraste é um dos principais fatores de atenção causando a perda de recuperação.

A flotação é iniciada pelo condicionamento das partículas ricas em nióbio por produtos químicos de forma que elas se tornem hidrofóbicas e sejam atraídas pelas bolhas de ar que são injetadas nas colunas. O processo, que é a flotação direta das partículas, é realizado em no mínimo três etapas e com materiais com diferentes características de composição e granulometria. A seletividade e eficiência desse processo depende de parâmetros importantes como o pH, liberação e a presença de compostos que podem competir com o processo de condicionamento. A lavagem das bolhas também é importante para que o efeito de arraste de impurezas pela colmeia de bolhas seja minimizado.

A separação dimensional das partículas é feita através de peneiramento a úmido e principalmente processos de hidrociclonagem devido ao tamanho das partículas. O ajuste do tamanho das partículas é realizado através da cominuição em moinhos de bolas e de barras para permitir a liberação e boa recuperação mineral.

Conforme descrição no RIMA do projeto EDR9 (CBMM, 2021), no processamento do minério de nióbio são gerados três tipos de rejeito de flotação e o rejeito magnético:

- Rejeito de Flotação Grosso (RG): Contém as partículas de impurezas de tamanho maior da primeira etapa de flotação;
- Rejeito de Flotação Fino (RF): Contém as partículas de impurezas de tamanho pequeno da segunda etapa de flotação;
- Rejeito de Flotação Ultrafino (RUF): Contém as partículas de impurezas de tamanho muito pequeno da última fase de flotação;
- Rejeito Magnético (RM): Contém as partículas de magnetita e outras formas magnéticas separadas do minério de nióbio por processo de separação magnética.

Atualmente a CBMM conta com duas plantas de beneficiamento mineral conhecidas como Concentração 1 e Concentração 2. Elas se diferenciam pela evolução tecnológica pois a Concentração 1 iniciou sua operação em 1981 e teve

sucessivas modificações, especialmente em 2007, quando a tecnologia de flotação de colunas foi incorporado. A Concentração 2 já trouxe toda a evolução tecnológica dos anos de desenvolvimento da Concentração 1 e iniciou sua operação em 2016, sendo a unidade de operação preferencial por sua maior eficiência produtiva.

Devido a ampliação de mercado e desenvolvimentos que vem sendo realizados para uso do Nióbio, existe a expectativa de ampliação dessa etapa produtiva com a construção de uma terceira unidade nos próximos anos.

As massas de produção atual e futura de rejeitos minerais (CBMM, 2021) são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Capacidade produtiva atual e futura de rejeitos da CBMM. (CBMM, 2021)

	Distribuição em massa (%)	Concentração 1 (t/h)	Concentração 2 (t/h)	Concentração 3 (t/h)
Rejeito Flotação Grosso	34%	240	178	240
Rejeito Flotação Fino	26%	182	135	182
Rejeito Flotação Ultrafino	25%	173	128	173
Rejeito Magnético	15%	105	78	105

Demais etapas produtivas não serão aqui detalhadas pois não são de interesse para o foco principal que é a produção de materiais para disposição em barragem.

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITO NO COMPLEXO DE ARAXÁ

As estruturas utilizadas para a disposição dos rejeitos e resíduos do complexo são barragens, pilhas e células de resíduos classe I e II. Nesse trabalho será dado o enfoque as estruturas de barragem.

Em consulta realizada ao site da FEAM (FEAM, 2021) e da CBMM (CBMM, 2021) é possível observar a existência do cadastro de 8 barragens no complexo minero-industrial de Araxá, sendo composto por 6 barragens em nome da CBMM

(Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração) e 2 em nome da COMIPA (Companhia Mineradora do Pirocloro de Araxá) que realiza a operação de mineração. As características são descritas na Tabela 2:

Tabela 2: Estruturas utilizadas para a produção de produtos de nióbio em Araxá e suas características (Modificado de FEAM e CBMM, 2021)

