



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA-UFBA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SEGURANÇA DE BARRAGENS:
ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS**

NÍVEA LOUISE VIEIRA DE CARVALHO

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE COBRE
PRESENTES EM BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE
REJEITOS**

Salvador
2018

NÍVEA LOUISE VIEIRA DE CARVALHO

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE COBRE
PRESENTES EM BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE
REJEITOS**

A monografia apresentada ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens.

Orientador: Professora Dr Terezinha de Jesus Espósito
Professora de Metodologia: Msc. Alzira Ribeiro Mota

Salvador
2018


NÍVEA LOUISE VIEIRA DE CARVALHO


**REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE COBRE
PRESENTES EM BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE
REJEITOS**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de
ESPECIALISTA EM SEGURANÇA DE BARRAGENS, da Universidade Federal da
Bahia.


Aprovada em 30 de Janeiro de 2019.

Banca Examinadora

Prof.^a, Dr.^a Terezinha de Jesus Espósito 
Especialista em Engenharia de Barragens pela Universidade Federal de Ouro Preto, Mestrado
e Doutorado em Geotecnia pela Universidade de Brasília. (Orientadora)

Prof. Dr Carlos Henrique Medeiros 
Doutorado em Geotechnical Engineering, University of Newcastle Upon-Tyne, England, UK.
Ex: Titular da Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Prof. Me. Luis Edmundo Prado Campos 
Mestrado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Prof.^a Dr.^a. Yvonilde Dantas Pinto Medeiros 
Doutorado em Hidrologia, University of Newcastle Upon-Tyne, England, UK.
Universidade Federal da Bahia - UFBA

A
Toda minha família, amigos e colegas de trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos, que direta ou indiretamente contribuíram para execução deste trabalho, em especial:

Mineração Caraíba S/A por incentivar, financiar e viabilizar a oportunidade de realizar essa pós-graduação.

Ao coordenador do setor de Engenharia da MCSA, Manoel Valdemir, por incentivar e possibilitar os meus estudos.

A professora Dr. Terezinha de Jesus Espósito pela orientação e compreensão.

Aos meus pais Noemi e Lival, irmãs Neiva, Nara e Neila pelo carinho, confiança, apoio e amor de sempre.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Métodos construtivos de barragens de rejeito (a) jusante; (b) linha de centro; (c) montante.	15
Figura 2	Roteiro de amostragens e testes.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição química do rejeito de cobre da barragem da MCSA	24
Tabela 2	Parâmetros Marshall	30
Tabela 3	Quantidade e teores de rejeito por corpo de prova	30
Tabela 4	Análise química da argila e do RMSC	36
Tabela 5	Análise química da CCA, RMSC e Microssílica (*Eliminados após a calcinação)	38
Tabela 6	Formulações desenvolvidas	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Trabalhos analisados	25
Quadro 2	Simulação dos teores das etapas de produção	35
Quadro 3	Quadro resumo do trabalho	42

RESUMO

O aumento da demanda mundial por minério de cobre, decréscimo da qualidade do minério extraído, a necessidade em obedecer a Resolução ANM 04/19 e uma maior consideração sobre os impactos associados à disposição final de rejeitos têm motivado estudos que visam o reaproveitamento dos materiais contidos em barragens de rejeito da mineração. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de cobre como materiais de construção alternativos, base para regularização de pavimento, produção de ferro-gusa e escória vanadífera, uso para preenchimento de realces de mina subterrânea e finalidade agrícola. Para tanto, apresenta-se revisão bibliográfica do processo de beneficiamento do minério de cobre, composição do rejeito armazenado em barragem e reaproveitamento do mesmo; e a descrição de estudos de casos que estão presentes na literatura; Por fim, foi realizada uma análise técnica dos produtos gerados do processo de reaproveitamento do rejeito de cobre. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica do aproveitamento de rejeitos de cobre pelas empresas de mineração.

Palavras-chave: barragem de rejeito, minério de cobre, rejeitos da mineração de cobre; reaproveitamento;

ABSTRACT

The increase in world demand for copper ore, the decrease in the quality of the extracted ore, the need to comply with Resolution ANM 04/19 and a greater consideration of the impacts associated to the tailing final disposal has motivated studies that aim for the reuse of materials contained in mining tailing dams. In this scenario, the objective of this study is to evaluate the perspectives for the copper mining tailings reuse as alternative construction materials, base for pavement regularization, pig iron production and vanadium scoria, fill in underground mine enhancements and for agricultural purpose. Therefore, a bibliographical review of the copper ore beneficiation process, the tailing composition stored in dams and its reuse; and the description of case studies present in the literature; Finally, a technical analysis of the reuse process of copper waste was performed and a new process for its reuse was proposed. The results obtained demonstrate the technical viability of the copper tailing use by the mining companies.

Keywords: tailing dam, copper ore, copper mining tailing; reuse;

SUMÁRIO

1. CAPITULO I - INTRODUÇÃO	9
2. CAPÍTULO II - REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1. REJEITO DE MINERAÇÃO	13
2.2. DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	14
2.3. RESOLUÇÃO Nº 4, DE 15 DE FEVEREIRO DE 2019	16
2.4. REAPROVEITAMENTO DO REJEITO DE MINERAÇÃO.....	18
2.5. MINERAIS DE COBRE	20
2.6. RESERVAS DE COBRE.....	20
3. CAPÍTULO III – METODOLOGIA.....	25
4. CAPÍTULO IV - COMPILAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS.....	27
4.1. PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA E ESCÓRIA VANADÍFERA	27
4.2. INCORPORAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	28
4.3. APLICAÇÃO DO RESÍDUO DA MINERAÇÃO DO COBRE PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	29
4.4. PREPARAÇÃO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS A PARTIR DE REJEITOS DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE E CINZAS	31
4.5. UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE EM CERÂMICA ESTRUTURAL	31
5. CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1. PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA E ESCÓRIA VANADÍFERA	33
5.2. INCORPORAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	35
5.3. APLICAÇÃO DO RESÍDUO DA MINERAÇÃO DO COBRE PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	37
5.4. PREPARAÇÃO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS A PARTIR DE REJEITOS DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE E CINZAS.	37
5.5. UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE EM CERÂMICA ESTRUTURAL	39
6. CAPÍTULO IV - CONCLUSÃO	41
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. CAPITULO I - INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades mais antigas da humanidade e possui um papel importante no desenvolvimento econômico e social de um país. Nesta atividade há um grande inconveniente ambiental que é a geração de resíduos. O rejeito normalmente é depositado em barragens de contenção, que além de proporcionar altíssimos custos de construção e manutenção, gera risco de rompimento e desastres ambientais.

O rejeito de mineração é composto por minerais que são descartados do processo de beneficiamento, por não possuírem teor ou granulometria desejados. Segundo Lima (2006), eles são materiais fabricados cujas propriedades dependem, em um primeiro momento, das características de beneficiamento e do tipo de mineral lavrado. Posteriormente estas propriedades passam a ser afetadas também pelo modo da sua disposição final.

Nos últimos anos, com o aumento da importância da preservação ambiental, de investimento em tecnologia de beneficiamento de minérios e o empobrecimento das jazidas de minério com alto teor metálico existentes, fez com que surgisse a necessidade em buscar alternativas para tratamento, reutilização e aplicação em outras áreas do rejeito presente nas barragens de contenção de rejeito.

Além disso, no dia 18 de fevereiro de 2019 foi publicada a **Resolução ANM 04/19**, na qual a Agência Nacional de Mineração (ANM) objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido, ordenou a desativação e descomissionamento ou descaracterização dessas barragens de rejeito até 15 de agosto de 2021. Fazendo-se assim necessário o desenvolvimento de projetos para diminuição do volume do rejeito presente nesse tipo de barragens de contenção, desenvolvimento de novas técnicas de deposição e reaproveitamento do rejeito.

Atualmente o cobre é um dos metais mais produzidos e utilizados no mundo, sendo empregado principalmente na base da indústria elétrica e de equipamentos devido a sua característica de excelente condutor elétrico. O empobrecimento das jazidas de minério de

cobre ocorre paralelamente ao crescimento da demanda desse mineral no mercado internacional, forçando as empresas mineradoras a investirem no aperfeiçoamento de suas operações, no desenvolvimento de novas tecnologias e a reutilização dos rejeitos armazenados nas barragens.

A metodologia empregada nesse trabalho envolveu revisão bibliográfica do processo de beneficiamento do minério de cobre, composição do rejeito armazenado em barragem de contenção e reaproveitamento do mesmo; e a descrição de estudos de casos que estão presentes na literatura; Por fim, foi realizada uma análise técnica dos produtos gerados do processo de reaproveitamento do rejeito de cobre.

