

Caracterização dos rejeitos das minas do Camaquã para reaproveitamento sustentável

Characterization of tailings from Camaquã mines for sustainable reuse

Adriane de Oliveira Trindade e Luciene Osório Soares¹, Raul Oliveira Neto², Luis Eduardo de Souza², Luciana Arnt Abichequer², Ítalo Gomes Gonçalves², Felipe Caron³

¹Tecnólogo em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, RS, Brasil

²Engenheiro(a) de Minas/Professor do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Mineral (PPGTM), Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, RS, Brasil

³Oceanógrafo/Professor, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, RS, Brasil

Resumo

O reaproveitamento de rejeitos provindos de atividades mineiras é de extrema importância, pois são possíveis poluidores do meio ambiente. Este trabalho visou à reutilização sustentável, social e econômica dos rejeitos remanescentes do beneficiamento do minério de cobre das Minas do Camaquã. Na 1ª fase do estudo, foram empregadas metodologias de amostragem, separação granulométrica, análises físico-químicas, análise mineralógica, ensaios físico-químicos de concentração de minerais, elaboração de mapa de isocontorno de teores do elemento químico principal Cu. Nesta 2ª fase, aprofundou-se a análise granulométrica para detalhamento do percentual de distribuição de finos, classificação do resíduo para verificação segundo a norma da ABNT 10004 e avaliar a pré-viabilidade econômica para verificação da alternativa de recuperação do Cu pelo método de lixiviação e ensaios para uma possível utilização do material na construção civil. Concluiu-se pela inviabilidade econômica através da recuperação do Cu contido, por lixiviação, de acordo com o modelo de análise econômica. A pré-viabilidade técnica da utilização na fabricação de tijolos foi constatada conforme resultados das simulações em ensaios realizados de acordo com a fabricação industrial e normas de índice de qualidade (NBR 8492). O resíduo apresentou "inerte" de acordo com a ABNT 10004 e granulometria entre areia fina até areia muito fina.

Palavras-chave: Mineração. Sustentabilidade. Meio ambiente. Reutilização. Rejeito.

Abstract

The reuse of waste stemmed from mining activities is extreme important because it is a possible polluters of the environment. This work covered sustainable social and economic waste reuse remainder of ore copper processing from the Minas do Camaquã. In the first phase of the study were employed: sampling methodologies, particle size separation, physical-chemical analyzes, mineralogical analysis, physical and chemical tests concentration of minerals, iso-contour map elaboration of contents to director element, the copper. In the second phase the particle size analysis detailed the percentage of fine distribution, classification of waste according to ABNT 10004 and evaluation of economic pre-viability to verify recovery alternative of copper through leaching method and test for using of the material in construction. In conclusion, the economic recovery of copper by leaching is impossible, according to economic analysis model. The technical pre-viability of use in brick factory, was found as results of the simulations in testing done of the agreement with an industrial manufacturing and quality index standards (NBR 8492). The residue, it performed "inert" of the agreement with ABNT 10004 and fine sand grain size between even very fine sand.

Keywords: Mining, Sustainability, Environment, Reuse, Waste.

1 Introdução

Nas últimas décadas, ocorreram mudanças de paradigma no que diz respeito à concepção de desenvolvimento e a responsabilidade social em face da preservação, exploração e manipulação de recursos minerais. A grande demanda por bens minerais, aliada à exaustão dos grandes depósitos com altos teores de metais, assim como a crescente demanda de agregados para a construção civil, vêm mostrando a necessidade de alternativas que busquem atender esses setores tão relevantes para o desenvolvimento econômico e o bem estar social da população. Aliado a isso, a crescente preocupação com o setor ambiental tem buscado, cada vez mais, o estudo de rejeitos de mineração e pesquisas tanto em novas tecnologias para o beneficiamento destes minérios com menores teores, quanto para sua utilização em outros setores, buscando verificar a possibilidade de utilização deste material Fleck *et al* (2013). A barragem de rejeito em estudo está situada na antiga mineração de cobre das Minas do Camaquã que localiza-se a 70 km de Caçapava do Sul e 310 km de Porto Alegre (Figura 1). De acordo com os dados que constam na biblioteca da Companhia Brasileira do Cobre (CBC), a barragem de rejeitos da referida mineração está disposta sobre uma área de 122,28 ha e recebeu durante 13 anos todo o material efluente do sistema de flotação. Eram depositadas 224 t/h de material em polpa em um ciclo de trabalho de 24 h/dia, 313 dia/ano, totalizando uma massa de material com 21.874.944 t (Abib, 1979).

O contexto de reaproveitamento de rejeitos vem sendo cada vez mais abordado, embora ainda existam poucos estudos sobre rejeitos metálicos. O presente trabalho em caráter inédito visa propor novas alternativas de utilização do rejeito de cobre das Minas do Camaquã, tendo em vista que a região tem grande potencial e desenvolvimento para a construção civil.

Na primeira fase do trabalho, Fleck *et al* (2013) caracterizaram a granulometria (método de peneiramento), composição química (Tabela 1) e mineralógica do rejeito de cobre bem como ensaios de recuperação de teores. Os resultados obtidos na totalidade das amostras analisadas foram de 83% entre areia média e areia muito fina (0,25mm a 0,0625mm) e 17% nas frações de silte a argila (<0,0625mm). As análises químicas revelaram a presença de Fe₂O₃ (9%) e Al₂O₃ (6%) com maior importância, e a composição mineralógica identificou a presença de feldspatos (38,5%) e quartzo (38%) entre outros com menores percentuais. Em ensaios realizados para recuperação do teor de cobre, a extração por lixiviação apresentou melhor resultado (50%) em relação à flotação 9%. O mesmo trabalho também mostrou que a média nos teores de Cu ficou em torno de 0,06 %, não apresentando uma distribuição uniforme. A partir destes dados, o presente trabalho (2^o fase) tem como objetivos: aprofundar a análise granulométrica (detalhando o percentual de finos); classificar o resíduo considerando os aspectos “perigoso ou não perigoso e inerte ou não inerte”; avaliar a pré-viabilidade econômica como alternativa de recuperação do Cu pelo método de lixiviação e realização de ensaios como uma possível utilização do material na construção civil, como ilustra o fluxograma deste trabalho na figura 2.

Para prover as necessidades do mundo moderno é imprescindível um aumento de produção que contribui para uma maior quantidade de resíduo, que nem sempre têm um destino ecologicamente adequado. O reaproveitamento de rejeitos provindos de atividades mineiras é de extrema importância, do ponto de vista ambiental e socioeconômico, aproveitando um material potencialmente poluidor e proporcionando a recuperação da área em questão de forma sustentável.