Empreendimento	Nome da Estrutura	Tipo	Situação de Estabilidade	Altura (m)	Volume (m³)
CBMM	Barragem 4	Indústria / Disposição de Rejeitos e Resíduos – Não Impermeabilizada	Atestada	40,00	4.000.000,00
CBMM	Barragem 5	Indústria / Disposição de Rejeitos e Resíduos – Não Impermeabilizada	Atestada	85,00	12.000.000,00
CBMM	Barragem 6	Indústria / Disposição de Rejeitos e Resíduos – Impermeabilizada	Atestada	90,00	26.011.505,30
CBMM	Barragem 7	Indústria / Água	Atestada	33,00	3.550.000,00
CBMM	Barragem D	Indústria / Sedimentação	Atestada	12,50	50.000,00
CBMM	Barragem 8	Indústria / Disposição de Rejeitos e Resíduos – Impermeabilizada	Atestada	69,00	14.000.000,00
COMIPA	Barragem Mina II	Mineração / Sedimentação	Atestada	25,00	22.000,00
COMIPA	Barragem 1	Mineração / Sedimentação	Atestada	14,30	108.000,00

As estruturas são construídas pelo método a jusante, com exceção da Barragem 5 que foi feita pelo método a jusante com seus últimos 10 metros

construídos por alteamento a montante, e tem sua estabilidade atestada por auditorias de terceira parte que verificam as condições hidráulicas e estruturais das barragens. A função e as características dimensionais são também descritas na tabela 2. A CBMM sempre utilizou as técnicas mais seguras e modernas na época da construção das estruturas para permitir a segurança as pessoas e ao meio ambiente.

Conforme descrição no site da CBMM (2021), o Centro de Monitoramento Integrado que opera 24 horas por dia, 7 dias por semana, conta com técnicos capacitados e sistemas inteligentes para verificar a instrumentação e a operação de todas as estruturas e permite de forma rápida e eficaz a detecção de qualquer anomalia. Ações para atuação em uma eventual situação de emergência são mapeadas e simuladas periodicamente com o apoio dos Órgãos de Proteção e Defesa Civil.

As barragens 4 e 5 foram construídas sem a impermeabilização com membranas de polietileno de alta densidade (PEAD) na década de 80 e se encontram hoje em processo final de fechamento. (CBMM, 2021)

As barragens de rejeito 6 e 8 são impermeabilizadas com membranas de polietileno de alta densidade (PEAD) o que traz os seguintes ganhos:

- Proteção ambiental: os rejeitos que tem potencial de solubilização e por isso capacidade de infiltração no lençol freático são impedidos de realizar essa migração de forma intensa devido à baixa permeabilidade criada por essa camada impermeabilizante (CBMM, 2021);
- Aumento da recirculação de água: uma vez que a água não é drenada pelo meio, torna-se possível realizar o reaproveitamento dos líquidos presentes nas barragens através de balsas que criam a condição de recirculação a percentuais superiores a 96%, ou seja, 96% da água utilizada no complexo provém da recirculação da água das barragens e não de água bruta. Isso permite a viabilidade do complexo porque não existe na região volume de água para atender a produção atual e a expansão futura prevista (CBMM, 2021);
- Aumento de segurança: a água é o principal fator de risco em barragens de rejeito, seja nas barragens a montante pelos riscos de liquefação ou pelo risco de instabilidade dos taludes ou criação de caminhos preferenciais e erosões internas (“piping”) caso exista excesso de umidade. A

impermeabilização evita essa migração de água pelos caminhos preferenciais reduzindo os riscos de eventuais eventos desse tipo nas estruturas (CBMM, 2021).

A figura 3 representa esquematicamente o método construtivo e o detalhe dos drenos das estruturas atualmente utilizados pela CBMM:

