

## Aplicação de rejeito de mineração em pequena escala de ouro na produção de tijolo de solo-cimento

Application of tailing from small-scale gold mining in the production of soil-cement brick

Ana Cláudia Franca Gomes<sup>1,2</sup>, Carol Cardoso Moura Cordeiro<sup>2</sup>,  
Roberto Aguiar dos Santos<sup>3</sup>, Vítor Rodrigues Alves Soares<sup>4</sup>,  
Sônia Denise Ferreira Rocha<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (PPGEM/UFMG). Escola de Engenharia, CEP: 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Mato Grosso (FAENG/UFMT). Campus de Várzea Grande, CEP: 78060-900, Cuiabá, MT, Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (DEC/UFV). CEP:36570-900, Viçosa, MG, Brasil

<sup>4</sup>Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (DEMIN/UFMG). Escola de Engenharia, CEP:31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

e-mail: anafrancca@yahoo.com.br, carolcardoso.eng@gmail.com, santosr@ufv.br, vitoralves2194@gmail.com, sdrocha@demin.ufmg.br

---

### RESUMO

A economia circular na mineração, com a utilização de rejeitos para geração de novos produtos, destaca-se como forma potencial de mitigar o passivo ambiental da atividade mineral. Este trabalho avaliou a utilização de rejeito da mineração de ouro, como matéria-prima principal, na composição de tijolos tipo solo-cimento. Para tal, foram preparadas misturas com traços cimento CII-Z-32 (1): rejeito (5-10): solo (0-5) e submetidas à caracterização física (distribuição granulométrica pela NBR 7181, massa específica por picnometria a gás hélio e área superficial específica por BET), química (fluorescência de raios-X), mineralógica (difração de raios-X), geotécnica (limites de consistência) e ensaios de compactação (NBR 12023), sendo este último ensaio determinante do teor de umidade ótimo utilizado na produção dos tijolos para cada mistura. Os parâmetros mecânicos dos tijolos foram caracterizados segundo a NBR 8491 e a avaliação ambiental foi realizada através da NBR 10004. Os tijolos com traço 1:5:5 alcançaram resistência a compressão de 3,1 MPa e absorção de água de 17,0%, compatíveis com a exigência da norma. A NBR 10004 classificou estes tijolos como um produto não perigoso e não inerte devido à solubilização de alumínio superior ao limite estabelecido. A liberação de alumínio está associada a composição química natural das matérias-primas. Por outro lado, contaminantes do rejeito, como o cianeto, foram imobilizados pela mistura cimento, rejeito e solo através das fases de hidratação do cimento (C-S-H e C-A-S-H). Portanto, os estudos demonstraram que o rejeito da mineração de ouro estudada, até então considerado passivo ambiental, apresenta potencial para produção de tijolos tipo solo-cimento atendendo as especificações técnicas e ambientais.

**Palavras-chave:** Mineração sustentável, Economia circular na mineração, Caracterização de rejeito, Tijolo ecológico.

---

### ABSTRACT

The use of mining tailings meets the needs of circular economy as it increases the useful service life of this material. The present work evaluated the use of gold mining tailings (main raw material) in the production of soil-cement bricks formed by cement, tailings and soil. Mixtures were prepared with traces of cement CII-Z-32 (1): tailings (5-10): soil (0-5) and subjected to physical characterization (particle size distribution - NBR 7181, specific mass by picnometry - helium gas, and specific surface area - BET), chemical (X-ray fluorescence), mineralogical (X-ray diffraction), geotechnical (consistency limits) and compaction tests (NBR