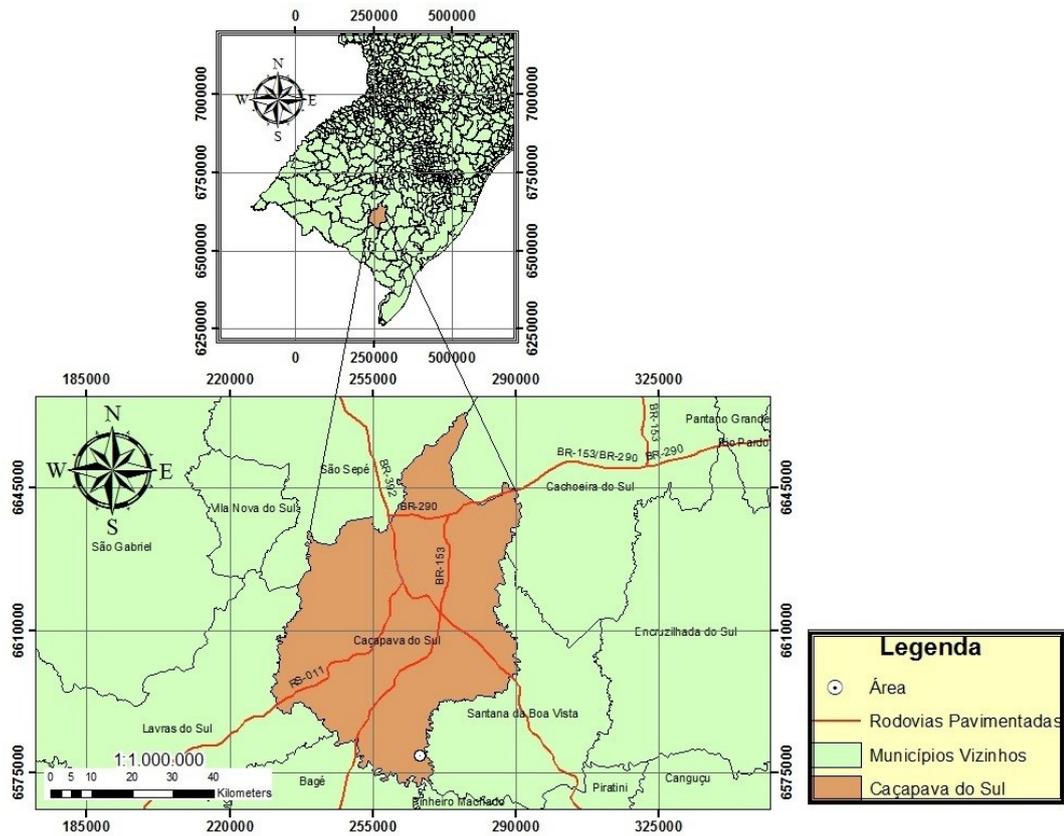


Figura 1 – Mapa de situação e localização

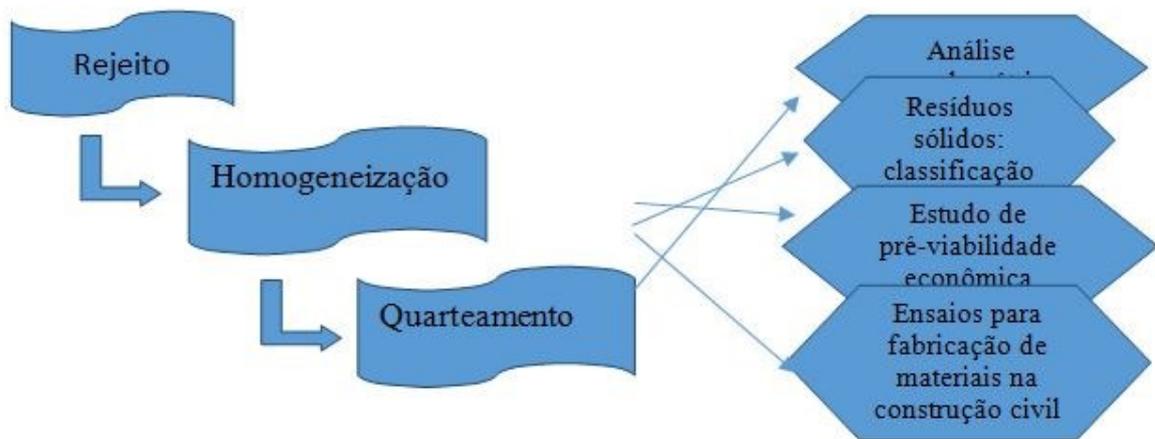


Figura 2 – Fluxograma das atividades práticas desenvolvidas neste trabalho

2 Revisão bibliográfica

2.1 Estudo de pré-viabilidade econômica

Segundo Petter e Carriconde (2010), os empreendimentos em mineração são frequentemente classificados como de elevado fator de risco econômico por associarem características de investimentos elevados, com longo tempo de preparação e com certo grau de incertezas no que se refere a reservas geológicas ou caracterização tecnológica do minério. Portanto, é imperativo que a continuidade de um projeto, desde a prospecção geológica, seja acompanhada por frequentes

reavaliações técnicas e econômicas, de forma que, a decisão de prosseguir seja respaldada pela aferição da viabilidade do empreendimento à luz das novas informações agregadas ao longo de seu desenvolvimento. As avaliações efetuadas nas etapas preliminares são, em geral, estimativas grosseiras, pois as informações disponíveis sobre a jazida e o minério estão incompletas e somente serão intensificadas se houver intenção de prosseguir no projeto, mas essa decisão deverá ser tomada com base nas avaliações econômicas preliminares. Alguns modelos de cálculo estimativo de custos de implantação e operação de instalações mineiras e de beneficiamento de minério foram desenvolvidos para auxiliar o profissional de engenharia. Alguns deles estão disponíveis em aplicativos para computadores, tais como o *programa MAFMO – Modele d’Analyse Financière sur Micro-Ordinateur, desenvolvido no Centre de Géotechnique et d’Exploitation du Sous-sol da Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*, que utiliza modelos matemáticos desenvolvidos por T. Alan O’Hara em 1980, para determinação de parâmetros econômicos adequados para proceder a avaliação econômica de um empreendimento mineiro, a nível de escopo inicial ou de pré-viabilidade.

2.2 Minério de cobre

“Ribeiro (2001) define os minérios de cobre da seguinte forma:”

O cobre em estado puro, denominado cobre nativo, raramente é encontrado na natureza e normalmente está associado a outros elementos químicos em várias formas estruturais, com proporções estequiométricas e combinações químicas, formando diversos minerais. Existem dois grupos de minerais: os primários ou sulfetados, ocorrentes em zonas mais profundas da crosta terrestre, com mais alto teor em cobre, e os oxidados ou secundários, de origem mais superficial, de menor teor em cobre. Entre esses grupos são conhecidos cerca de 170 espécies minerais, das quais apenas algumas apresentam importância econômica. No rol dos sulfetados, os mais importantes são a calcopirita (CuFeS_2 , com 34,6 % de Cu), a calcocita (Cu_2S , com 79,9 % de Cu), a bornita (Cu_5FeS_4 , com 63,3 % de Cu), a covellita (CuS , com 66,4% de Cu) e a enargita (Cu_3AsS_4 , com 48,3% de Cu). Entre os secundários, incluem-se os oxidados cuprita (Cu_2O , com 88,8% de Cu), e a tenorita (CuO , 79,8%Cu); os carbonatados malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, 57,5%Cu), e a azurita ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, 55,3% Cu) e os silicatados crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 36 % Cu).

O tratamento de minério de cobre consiste de uma série de processos que têm em vista a separação física dos minerais de minérios (calcopirita e bornita) e minerais de ganga (não possuem interesse econômico e são rejeitados, por exemplo: quartzo, feldspato, etc.) obtendo um concentrado final com um teor elevado de cobre. O processamento do cobre depende da sua forma, se sulfetada ou oxidada. No caso dos sulfetos, a principal técnica utilizada na indústria do cobre é a **flotação**, que permite a obtenção de concentrado com elevados teores e expressivas recuperações, e este processo se baseia no comportamento físico-químico das superfícies das partículas minerais presentes numa suspensão aquosa. A utilização de reagentes específicos, denominados coletores, depressores e modificadores, permite a recuperação seletiva dos minerais de interesse por adsorção em bolhas de ar. Como exemplo de utilização deste processo, a Mineração de Cobre em Sossego (CVRD) onde o minério de cobre é basicamente calcopirítico, com pequena presença de bornita e calcocita, sendo que a ganga compreende silicatos e magnetita, além de óxidos e carbonatos em quantidades pequenas. No processo de flotação desses sulfetos, tradicionalmente são aplicados os coletores aniônicos sulfídricos em virtude de sua afinidade química com esses minerais (Chaves, 2009). Na forma oxidada utiliza-se a lixiviação, que envolve a dissolução seletiva dos minerais portadores do metal valioso, onde o minério entra em contato com uma solução química ativa conhecida como agente lixiviante ou solução de lixiviação.