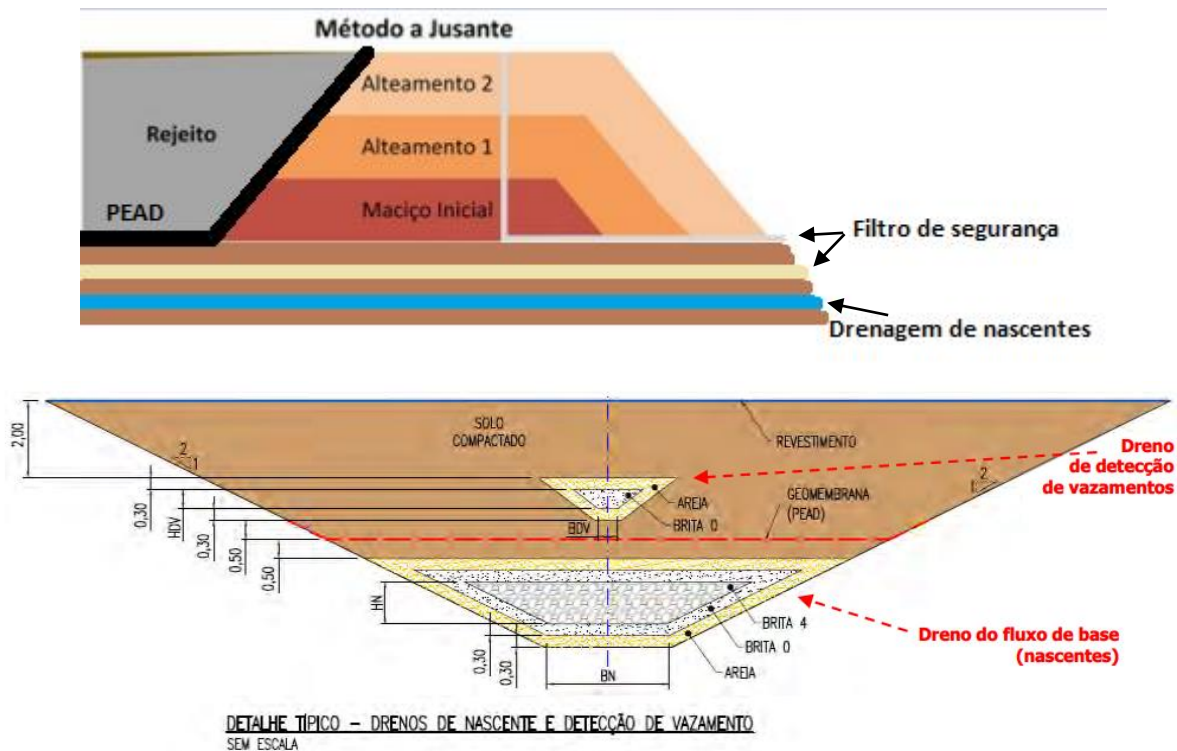


Figura 3: Método construtivo da barragem impermeabilizada e drenos.

Fonte: Modificado CBMM (2021).

A água é o grande fator de controle para as estruturas. O direcionamento de águas consiste na construção de canais laterais que evitem a entrada de águas de chuva das laterais para dentro da barragem e a impermeabilização consiste na aplicação de revestimento de geomembrana de PEAD, com uma espessura de 1,5mm, em todo o reservatório, incluindo a porção superior de ancoragem. Para implantação da geomembrana, prevê-se a regularização topográfica do reservatório para evitar que pedras ou outros corpos estranhos perfurem a manta, com taludes máximos de 1,5H:1V e ancoragem da geomembrana a cada 10m (CBMM, 2021).

Dessa forma, apenas a água proveniente de pluviometria entra em contato com o rejeito consolidado, sendo direcionado naturalmente para um lago de onde a

água é reutilizada para fins industriais ou tratada para devolução aos corpos hídricos da região. As águas naturais de nascente são direcionadas através de drenos de fluxo de base ou de nascentes, construídos com areia e brita, para permitir a passagem desse volume sem que esteja em contato com os rejeitos. Comporta-se como um canal sob as estruturas garantindo o fluxo dos cursos d'água existentes.

Os drenos de segurança (ou filtros de segurança), servem para drenagem de águas que possam provir de um potencial vazamento ou “encharque” do maciço, sem comprometer a segurança geotécnica ou ambiental. As águas provenientes desses drenos são monitoradas com frequência, assim como toda a instrumentação de níveis, permitindo a sua captação e tratamento adequado em caso de ocorrência de contaminação sem que a mesma entre em contato com os cursos hídricos locais.