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica do aproveitamento de rejeitos de cobre, por meio do seu emprego na fabricação de blocos e revestimentos cerâmicos, regularização de pavimentos, produção de ferro-gusa e escória vanadífera, uso para preenchimento de realces de mina subterrânea e finalidade agrícola.

1.1. OBJETIVO

Esse estudo teve como objetivo principal realizar uma análise técnica do aproveitamento de rejeito de minério de cobre na fabricação de materiais de construção, produção de outros minerais, regularização de pavimentos e preenchimento de realces de mina subterrânea.

1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVANCIA DO TRABALHO

O setor de mineração nos últimos anos tem enfrentado grandes problemas ambientais com a disposição dos rejeitos de minério, pois a exploração crescente de jazidas de baixos teores fez com que houvesse o aumento do volume de rejeitos gerados e consequentemente a necessidade de ampliação e construção de novas barragens de contenção de rejeito.

O rompimento da barragem de rejeito de Fundão em Mariana-MG (2015) pertencente a mineradora Samarco ocasionou o maior impacto ambiental do Brasil e constatou a fragilidade da segurança e fiscalização das barragens de rejeitos presentes no país. Tragédia que se repetiu em 25 de janeiro de 2019 na barragem de rejeito do Córrego do Feijão em Brumadinho-MG. Surgindo assim a necessidade de desenvolvimento de processos para o reaproveitamento do rejeito contidos nas barragens.

Em virtude do histórico recente de rompimentos de barragens de mineração (Itabirito, em 2014; Mariana, em 2015; e Brumadinho, em 2019, todas no Estado de Minas Gerais), a Agência Nacional de Barragens publicou no dia 18 de fevereiro de 2019 a Resolução ANM 04/19, em que objetivou assegurar a estabilidade de barragens de mineração “a montante”. Ficando definido que as empresas detentoras desse tipo de barragem de contenção desenvolvam novas formas de deposição e eliminem as existentes.

O reaproveitamento de rejeito presente em barragens de contenção gera benefícios econômicos e ambientais, como o aumento da vida útil da mina pertencente a mineradora e possibilita o atendimento da resolução ANM 04/19. Além de gerar benefícios diretos para a sociedade e o meio ambiente, pois os recursos minerais serão explorados de forma mais sustentável e diminuiria a necessidade de construção de novas barragens.

2. CAPÍTULO II - REVISÃO DE LITERATURA

Esse capítulo apresenta uma revisão sobre rejeito de mineração, disposição do rejeito nas empresas mineradoras, reaproveitamento de rejeitos de minério, minério de cobre e reservas de cobre existentes.

2.1. REJEITO DE MINERAÇÃO

Rejeito de mineração é todo material resultante de processos químicos e físicos que surgem da extração e beneficiamento dos metais. Sendo a atividade de mineração geradora de uma grande quantidade de rejeito, a qual cresce em função do aumento da produção mundial de minério, à exaustão de jazidas de maior teor e a entrada em operação de jazidas de baixo teor.

Os rejeitos são produtos inevitáveis dos processos de tratamento a que são submetidos os minérios, sendo gerados, paralelamente, ao material de interesse. Estes, por sua vez, impactam o meio ambiente, por ocuparem grandes áreas para sua disposição, causarem supressão da vegetação e afetarem a qualidade física e química de águas superficiais e subterrâneas, entre outros. Associa-se ainda às barragens de rejeito os riscos ambientais e à segurança de um rompimento das estruturas de contenção. Por este motivo, os rejeitos são motivo de preocupação cada vez maior nas empresas, que buscam minimizar os impactos ambientais e os custos associados aos processos de disposição, contenção e fechamento de barragens de rejeito (PORTES, 2013).

Estes resíduos, de modo geral, podem ser pilhas de minérios pobres, estéreis, rochas, sedimentos, solos, aparas e lamas das serrarias de mármore e granito, as polpas de decantação de efluentes, finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento. Sendo a quantidade de resíduos gerados por uma mineração dependente do método de lavra utilizado (céu aberto ou subterrâneo) e ao teor do mineral de minério presente na rocha de interesse.

2.2. DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Nos últimos anos, as empresas de mineração têm investido em estudos de novas possibilidades de disposição de rejeitos. No Brasil, a disposição de rejeitos em forma de polpa ainda é a mais utilizada e requer grandes estruturas de terra (barragens) para contenção dos rejeitos.

Para disposição dos rejeitos é essencial considerar os aspectos intrínsecos da construção e da segurança, além da estanqueidade do reservatório formado para conter o material. A forma de disposição dos rejeitos está relacionado com o tipo de minério, das condições geológicas e topográficas da região, das condições climáticas e processo empregado para o seu beneficiamento.

Os rejeitos podem ser encontrados sob a forma de pasta ou granel (solida), polpa de água com sólidos ou lama (liquida), podendo sua disposição ser feita em pilhas, em cavidades subterrâneas, cavas exauridas de minas, por empilhamento a seco ou em barragens de contenção de rejeitos.

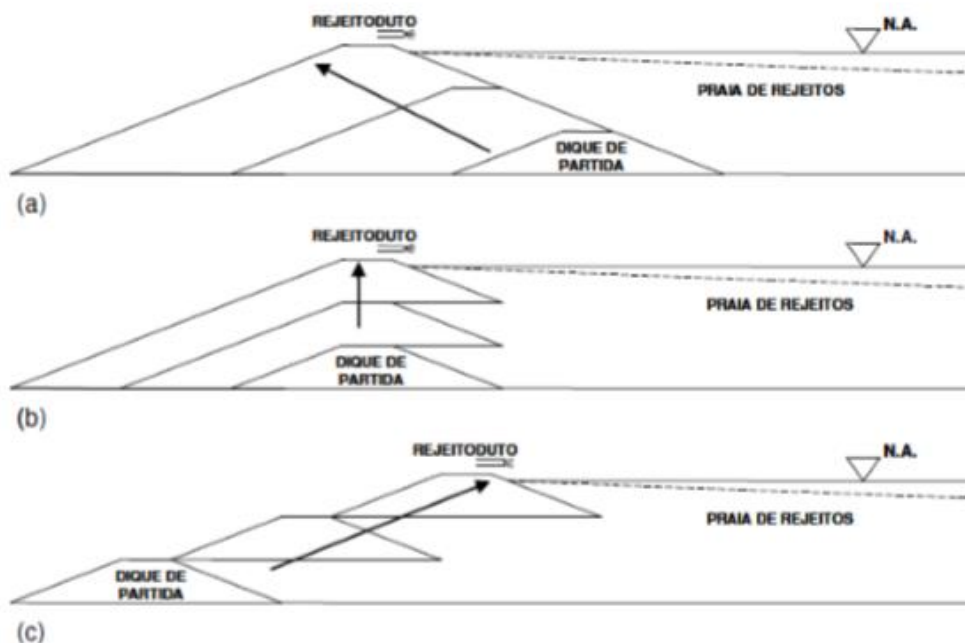
As barragens de contenção de rejeitos são estruturas idealizadas ao longo do tempo por meio de alteamentos sucessivos. Assim, é construído um dique de partida inicialmente e a barragem passa por alteamentos ao longo de sua vida útil, podendo ser construídas com material compactado proveniente de áreas de empréstimo, ou com o próprio rejeito, através dos métodos a montante, a jusante e em linha de centro.

O método de montante é o mais antigo, simples e econômico método de construção de barragens. A etapa inicial na execução deste tipo de barragem consiste na construção de um dique de partida, normalmente de material argiloso ou enrocamento compactado. Após realizada esta etapa, o rejeito é lançado por canhões em direção a montante da linha de simetria do dique, formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o próximo alteamento. Este processo continua sucessivamente até que a cota final previsto em projeto seja atingida (ARAUJO,2006).

Já o método de jusante consiste na construção de um dique de partida em que os alteamentos subsequentes são realizados para jusante do dique de partida. Enquanto que, o método em linha centro consiste em uma disposição intermediária entre os dois métodos citados anteriormente.

Segundo Araújo (2006), a escolha de um ou outro método de execução irá depender de uma série de fatores, tais como: tipo de processo industrial, características geotécnicas e nível de produção de rejeitos, necessidade de reservar água, necessidade de controle de água percolada, sismicidade, topografia, hidrologia, hidrogeologia e custos envolvidos. No entanto, como as barragens alteadas pelo método de montante têm se mostrado de maior facilidade de execução e mais economicamente viáveis, essas têm sido as preferencialmente adotadas pelas empresas mineradora. A figura 1 ilustra os três principais tipos de barragem de contenção empregadas pelas empresas de mineração.

Figura 1- Métodos construtivos de barragens de rejeito (a) jusante; (b) linha de centro; (c) montante.



Fonte: Araújo (2006)

As empresa de mineração, visando reduzir os altos custos de construção e manutenção de barragens, vêm procurando novas alternativas para dispor o rejeito de maneira mais econômica e sustentável. Assim, diversas alternativas têm sido estudadas e adotadas como o método de disposição através de empilhamento drenado.

