

## **ESTÉREIS DA EXPLORAÇÃO DE MINÉRIOS DE OURO E COBRE COMO MATÉRIA-PRIMA PARA REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

**CUNHA, J.M.<sup>1</sup>; FONSECA, M.V.A.<sup>1,2</sup>; MOTTA, C.F.M.<sup>1</sup>; ALMEIDA, R.S.<sup>3</sup>; SIQUEIRA A.S.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Knowledge Direction do Brasil Ltda, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

<sup>3</sup>Lundin Mining Corporation, Mineração Maracá Ind. Com. – Chapada, Brasil

### **RESUMO**

A geração de estéreis de mineração é comum nas atividades deste setor em nível global. Por sua vez, alternativas de aproveitamento desses estéreis como insumos circulares para processos industriais oferecem meios viabilizadores de conceitos preconizados pela economia circular – e.g. *upcycling*. Nesse sentido, a sinterização desses recursos para produção de revestimentos cerâmicos apresenta-se como chave para grandes volumes minerados e redução de custos com geração de receita. Ademais, a oportunidade da geração de emprego e renda para comunidades locais, mesmo após o esgotamento das minas, representa um fomento ao desenvolvimento sustentável. Este trabalho introduz a tecnologia *nextone* como solução para valorização de estéreis de mineração. O volume gerado pela Lundin Mining, em sua unidade instalada em Alto Horizonte – GO –, derivado do processamento de minérios de ouro e cobre, exhibe potencial para ofertar produtos sustentáveis de alta qualidade ao mercado de revestimento cerâmico. A abordagem estratégica desenvolvida, discutindo aspectos técnicos e econômicos, estimula uma nova visão à gestão de rejeitos da mineração e ao *design* de produtos e processos. O passo seguinte é aplicar essa abordagem a outros rejeitos da mineração e avaliar essa tecnologia em processos de recuperação de metais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduo Sólido, Estéril de Mineração, Revestimento Cerâmico, Inovação

### **ABSTRACT**

Sterile's generation is usually observed in mining activity at global level. On the other hand, recovery of these residues as circular feedstock for industrial processes offer means to enable concepts from circular economy – e.g., *upcycling*. In this regard, sintering is considered for producing ceramic coatings from these resources. It is a mean to absorb the large volume mined and to reduce costs while at the same time improve revenue. Besides, the opportunity of job and income generation for local communities, even after mining depletion, meets with sustainable development goals. This work intends to introduce *nextone* technology as a solution for sterile's generation based on the volume resulted from gold and copper processing by Lundin Mining in Alto Horizonte Unit – GO. Material properties are described to evaluate its high-quality and sustainability compared to traditional ceramic coatings. Technical and economic evaluation are considered in order to encourage a new approach on waste management and product design. The next step is to apply this approach to other mining waste and evaluate this technology in metal recovery processes.

**KEYWORDS:** Solid residue, Sterile, Ceramic coating, Innovation

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais *players* mundiais na comercialização de minérios para o mercado global. Neste sentido, o setor de mineração apresenta participação considerável no saldo da balança comercial e no recolhimento de tributos e encargos (Cunha, 2022). Por sua vez, a perspectiva de conduzir a economia sob um modelo de desenvolvimento sustentável implica na demanda por alinhamento deste setor a instrumentos reguladores, como a gestão integrada de resíduos sólidos (PNRS, 2010; PNSB, 2020). Dessa forma, o reposicionamento do setor diante dos impactos ambientais intrínsecos a sua atividade é fator determinante para a sua sobrevivência futura (Fonseca *et al.*, 2019).

Dentre os resíduos sólidos gerados pela atividade mineradora, destacam-se os estéreis de mineração. Os estéreis são definidos pela Comissão Brasileira dos Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP) como “uma porção de uma jazida mineral que não apresenta minério ou cujo teor de minerais ou elementos úteis esteja abaixo do teor de corte”. A SIGEP ressalta ainda que o volume de estéreis pode inviabilizar a mina por onerar o custo da mineração. Esta condição representa um passivo para o setor e o meio ambiente, de modo que a gestão sobre a sua geração permite avaliar alternativas de aproveitamento para adequar a sua cadeia de produção aos preceitos de sustentabilidade (World Economic Forum, 2015; Weetman, 2016).