3.2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS DA CBMM

Conforme descrição no licenciamento do projeto de Estruturas de Disposição de Rejeitos 9 (EDR9) no relatório de caracterização e nos estudos de usos alternativos, temos na tabela 3 o resumo dos principais parâmetros dos diferentes rejeitos:

Tabela 3: Resumo das principais características dos rejeitos da CBMM. (CBMM, 2021)

Parâmetros	Rejeito Flotação Grosso	Rejeito Flotação Fino	Rejeito Flotação Ultrafino	Rejeito Flotação Fino e Ultrafino	Rejeito Flotação Global	Rejeito Magnético
P80* ¹ (µm)	70	65	6,5	45	65	500
Massa específica (g/cm ³)	4,2	4,0	3,9	3,95	4,0	5,0
Limite de liquidez (%)	NL	NL	29	-	NL	NL
Limite de plasticidade (%)	NP	NP	18	-	NP	NP
Umidade ótima compactação (%) ^{*2}	10,95	15,18	16,11	-	10,95	9,01
Análise química^{*3}	43,6% Fe ₂ O ₃ 29,5% BaO 5,7% SiO ₂ 5,7% TiO ₂ 4,2% S	42,1% Fe ₂ O ₃ 17,55% BaO 10,8% SiO ₂ 5,1% OTR 3,3 TiO ₂ 2,6% MnO 2,4% CeO ₂ 2,2% S	54,3% Fe ₂ O ₃ 10,3% BaO 8,1% OTR 3,98% CeO ₂ 3,7% MnO 3,2% SiO ₂ 2,7% TiO ₂	49,1% Fe ₂ O ₃ 12,3% BaO 6,9% SiO ₂ 6,6% OTR 3,2% MnO 3,2% CeO ₂ 2,9% TiO ₂	46,6% Fe ₂ O ₃ 19,4% BaO 6,4% S 4,5% OTR 4,0% TiO ₂ 2,5% S 2,5% MnO 2,2% CeO ₂	91,7% Fe ₂ O ₃ 3,5% BaO 3,5% TiO ₂
Análise mineralógica	36% Barita 35% Hematita 15% Goethita 4% Anatásio 3% Gorceixita 3% Quartzo 2% Magnetita 2% Monazita	44% Goethita 23% Barita 14% Hematita 8% Monazita 4% Gorceixita 4% Quartzo 2% Anatásio 1% Ba-pirocloro	52% Goethita 16% Barita 14% Hematita 10% Monazita 2% Gorceixita 2% Anatásio 2% Quartzo 2% Ba-pirocloro	40% Goethita 22% Hematita 19% Barita 9% Monazita 3% Gorceixita 2% Anatásio 2% Quartzo 2% Magnetita 1% Ba-pirocloro	37% Goethita 27% Barita 20% Hematita 7% Monazita 3% Anatásio 2% Gorceixita 2% Quartzo 1% Magnetita 1% Ba-pirocloro	57% Hematita 28% Magnetita 6% Goethita 4% Barita 3% Anatásio 2% Ba-pirocloro
Caracterização do sólido	Classe II A	-	-	Classe II A	Classe II A	Classe II A

*¹Abertura de peneira que 80% das partículas é passante

*²Umidade base úmida: $\frac{\text{massa água}}{\text{massa sólido} + \text{massa água}}$

*³Destacados apenas constituintes majoritários

Através desta análise é possível observar a alta composição de ferro no rejeito magnético e bário-pirocloro que é a fonte de nióbio dessa composição mineralógica. Assim, decidiu-se focar a atenção para esse rejeito específico pelo potencial de recuperação de ferro e nióbio.

Conforme documentação CBMM (2021), são apresentadas na Figura 4 e a Tabela 4 as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do rejeito magnético, utilizando o microscópio acoplado a uma sonda de dispersão de energia de raio-X (EDS). São apresentadas micrografias obtidas por Detector de Elétrons

Secundários (SE), que representa melhor a textura das partículas e Retroespalhados (BSE) que tem relação com a composição química.