12023), the latter being used to determine the optimum moisture content used in the production of the bricks for each mixture. The mechanical parameters of the bricks were characterized according to NBR 8491 and the environmental assessment was carried out using NBR 10004. The soil-cement brick with the addition of 50% of soil reached values of  $f_t = 3.1$  MPa and  $A = 17.0\%$ . However, even if it meets the specifications of NBR 8491, each mining tailing has unique characteristics of hazardousness. Therefore, the brick with 50% of soil was evaluated according to NBR 10004 in which it was classified as non-dangerous, but not inert due to the high content of aluminum. The higher the soil content, the closer these parameters are to the maximum allowed by the standard. The chemical evaluation showed phases of cement hydration that are related to the stabilization of contaminants such as cyanide. Finally, the tailing studied demonstrated their potential use as a raw material in the manufacture of soil-cement bricks by meeting the Brazilian's specifications. It is suggested that new bricks with higher proportions of soil be evaluated.

**Keywords:** Sustainable mining, Mining circular economy, Tailing characterization, Ecological brick.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A Agência Nacional de Mineração (ANM) reportou que no ano de 2019 a produção de substâncias metálicas gerou um lucro aproximado de 129 bilhões de reais. Desse montante, o ouro é o segundo bem metálico mais comercializado no país e o principal extraído no estado de Mato Grosso. Entretanto, ainda que seja de extrema importância para a sociedade, a mineração é alvo de constante debate devido ao fato de explorar recursos naturais não renováveis. Além disso, com a elevada produção de minério, também são geradas quantidades expressivas de rejeito que são depositados em pilhas ou barragens cujos riscos associados foram enfatizados pela ruptura da barragem em Brumadinho, da Vale, em 2019 [1].

O conceito de economia circular mineral vem ganhando força por objetivar a potencialização do uso de recursos minerais. Enquanto a tradicional economia linear se baseia na extração, produção, uso e descarte de resíduos; a economia circular propõe resgatá-los e mantê-los na cadeia produtiva pelo máximo tempo possível, ainda que em outro setor industrial [2-6].

A mineração é o setor industrial que extrai os recursos minerais, ao passo que a construção civil é um dos maiores consumidores desses bens. DOMINGUES [7] estima que 50% de todos os recursos minerais mundiais são destinados para a construção civil, e o consumo elevado desses recursos também gera fortes impactos ambientais. Com o objetivo de adotar práticas que incorporem os conceitos da economia circular, pesquisas que envolvem a fabricação de tijolos tipo solo-cimento utilizando materiais secundários, como rejeitos de mineração, vem sendo conduzidas. A norma técnica brasileira NBR 8491 [8] define o tijolo de solo-cimento como um componente de alvenaria constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, e água, fabricado com a utilização de prensa manual ou hidráulica sem o processo de cozimento. Dentre as vantagens destes tijolos aplicados em bioconstruções se destacam a pequena emissão de CO<sub>2</sub>, baixa geração de subprodutos, fácil manuseio, e não exigência de mão de obra especializada [7, 9-14].

A utilização de rejeitos de mineração na produção de tijolos de solo-cimento é reportada por ZHOU *et al.* [11] que associaram rejeito de minério de ferro, escória de alto forno e cimento Portland como materiais principais para a produção de tijolos tipo solo-cimento que atenderam às normas chinesas. Empregando rejeito de minério de ferro e finos de pedreira para a fabricação de tijolos, NAGARAJ e SHREYASVI [15] obtiveram um produto que alcançou os padrões indianos. A NBR 8491 [8] foi atendida para os tijolos obtidos em situações diversas: VIEIRA [16] mesclou rejeito oriundo de uma pedreira, ou areia de britagem, a um solo argiloso no sul do Brasil; enquanto REIS *et al.* [17] avaliaram diferentes proporções de solo siltoso e quartzi-to (rejeito de rocha ornamental) da região sudeste do país; BEZERRA *et al.* [18] avaliaram misturas de rejeito de minério de ferro e cinza de cavaco de eucalipto; já VILELA *et al.* [19] fabricaram tijolos de solo-cimento com até 40% de rejeito de minério de ferro e solo silte-argiloso no estado de Minas Gerais.