Uma maneira de aproveitar estes resíduos consiste na sua conversão a materiais cerâmicos e vítreos. Esta tecnologia está disponível há, pelo menos, cinco décadas (Strnad, 1986; Rawling *et al.*, 2006). No entanto, a sua limitação era comumente atribuída à demanda por adições cuja finalidade era ajustar a composição química da matéria-prima e que, ocasionalmente, representava a inviabilidade econômica do produto final. Desta forma, a tecnologia *nextone* apresentada neste trabalho representa uma metodologia para avaliar a viabilidade tecnológica do resíduo sólido para destinação como pisos e revestimentos à construção civil, em contrapartida aos produtos tradicionais, como porcelanatos e granitos.

Vale ressaltar que esta iniciativa oferece também benefícios às comunidades locais, estimulando a prestação de serviços e a comercialização de bens, a partir da instalação de uma unidade produtora de pisos e revestimentos cerâmicos derivados de resíduos sólidos próxima à mina. A implementação do processo produtivo não representa uma condição limitante, porque é comum às linhas de produção de pisos e revestimentos cerâmicos usuais (Fonseca *et al.*, 2019). Portanto, os custos da produção e as especificações técnicas são comparáveis àqueles dos produtos tradicionais, apresentando-se em particular como materiais sustentáveis e passíveis de serem oferecidos ao mercado com preços competitivos.

O objetivo deste trabalho é realizar uma prova de conceito (PoC) para avaliar os potenciais tecnológicos e econômicos do aproveitamento do resíduo sólido gerado pela unidade de Alto Horizonte (GO), da Lundin Mining. Sendo assim, buscou-se identificar a viabilidade em utilizar estéreis de mineração como matéria-prima para a produção de materiais cerâmicos, a partir do conceito *upcycling*, ou sobreciclar, da economia circular – i.e. processo de conversão de materiais em novos materiais ou produtos de melhor qualidade ou de maior funcionalidade (Weetman, 2016). Além disso, uma avaliação mercadológica do setor cerâmico brasileiro é considerada para discutir aspectos econômicos da solução proposta, tendo em vista que esta tecnologia impacta o setor de mineração a montante e o setor de construção civil a jusante.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Material

O material estudado neste trabalho é um estéril de mineração, gerado nos processos de concentração de ouro e cobre da mineradora Lundin Mining Corporation.

### 2.2. Métodos

#### 2.2.1. Técnicas de caracterização

##### 2.2.1.1. Microscopia com aquecimento

A microscopia com aquecimento permite analisar modificações dimensionais da amostra em função da variação controlada da temperatura, indicando as temperaturas características – e.g. ponto de deformação, semiesfera e escoamento da amostra. O ponto de deformação é o valor da temperatura onde uma peça conformada da amostra exhibe deformação inicial de suas dimensões. Por sua vez, o ponto de semiesfera refere-se à transição entre o máximo de deformação e o início do escoamento. Por fim, o ponto de escoamento corresponde ao valor de temperatura para o qual a massa fundida do resíduo exhibe escoamento fluido (Venturelli, 2011).

A amostra foi analisada em equipamento Hesse-Instruments EMI II com perfil de aquecimento definido entre a temperatura ambiente e 800°C sob razão de aquecimento igual a 12°C/min e entre 800°C e 1500°C sob razão de aquecimento igual a 10°C/min. As análises foram obtidas em colaboração com LASID/UFRGS Brasil, atendendo à normatização DIN 51730/ISO 540 (1995-03-15).