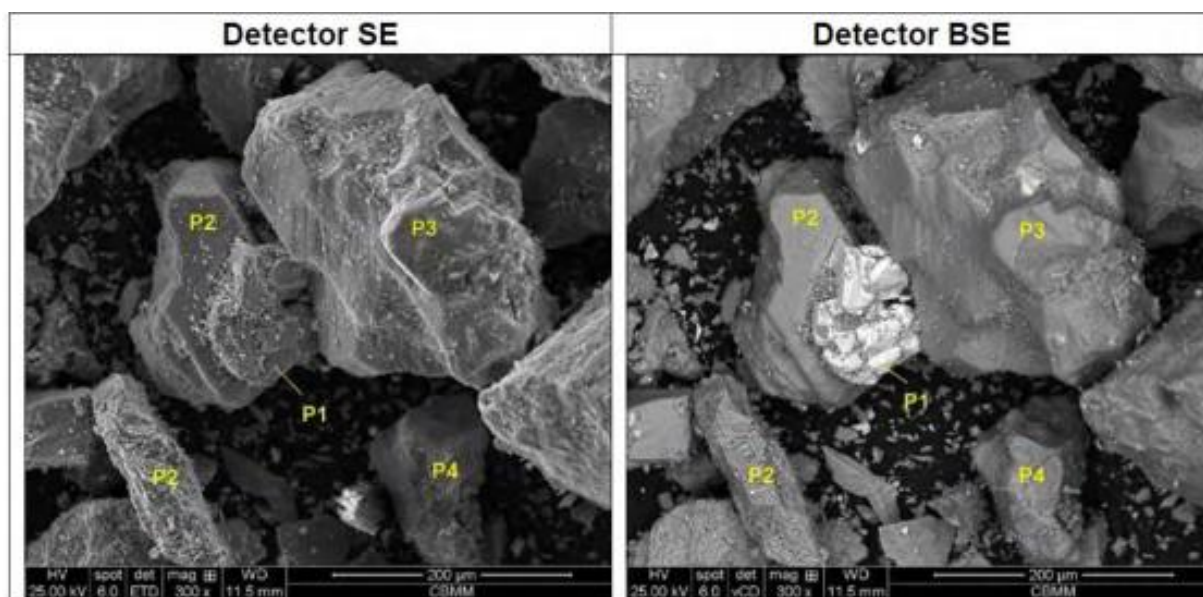


Figura 4: Caracterização por imagem dos rejeitos magnéticos e representação dos pontos

Fonte: CBMM (2021).

Tabela 4: Resultados semiquantitativos (MEV) do rejeito magnético. (CBMM, 2021)

Elemento	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
	Wt (%)	At (%)	Wt (%)	At (%)	Wt (%)	At (%)	Wt (%)	At (%)
Fe	23	32	98	98	97	96	100	100
Ba	62	36	-	-	-	-	-	-
S	13	32	-	-	-	-	-	-
Si	-	-	-	-	0,7	1,3	-	-
Mn	-	-	-	-	0,8	0,8	-	-
P	-	-	-	-	0,8	1,4	-	-
La	2,6	1,5	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	2,1	2,4	0,8	1,0	-	-

É possível observar através dos resultados indicados nas tabelas 3 e 4, assim como nas imagens da Figura 4 a predominância de partículas ricas em ferro compostas de magnetita e/ou hematita. O ponto 1 apresenta alguns grãos mistos contendo ferro, bário e enxofre, indicando a presença de bário-pirocloro. Os pontos 2 e 3 que tem em sua composição titânio, indicam a presença de ilmenita, normalmente associada a magnetita da região que tem grãos desse minério apresentado na forma de feixes em sua estrutura. O fósforo, silício e manganês também estão associados a presença de outros minerais como a apatita na região.

METODOLOGIA

Este projeto divide-se em duas vertentes: caracterização tecnológica do rejeito com avaliação de possíveis rotas de concentração dos elementos ferro e nióbio presentes nos rejeitos e outra do processo de estudos de desaguamento de rejeitos já depositados para descaracterização de barragem impermeabilizada.

Para a e envelopamento de barragem impermeabilizada, as seguintes fases foram planejadas: avaliação da capacidade de bombeamento da água presente no reservatório, caracterização química da água, avaliação de potenciais tratamentos ou destinação do líquido e rejeitos, avaliação de metodologias de fechamento superficial e potencial uso futuro da área.

Os experimentos industriais serão realizados através de testes de testes em laboratório de tecnologia de rejeitos da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) e perfuração e ensaios de bombeamento em barragem impermeabilizada que se encontra em fase final de vida.

Para a avaliação da possibilidade de recuperação dos elementos ferro e nióbio, será realizado a seleção do rejeito magnético com potencial separação física de forma a criar dois produtos de interesse para aproveitamento dos elementos. Diferentes rotas e processos poderão ser testados visando obter economicidade e eficiência na recuperação dos elementos.

Não está previsto aqui a descaracterização com remoção dos rejeitos nesse momento por haver dificuldade na separação de elementos considerados limitantes de uso no material. Desta forma, o foco se dará no potencial aproveitamento de material com geração futura, de forma a permitir a redução do volume de líquido enviado a barragem (pelo reaproveitamento de parte dele na recuperação de nióbio), além da redução em massa pela retirada de sólido com potencial uso como fonte de ferro.