Ainda que pesquisas que abordem a incorporação de rejeitos de mineração na indústria civil sejam cada vez mais frequentes, poucas utilizam rejeito de mineração de ouro porque o seu processamento envolve o uso de substâncias nocivas, tais como mercúrio e cianeto, a depender da geologia da jazida e do processamento mineral utilizado.

Sobre o uso de rejeitos da mineração de ouro na fabricação de tijolos de solo-cimento, ROY *et al.* [20] fabricaram tijolos que alcançaram as especificações indianas utilizando apenas rejeito e cimento (com adição de até 20%), entretanto, a grande quantidade de estabilizante, tornou os tijolos economicamente inviáveis. Já MALATSE e NDLOVU [21] testaram diferentes misturas de rejeito e cimento (adição de até 50%) na África do Sul; contudo, nenhum deles alcançou as especificações de resistência à compressão do país. Em ambos os estudos [20, 21], os autores sugeriram avaliações químicas e ambientais para afirmar o uso potencial destes tijolos produzidos com rejeito de mineração de ouro.

Para todas as pesquisas citadas [11, 15-21], os parâmetros principais avaliados foram resistência à compressão e absorção de água. Contudo, segundo [3, 4, 22], ademais desses indicadores, conhecer as características dos rejeitos é necessário, pois variações da composição química, mineralógica, granulométrica, assim como características de periculosidade são intrínsecos a cada rejeito e podem produzir tijolos com aspectos distintos.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho se dá na avaliação do uso de rejeito de mineração de ouro, como matéria-prima principal, na produção de tijolos de solo-cimento, considerando não só as características mecânicas estabelecidas pela NBR 8491 [8] para essa técnica de alvenaria, mas também as ambientais regidas pela NBR 10004 [23].

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho aborda a caracterização dos materiais utilizados para a fabricação dos tijolos de solo-cimento (rejeito de mineração de ouro, solo e misturas cimento:rejeito:solo), o estudo de dosagens das misturas, bem como a caracterização dos tijolos produzidos. Visando aplicar os preceitos da economia circular na mineração, o rejeito será avaliado como matéria-prima principal para a fabricação dos tijolos, visto que é considerado um passivo ambiental. Para tal, o rejeito foi amostrado segundo as diretrizes tomadas para a obtenção de alíquotas representativas em pequena mineração no estado de Mato Grosso conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 10007 [24]. Já o solo, da mesma região, foi coletado de uma profundidade de 50 cm da superfície em fase inicial de obra habitacional.

### 2.1 Caracterização dos materiais

Sobre a caracterização física, a massa específica dos sólidos foi obtida por picnometria a gás Hélio em equipamento marca Quanta Chrome, modelo MVP-1. A análise granulométrica conjunta seguiu as diretrizes da NBR 7181 [25] com peneiras da série Tyler (peneiras Bertel de 20 cm de diâmetro montadas em agitador de peneiras por 30 min – malhas de 4,75 a 0,075 mm). O material passante foi submetido a sedimentação utilizando hexametáfosfato de sódio como defloculante em aparelho dispersor da marca Via Test – 15 min a 10000 rpm. Por último, a área superficial específica (ASE) foi determinada pelo método de Brunauer, Emmett e Teller (BET), e a distribuição de tamanho de poros pelo modelo de Barret, Joyner e Hallenda (BJH) foram realizadas em equipamento Quantachrome, modelo Nova 1000 com temperatura de desgaseificação de 200°C e nitrogênio gasoso como adsorvato.

As caracterizações química, mineralógica e morfológica englobaram análise por fluorescência de Raios-X (FRX) por meio de um Espectrômetro de Raios-X da marca Rigaku, modelo 3550 (60 kV e 110 mA, fonte de tungstênio e janela de berílio). A difratometria de Raios-X foi executada em difratômetro de raios – X Philips (Panalytical) utilizando método do pó com sistema X'Perd-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW1830/40 e detector PW3020/000 executando varredura de  $2\theta$  de 10-80°. Para a análise dos difratogramas obtidos, utilizou-se o banco de dados Crystallography Open Database (COD). Já a microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em equipamento Phenom XL da ThermoFisher equipado com detector de energia dispersiva (EDS).