Cabe ressaltar que em uma barragem de rejeitos, como no caso em estudo, provenientes do processo de concentração por flotação, é esperado que a maioria dos minerais de cobre estejam sob a forma de óxidos (malaquita, azurita, etc.) já que estes não tem afinidade superficial pelos coletores e,

por consequência, não serão flotados pelas bolhas de ar formadas neste processo. Em média, uma usina de beneficiamento de cobre por flotação apresenta uma recuperação de 90% do teor de Cu presente no minério sulfetado que alimenta a usina, ou seja, cerca de 10% dos minerais de cobre que seguem para a barragem de rejeitos é composto por sulfetos e os restantes são oxidados.

2.3 Meio Ambiente

A questão ambiental é um ponto preocupante no setor do cobre, pois a poluição na indústria pode ser registrada nos diversos ramos da cadeia estrutural produtiva, especialmente nas áreas de concentração, fundição e refino (Ribeiro, 2001). Na mineração, ocorrem modificações topográficas, causando processos erosivos e de assoreamento de recursos hídricos; devastação vegetal e emissões de partículas sólidas no ar. Durante a concentração, os danos são causados pelos produtos químicos utilizados nos processos e expelidos como rejeitos.

Como em qualquer processo industrial, na mineração são gerados resíduos, dos quais podemos classificar dois tipos principais: a geração de material estéril e rejeitos. Os estéreis são materiais movimentados com o objetivo de atingir o corpo de minério. Esses são dispostos, geralmente, em pilhas e não possuem valor econômico. Já os rejeitos são materiais oriundos das plantas de beneficiamento e processamento mineral (Neto *et al* 2014).

Conforme Baldo (2003), a degradação do meio ambiente é, sem dúvida alguma, um dos temas que mais tem sido abordado nos últimos anos. A discussão desse tema tem levado a sociedade a uma mudança de comportamento em todos os seus segmentos.

A intensidade do crescimento industrial e demográfico ocorrido nas últimas décadas trouxe como consequência a geração de quantidades significativas de resíduos. Diversas formas de gerenciamento destes resíduos podem ser implementados. Atualmente, esforços tecnológicos têm sido concentrados nas ações que levam a utilização de tecnologias limpas, que possibilitam minimização dos resíduos ou incorporação destes dentro do próprio processo produtivo que os gerou ou como matéria prima em outros processos.

Entretanto, o que também deve ser enfatizado é que apenas com um estudo criterioso é que se pode de fato estabelecer ótimas aplicações para os resíduos. No trabalho publicado por John e Zordan (2001), obteve as seguintes conclusões:

- reciclar rejeitos como materiais úteis é uma ferramenta de gestão ambiental muito importante para se atingir sustentabilidade;
- a pesquisa bem sucedida e o desenvolvimento de um novo material ou componente para construção civil, a partir de rejeitos como matéria-prima, é uma tarefa complexa e multidisciplinar tendo aspectos ambientais, técnicos, financeiros, legais, de mercado e sociais.

A preocupação crescente com o impacto das atividades de mineração sobre o meio ambiente tem acarretado estudos visando tanto à utilização racional dos recursos hídricos, quanto o tratamento das águas descartadas durante o processo de beneficiamento mineral, que posteriormente irá ser depositada em barragens de rejeitos.

Segundo Duarte (2008) as barragens de contenção de rejeitos geralmente retêm materiais sólidos e água que podem ser considerados contaminantes, se liberados para o meio ambiente. A composição destes materiais depende do processo industrial e do tipo de mineral explorado. A contaminação do meio ambiente pode acontecer através de drenagem ácida, infiltração dos contaminantes para o lençol freático, contaminação do solo e água superficial a jusante, podendo até mesmo afetar a fauna local que utiliza a água da barragem para consumo.

2.4 Classificação de resíduos

Considerando a crescente preocupação da sociedade com relação às questões ambientais e ao desenvolvimento sustentável, a ABNT 10004 (ABNT 2004) criou a CEET-00.01.34, que estabelece a classificação de resíduos sólidos envolvendo a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

Para os efeitos desta Norma, os resíduos são classificados em:

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;
 - resíduos classe II A – Não inertes.
 - resíduos classe II B – Inertes.

2.5 Alternativas para o reaproveitamento de rejeitos

Segundo Petrucci (1987) o uso de agregados alternativos está em crescimento no Brasil e no exterior, estes podem ser denominados agregados sintéticos, que incluem rejeitos ou subprodutos de processos industriais.

Diversos rejeitos e estéreis de mineração assim como outros resíduos de várias outras fontes (inclusive a própria indústria da construção na classe dos RCD - resíduos de construção e demolição) têm sido estudados em termos das suas potenciais aplicações na engenharia civil, tanto na edificação como na pavimentação (John e Zordan, 2001).

Segundo estudos realizados por Carvalho *et al* (2007), a inclusão de rejeitos de níquel na indústria da construção civil mostrou uma boa trabalhabilidade na argamassa e uma baixa porosidade mostrando uma interação forte entre partículas e o aglomerante o que indica uma possível inclusão deste material.

O rejeito de Bauxita da Região de Minas Gerais apresenta-se como uma lama, alto teor de umidade, granulometria fina, porém baixa plasticidade. Em sua análise química, os dados mais relevantes deste material apresentaram um alto teor de Fe_2O_3 (20,1%), Al_2O_3 (22,3%) e TiO_2 (19,8%). Em ensaios realizados, observou-se que a utilização deste rejeito juntamente com a areia, água e cimento apresentaram resultados satisfatórios, pois propiciaram melhorias substanciais nas propriedades de resistência mecânica à compressão e absorção de água do solo-cimento (Vieira 2007).

A incorporação desses resíduos é uma alternativa tecnicamente viável e ecologicamente correta, pois contribui para a redução de volume de materiais descartados na natureza e reduz a exploração de recursos naturais.

3 Materiais e métodos

3.1 Estudo de pré-viabilidade econômica para extração do cobre pelo método de lixiviação

Foi realizada uma simulação no *software* MAFMO (*Modèle de Analyse Financière pour Micro Ordinaire*) baseado no MODELO DE O'HARA.

3.1.1 Custos com investimentos

O *software* MAFMO faz estimativas para projetos de mineração, sendo empregado na simulação de investimentos, Os dados de entrada adotados foram os seguintes: 100 t/dia de rejeito com recuperação de 50% pelo método de lixiviação no concentrado (resultados obtidos nos ensaios em laboratório).

De acordo com o *software*, adotou-se uma escavadeira com capacidade de 0,5 m³, sendo estimado uma frota de 2 caminhões de 10t, para movimentação do rejeito até a planta. Algumas simplificações foram adotadas, tais como:

- Sem descobertura inicial;
- Sem operação de cominuição;
- Sem investimentos em infraestrutura.

Os valores monetários apresentados, como resultados do MAFMO, correspondem a US\$ de 1986, sendo então corrigido para 2014 utilizando o fator de correção de 2,8 (este fator é calculado através da inflação acumulada no período).

3.2 Análise granulométrica

Nesta 2^o fase do trabalho foram selecionadas 46 amostras para análise granulométrica no laboratório de Sedimentologia da Unipampa. A técnica utilizada foi por difração a laser utilizando o analisador da marca Microtrac S3500®, capaz de analisar amostras nas frações de 0,021 a 2 µm. Primeiramente se investigou um índice de refração a ser utilizado, baseado na composição química dos sedimentos. A análise química (feita através do método de Absorção Atômica e pelo Espectrômetro portátil de Raio-x) pode ser encontrada na tabela 1 na qual mostra a predominância de Fe₂O₃ nas amostras. O índice de refração sugerido segundo a tabela fornecida pelo fabricante do equipamento correspondente ao Fe₂O₃ é de 2,32. A intensidade do fluxo foi previamente testada através de uma bateria de ensaios que visou a melhor representatividade dos tamanhos contidos em amostras distintas. Portanto, a fim de padronizar o fluxo, levaram-se em consideração os diferentes comportamentos de análise relativos aos distintos fluxos impostos. Optou-se por estabelecer como padrão um fluxo de 30%.