##### 2.2.1.2. Classificação granulométrica

A amostra de estéril de mineração foi cominuída por britagem e moagem (Figura 1). Em sequência, foi classificada por peneiramento e a seguinte classificação granulométrica foi obtida (Tabela 1). A partir dos valores tabelados, verifica-se que o percentual do passante da peneira de abertura 0,037 mm (400 mesh) foi equivalente à fração mássica de 9,32%.



Figura 1. Amostra britada de estéril de mineração gerado nos processos de concentração de ouro e cobre.

Tabela 1. Distribuição granulométrica resultante da moagem da amostra de estéril de mineração.

Padrão Tyler™ (mesh)	Abertura (mm)	Fração mássica (%)
100	0,150	0,00
140	0,106	35,80
200	0,075	22,00
270	0,053	27,52
400	0,037	5,36

### 2.2.2. Ensaio de sinterização

A partir da microscopia com aquecimento, obteve-se o registro sequencial das imagens da amostra analisada (fotomicrografia) em suas respectivas temperaturas. Esta informação permitiu construir o gráfico de variação da retração linear ( $R_L$ ) em função da temperatura ( $T$ ). A retração linear foi calculada de acordo com a expressão indicada na Equação 1, onde  $L_0$  corresponde à medida da altura inicial da amostra e  $\Delta L$  é referente à variação entre um valor de altura  $L$  imediatamente posterior e o valor inicial.

$$R_L = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

A amostra foi conformada a frio com o auxílio de uma mistura de álcool polivinílico (PVA) e prensada para obter o compactado a ser sinterizado. Em seguida, a peça verde foi transferida para o forno de sinterização onde foi submetida ao tratamento térmico à temperatura de sinterização, definida a partir do gráfico  $R_L \times T$ .

### 2.2.3. Ensaio de lixiviação e solubilização

A classificação do resíduo sólido foi avaliada a partir de ensaios de lixiviação e solubilização realizados segundo a norma ABNT NBR 10004:2004. A classificação permitiu caracterizar o resíduo quanto à inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e toxicidade.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Avaliação da viabilidade tecnológica do resíduo

Os resultados da microscopia com aquecimento permitiram identificar as temperaturas características do material. Verificou-se que o ponto de deformação corresponderia à temperatura igual a 1250°C, enquanto o ponto de semiesfera e de escoamento ocorreriam, respectivamente, a valores de temperatura iguais a 1304°C e 1381°C (Figura 2).

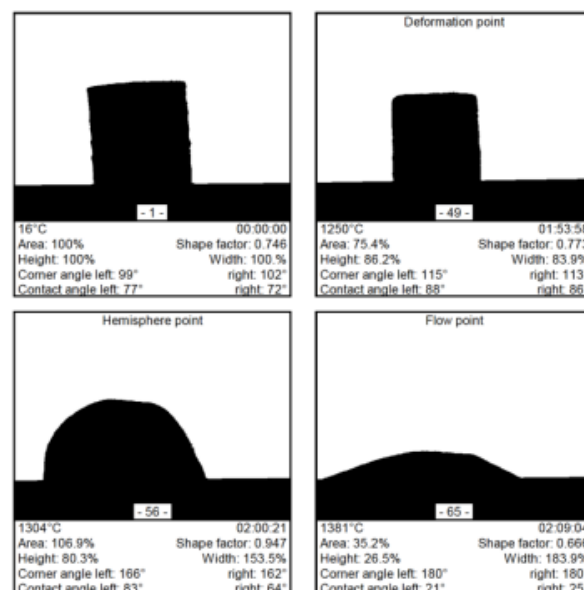


Figura 2. Resultados da microscopia com aquecimento, revelando os aspectos físicos da amostra.

O ponto de escoamento revelado acima de 1350°C indica que o material não é recomendável para a produção de materiais vitro-cerâmicos, tendo em vista que corresponde a um intervalo superior àquele comumente praticado pelo setor vidreiro. Dessa forma, estas informações sugerem um favorecimento da rota de sinterização para a produção de materiais cerâmicos.