Seguiu-se as recomendações da NBR 6457 [26] para a preparação das amostras para os ensaios de caracterização geotécnica e limites de consistência, assim como para a determinação do teor de umidade higroscópica. O Limite de Liquidez (*LL*) foi obtido pela NBR 6459 [27] no aparelho Casagrande e a NBR 7180 [28] norteou a determinação do Limite de Plasticidade (*LP*). A diferença entre estes dois parâmetros fornece o valor do índice de Plasticidade (*IP*). Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

### 2.2 Estudo de dosagens

Os ensaios de compactação seguiram a metodologia descrita na NBR 12023 [29] com a finalidade de se determinar a densidade aparente seca máxima (*pd*) e o teor de umidade ótimo ( $w_{om}$ ) correspondentes à energia normal de compactação de misturas de solo-cimento (método A -100% < 4,75 mm). Para os ensaios, 12 corpos de prova foram moldados (para cada mistura) em cilindro pequeno ( $\phi = 10,0$  cm e altura = 17,8 cm), compactados com soquete pequeno (2,48 Kg - altura de queda  $305,0 \pm 2$  mm) em 3 camadas e 26 golpes por camada.

Produzidos os corpos de prova, amostras de aproximadamente 100 g foram retiradas do centro dos cilindros, colocadas em cápsulas, pesadas e condicionadas em estufa para determinação de umidade no momento da compactação.

Dentre as misturas propostas, fixou-se a quantidade de cimento tipo CII-Z-32 ao traço volumétrico

de 1:10 (uma parte de cimento para 10 partes de rejeito e/ou solo) segundo as orientações do boletim técnico BT-111 [30]. O rejeito de mineração foi utilizado como matéria-prima principal, e outros traços contendo solo (0 – 50%) também foram avaliados. Buscou-se avaliar traços com a maior quantidade possível de rejeito visando aplicar a base da economia circular como apresentado em [3, 4, 20-22]. As proporções selecionadas estão descritas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Misturas ou traços volumétricos avaliados para a produção de tijolos de solo-cimento.

| Parâmetros     | Razão Cimento: Rejeito: Solo |       |       |       |
|----------------|------------------------------|-------|-------|-------|
|                | 100                          | 90    | 70    | 50    |
| % rejeito      | 100                          | 90    | 70    | 50    |
| % solo         | 0                            | 10    | 30    | 50    |
| Traço (volume) | 1:10:0                       | 1:9:1 | 1:7:3 | 1:5:5 |

Sobre a escolha do ligante, o Conselho Administrativo de Defesa Econômica, CADE [31] reportou que os cimentos Portland compostos (CP II) são os mais encontrados no mercado, correspondendo a aproximadamente 75% da fabricação industrial brasileira, utilizados na maioria das aplicações usuais em engenharia. Já sobre a localização das minas que fornecem esses insumos, Mato Grosso possui duas cimenteiras, ambas da Votorantim em que o CPIX-Z-32 corresponde a cerca de 60% da produção no estado. Em adição, o CPIX-Z-32 (94-76% de clínquer + gesso, 6-14% de pozolana e 0-10% de material carbonático) está listado como cimento satisfatório para a fabricação destes tijolos [30].

A fabricação dos tijolos de solo-cimento seguiu as orientações da NBR 10833 [32]. Dessa forma, rejeito, solo, cimento e água foram misturados em uma betoneira até coloração uniforme e umidade ótima, segundo ensaio de compactação correspondente. A mistura foi então moldada em prensa manual MTS-010 da PERMAQ (pressão de prensagem máxima de 6 toneladas – tijolos com 10 cm largura, 20 cm comprimento, 5 cm altura, 51 mm de diâmetro do furo). O processo de cura dos tijolos foi realizado a  $20 \pm 2$  °C e 95% de umidade por 28 dias, conforme determina a NBR 10833 [32]; período requerido para hidratação do cimento.