Os dados foram carregados no programa Excel® relativas às porcentagens para cada tamanho de grão. Posteriormente no programa Sysgran® de Camargo (2006) foram realizadas as análises estatísticas baseadas em Folk & Ward (1957). Neste trabalho optou-se por analisar a média do tamanho de grão seguida da seleção e porcentagens totais de argila, silte, areia e cascalho, bem como suas distribuições espaciais. Os gráficos foram realizados no programa Excel® e mapas de superfície no Surfer® através do método de Krigagem.

Tabela 1 – Teor médio dos elementos por análise química, demonstrando a predominância do Fe₂O₃ (fase I)

Quantidade de dados amostrados	#/mm	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cu	Zn
3	32/0,5	6,7322	8,9433	0,0785	0,0011
41	60/0,250	6,2322	8,9433	0,0785	0,0020
43	115/0,125	6,0709	7,4055	0,0485	0,0018
43	250/0,0625	6,0099	9,6689	0,0554	0,0020
42	-250/-0,0625	6,2111	12,9690	0,0031	0,0031

3.3 Classificação de resíduos

Para a campanha de amostragem *in situ* foi previamente determinada uma malha regular com espaçamento médio de 150 m após, em campo foram coletadas amostras em 46 pontos com auxílio de GPS. Através do mapa de isotores (Figura 3) a barragem de rejeitos foi dividida em 3 áreas de acordo com a distribuição de teores de Cu. Assim, foi definida que a área 1 (A1) contém amostras com menor teor de Cu, a área 2 (A2) com amostra de teores intermediários e a área 3 (A3) com os teores mais elevados (Figura 4).

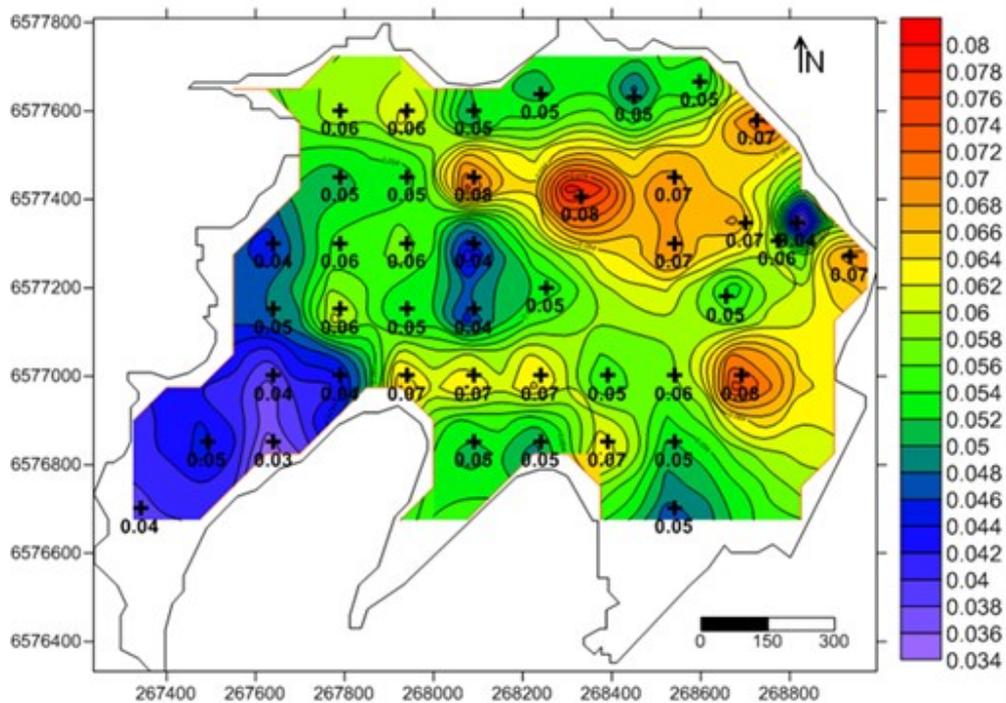


Figura 3 – Mapa de isotores do minério de cobre em porcentagem, modificado por Fleck et al (2013).

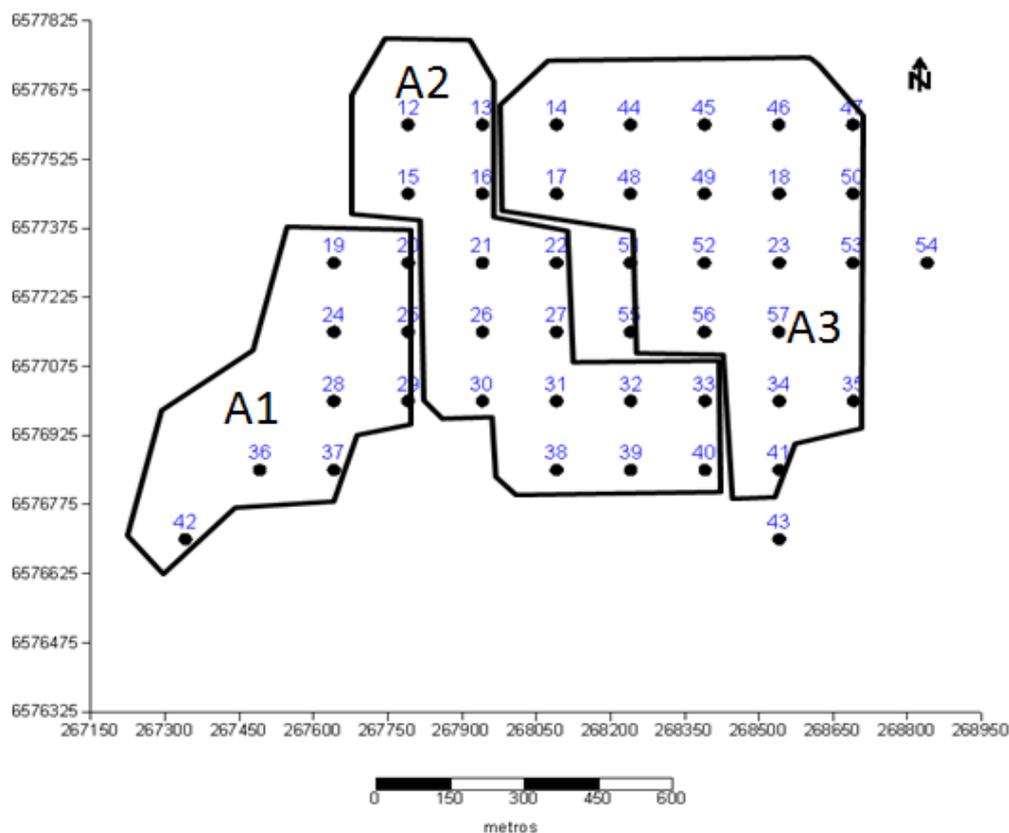


Figura 4 – Divisão das áreas A1, A2 e A3.

As amostras correspondentes de cada área foram homogêneas e quarteadas até atingirem 250 g. As três amostras finais foram analisadas no laboratório de química da Unipampa para determinar a classificação de resíduos sólidos, através da implementação da ABNT 10004 (2004), concluindo sobre o potencial de contaminação do meio ambiente.

Para o procedimento de análise, cada amostra foi seca em uma estufa a uma temperatura de até 42° C . Após, as amostras foram condicionadas em um frasco de 1500 ml e adicionado 1 L de água desionizada e colocadas em um agitador mecânico durante 5 min com uma velocidade média de 250 rpm. Os frascos foram cobertos com filme de PVC e deixados em repouso por 7 dias em temperatura ambiente. A solução foi filtrada com uma membrana filtrante, definindo como sendo o extrato solubilizado e após, a determinação do pH deste extrato utilizando um pHmetro. Para os padrões de ensaio de solubilização foi utilizado o espectrofotômetro UV visível BEL SP 2000 UV®, onde os parâmetros analisados estão representados na tabela 2.