Segundo Portes (2013) na técnica de disposição de rejeito por empilhamento drenado, os rejeitos granulares são depositados sob a forma de pilha, através da técnica de aterro hidráulico. A pilha deve ser dotada de um sistema de drenagem interna eficiente e os rejeitos devem ter coeficiente de permeabilidade tal que permitam a drenagem da camada lançada de forma otimizada com a área operacional disponível e a produção diária.

2.3. RESOLUÇÃO Nº 4, DE 15 DE FEVEREIRO DE 2019

A AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM considerando o histórico recente de rompimentos de barragens de mineração construídas e alteadas pelo método construtivo "a montante" (em especial da barragem de Fundão da Mina Germano em Mariana-MG e a barragem da mina Córrego do Feijão em Brumadinho-MG), publicou-se a resolução Nº 4 em 15 de fevereiro de 2019.

Segundo o banco de dados da ANM, existem atualmente oitenta e quatro barragens de mineração construídas ou alteadas pelo método "a montante" ou por método declarado como desconhecido na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB. Surgiu assim a necessidade de adoção imediata, pela ANM, de medidas reguladoras cautelares visando reduzir o risco real de novos incidentes de rompimento de barragem e a prevenir novas tragédias.

As principais medidas descritas na resolução Nº 4 está a proibição da utilização do método de construção ou alteamento de barragens de mineração denominado "a montante" em todo o território nacional; Os empreendedores responsáveis por barragens de mineração inseridas na PNSB, independentemente do método construtivo adotado, ficam proibidos de manter ou construir qualquer instalação na Zona de Autossalvamento – ZAS e de barramento para armazenamento de efluente líquido a jusante da barragem; As instalações, obras, serviços e

barragens de efluentes líquidos existentes devem ser desativados e descomissionados ou descaracterizados até 15 de agosto de 2019 (para as instalações, obras e serviços) e 15 de agosto de 2020 (para os barramentos).

A ANM exigirá do empreendedor a utilização de método alternativo de disposição de rejeito, caso a construção ou ampliação da barragem se mostre inadequada, mesmo após consideradas as alternativas locais; Os projetistas responsáveis devem estabelecer os fatores de segurança mínimos para as barragens de mineração inseridas na PNSB, independentemente do método construtivo adotado; As barragens de mineração inseridas na PNSB devem contar com sistemas automatizados de acionamento de sirenes na ZAS, em local seguro e dotado de modo contra falhas em caso de rompimento da estrutura.

Visando reduzir ou eliminar o risco de rompimento, em especial por liquefação, das barragens construídas ou alteadas pelo método a montante ou por método declarado como desconhecido, o empreendedor deverá concluir a elaboração de projeto técnico de descomissionamento ou descaracterização da estrutura (até 15 de agosto de 2019); Até 15 de fevereiro de 2020, concluir as obras de reforço da barragem à jusante ou a construção de nova estrutura de contenção à jusante, conforme estiver previsto no projeto técnico; E até 15 de agosto de 2021, concluir o descomissionamento ou a descaracterização da barragem.

Essa resolução descreve também que os empreendedores com barragens de mineração para disposição de rejeitos, em operação, independentemente do método construtivo, deverão, até 15 de agosto de 2019, concluir estudos voltados à identificação e implementação de soluções voltados à redução do aporte de água nas barragens.

Assim, o reaproveitamento do rejeito presente em barragens de contenção poderá ser utilizado como método para diminuir o volume presente nas barragens, contribuindo para sua estabilidade e conseqüentemente sua segurança. E em barragens “a montante” poderá ser utilizado para o seu descomissionamento.

2.4. REAPROVEITAMENTO DO REJEITO DE MINERAÇÃO

As barragens de rejeito são construídas em grandes áreas e dão origem a inúmeros impactos ambientais aos meios físico, biológico e de ecossistemas naturais e socioeconômico de seu entorno. Além disso, existem o risco do rompimento repentino, como o que ocorreu na barragens de rejeito da mineração Herculano na mina de exploração de ferro Retiro do Sapecado no Quadrilátero Ferrífero/MG (2014) e o rompimento da barragem de rejeito de Fundão, da mineradora Samarco, também no Quadrilátero Ferrífero/MG (2015). Visando diminuir a possibilidade de novos acidente em barragens, o impacto ambiental existe e obter lucros, as empresas do ramo de mineração tem investido em pesquisas para viabilização do reaproveitamento do seu rejeito.

O processo de reaproveitamento só é possível devido à presença nas barragens de material com altos teores de minério. Pois por muitos anos, foram extraídos minérios de alto teor e o seu beneficiamento foi feito por técnicas com baixa eficiência, gerando assim um rejeito rico em minério. Os usos alternativos para os resíduos de barragens de rejeito estão diretamente ligados à sua composição, sendo determinante que se proceda ao levantamento de suas propriedades visando seu reaproveitamento.

O material presente nas barragens de rejeitos poderá ser submetido a processos físicos e químicos, os quais possibilitaram a recuperação dos metais existentes, como ouro e ferro. Podendo ser empregado também no preenchimento de cavas exauridas de minas, ou seja, a polpa de rejeitos é lançada nas cavas a céu aberto, com a finalidade de reduzir a disposição na barragem de rejeito existente e eliminar a implantação de nova barragem ou aumentar a vida útil da barragem existente.

Outro uso para o rejeito de mineração é o preenchimento de realces em mina subterrânea. Para isso a polpa do rejeito adensada é bombeada para a planta de pastefill, onde é adicionado água ou polpa para corrigir a densidade do material e cimento para produzir a pasta. Segundo Figueiredo (2007), a disposição de rejeito em abertura subterrânea, seja na forma de polpa,

pasta ou até mesmo material consolidado, geralmente é feita concomitantemente com o método de lavra chamado de corte e enchimento, onde o material preenche os realces gerados pela exploração do minério.

Segundo Rodrigues (2017) o preenchimento de minas subterrâneas com rejeito de minérios pode ser realizado por meio de duas técnicas, escolhidas em função da demanda da operação. A primeira corresponde à necessidade de preenchimento para formar um novo piso, a ser utilizado para desmontar a fatia de minério imediatamente acima da área lavrada. Neste caso, o preenchimento ocorre obrigatoriamente junto com a lavra do minério e pode ser feito com a utilização dos rejeitos misturados com estéril e areias (backfill ou pastefill). A segunda técnica se aplica quando o preenchimento da câmara ou realce é necessário para garantir a manutenção permanente da estabilidade do maciço rochoso. Neste caso o preenchimento pode se dar durante o processo de lavra ou durante o fechamento da mina, podendo ser realizado com argamassa constituída de rejeito (pastefill) e/ou estéril, areia e cimento, para se obter melhores propriedades geotécnicas para a mistura.

Existem casos em que os rejeitos do beneficiamento do minério apresentam potencial para aproveitamento agrícola, como o pó de calcário industrial que poderá ser destinado como corretivo do pH de solos para atender as necessidades do mercado agrícola regional. Além de possibilitar o seu aproveitamento industrial: nas indústrias da cerâmica, do vidro, da construção civil, metalúrgica, química e no artesanato, na confecção de pavimentos e tijolos, dentre outros.

Existem diversas pesquisas que comprovam a eficiência do uso de rejeito na confecção de materiais de construção, como as que estão sendo realizadas na Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP juntamente com a iniciativa privada para a utilização de rejeito da extração do minério de ferro para a fabricação de insumos para a construção civil. Estudo que foi confirmado na pesquisa realizada pela Universidade Federal de Viçosa, a qual demonstrou que os rejeitos de minério de ferro apresentam grande potencial de uso, especialmente quando melhorados com cimento para aplicação como argamassa, blocos de pavimentação e alvenaria.

2.5. MINERAIS DE COBRE

O cobre na forma de metal puro é raramente encontrado na crosta terrestre, sendo a calcopirita (CuFeS_2) o mineral mais comum e a principal fonte de cobre. Os minerais podem se dividir basicamente em sulfetados, oxidados, carbonatados e silicatados. Eles também podem receber a classificação de mineral primário (sulfetados) e mineral secundário (oxidados, carbonatados e silicatados). Sendo os minerais primários encontrados em maiores profundidades, enquanto que os secundários são de origem mais superficial.

O cobre é extraído de minerais sulfetados através de processos pirometalúrgicos como redução, fusão, conversão e refino. Antes de alimentar os processos pirometalúrgicos é necessário enriquecer o minério sulfetado. Como o minério disponível é muito diluído (concentração menor que 2%) a massa a ser processada seria muito grande, assim o enriquecimento ocorre através de várias etapas físicas, constituindo o processo de beneficiamento mineral que envolve: britagem, peneiramento, moagem, flotação, sendo esta última a etapa de concentração. O concentrado obtido apresenta geralmente teor de cobre entre 30 e 35% (Davenport, 2002).