Sendo assim, obteve-se o gráfico  $R_L \times T$  para identificação da temperatura de sinterização do material (Figura 3). A temperatura de sinterização foi então verificada aplicando o método de temperatura inicial extrapolada. Este método corresponde à observação do ponto de inflexão na região de variação dimensional, no qual define-se um segmento de reta tangente a este ponto e, em seguida, um segmento de reta coincidente ao registro imediatamente anterior à variação (neste caso, ao eixo das abscissas).

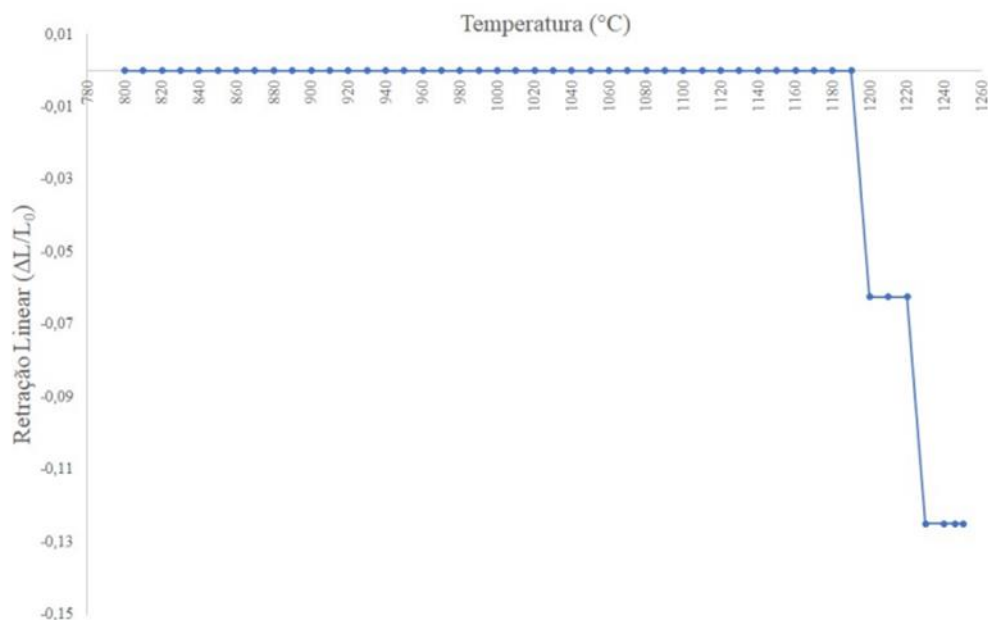


Figura 3. Curva de sinterização obtida a partir da fotomicrografia da amostra.

O ponto no qual os segmentos de reta traçados cruzam-se corresponde à temperatura de sinterização do material. Pela Fig. 3, este ponto corresponde ao valor de temperatura de, aproximadamente, 1250°C. Desta forma, este ponto foi admitido como estimativa inicial para submeter a peça conformada à sinterização. Contudo, os ensaios de sinterização revelaram baixa adesão entre os grãos e significativa fragilidade do material processado termicamente.

Ensaio posteriores foram realizados para valores de temperatura iguais a 1300°C e 1350°C. Esta última temperatura revelou-se adequada para a sinterização do compactado, gerando peças com parâmetros qualitativos equivalentes aos observados em porcelanatos, como a adequação ao manuseio e ao polimento superficial. O compactado produzido por prensagem e a peça sinterizada após polimento foram reunidas na Figura 4.

A partir dos resultados verificados por esta etapa inicial voltada à PoC, sugere-se realizar experimentos de adição de rejeitos de barragem para obtenção de misturas proporcionais, a fim de avaliar a possibilidade de sinterizar o material a valores de temperatura mais brandos e estimular a viabilidade econômica do processo. Com isso, a

demonstração da viabilidade tecnológica do aproveitamento de estéreis de mineração para o setor da construção civil tornar-se-á mais sustentável.