Tabela 2 – Padrões para o ensaio de solubilização definidos pela ABNT 10004

Parâmetro	Limite máximo no extrato mg/L
Cobre	2,0
Ferro	0,3

3.4 Reaproveitamento do rejeito

O reaproveitamento dos resíduos vem a ser bastante oportuno, do ponto de vista ambiental, por se tratar um material que ao ser descartado de forma inadequada na natureza, provoca grandes impactos ao meio ambiente. Portanto, a recuperação e reciclagem de resíduos têm um grande valor não só econômico como também ambiental. Neste âmbito, foram realizados testes utilizando diferentes porcentagens do rejeito na fabricação de tijolos conforme a tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na fabricação dos tijolos

Amostra	Dosagem ("traço")
1	10% rejeito + 90% argila preta + 100 ml água
2	30% rejeito + 70% argila preta + 200 ml água
3	50% rejeito + 50% argila preta + 150 ml água
4	30% rejeito + 40% argila preta + 30% argila vermelha + 200 ml água

3.4.1 Ensaio de retração

O ensaio de retração é comumente utilizado no processo de fabricação industrial dos tijolos em olarias, sendo uma importante determinação da qualidade do produto final. O procedimento adotado foi de acordo com o usual, onde os tijolos são medidos e pesados ficando em temperatura ambiente durante 48 horas, e após, estas amostras são condicionadas em um forno contínuo à lenha com temperatura inicial de 100° até 800° C, onde permaneceram durante 96 horas.

3.4.2 Ensaio de absorção de Água

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR-8492 onde os tijolos depois de secos foram pesados. em seguida, são imersos por 24 horas em água, de onde são retirados para nova pesagem e cálculo (1) dos respectivos valores de absorção:

$$A = \frac{M2 - M1}{M1} \times 100 \quad (1)$$

Sendo:

M1= massa do tijolo seco;

M2= massa do tijolo saturado;

A= absorção de água, em porcentagem.

4 Resultados e discussão

4.1 Estudo de pré-viabilidade econômica para o caso de extração do cobre por lixiviação

Os resultados de custos com investimentos – Mina a céu aberto, através da simulação feita com o *software* MAFMO (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados dos custos com investimentos obtidos do *software* MAFMO

Parâmetro	M US\$ 86
Preparação do sítio	0,0
Descoberta prévia	0,0
Equipamentos de mineração	0,67
Instalações	0,91
Custos com estudos, supervisão e pré-produção	0,09
Total	1,67

O total do investimento nesta unidade, aplicando a correção monetária fica em US\$ 4.676.000. Considerando que a barragem de rejeitos apresenta cerca de 12.000 t de Cu contido, e que os testes de lixiviação indicaram recuperação de 50%, tem-se 6.000 t de Cu a ser aproveitado economicamente.

O faturamento total bruto, sem considerar nenhum tipo de custo, ficaria pelo preço atual do Cu na Bolsa de Metais de Londres, US\$ 1850/t (valor consultado em Julho/2014), em US\$ 11.100.000,00. Portanto, a alta incidência do capital inicial (investimento) sobre o faturamento bruto total, cerca de 43%, torna inviável a recuperação do investimento a curto e médio prazo, indicando que esta alternativa de reaproveitamento do rejeito não tem viabilidade econômica nestas condições simuladas.

4.2 Análise granulométrica

Os resultados da granulometria revelam a predominância da fração areia em relação aos demais tamanhos de grãos. Posteriormente são significativas as porções de silte nas amostras. As frações de argila e cascalho são muito reduzidas, (Figura 5). Expressando de modo total as frações analisadas, também nota-se a predominância da fração arenosa com 75% (1 – 0,062 mm) em relação às demais: silte em 23,1% (<0,062 <0,0039 mm), argila em 1,6% (<0,0039 mm) e cascalho em 0,03% (< 2mm) (Figura 6).

Quanto ao tamanho médio de grão a maioria das amostras (20) encontra-se entre areia fina (0,250 – 0,125 mm) e 11 amostras encontram-se em areia muito fina (0,125 - 0,062 mm). O tamanho médio de grão em areia média (0,250 – 0,125 mm) estão de forma reduzida na área, representadas apenas por 6 amostras. Os tamanhos médios em silte grosso representados por 4 amostras (0,0078 mm), silte médio (0,0156 mm) com 2 amostras e silte fino (0,0313 mm) com 1 amostra, estão em menor número na área (Figura 7).

Como a seleção é um parâmetro que avalia a distribuição granulométrica dentro de cada amostra e a grande maioria (29) foi caracterizada como pobremente selecionada, apenas o valor do tamanho médio pode evidenciar uma falsa interpretação quanto à caracterização dos tamanhos de grão das amostras analisadas. Isto significa que apesar das amostras terem predominantemente a fração areia, esta vem sempre acompanhada de outros tamanhos como o silte e argila. Isto pode ser verificado na figura 6, onde mostra as porcentagens dos tamanhos de grão referentes a cada amostra. Algumas amostras encontram-se muito pobremente selecionadas (7 amostras) e moderadamente selecionadas representadas por 8 amostras (Figura 8). A seleção das amostras esta relacionada diretamente ao desvio padrão, ou seja, o quanto a distribuição nos tamanhos de grão se afasta da média.

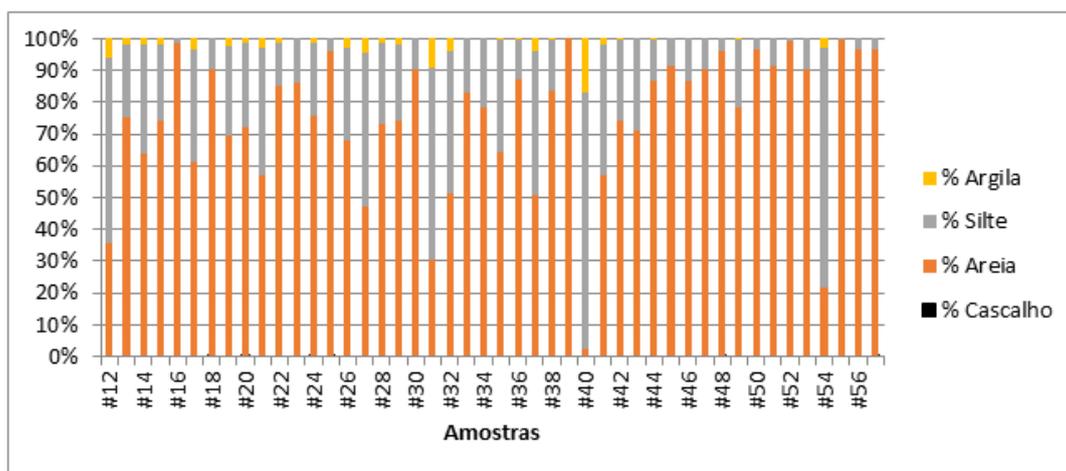


Figura 5– Porcentagem dos tamanhos de grãos por amostra.