Os minerais oxidados são tratados através de processos hidrometalúrgicos como lixiviação, extração por solventes e eletrorecuperação. Geralmente não é necessário realizar a etapa prévia de concentração mineral.

2.6. RESERVAS DE COBRE

As reservas de cobre conhecidas no mundo se situam em torno de 01 (um) bilhão de toneladas de cobre contido. Geograficamente metade das reservas se localiza no continente Sul Americano. O Chile com maior participação (36%, mais de um terço das reservas) seguida pelo Peru com 12% (2ª maior reserva mundial) e Brasil com 1,7% (DA SILVA, 2011).

Segundo o DNPM, no Brasil as reservas são de aproximadamente 17,3 milhões de toneladas de cobre contido. Sendo o principal estado detentor das reservas é o Pará com mais de 80% do total, seguido por Goiás e Bahia, com 7% e 5% respectivamente.

2.7. BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE COBRE

Na mineração de cobre o circuito típico de beneficiamento é constituído por britagem primária, seguida por pilha de regularização, transporte do ROM (*Run of mine*) britado até a planta de moagem/concentração, moagem, flotação de sulfetos e separação de sólido/líquido.

Os equipamentos que são empregados no processo de britagem são definidos de acordo com o tipo de minério, características do clima (influencia na umidade dos minérios, entre outras coisas) e capacidade da planta. A função principal do britador é possibilitar a redução de grandes blocos (matacos) com dimensões em torno de 1m para tamanho próximo a 200 mm de modo a propiciar o transporte através de correias transportadoras e possibilitar a alimentação da moagem SAG.

A moagem é a etapa que propiciar a liberação dos minerais de cobre presentes no minério. Os minerais de cobre devem estar fisicamente independentes dos demais minerais sem interesse, como sílica, pirita, etc. Ela pode ser realizada com moinho SAG (semi-autôgeno) e moinho de bolas.

O material moído é descarregado em peneira classificadora (vibratória inclinada), para realizar a separação do material com granulometria de 12 mm dos demais. O material retido segue para uma nova britagem realizada em britadores de cone e o passante da peneira é bombeado para alimentar a classificação realizada em hidrociclones (overflow segue para a flotação e o underflow alimenta a moagem de bolas por gravidade).

A flotação é o processo de separação de partículas minerais realizada em meio aquoso e com presença de fase gasosa através de fluxo de ar induzido. A separação se baseia nas diferenças de comportamento da partícula em função da característica de sua superfície, que pode apresentar diferentes níveis de hidrofobicidade (aversão pela água). A grande maioria dos minerais apresenta a superfície naturalmente hidrofílica, entretanto com o uso de reagentes específicos a característica da superfície pode ser alterada de hidrofílica para hidrofóbica. Assim os coletores (reagentes com estrutura polar e apolar ao mesmo tempo) se une aos minerais, absorvendo a sua estrutura polar, e a parte apolar do reagente fica exposta e confere

caráter hidrofóbico à superfície permitindo a combinação e a ligação com o ar, e com isso promovendo a separação das partículas.

As bolhas de ar que capturam as partículas minerais para terem instabilidade são misturadas a um reagente químico chamado espumante, permitindo assim a formação de espuma carregada com o mineral de interesse. Outros reagentes utilizados na flotação chamados de modificadores ou reguladores têm por objetivo ajustar as condições do sistema de flotação como o pH, o nível de potencial, auxiliar na ação do coletor, intensificar a característica hidrofílica (neste caso chamado de depressor) e controlar o estado de dispersão das partículas (Chaves, 2006).

Os coletores mais utilizados na flotação de sulfetos são Xantato (para minerais oxidados), Ditioposfato (minerais de cobre e zinco), Ditiocarbonato (mesma utilização do Xantato, porém mais caro), Éster Xânico (para sulfetos e cobre) e Mercaptobenzotiazol (para minerais de cobre e chumbo). Enquanto que, os espumantes mais empregados na flotação de cobre são Metil Isobutil Carbinol (MIBC) e o Propileno Glicol.

Na flotação de sulfetos é comum o uso de modificadores, os quais são utilizados para realizar a remoção da pirita através da elevação do pH. A pirita (FeS_2) é o mineral sulfetado mais comum nos minérios de cobre, porém não possui interesse econômico e são removidos pelo uso de reagente como a cal (CaO).

A flotação gera dois produtos finais, o concentrado que sairá pela parte superior da célula de flotação e seguirá para o processo de separação sólido/liquido e o rejeito, o qual sairá pela parte inferior da célula e será bombeado para barragem de contenção de rejeito. Podendo o rejeito passar por espessadores, com o objetivo de recuperar a água e diminuir o volume lançado na barragem.

O concentrado obtido na etapa de flotação é uma polpa com geralmente 25-30% de sólidos em peso e deve ser processado para facilitar o manuseio, ser estocado e transportado economicamente para posteriormente alimentar a etapa de extração metalúrgica. O processo de separação sólido/liquido tem início com os espaçadores, onde com ajuda dos floculantes se

recupera até 60-65% de sólidos em peso (seguindo para filtragem) e a água resultante da separação segue para o sistema de recuperação de água da planta.

Para a filtragem de minérios de cobre podem se utilizar filtros de discos a vácuo, filtros de tambor a vácuo, filtros prensa e filtros com meio filtrante de cerâmica. O mais utilizado atualmente é o filtro prensa, especialmente em razão da maior dificuldade para filtrar concentrados obtidos de minérios que exigem tamanhos mais finos para a liberação. Após a conclusão da filtragem, o concentrado de cobre segue para o pátio de manuseio e estocagem de concentrado.

2.8. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE REJEITO DE MINÉRIO DE COBRE

A caracterização, até bem pouco tempo, era pouco aplicada a rejeitos de usinas de beneficiamento de minérios, sendo esses descartados sem maiores conhecimentos de suas características físicas, químicas e mineralógicas e de sua resposta ao processo de concentração da fração mineral valiosa contida. Nos últimos anos, isto vem mudando, não só pela maior preocupação com questões ambientais, como também em alguns casos, devido à escassez do minério e à depleção de reservas, com a consequente diminuição dos teores das minas (Borges, 2008).

Os rejeitos de mineração formam um sistema particulado semelhante ao solo natural, apresentando comportamento geomecânico e hidráulico caracterizado em termos de resistência, permeabilidade, densidade e grau de saturação, dentre outras variáveis (Penna, 2008). O tamanho das partículas de rejeito se encontra tipicamente na faixa de partículas de areias finas e siltes. As características químicas dos rejeitos variam de acordo com o mineral de interesse e as substâncias químicas envolvidas no processo de concentração adotado.

No caso dos rejeitos de minério de cobre, mesmo considerando toda a sua heterogeneidade associada ao teor de cobre e ao processo de beneficiamento, estes não apresentam plasticidade. Embora os rejeitos apresentem classificações granulométricas e algumas características geotécnicas bem definidas, o seu comportamento não deve ser avaliado

unicamente através dos critérios convencionais.

Pignaton (2010) cita as composições químicas do rejeito gerado no processo de beneficiamento, da mina de cobre localizada no município de Jaguarari-BA e pertencente a empresa Mineração Caraíba S/A. Segundo o autor, as amostras retiradas da barragem de rejeito é constituída quimicamente em maior escala por SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO e CaO e em menor escala por V_2O_5 , TiO_2 , P_2O_5 e CuO . Ele fez também a composição mineralógica, na qual apontava a presença de piroxênio (40%), feldspato (30%), mica (10%), magnetita (4%), ilmenita (0,9%), entre outros. A tabela 1 descreve a composição química do rejeito de cobre presente na barragem de contenção da empresa Mineração Caraíba S/A (MCSA).

Tabela 1 – Composição química do rejeito de cobre da barragem da MCSA

Óxido	(%)
V_2O_5	0,05
TiO_2	0,97
CuO	0,32
Al_2O_3	12,4
SiO_2	49,5
Fe_2O_3	15,7
MgO	9,17
CaO	5,8
Na_2O	2,36
K_2O	0,93
P_2O_5	0,67
SO_3	0,45
PF	1,19

Fonte: Pignaton (2010)

3. CAPITULO III – METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se inicialmente na consulta de artigos, dissertações e teses que abordavam como tema reaproveitamento de rejeito de cobre presentes em barragens de contenção de rejeitos. Diante destes trabalhos, foram escolhidos cinco para retirada de dados e posteriormente análise da viabilidade técnica do aproveitamento de rejeitos de cobre presente em barragem de contenção. O Quadro 1 mostra os trabalhos analisados, sua localização e os produtos obtidos pelo reaproveitamento do rejeito contido nas barragens de contenção.