### 2.3 Caracterização dos tijolos

Dos 100 tijolos produzidos para cada mistura, após 28 dias, 10 foram retirados de forma aleatória para atender a NBR 8491 [8] que estabelece diretrizes para análise dimensional (10 unidades), para ensaio de resistência à compressão simples (7 unidades) e absorção de água (3 unidades).

Para a análise dimensional, foram medidas largura, altura e comprimento de 10 tijolos (para cada mistura) através de um paquímetro com resolução de 0,05 mm. A média obtida indica as dimensões do lote.

Para o ensaio de resistência à compressão ( $f_t$ ), foi utilizada uma máquina de compressão da EMIC (carregamento uniaxial aplicado de forma uniforme à razão de 50 kgf/s) equipada com 2 pratos de aço para apoio (sendo um articulado). Sete tijolos foram cortados ao meio perpendicularmente à sua maior dimensão. As faces maiores foram superpostas e ligadas com camada fina de pasta de cimento Portland (o mesmo utilizado na fabricação dos tijolos- entre 2 e 3 mm). As unidades ficaram aproximadamente 12 h em repouso antes da retífica dos tijolos, para deixar suas faces planas e paralelas e garantir o perfeito contato entre as superfícies. Elas foram então imersas em água por 6 h e retiradas logo antes da execução do ensaio. As cargas foram gradativamente elevadas até ocorrer à ruptura do tijolo. A NBR 8492 [33] permite o cálculo de resistência à compressão ( $f_t$ ) para cada unidade. A média aritmética das 7 unidades representa a  $f_t$  do lote.

Para o ensaio de absorção de água, os três tijolos restantes foram secos em estufa em temperatura entre 105 e 110°C por 24 h, obtendo-se assim a massa seca. Em seguida o corpo foi imerso em água à temperatura ambiente por 24 h. Após a imersão, os tijolos foram secos com um pano úmido e decorridos três minutos, sua massa úmida foi registrada. A NBR 8492 [33] permite o cálculo da absorção de água (A) para cada unidade. A média aritmética das três unidades, representa a A do lote.

A Figura 1 ilustra, na sequência de a –f, a prensa manual utilizada, a mistura sendo colocada no molde, o tijolo de solo-cimento moldado, os tijolos numerados de 1-10 para atender a NBR 8491 [8] para análise dimensional, tijolos imersos em água para o ensaio de absorção de água e um tijolo durante o teste de resistência à compressão.

Por se tratar de um material alternativo, tanto o rejeito de mineração de ouro, quanto os tijolos produzidos com ele foram caracterizados pela NBR 10004 [23] que classifica os resíduos sólidos por meio de ensaios de lixiviação NBR 10005 [34] e solubilização NBR 10006 [35]. Nestas últimas, os elementos químicos presentes no meio aquoso são analisados por Espectrofotometria de Absorção Atômica. As análises de extrato lixiviado e solubilizado foram realizadas utilizando como referências analíticas a *Standard Methods for the*

*Examination of Water and Wastewater (SMEWW)*. A Tabela 2 sumariza a metodologia adotada, onde “x” indica a execução do ensaio para um determinado material.



**Figura 1:** a) Prensa manual PERMAQ; b) moldagem do tijolo; c) tijolo moldado; d) tijolos para análise dimensional; e) ensaio de absorção de água; f) ensaio de resistência à compressão.