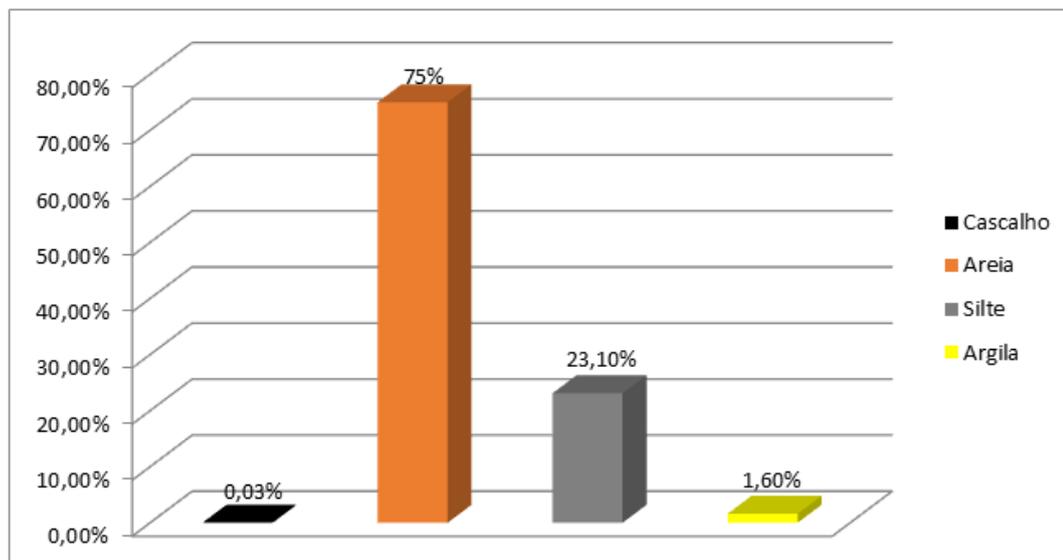


Figura 6– Porcentagem totais dos tamanhos de grãos.

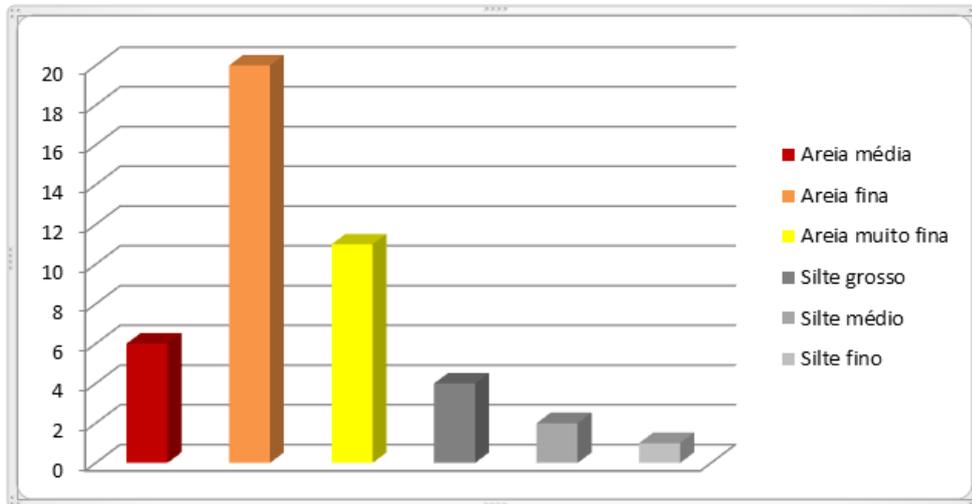


Figura 7- Tamanho médio das amostras.

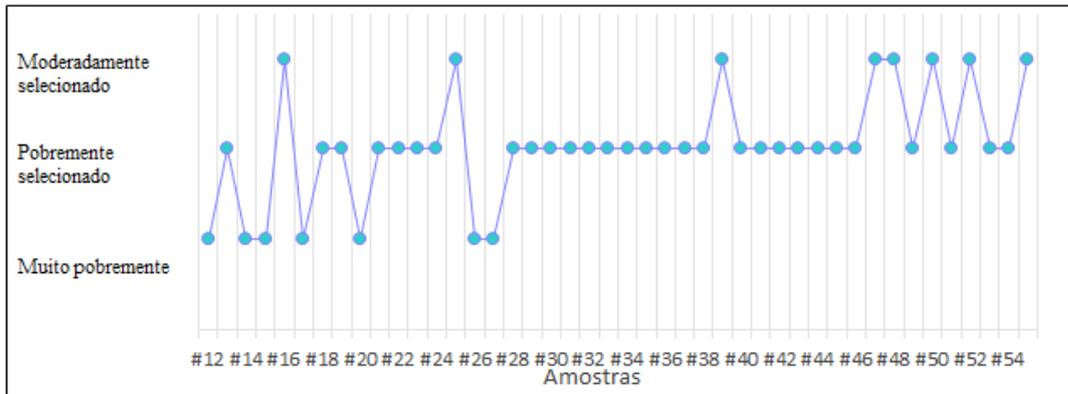


Figura 8-Seleção por amostra.

Através dos mapas de superfície comparando-os com o mapa de isotores, verificou-se a distribuição espacial quanto à porcentagem de cascalho, areia, silte e argila na área amostrada. Nota-se que a distribuição de cascalho (Figura 9) é pouco evidente (0,03%) considerando a área total da bacia de rejeito (122,28 ha), concentrando-se em um local que contém baixos teores de Cu. A fração areia (Figura 10) tem uma predominância relevante (75%) em toda a área, principalmente nos locais onde há maiores teores de Cu. Existe uma presença significativa de silte com 23,1% (Figura 11) e uma pequena distribuição de argila com 1,6% (Figura 12), ambas estão concentradas em amostras com teores intermediários de Cu e localizadas em áreas mais distantes do ponto de lançamento do rejeito.

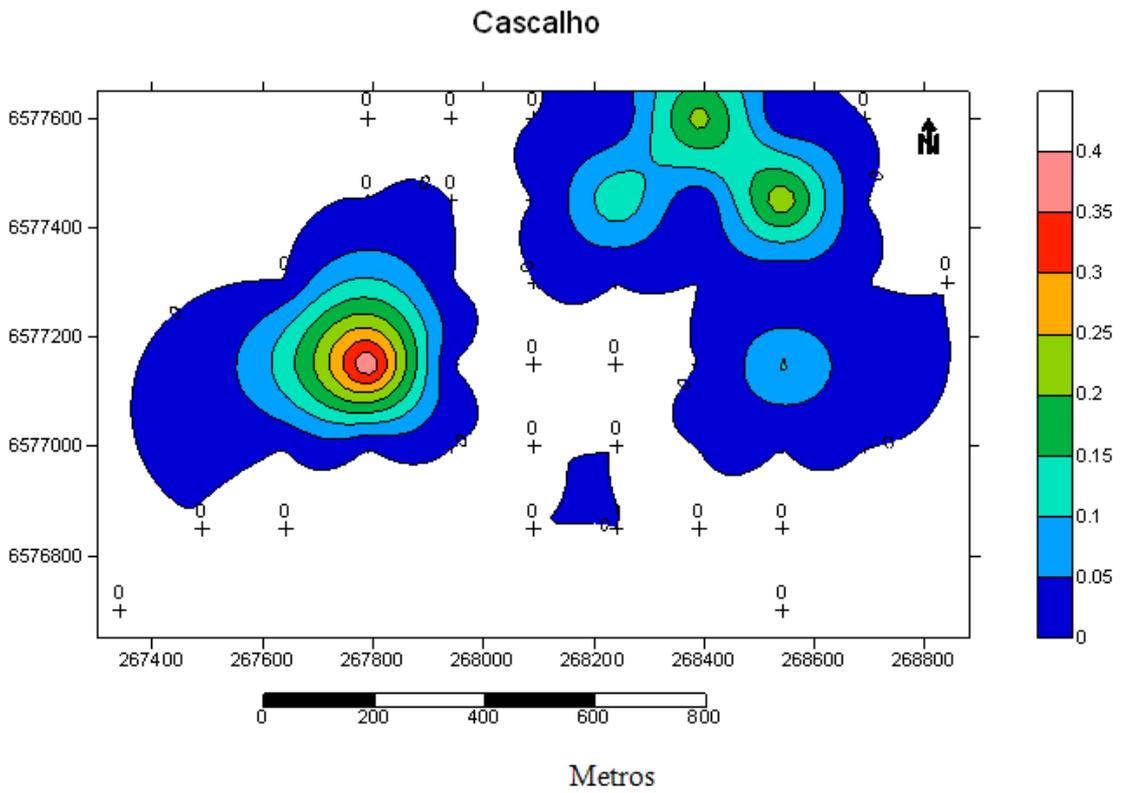


Figura 9- Representação em porcentagem da concentração de cascalho.