Quadro 1- Trabalhos analisados

Autor	Localização da barragem de contenção de rejeito	Empresa proprietária	Título do trabalho
Pignaton (2010)	Distrito Pilar – Jaguarari-BA	Mineração Caraíba S.A	Produção de ferro-gusa e escória vanadífera a partir de rejeitos da mineração caraíba
Pinheiro; Rabelo; Acchar; Oliveira (2014)	Canaã dos Carajás - Pará	Vale S.A.	Incorporação de rejeito de minério sulfetado de cobre nas propriedades tecnológicas de revestimentos cerâmicos
Kato (2017)	Não informado	Não informado	Aplicação do resíduo da mineração do cobre para melhoria do desempenho de misturas asfálticas
Da Silva; Neto (2017)	Não informado	Não informado	Preparação de argamassas geopoliméricas a partir de rejeitos de minério sulfetado de cobre e cinzas
Castro; Costa; Tavares; Neto; Rabelo (2015)	Carajás – PA	Vale S.A	Utilização de rejeito de minério sulfetado de Cobre em cerâmica estrutural

Fonte: Autor (2018)

Os trabalhos que foram utilizados como referência têm suas amostras retiradas de barragens de contenção de rejeito sulfetado de cobre. Portanto, a composição química e mineralógica das amostras de rejeito empregadas é praticamente iguais o que já foi descrito na revisão bibliográfica.

Todos os estudos mencionados no quadro 1 apresentam praticamente as mesmas metodologias para viabilizar tecnicamente o aproveitamento de rejeito de cobre presente em barragens de contenção. Inicialmente foi realizado os ensaios de caracterização das amostras, mistura do rejeito com outros materiais, processo de beneficiamento do rejeito e análise física e mecânica dos produtos obtidos.

4. CAPÍTULO IV - COMPILAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS

Neste trabalho buscou-se avaliar os processos e materiais gerados do reaproveitamento de rejeito de cobre presentes em barragens de contenção existentes na literatura. Para isto, inicialmente realizou-se a coleta de dados dos processos adotados nos estudos referenciais.

4.1. PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA E ESCÓRIA VANADÍFERA

O trabalho de Pignaton (2010) estudou a possibilidade de recuperação da magnetita e do pentóxido de vanádio contidos na barragem de rejeitos da empresa Mineração Caraíba S/A (MCSA), através de uma rota por concentração magnética e pirometalúrgica, até se chegar aos produtos ferro-gusa e escória vanadífera.

Segundo o autor a barragem de contenção de rejeito de cobre da MCSA possui aproximadamente 700 ha de extensão e uma massa de rejeito de 71 milhões de toneladas, contendo de 3 a 4% de magnetita e 0,05% de pentóxido de vanádio. Para recuperação do material da barragem o estudo mostrou que a melhor forma é através de desmonte hidráulico seguido de bombeamento até a usina de beneficiamento.

A produção do pentóxido de vanádio a partir do rejeito de cobre foi possível em decorrência da presença de minerais necessários para produção desse material nas amostras estudadas. A composição mineral desse pentóxido baseasse em magnetita (50%), mica (22), piroxênio (20) e ilmenita (8%).

A pesquisa teve início com a coleta e homogeneização de amostras da barragem, as quais foram enviadas para realização de testes de caracterização em laboratórios. Os resultados obtidos possibilitaram o conhecimento das faixas granulométricas, a quantidade dos minerais de interesse e a proporção do vanádio associado à magnetita. Dentre as técnicas utilizadas estão difratometria de raios-x, fluorescência de raios-x, espectrofotometria por absorção atômica, QEM-SCAN, ICP, microscopia eletrônica de varredura (EDS/WDS).

Após a etapa de caracterização das amostras, Pignaton (2010) escolheu como processo de concentração o método de concentração magnética. O processo de separação magnética, segundo Sampaio e Luz (2004), é um método bastante consagrado na área de processamento mineral, tanto para separação quanto para concentração, e sua propriedade diferenciadora é a susceptibilidade magnética, sendo assim, os minerais podem ser atraídos ou repelidos por um campo magnético. Quando ocorre forte atração ao campo magnético diz-se que os minerais são ferromagnéticos, quando ocorre fraca atração diz-se que são paramagnéticos e quando há repulsão são diamagnéticos. No estudo em análise, a magnetita que possui vanádio associado é ferromagnética, a ilmenita é fortemente paramagnética e os demais minerais são diamagnéticos ou fracamente paramagnéticos.

Os processos seguintes adotados foram a sinterização, fusão redutora e escorificação do gusa fundido para separação da escória rica em vanádio do ferro-gusa. A sinterização é um processo de aglomeração de finos, adequando a sua granulometria, para que os mesmos possam ser utilizados em fornos metalúrgicos. O processo consistiu na aglomeração de finos de minério, finos de redutor (coque ou carvão vegetal), fundente e água. Formando assim microaglomerados.

O material gerado na sinterização seguiu para o processo de fusão redutora, o qual foi feito em mini alto-forno (MAF) a carvão vegetal. Já para a recuperação do vanádio foi adotado o processo de lixiviação da escória rica em vanádio proveniente da injeção de oxigênio em ferro-gusa líquido. Possibilitando no final do processo obter a produção de ferro-gusa e escória vanadífera.

4.2. INCORPORAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

O trabalho em análise teve como objetivo avaliar a viabilidade do reaproveitamento do minério sulfetado de cobre incorporado em formulações de porcelanato, analisando sua influência nas propriedades tecnológicas do material e a sua viabilidade econômica. As amostras de rejeito empregadas no estudo foram provenientes do beneficiamento do minério de cobre sulfetado (RMSC) realizado na mina do Sossego, da empresa Vale, em Canaã dos

Carajás – Pará.

A pesquisa teve início com a coleta e homogeneização de amostras, posteriormente mistura do rejeito com argila de baixo teor Fe_2O_3 (proveniente da região de São Bento no Tocantins), feldspato sódico, caulim processado da empresa Ímerys, e filito da região de Marabá (sudeste paraense). A metodologia empregada consistiu na substituição parcial da argila pelo RMSC, baseando-se na incorporação de 3, 6, 9 e 12% desse material em substituição parcial da argila.

A preparação da massa cerâmica foi iniciada com a secagem da matéria-prima em estufa a 100°C , seguida de seu peneiramento em malha de 150 μm e da sua homogeneização realizada por meio de moagem via úmido, sendo adicionado à mistura silicato de sódio (defloculante). Posteriormente, realizou-se uma secagem, maceramento em almofariz e novamente a mistura foi peneirada em malha de 150 μm . Sendo confeccionados um total de 15 corpos de prova para cada formulação, os quais passaram pelo processo de secagem em estufa, por 24 horas e à uma temperatura de 100°C . Tendo-se, após este período, realizado uma pré-queima.

Finalizado a pré-queima dos corpos de prova, eles foram submetidos a ensaios físicos referentes à determinação da absorção de água, retração linear de queima, densidade aparente e porosidade aparente, além de ensaio mecânico, para determinar sua resistência através do ensaio de ruptura à flexão.

4.3. APLICAÇÃO DO RESÍDUO DA MINERAÇÃO DO COBRE PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O artigo teve como objetivo verificar o desempenho de misturas asfálticas frente as propriedades Marshall, quando adicionado resíduo da mineração do cobre em sua composição. Para se atingir este objetivo foi realizada a caracterização dos materiais, procedendo posteriormente a dosagem Marshall preconizada pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte).

O parâmetro de Marshall utilizado no estudo está relacionado a porcentagem de vazios, sendo

este o principal parâmetro para a dosagem de misturas asfálticas, juntamente com sua estabilidade e resistência a tração, seguindo os parâmetros do DNIT (Departamento de Infraestrutura de Transportes). A tabela 2 descreve dois dos parâmetros de Marshall adotados pelo estudo.

Tabela 2- Parâmetros Marshall

Parâmetros Marshall	Método de Ensaio	Camada de Rolamento
Porcentagem de Vazios	DNER-ME 043	3 a 5
Estabilidade Mínima (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500

Fonte: DNIT031/2006 ES.

Para desenvolvimento da pesquisa, inicialmente foi realizada a caracterização dos materiais empregados na fabricação dos corpos de prova (seixo rolado de rio e areia de cava) e o rejeito de cobre. Sendo a areia fina utilizada na confecção dos corpos de prova procedente da jazida de Nova Timboteua e o seixo fino proveniente da jazida Ourém. Já o rejeito caracterizou-se como um agregado miúdo muito fino. Após caracterização dos agregados foi estabelecido como dosagem piloto, ou amostra branca, a composição de 75% de seixo e 25% de areia. Sendo essa amostra utilizada como base para substituição gradativa da areia por rejeito, originando mais 3 dosagens: com 10% de rejeito, com 20% de rejeito e com 25% de rejeito. A tabela 3 mostra a quantidade e teores de rejeito por corpo de prova.