Quanto aos ensaios de bombeamento visando a redução de volume de água e rotas de tratamento desse efluente para permitir o descomissionamento de barragem impermeabilizada, é importante a visualização das potenciais movimentações de consolidação, permeabilidade do meio, além da qualidade da água que poderá necessitar de tratamento por estar em contato com rejeito classificado como II A.

A partir dos resultados obtidos, poderá ser realizado dois produtos importantes da tese de doutorado: uma rota de recuperação de nióbio a partir dos rejeitos, com concentração de ferro em um dos subprodutos com potencial aproveitamento para produção de gusa e aço e uma possível metodologia para descomissionamento em barragens impermeabilizadas para evitar contaminação ambiental da água armazenada em contato com os rejeitos não inertes.

A partir da descrição foi elaborado o fluxograma representado na Figura 5 que demonstra de forma simples o objetivo do desenvolvimento do fechamento de barragem impermeabilizada e seu desdobramento nos temas aqui descritos:



Figura 5: Fluxograma hierarquizando as etapas e entregas do projeto

Fonte: próprio autor

5.1. ETAPAS

1. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA PRÉVIA

A revisão prévia consiste na apresentação deste TCC que é obrigatório para a conclusão do curso de especialização. Durante toda a elaboração do projeto, será realizado complementarmente a continuidade da revisão em estudos de referência.

2. AVALIAR ROTAS DE RECUPERAÇÃO ALTERNATIVAS PARA OS REJEITOS.

Revisão bibliográfica: trata-se a etapa de continua avaliação de trabalhos sobre o tema para identificação de novos conhecimentos e complementação de dados comparativos durante todo o desenvolvimento do trabalho, até a obtenção e caracterização final dos produtos recuperados e métodos desenvolvidos.

Visita a centros de referência: sendo o tema de pouca referência devido a particularidade dos elementos, é de suma importância o planejamento de visitas a centros de tecnologia que já estão executando pesquisas exploratórias de forma a conhecer metodologias e criar um networking de discussões futuras. Pretende-se nesta fase visitar entre dois a três centros de forma a identificar equipamentos, metodologias e técnicas para a produção e caracterização do produto, além da execução do envelopamento da estrutura de barragem.

Caracterização do material depositado em barragem, com plano de amostragem e caracterizações física e química.

3. CONHECER AS TÉCNICAS PARA ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO E ENVELOPAMENTO

Avaliação de equipamentos disponíveis: para a reprodução dos produtos neste trabalho, poderão ser usados os laboratórios da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) ou laboratórios da REDEMAT. Nesta atividade serão avaliados os equipamentos através de um relatório de visita de forma a tentar identificar potenciais metodologias de produção, conforme equipamentos existentes.

Selecionar rota produtiva possível de ser realizada: nesta etapa, uma ou mais rotas de produção serão selecionadas com base nas atividades anteriores, sendo descrito através de um procedimento o passo a passo a ser seguido para cada uma delas.

Realizar teste exploratório com rota selecionada: nesta etapa cada uma das rotas selecionadas anteriormente será testada em laboratório de forma exploratória de forma a avaliar a sua real reprodutibilidade. Ao final um relatório com as técnicas possíveis será feito com enumeração de vantagens e desvantagens. As metodologias serão elencadas de forma crescente em termos de estabilidade de resultado, qualidade do material produzido e custos de produção.

Avaliar técnicas de fechamento e redução do nível freático de forma a reduzir o potencial de contaminação do material disposto em barragem impermeabilizada no longo prazo.

4. IDENTIFICAR E REALIZAR TESTES EM ESCALA PILOTO.

Realizar teste piloto com ajustes no teste exploratório: Uma ou duas técnicas do teste exploratório serão repetidas de forma piloto, buscando a otimização dos resultados de estabilidade, qualidade e custo. O objetivo é conseguir atingir materiais que possam ser incorporados no atual processo produtivo (recuperação de nióbio) e mercado (produtos de ferro).

Realizar testes de bombeamento de forma a avaliar possíveis formas de redução do volume de água no reservatório e reação do rejeito que possam dar condições de definir a melhor técnica de envelopamento.

Realizar análises químicas da água do teste de bombeamento e desenvolver técnicas de tratamento, caso necessário.