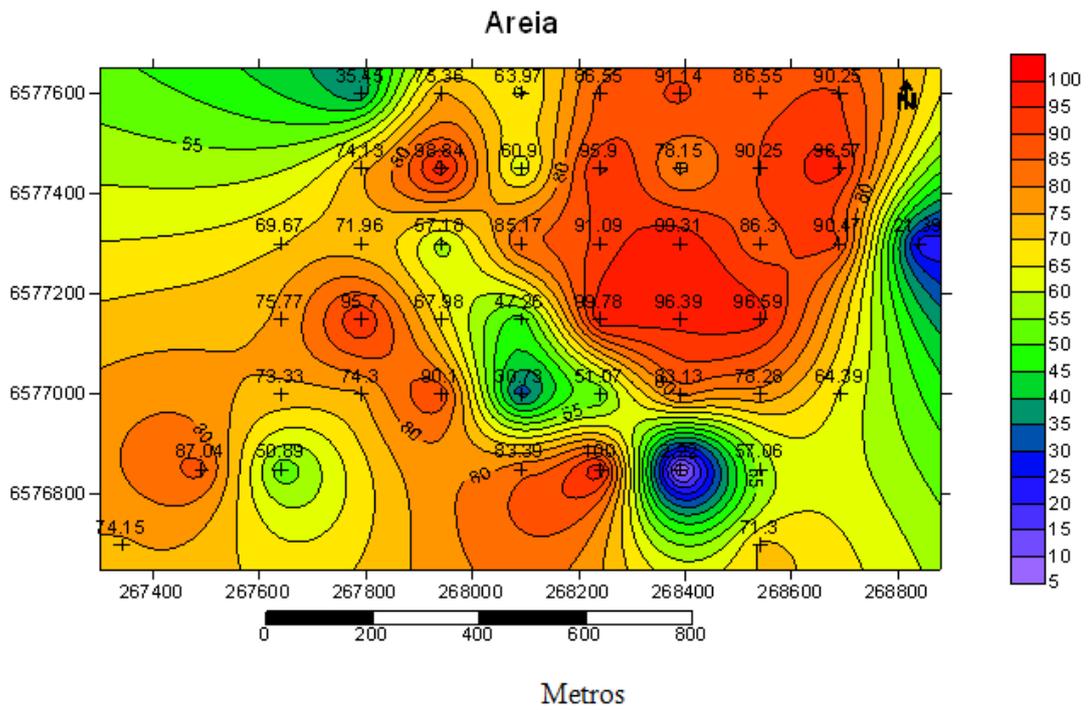


Figura 10- Representação em porcentagem da concentração de areia

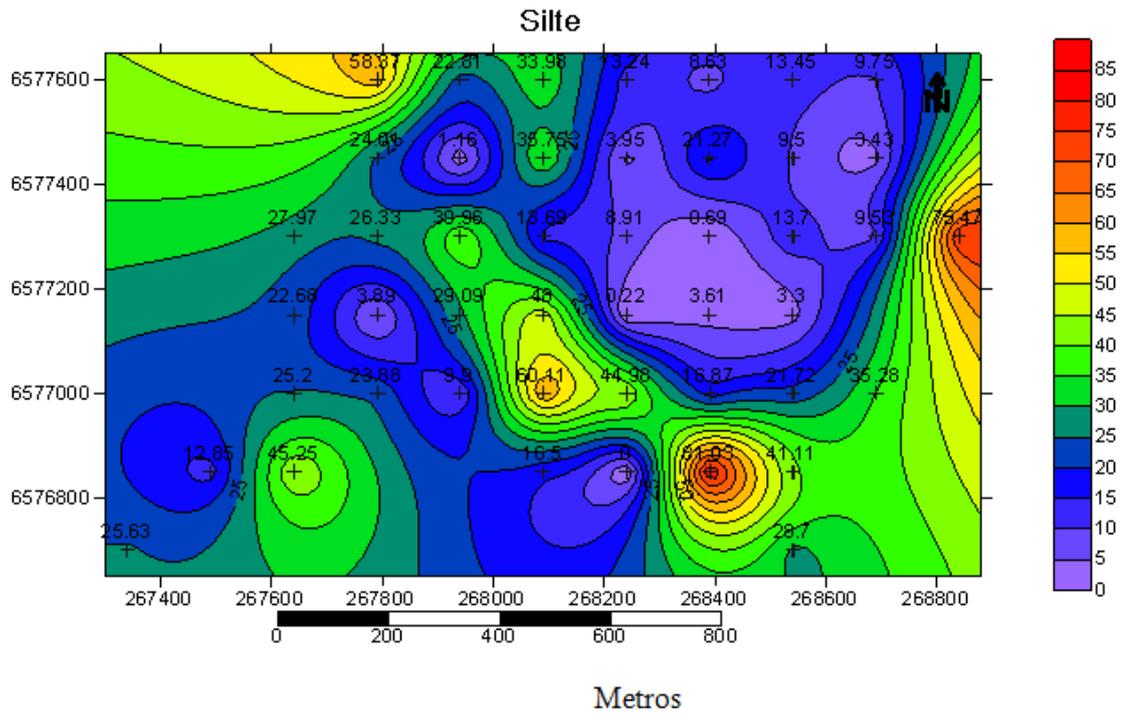


Figura 11– Representação em porcentagem da concentração de silte

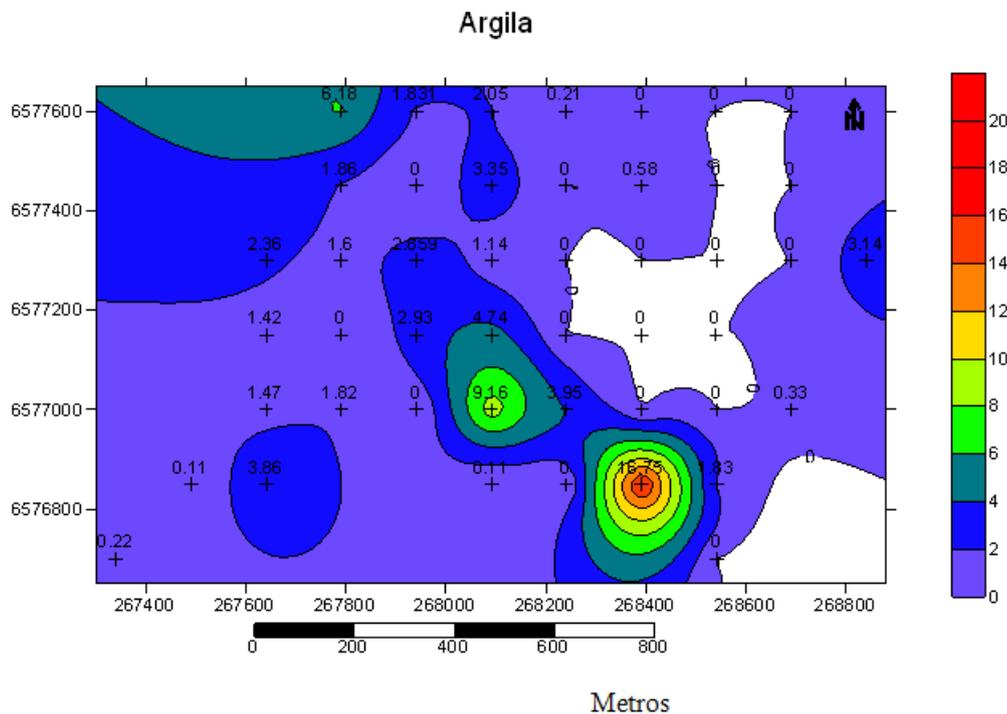


Figura 12– Representação em porcentagem da concentração de argila.