Tabela 3- Quantidade e teores de rejeito por corpo de prova.

DOSAGEM	QUANT. DE CP's
Piloto (75% de seixo + 25% areia)	15
10% Rejeito (75% de seixo + 15% areia + 10% de rejeito)	15
20% Rejeito (75% de seixo + 5% areia + 50% de rejeito)	15
25% Rejeito (75% de seixo + 25% de rejeito)	15
TOTAL DE CP's	60

Fonte: KATO (2017)

4.4. PREPARAÇÃO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS A PARTIR DE REJEITOS DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE E CINZAS

A pesquisa em análise teve como objetivo desenvolver uma argamassa geopolimérica a base de cinza de casca de arroz (CCA), rejeito de minério sulfetado de cobre (RMSC) e uma fonte de sílica (SiO_2). Os geopolímeros são polímeros inorgânicos cuja obtenção se dá pela polimerização de matérias-primas naturais de origem geológica contendo aluminossilicatos. Sendo empregados na produção do cimento de espuma, material leve que é utilizado na indústria da construção, especialmente para habitação pré-fabricada, como na fabricação de blocos de baixa densidade.

Para iniciar o estudo, foram discutidas quais matérias primas se tornariam viáveis e quais iriam melhorar em algum aspecto o desenvolvimento do trabalho. Levando em consideração a disponibilidade e a qualidade foi escolhido a cinza de casca de arroz (CCA) como fonte de sílica e o rejeito de minério sulfetado de cobre (RMSC) como outra matéria prima. Para serem aplicados na confecção das argamassas deste trabalho, os materiais passaram por análise das suas composições químicas, por processo de calcinação na temperatura de 600°C durante 4 horas, adição de solução ativadora NaOH e de microssílica (fonte de SiO_2).

Para teste de formulações foram feitas a adição de 70% de CCA, 30% de RMSC, 30% de microssílica e 70% de RMSC. Esses materiais foram misturados em um recipiente de plástico com adição de 100 ml de NaOH. A mistura resultante foi inserida em molde de PVC com as medidas de 2,5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, isolados individualmente com filme plástico de polietileno. Logo após o processo de cura dos corpos de prova (28 dias), foi realizada a avaliação mecânica e química dos corpos de prova, por meio de microscopia eletrônica de varredura, difratograma de raios-X e infravermelho.

4.5. UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE EM CERÂMICA ESTRUTURAL

O estudo em questão teve por objetivo analisar o efeito da incorporação do rejeito de minério sulfetado de cobre em três formulações argilosas para cerâmicas estruturais. Segundo os autores do estudo, a cerâmica estrutural caracteriza-se pela cor vermelha de seus produtos, como em tijolos, blocos, telhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais, agregados leves de argila expandida e outros.

A utilização do rejeito sulfetado de cobre na substituição da argila teve como principal objetivo a melhoria das propriedades mecânicas do material cerâmico em questão, bem como a economia de energia para a produção. A amostra de rejeito empregado na pesquisa foi coletado em uma das minas de exploração da Vale em Carajás – PA, e a argila foi adquirida em uma fábrica de cerâmicas estruturais em Marabá – PA. Para iniciar o estudo, foi definido três formulações para produção da cerâmica (relação argilaxrejeito) e análise da composição química da argila e do rejeito.

Finalizada a análise da composição química, foi realizada a mistura dos materiais, moldagem dos corpos de prova e a moagem via úmida com tempo de 30 minutos por formulação. Após a secagem em estufa a 100°C, as massas cerâmicas foram submetidas a prensagem uniaxial e as amostras foram sinterizadas a 900°C, 950°C e 1000 °C com patamar de queima de 2 horas em forno elétrico.

Após o termino do processo de queima, foram realizados ensaios e parâmetros para determinar a eficácia do rejeito inserido nas formulações, bem como para saber a sua composição química e mineralógica. Os ensaios empregados no trabalho foram a fluorescência de raios X utilizando espectrômetro, difração de raios X, ensaios de densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água, retração linear e tensão de ruptura a flexão.

5. CAPITULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos nos estudos referenciais possibilitaram realizar a análise da viabilidade técnica dos processos utilizados para o reaproveitamento do rejeito de cobre presente em barragens de contenção de rejeito, existentes na literatura.

5.1. PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA E ESCÓRIA VANADÍFERA

Inicialmente Pignaton (2010) constatou que para realizar a coleta do rejeito de cobre presente na barragem era viável tecnicamente e economicamente a retomada de material via desmonte hidráulico com bombeamento, onde o material seria desmontado por canhão hidráulico, carregado e bombeado até a usina de beneficiamento. O trabalho baseou-se na realização de diversos testes para caracterização tecnológica da amostra, ensaios de concentração magnética, estudos de remoagem, moabilidade, sinterização, fusão redutora e escorificação. A figura 2 ilustra os testes que foram realizados pela pesquisa.

Figura 2- Roteiro de amostragens e testes

Roteiro dos Testes		
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Caracterização tecnológica LCT-USP	Caracterização tecnológica SGS-Lakefield	Geração de concentrado magnético FG
Testes de Concentração magnética Inbrás-Eriez	Testes e geração de concentrado magnético SGS-Lakefield	Testes de remoagem e moabilidade
Testes com fusão redutora USP	Testes com fusão redutora e escorificação Mintek	Testes de sinterização Minitec

Fonte: Pignaton (2010)

Para as etapas de concentração magnética e remoagem foram coletadas três amostras, as quais foram submetidas a ensaios em laboratório para indicar os índices de recuperações, teores e contaminantes. Após realização de teste caracterização, o material da barragem apresentou uma distribuição granulométrica fina, porem com necessidade de teste de remoagem para liberação da magnetita. Os teores de concentrado final de Fe_2O_3 ficou em 84,7%, de V_2O_5 ficou em 0,76%, a recuperação de magnetita foi de 79,9% e V_2O_5 ficou em 40,3%.

Logo após, foram realizados testes de sinterização onde foram utilizados como matérias-primas o concentrado magnético, cal fina, calcário e carvão vegetal para produção do sínter. O produto gerado do sínter foram micropelotas, as quais foram submetidas ao alto-forno em temperatura em torno de 900°C , reduzindo assim a ferro metálico. Para obtenção do ferro-gusa e escória vanadífera foram realizados testes de fusão redutora, onde foram adicionados ao concentrado de magnético, finos de coque de petróleo, finos de ferro-silício (Fe-75%Si), cal dolomítica hidratada e cimento Portland ARI, sendo os materiais misturados e pelletizados.

Os testes de fusão redutora ocasionaram recuperações do vanádio (metálico) em valores acima de 90%, formação de carbeto de titânio e vanádio (com teores de 72,5% e 7,26%), altos teores Si e dificuldade de separação metal/escória. Buscando reduzir os teores de Si no metal e facilitar a separação metal/escoria, foram realizados novos testes retirando-se o Fe-Si, substituindo o calcário dolomítico pelo calcário calcítico e realizando a substituição do coque de petróleo por carvão vegetal. Assim, a recuperação do teor metálico do vanádio da ordem de 98%, maior que aquele dos testes anteriores, o teor de Fe saltou de 82% para 92%, o teor de Si foi drasticamente reduzido de 6,5% para valores menores que 1%, possibilitando assim a realização da separação completa entre metal e escória.

Os últimos testes realizados no estudo promoveram a adição de oxigênio nas ligas metálicas e na escória geradas dos testes de fusão redutora. A adição de oxigênio possibilitou a remoção do vanádio da liga e sua recuperação pela escoria, obtendo assim escória vanadífera (teor de 95%) e ferro-gusa refinado. Pignaton (2010) apresentou também as primeiras simulações realizadas pela MCSA que apontavam para uma possibilidade de produção anual de ferro-gusa da ordem de 212 mil t/ano e 9 mil t/ano de escória vanadífera. E as simulações para os

teores de concentrado, ferro-gusa bruto, escória vanadífera e ferro-gusa refinado (após injeção de O₂) são apresentadas no Quadro 2 abaixo.

Quadro 2 – Simulação dos teores das etapas de produção

Item (%)	Concentrado Magnético	Item (%)	Gusa Bruto	Escória Vanadífera	Gusa Refinado
Fe	60	Fe	94,00	28,20	94,40
SiO ₂	3,5	C	4,00	-	4,00
MgO	1,3	V	0,63	14,00	0,03
CaO	0,3	Si	0,70	8,50	0,08
Al ₂ O ₃	0,4	Mn	0,30	-	0,35
MnO ₂	0,4	Cr	0,20	-	0,23
TiO ₂	2,3	Ti	0,20	0,60	0,17
Cr ₂ O ₃	3,7	Ca	-	7,86	-
V ₂ O ₅	0,69	Mg	-	1,30	-
C	-	Al	-	2,65	-

Fonte: Pignaton (2010)

5.2. INCORPORAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

O estudo teve início com a análise química da argila e do RMSC através da fluorescência de raios-X. Os resultados obtidos indicam um teor de óxido de ferro reduzido na argila, viabilizando sua utilização na massa cerâmica de porcelanato. Contudo, o rejeito de minério de cobre sulfetado apresenta um teor de Fe₂O₃ em 23,05%, o que poderia acarretar uma coloração durante a queima do produto, de acordo com a porcentagem de rejeito incorporado a massa.