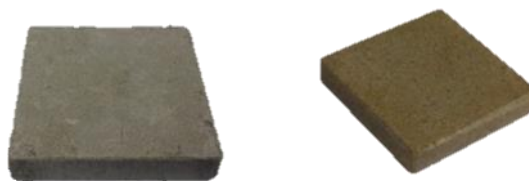


Figura 4. À esquerda, compactado produzido após mistura com PVA e prensagem. À direita, peça sinterizada e polida.

Vale ressaltar que os ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo permitiram classificá-lo como resíduo não perigoso inerte classe IIB. Isso significa que o material não exibe características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e toxicidade. Além disso, os ensaios de lixiviação e solubilização indicaram que a amostra não apresenta nenhum parâmetro acima de seu respectivo valor máximo permitido (VMP).

### 3.2. Avaliação da viabilidade econômica

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (ANFACER), o Brasil ocupa a terceira posição em produção de revestimentos cerâmicos e a segunda em consumo global, além de estar entre os dez maiores exportadores mundiais. O setor é representado por 60 empresas, incluindo 71 unidades fabris e 137 marcas, concentrado nas regiões Sudeste e Sul do país e responsável pela geração de cerca de 28 mil postos de trabalho diretos (ANFACER).

Neste contexto, os materiais graníticos respondem por 45% do consumo brasileiro de rochas ornamentais. Em 2018, o total do consumo desses materiais alcançou o valor de 67,8 milhões de metros quadrados, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHA). Desse total, 30 milhões de metros quadrados corresponderam ao granito serrado, alternativa de menor preço – i.e. entre R\$ 150,00 e R\$ 180,00 por metro quadrado.

Por sua vez, a venda de porcelanatos alcançou, no mesmo período de 2018, o equivalente a 150 milhões de metros quadrados (ANFACER) e o seu preço oscilou geralmente entre R\$ 100,00 e R\$ 150,00 por metro quadrado, e em função do fabricante. Com isso, o mercado de granito serrado e porcelanato reuniu um total de quase 200 milhões de metros quadrados por ano, o que representou cerca de 26% de vendas totais de pisos e revestimentos cerâmicos no período (ANFACER).

Do exposto, a quantidade de porcelanato cerâmico derivado do processamento de estéreis de mineração a escoar é estimado em cerca de 20 mil toneladas mensais, admitindo placas de 40 cm x 40 cm e 12 mm de espessura, o que representa, aproximadamente, 550 mil metros quadrados por mês, ou o equivalente a 6,6 milhões de metros quadrados por ano. Este valor corresponde a cerca de 0,7% do mercado total de pisos e revestimentos ou 3,3% do mercado segmentado, incluindo apenas o granito serrado e o porcelanato como potenciais concorrentes.

Assumindo custo e disponibilidade do gás, flexibilidade da linha de produção e a estratégia mercadológica a ser adotada, avalia-se que o produto derivado de estéreis de mineração possa ser introduzido no mercado com preços competitivos. Isso porque cerca de 50% dos custos da produção são compostos basicamente pelo consumo de energia térmica (23%), esmaltação e decoração (23%) e matéria-prima (5,3%), segundo Junior *et al.* (2010). A supressão de um ou mais desses custos já representa um impacto significativo à operação.

Nesse sentido, considerando não haver custo de aquisição de matéria-prima – i.e. estéreis de mineração – ou não haver a necessidade de introduzir esmaltação e decoração ao produto, o qual exhibe considerável apresentação após polimento, dotado de variações de cor e tonalidade comuns àquelas de rochas decorativas naturais, os custos de operação são mitigados. Com isso, a competitividade do produto é demonstrada, ainda que a economia gerada na eliminação do custo associado à disposição de estéreis de mineração em espaço da mina não esteja sendo considerada nesta etapa.

#### 4. CONCLUSÕES

O aproveitamento de estéreis de mineração gerados no processo de concentração de ouro e cobre foi verificado, a partir de sua conversão a material cerâmico via rota de sinterização. Este material apresenta características que o torna uma alternativa vantajosa técnica e economicamente para a produção de pisos e revestimentos para atender ao mercado da construção civil.