4.3 Classificação de resíduos

O material contido na bacia de rejeitos das Minas do Camaquã tem origem conhecida, pois é oriundo da planta de beneficiamento da flotação de Cu. Este rejeito não tem características de: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Portanto de acordo com a ABNT 10004, este material classifica-se como “Resíduo não perigoso classe II”.

De acordo com as análises realizadas para os elementos Cu e Fe, os extratos solubilizados de cada área não possuem constituintes superiores aos limites máximos aceitáveis pela NBR 10004 (Tabela 5).

Tabela 5 – Resultados dos constituintes analisados

Parâmetro mg/L	Limite máximo no extrato mg/L	Concentração por área		
		A1	A2	A3
Cobre	2,0	0	0	0
Ferro	0,3	0,003	0	0

4.4 Reaproveitamento do rejeito

A avaliação da qualidade dos tijolos confeccionados com rejeito foi feita a partir de ensaios simples de retração e absorção de água. Na retração obteve-se resultados satisfatórios, diminuindo apenas 1 cm no comprimento e na largura do corpo de prova, estando de acordo com os parâmetros utilizados pelas olarias da região de Caçapava do Sul.

Verificou-se que todos os traços da formulação atenderam a NBR 8492, que prescreve absorção máxima individual de 22%. Notam-se nos traços 1°, 2° e 3° que quanto mais rejeito menor será a absorção de água (Tabela 6), o que significa um bom resultado. Após o processo de queima, foi feita uma análise visual dos corpos de prova, observando-se que a amostra que continha 10% de rejeito ocorreu diversas fraturas. As outras amostras não apresentaram nenhuma fratura, concluindo-se que o resultado geral foi satisfatório.

Tabela 6 – Ensaios de absorção de água e retração.

Amostra	Traço	Seco (g)	Saturado	Absorção de água após 24 h imersos (%)	Dimensões iniciais (cm)	Dimensões após a queima (retração)(*)
1	10%	0,685	0,805	17,5	15x9x5	14x8x5
2	30%	0,675	0,770	14,1	15x10x4	14x9x4
3	50%	0,825	0,940	13,9	15x10x4	14x9x4
4	Mista	0,740	0,845	14,2	15x10x4	14x9x4

(*)% de participação do rejeito na mistura dos componentes do tijolo ("traço").

5 Conclusões

Após análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios, conclui-se que:

Através do estudo de pré-viabilidade econômica para método de lixiviação, na provável hipótese de recuperação do Cu, ficou constatado que não é viável sua aplicação, pois o total do investimento é muito alto em relação ao faturamento bruto total previsto. Sendo que não foram considerados os custos operacionais e o custo com recuperação ambiental, que não se aplica ao *software* MAFMO, e que tornaria ainda mais inviável à recuperação do investimento.

No teste de granulometria com o analisador de partículas via úmido, obteve-se resultados detalhados quanto à distribuição dos tamanhos de grãos, mostrando que a maioria das amostras contém partículas entre areia fina (0,125mm) até areia muito fina (0,0625mm). Quanto à classificação dos grãos verificou-se que a seleção na maioria das amostras é pobremente selecionada, significando que a distribuição do material é heterogênea. Este resultado é muito importante para a avaliação do reaproveitamento do rejeito para fabricação de materiais da construção civil.

Nas análises de classificação de resíduos sólidos para os elementos Fe e Cu, constatou-se que o rejeito depositado na área de estudo é um material não perigoso e inerte. Para um maior detalhamento, outros elementos correspondentes a ABNT 10004 poderiam ainda ser analisados através do método de absorção atômica, mas provavelmente ficariam em níveis abaixo do limite máximo. Este resultado indica que o material pode ser utilizado em outras aplicações sem o risco de contaminação de usuários e do meio-ambiente.

A incorporação do resíduo possibilita condições favoráveis para se produzir tijolos tendo todos os ensaios de qualidade satisfatórios, com exceção da primeira formulação (10% de rejeito), que no processo de queima exposto a alta temperatura apresentou trincas e fraturas. Testes com maiores porcentagens de rejeito e ensaios de resistência à tração e compressão podem ser realizados para melhor avaliar sua aplicabilidade na construção civil, embora já se possa concluir que haja pré-viabilidade técnica para o caso dos tijolos.

Agradecimentos

Os autores desse projeto agradecem às empresas Cléo dos Santos Cerâmica e Mineração Mônego (proprietária da CBC – Minas do Camaquã), assim como servidores, professores e colegas que nos ajudaram diretamente na obtenção de nossos resultados.

Referências

- ABIB, P. Projeto expansão Camaquã. Caçapava do Sul, (1979).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. Resíduos Sólidos- Classificação. NBR 10004. Rio de Janeiro, 77 pp, (2004).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Tijolo maciço de solo-cimento- Determinação da resistência á compressão e da absorção de água: NBR 8492. Rio de Janeiro, 5p, (1984).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Tijolo maciço de solo-cimento: NBR 8491. Rio de Janeiro, 4p, (1994).
- BALDO, J.B; MARTINS, C.A. Resíduo zero na indústria de pisos. Universidade Federal de São Carlos, Departamento de engenharia e materiais, Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. (2003).
- CAMARGO, M.G. SysGran: um sistema de código aberto para análises granulométricas do sedimento. Revista Brasileira de Geociências 345: 345–352, (2006).
- CARVALHO, M.T; JUNIOR, I.F; ZAMPIERONR, J.V. Estudo Preliminar da Interação de Escória de Níquel em argamassa de Cimento Portland. UEMG Depto. Engenharia Civil- Laboratório de Materiais de Construção Civil-LabMCC. (2007).

- CHAVES, A.P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, A Flotação no Brasil. São Paulo: Editora Signus. Vol.4. PP.199-217 (2009).
- DUARTE, A.P. Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco. UFMG, Programa de pós - graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 130 pp, (2008).
- FLECK, A; ZAGO, L.E. Estudo e caracterização para o reaproveitamento do rejeito remanescente da mineração de cobre das Minas do Camaquã Caçapava do Sul – RS, 107 pp, (2013).
- FOLK, R.L. & Ward, W.C. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3-27, (1957).
- JOHN, V.M.; ZORDAN, S.E. Research & development methodology for recycling residues as building materials - a proposal, *Waste Management*, 21, pp. 213-219 (2001).
- LME - London Metal Exchange 2014, disponível em: <<https://www.lme.com/>>
- NETO, R.O., SOUZA, L.E., PARANHOS, R. S., FLECK, A; ZAGO, L.E., TRINDADE, A.O., BRUM, I.A.S. Waste characterization of copper ore processing for sustainable management in the closure of mining. In proceedings: International Conference of Solid Waste Management – ICSW. (2014).
- RIBEIRO, J.A.S. Cobre. Balanço Mineral Brasileiro, 52pp, (2001).
- VEIRA, A; CECHINEL, B; DEGHEHARD, C; MAGNUS, D; HOLTHAUSEN, R; TASSI, R; MODESTO, C; JUNIOR, A, N; CARGNIN, M. Estudo do Processo de Obtenção e Caracterização de Tijolos Solo-Cimento. Instituto Maximiliano Gaidzinski (IMG). Cerâmica Industrial. 47 pp. (2007).
- PETRUCCI, E. Concreto de Cimento Portland. Globo, ISBN 85-250-0225-9, (1987).
- PETTER, C.O; CARRICONDE,M.C.Verificação da aplicabilidade do programa MAFMO como ferramenta auxiliar na estimativa de custos em projetos conceituais, UFRGS,2010,disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/25053?show=full>