O SiO₂ apresentou-se em valores substancialmente elevados em ambas as matérias primas, contribuindo para o aumento da resistência mecânica da massa, pois combinado com o CaO pode formar silicatos de cálcio, além de diminuir a retração da massa. A tabela 4 ilustra as porcentagens de cada oxido na argila empregadas no estudo e do rejeito minério de cobre sulfetado (RMSC).

Tabela 4- Análise química da argila e do RMSC

Óxidos Presentes	Amostra	
	Argila	RMSC
SiO₂	57,72	44,49
Al₂O₃	35,16	11,19
Fe₂O₃	2,88	23,05
K₂O	2,60	0,87
TiO₂	1,50	-
CaO	-	9,46
MgO	-	5,34
P₂O₅	-	3,52
SO₃	-	1,70
V₂O₅	0,06	0,15
MnO	0,07	0,007
CuO	-	0,04

Fonte: Pinheiro; Rabelo; Acchar; Oliveira (2014)

A produção da massa cerâmica de porcelanato necessita do processo de sintetização em altas temperaturas, assim o estudo realizou vários testes com diversas temperaturas (1150, 1200 e 1250°C), sendo a temperatura de sinterização de 1200 °C ideal e a de 1150°C mais ineficaz na formação de fluxo viscoso, apresentando os maiores valores de absorção para todas as amostras utilizadas no estudo.

Outro teste realizado foi o de porosidade aparente no porcelanato, o qual os resultados demonstraram que a porosidade aparente das formulações propostas apresentou-se reduzida apenas em temperaturas acima de 1150°C. Já na temperatura de 1200°C, em todas as formulações, com exceção da formulação que utiliza 3% de RMSC, apresentaram porosidade ideal. Outrossim, as quatro formulações com temperatura de queima de 1250°C encontram-se inseridas no limite de porosidade permitido pela norma (ABNT NBR 15463).

A pesquisa comprovou também que as formulações apresentaram valores de densidade adequados nas temperaturas de 1150°C e 1200°C, superando o valor mínimo exigido por norma, acima de 2,30g/cm³. Os resultados evidenciam que a densidade sofre redução com o aumento da temperatura e que as amostras apresentam densidade máxima na temperatura de 1200°C.

Assim foi comprovado que o rejeito combinado às outras matérias-primas constituintes da massa formulada, empregadas com a mesma finalidade, como o feldspato e o filito, produziram fase vítrea em excesso na temperatura de 1200 °C. Já no ensaio de flexão em 3 pontos, todas as amostras apresentaram compatibilidade com o limite de resistência estabelecido pela norma ABNT, NBR 15463, a qual exige valores ≥ 35 MPa para a classificação do porcelanato.

5.3. APLICAÇÃO DO RESÍDUO DA MINERAÇÃO DO COBRE PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Inicialmente no estudo foi definido as dosagens de cada mistura e confeccionados 60 corpos de prova para proceder os parâmetros Marshall e assim definir o teor ótimo de cada composição (piloto, 10% de rejeito, 20% de rejeito e 25% de rejeito). O primeiro parâmetro analisado foi a estabilidade mínima, a qual segundo os requisitos normativos do DNIT ES 031/2006 deve ser de 500 Kgf, sendo superado nas misturas dosadas, com superior desempenho nas misturas com adição de rejeito.

Outro parâmetro Marshall analisado foi o volume de vazios, segundo o DNIT 031/2006 define um limite entre 3% e 5%. Os resultados obtidos no estudo mostraram que o teor de 10% de rejeito na massa apresentou o comportamento mais intenso na redução dos vazios da massa. Possibilitando assim definir o teor ótimo de resíduo para o menor consumo de CAP (material visco-elástico, conhecido como cimento asfáltico), o qual corresponde a 7,73% de rejeito e um consumo de 5,65% de CAP.

5.4. PREPARAÇÃO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS A PARTIR DE REJEITOS DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE E CINZAS.

O estudo apresentou inicialmente o resultado da composição química dos materiais que foram empregados no trabalho. A tabela 5 mostra a composição química dos materiais.

Tabela 5-Análise química da CCA, RMSC e Microssílica (*Eliminados após a calcinação)

Componentes	CCA (%)	RMSC (%)	Microssílica
Al ₂ O ₃	0,86	11,19	-
CaO	0,63	9,46	-
Fe ₂ O ₃	1,16	23,05	-
K ₂ O	3,09	0,87	-
MgO	0,68	5,34	-
P ₂ O ₅	4,79	3,52	-
SiO ₂	86,37	44,49	95,50
SO ₃	-	1,7	-
V ₂ O ₅	-	0,15	-
MnO	-	0,007	-
CuO	-	0,04	-
Orgânicos*	2,1	0,008	1,60

Fonte: Da Silva; Neto (2017)

Os pesquisadores realizaram dois tipos de proporções para testes, os primeiros testes misturando-se as matérias primas inicialmente selecionadas nas proporções de 70% de CCA e 30 % de RMSC. E a outra formulação utilizada foi obtida pela adição de 30% de microssílica e 70% de RMSC, substituindo a CCA por microssílica por conter maior quantidade de sílica ativa.

Após a mistura das formulações observou-se que houve expansão das amostras durante a cura à 600C, formando uma espécie de espuma sólida, a qual mostrou a eficiência da reação de geosíntese. A obtenção de espumas geopoliméricas foi possível a partir das matérias primas propostas no trabalho. Para comprovação da reação de geosíntese foram realizados testes de difratometria de raios-X, onde observou-se a formação de fases típicas de geopolímeros, tais como silicato de sódio hidratado e trona. Além de testes de micrografias de MEV, onde mostraram a formação de uma matriz geopolimérica porosa.

5.5. UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE EM CERÂMICA ESTRUTURAL

O estudo teve início com a análise da composição química do rejeito de minério sulfetado de cobre, a qual possibilitou observar que o rejeito apresentou um teor superior de óxidos fundentes, como CaO (9,46%) e MgO (5,34%), o teor de cobre residual foi baixo, equivalente a 0,04% e o SiO₂ apresentou-se em valores substancialmente elevados, com o equivalente a 44,49%.

Logo após, foi realizado a mistura das materiais primas para confecção dos corpos de prova. Foram desenvolvidos quatro formulações com porcentagem de argila variadas e rejeito de cobre sulfetado (RMSC). A tabela 6 descreve as formulas desenvolvidas.

Tabela 6- Formulações desenvolvidas

FORMULAÇÃO	ARGILA (%)	RMSC (%)
0	100	0
1	94	6
2	89	11
3	84	16

Fonte: Castro; Costa; Tavares; Neto; Rabelo (2015)

Os corpos de prova confeccionados foram submetidos a diversas temperaturas (900,950 e 1000°C) e submetidos a diversos testes. Dentre esses testes, o de densidade mostrou que ocorreu o crescimento da densidade com o aumento da temperatura principalmente nas formulações 0 e 2. Quanto a porosidade, todas as formulações, com exceção da formulação 1, apresentaram bons resultados de porosidade.

Outra propriedade cerâmica testada no estudo foi a absorção de água, a qual está relacionada diretamente com a porosidade do material, assim a formulação 1 teve os valores mais altos nesse parâmetro atingindo apenas a especificação para tijolo maciço (8 a 25%) nas temperaturas de 900 e 950°C. As outras formulações ficaram dentro do que é proposto por norma em todas as temperaturas, inclusive para telhas ($\leq 18\%$) e tijolos vazados ($\leq 20\%$).

A pesquisa realizou também testes de retração linear dos corpos de prova, a qual cresceu à medida que se aumentou a temperatura de queima com exceção das formulações 0 e 2 que não sofreram retração nenhuma nas temperaturas de 900 e 950 °C e da formulação 3 que se estabilizou dimensionamento a partir de 950 °C. Sendo os valores de retração linear obtidos, dentro da faixa usual para fabricação de cerâmica vermelha.

O último teste realizado na pesquisa foi de resistência à flexão, o qual mostrou que os resultados apenas as formulações 0 e 2 podem ser aplicadas a toda a classe de cerâmicas estruturais em todas as temperaturas. As demais formulações revelaram valores que em geral, mesmo estando dentro da especificação de tijolo maciço ($\geq 5,5$ MPa) e tijolo vazado (≥ 2 MPa) não são seguras na aplicação das mesmas nessa classe de materiais cerâmicos por conta dos baixos resultados.