5. SUGERIR E, CASO POSSÍVEL, REALIZAR A ROTA DE PRODUÇÃO DESTES MATERIAIS.

Realizar a produção dos materiais pelas rotas selecionadas retornando ao processo produtivo e avaliando a recuperação mássica do nióbio e do potencial uso para os produtos de ferro.

Caracterizar através de análises microestruturais, físicas e químicas os componentes de forma a comparar com materiais de referência da bibliografia, avaliando a qualidade dos componentes e a sua adequação ao uso.

Após a realização de todos os testes, concluir quanto a viabilidade de produção dos componentes e do uso da técnica de envelopamento através da publicação de um artigo acadêmico.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos testes e caracterizações serão analisados visando obter rotas processuais e soluções de engenharia que permitam a elaboração de recuperação dos elementos de interesse, assim como o envelopamento seguro das barragens impermeabilizadas com o devido cuidado as características ambientais.

A implantação das rotas a nível industrial não faz parte das atividades desses estudos, assim como a caracterização geotécnica para a estabilidade das camadas de impermeabilização superficial.

4. CRONOGRAMA

As etapas 1, 2 e 3 descritas anteriormente já se encontram realizadas

ATIVIDADE	DURAÇÃO (ANUAL)			
	1	2	3	4
Revisão Bibliográfica	X	X	X	X
Visita a centros de referência	X	X		
Avaliação de equipamentos e técnicas disponíveis	X	X		
Selecionar rota de recuperação possível de ser realizada	X	X		
Realizar teste exploratório com rota selecionada	X	X		
Realizar teste piloto com ajustes no teste exploratório		X	X	
Realizar teste em escala industrial de recuperação			X	X
Caracterizar os componentes de rejeito e recuperados	X	X	X	X
Realizar testes in loco nos rejeitos depositados em barragens	X	X	X	
Caracterizar através de modelos o envelopamento	X	X	X	X
Analisar e concluir sobre viabilidade dos processos desenvolvidos			X	X

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CBMM, Apresentação corporativa da CBMM de 2020
- CBMM, Consulta ao website da CBMM <https://cbmm.com/pt/niobio> em 07/06/2021
- CBMM, Consulta aos documentos diversos relativos ao processo de licenciamento das Estruturas de Disposição de Rejeitos 9 (EDR9) em www.cbmm.com/licenciamentos em 16/06/2021
- FEAM, Consulta ao website <http://www.feam.br/gestao-de-barragens> em 07/07/2021
- Jovem Pan, **A revolução do nióbio**. Documentário consultado em 08/06/2021 em https://www.youtube.com/watch?v=DL_n98f_Hgs
- LAVOIE, Fernando Luiz et al. **Durability of HDPE Geomembranes: an overview**. Química Nova, São Paulo, v. 43, n. 5, p. 656-667, Maio 2020. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422020000500656&lng=en&nrm=iso acessado em 25/01/2021. Epub June 29, 2020. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170540>.
- **Lei 23291/2019**, disponível em <https://leisestaduais.com.br/mg/lei-ordinaria-n-23291-2019-minas-gerais-institui-a-politica-estadual-de-seguranca-de-barragens> acessada em 25/01/2021.
- LEMOS Jr, Marcos Antônio. **Estudo e avaliação da capacidade de barragens de rejeitos de nióbio**. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- LIU, Renzhi et al. **Accidental Water Pollution Risk Analysis of Mine Tailings Ponds in Guanting Reservoir Watershed**, Zhangjiakou City, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12, 15269–15284; doi:10.3390/ijerph121214983, www.mdpi.com/journal/ijerph acessado em 25/01/2021
- LYU, Zongjie et al. **A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History**, Advances in Civil Engineering, vol. 2019, Article ID 4159306, 18 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4159306>.

<https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/4159306/> acessado em 25/01/2021

- PEITER, Carlos Cesar et al. **Study of critical materials' production chains: opportunities and threats of the circular economy**. Technical Report – Final, CETEM/MCTIC, IBICT/MCTIC, JRC/DGGROW/EU, EESC-USP, Junho 2020.
- TITHER, Geoffrey **Progress in Niobium markets and Technology 1981-2001**. Proceedings of the International Symposium Niobium 2001, Orlando, Florida, EUA, Dezembro 2001