Neste sentido, os objetivos deste trabalho foram satisfeitos mediante a verificação da viabilidade tecnológica, sustentada em técnicas de caracterização e ensaios característicos, e econômica, a partir de um estudo mercadológico e premissas pertinentes à gestão de resíduos. Com isso, a fase inicial definida como PoC foi concluída e a tecnologia *nextone* foi apresentada.

Vale destacar que a discussão sobre o estudo mercadológico permitiu avaliar a dimensão da oferta de materiais para a produção de pisos e revestimentos cerâmicos, indicando que o mercado efetivo e correspondente à introdução de materiais cerâmicos derivados de estéreis de mineração representa cerca de 0,7% do mercado total de pisos e revestimentos.

Por fim, este trabalho discute uma metodologia que contribui com a implementação de conceitos de economia circular na produção industrial, permitindo a valorização de um material que seria avaliado na cadeia produtiva como rejeito e a sua conversão a um produto de utilidade à sociedade.

Com isso, estes resíduos apresentam-se como alternativas sustentáveis aos recursos naturais utilizados como matéria-prima para produção de pisos e revestimentos cerâmicos, aumentando a disponibilidade desses recursos às gerações futuras conforme preconiza o desenvolvimento sustentável.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à mineradora Lundin Mining Corporation por fornecer o resíduo sólido e lançar o desafio motivador deste trabalho e aos colaboradores do LASID/UFRGS e CAMPO por contribuírem no desenvolvimento deste trabalho, selecionado através do importante hub de inovação aberta Mining Hub ciclo 7.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABIROCHA. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHA). [Internet] 2021. Disponível em: <<https://abirochas.com.br>>
- ANFACER. Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. [Internet] 2021. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/brasil>>
- Cunha, J. M. Valorização de resíduo sólido do processamento de minério de zinco através da produção de materiais vítreos no contexto da economia circular. [Dissertação de Mestrado]. Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro; 2022.
- Fonseca, m. V. A.; Motta, C.; Rodrigues, L.; Siqueira, M.; Monteiro, J.; Gomes, R.; Pereira, D.; Nishiyamamoto, E.; Bissacot, T.; Mello, L. Minimizing environmental impacts through the elimination of tailings from mining operations. In: 6th International Congress on Environment and Social Responsibility in Mining. Sustainable Mining; 2019 p. 1-8.
- Junior, M. C.; Boschi, A. O.; Motta, J. F. M.; Tanno, L. C.; Sintoni, A.; Coelho, J. M.; Caridade, M. Panorama e Perspectivas da Indústria de Revestimentos Cerâmicos no Brasil. Cerâmica Industrial, v. 15 (3), 2010 p. 7–18.
- PNRS. Política nacional de resíduos sólidos. (2010) LEI 12305, 02 de agosto de 2010. [Internet] 2021; Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>
- PNSB. Política nacional de segurança de barragens. (2020) LEI 14066, 30 de setembro de 2020. [Internet] 2021; Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>>
- Rawlings, R. D.; Wu, J. P.; Boccaccini, A. R. Glass-ceramics: their production from wastes – a Review. J Mater Sci 41; 2006. p.733-761.
- SIGEP. Comissão brasileira dos sítios geológicos e paleobiológicos. [Internet] 2022; Disponível em: <[estéril \(cprm.gov.br\)](http://estéril.cprm.gov.br)>
- Strnad, Z. Glass-Ceramic materials: liquid phase separation, nucleation and crystallization in glasses. Glass Science and Technology 8. Elsevier; 1986.
- Weetman, C. A circular economy handbook for business and supply chains: repair, remake, redesign, rethink. First edition: Kogan Page Ltd; 2016.
- World economic forum; Accenture. Beyond supply chains empowering responsible value chains. Industry Agenda. Janeiro, 2015.