6. CAPITULO IV - CONCLUSÃO

Na literatura existem poucos estudos sobre o reaproveitamento de rejeito de cobre presentes em barragens de contenção, sendo mais comumente encontrado estudos referentes ao reaproveitamento de rejeito de ferro. Entretanto, este estudo demonstrou a viabilidade técnica de alguns procedimentos operacional sugerido para manuseio do rejeito de cobre. Estes procedimentos incluirão o método de remoção de rejeito da barragem, análise da composição química dos materiais empregados, mistura e testes mecânicos e físicos dos produtos obtidos.

O estudo de Pignaton (2010) comprovou que por meio do processo de fusão redutora é possível realizar a recuperação do vanádio e ferro (porcentagem acima de 95%) presentes no rejeito de cobre da barragem de rejeito da empresa Mineração Caraíba S.A. Enquanto que, os teores de Fe ficaram em torno de 92% no ferro gusa bruto, entre 0,6 e 0,75% de V. Além disso, os testes mostraram que na etapa de escorificação (injeção de O₂) o ferro-gusa purificado alcançou teores acima de 97% e a recuperação de V para a escória, com valores acima de 95%.

Já a pesquisa de Pinheiro; Rabelo; Acchar; Oliveira (2014), conclui que as incorporações de 6, 9 e 12% de RMSC na mistura de revestimento cerâmico, sinterizadas a 1200 °C apresentaram resultados satisfatórios para todas as propriedades tecnológicas determinadas, comprovando assim, o potencial do RMSC como matéria prima viável na produção do porcelanato esmaltado.

O trabalho de Kato (2017) comprovou que a adição de rejeito na produção de mistura asfáltica melhorou todas as suas características Marshall e promoveu a redução do teor de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo). Além proporcionar maior resistência à massa e consequentemente aumento da durabilidade por dificultar a penetração de agentes agressivos. Enquanto que o estudo de Da Silva e Neto (2017) concluiu que a utilização do rejeito de cobre na preparação de argamassa geopolimérica é possível a partir da sua mistura com cinza de casca de arroz e microssílicas.

Já a pesquisa de Castro; Costa; Tavares; Neto; Rabelo (2015), demonstrou que o rejeito de minério sulfetado de cobre, de uma forma geral, pode ser empregado em formulações e na fabricação de cerâmicas estruturais, pois todas as formulações com o rejeito se mostraram dentro dos padrões esperados e aceitáveis. O quadro 3 ilustra os procedimentos empregados e os produtos obtidos em cada estudo analisado. Além de descrever a viabilidade técnica dos procedimentos adotados.

Quadro 3 – Quadro resumo do trabalho

Autor	Procedimentos empregados	Produto obtido	Viabilidade técnica
Pignaton (2010)	Testes para caracterização tecnológica da amostra	Ferro-gusa e escória vanadífera	Ferro-gusa purificado alcançou teores acima de 97% e a recuperação de V para a escória, com valores acima de 95%.
	Concentração magnética		
	Remoagem		
	Sinterização		
	Fusão redutora		
	Escorificação		
Pinheiro; Acchar; (2014) Rabelo; Oliveira	Análise química da argila e do RMSC	Porcelanato esmaltado	Emprego de 6, 9 e 12% de RMSC na mistura de revestimento cerâmico, sinterizadas a 1200 °C apresentaram resultados satisfatórios para todas as propriedades tecnológicas.
	Sintetização em altas temperaturas		
	Ensaio de Porosidade aparente		
	Ensaio de densidade adequado		
Kato (2017)	Testes de caracterização dos materiais	Mistura asfáltica	Redução do teor de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) na mistura asfáltica.
	Ensaio de estabilidade mínima.		
	Ensaio de volume de vazios.		
Da Silva; Neto (2017)	Testes de caracterização dos materiais.	Argamassas geopoliméricas	A argamassa geopolimérica pode ser obtida a partir da sua mistura de rejeito com cinza de casca de arroz e microssílicas.
	Testes de difratometria de raios-X.		
	Testes de micrografias de MEV		

Castro; Costa; Tavares; Neto; Rabelo (2015)	Testes de caracterização química dos materiais	Cerâmica estrutural	Todas as formulações com o rejeito se mostraram dentro dos padrões esperados e aceitáveis.
	Sintetização em altas temperaturas		
	Ensaio de densidade adequado		
	Ensaio de Porosidade aparente		
	Testes de absorção de água		
	Testes de retração linear		
	Testes de resistência à flexão		

Fonte: Autor (2018)

Portanto, esse trabalho comprovou o potencial de utilização de resíduo proveniente da mineração de cobre, na produção de diversos produtos, como ferro-gusa e escória vanadífera, materiais de construção e mistura asfáltica. Além dos resultados positivos em termos de produção, a recuperação do rejeito pode acarretar o aumento da vida útil das barragens de contenção de rejeito, diminuição do volume presente nas barragens e consequentemente garantia da sua estabilidade e segurança. E para barragens de mineração construídas ou alteadas pelo método "a montante" a reutilização do rejeito pode ser empregada para viabilizar o cumprimento da Resolução N° 04 de 2019 da ANM.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo descreve diversos processos que viabilizam tecnicamente o reaproveitamento do rejeito de cobre presentes em barragens de contenção. Desta forma, este estudo recomenda que trabalhos futuros sejam desenvolvidos com vistas a:

1. Avaliar a viabilidade econômica e ambiental dos processos descritos neste trabalho para reaproveitamento do rejeito de cobre presente em barragens de contenção;
2. Avaliar economicamente a viabilidade de se adotar processos de filtragem do rejeito para que este seja diretamente empilhado ao invés de ser lançado nas barragens, evitando assim o custo de remoção de material das barragens e facilitando as etapas de manuseio do rejeito e concentração do cobre nele contido;
3. Realizar estudos de casos utilizando os procedimentos empregados para reutilização do rejeito de cobre;
- 4- Desenvolver outros processos de reaproveitamento dos rejeitos de cobre presente em barragens;
4. Caracterização/definição legal das barragens de rejeito para fins de aproveitamento econômico;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15463 – **Placas cerâmicas para revestimento-Porcelanato**, 2013.

ANM- Agencia Nacional de Mineração – **Resolução ANM N° 4**, 2019.

ARAUJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Dissertação de Mestrado. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006, 133 p.

BARROSO, M. D. B. **Desenvolvimento de compósitos com matriz de geopolímeros reforçados com partículas de quasicristais AlCuFe**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal da Paraíba, 64p, 2009.

BITENCOURT, C. S. et al. **A geopolimerização como técnica para a aplicação do resíduo de bauxita**, São Paulo, v. 58, n. 345, Mar. 2012.

CASTRO, M.A.M.; COSTA, F.G.; TAVARES, B. A. C.; NETO. E. F.; RABELO, A. A. **Utilização de rejeito de minério sulfetado de cobre em cerâmica estrutural**. Contribuição técnica ao 70º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 15º ENEMET – Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CHAVES, A.P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minério**, Volume 2, Signus Editora, 2004, 199p.

DA SILVA, A.O.; NETO E. F. **Preparação de argamassas geopoliméricas a partir de rejeitos de minério sulfetado de cobre e cinzas**. III Seminário de Iniciação Científica da UNIFESSPA, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (2006). **ES 31/2006: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico**. Rio de Janeiro.

DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (Brasil) **Cobre**, 2018, www.dnpm.gov.br (acessado em 09/09/2018, 16:35 h).

DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (Brasil) **Cobre, Balanço Mineral Brasileiro 2001**, www.dnpm.gov.br (acessado em 18/09/2018, 20:00 h).

KATO, R.B. **Aplicação do resíduo da mineração do cobre para melhoria do desempenho de misturas asfálticas**. Revista Eletrônica Brasil de Engenharia civil. Volume 14, Nº 1, pag. 16-24. 2018.

LIMA, L. M. K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2006, 90 p.

PIGNATON, T. V. **Produção de ferro-gusa e escória vanadífera a partir de rejeitos da Mineração Caraíba**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas –Escola de Engenharia da UFMG, 2010.

PINHEIRO, L. C. L.; RABELO, A. A.; ACCHAR, W.; OLIVEIRA, R. M. P. B. **Incorporação de rejeito de minério sulfetado de cobre nas propriedades tecnológicas de revestimentos cerâmicos**. Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, 2014.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. Dissertação de Mestrado. Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013, 154 p.

SANTOS, G. P. P. D. **Um Estudo Sobre a Utilização da Escória de Ferroníquel em Pavimentação Rodoviária**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, RJ. 2013. 124 p.

SANTOS, A. PESQUISA TESTA REJEITOS DA MINERAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/rejeitos-da-mineracao-na-construcao/>>. Acesso em: 25 de setembro de 2018.

VALE, Manual do Processo Produtivo de Cobre, 2006.