**Tabela 2:** Metodologia adotada para a caracterização das matérias-primas e dos tijolos de solo-cimento produzidos.

| CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS/ PARÂMETRO INVESTIGADO |  | REJEITO | SOLO | MISTURAS | TIJOLOS |
|---|--|---------|------|----------|---------|
| Física  | Massa específica: Picnometria a gás (Hélio)            | x       | x    |          |         |
|   | Distribuição granulométrica (NBR 7181)                 | x       | x    | x        |         |
|   | Área superficial específica (BET) e porosimetria (BJH) | x       | x    |          |         |
| Geotécnica  | Teor de umidade (NBR 6457)                             |         |      | x        |         |
|   | Limite de Liquidez (NBR 6459)                          |         |      | x        |         |
|   | Limite de Plasticidade (NBR 7180)                      |         |      | x        |         |
| Mineralógica  | Difração de raios - X (DRX)                            | x       | x    |          | x       |
| Química   | Fluorescência de raios - X (FRX)                       | x       | x    |          | x       |
| Morfológica   | Microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)          |         |      |          | x       |
| Ambiental   | Classificação de resíduos sólidos (NBR 10004)          | x       |      |          | x       |
|   | Lixiviação (NBR 10005)                                 | x       |      |          | x       |
|   | Solubilização (NBR 10006)                              | x       |      |          | x       |
| Tijolo tipo solo-cimento                            | Análise dimensional (NBR 8491)                         |         |      |          | x       |
|   | Absorção de água (NBR 8491)                            |         |      |          | x       |
|   | Resistência à compressão (NBR 8491)                    |         |      |          | x       |

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A massa específica do rejeito apontou um valor de  $2,74 \text{ g/cm}^3$  ( $\sigma = 0,18$ ), bem próxima à do solo, de  $2,80 \text{ g/cm}^3$  ( $\sigma = 0,10$ ). Como os valores de ambos materiais são similares, as misturas também apresentaram valores de massa específica dentro desse intervalo ( $2,74 - 2,80 \text{ g/cm}^3$ ).

A Tabela 3 apresenta a distribuição granulométrica segundo a NBR 10833 [32] para os materiais investigados. Esta normativa considera recomendável para a produção de tijolo de solo-cimento solos com 100% dos grãos passantes na peneira de 4,75 mm e de 10% a 50% passantes na malha de 0,075 mm. Dessa forma, o rejeito estudado, embora apresente partículas 100% passantes em 4,75 mm, possui cerca de 58% do material inferior a 0,075 mm. Assim, coletou-se solo, próximo a mineradora em questão, para ajuste de granulometria. Observa-se (Tabela 3), que o solo *in natura* tampouco atende às especificações de tamanho da NBR 10833 [32]. Para que este solo pudesse ser utilizado na produção de tijolo tipo solo-cimento, o mesmo foi peneirado em 4,75 mm. Com a incorporação de 0 - 50% de solo peneirado (ou traços volumétricos de 1:10:0, 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5), todas as misturas avaliadas estão de acordo com as especificações da normativa.

**Tabela 3:** Análise da distribuição granulométrica dos materiais utilizados na produção de tijolos de solo-cimento.

| Classificação granulométrica            |         |                   |  |       |       |       |
|---|---------|-------------------|--|-------|-------|-------|
| NBR 10833 [32]                          | Rejeito | Solo <sup>1</sup> | Misturas (razão cimento:rejeito:solo) <sup>2</sup> |       |       |       |
|   |         | <i>In natura</i>  | 1:10:0   | 1:9:1 | 1:7:3 | 1:5:5 |
| % Passante em 4,75 mm = 100%            | 100     | 60                | 100  | 100   | 100   | 100   |
| % Passante em 0,075 mm = entre 10 e 50% | 58      | 15                | 58   | 48    | 43    | 35    |

<sup>1</sup>Classificação granulométrica do solo *in natura*. <sup>2</sup>A classificação granulométrica das misturas considera o solo já peneirado.

**Quadro 1:** Caracterização química e mineralógica dos materiais utilizados para a fabricação dos tijolos de solo-cimento.

| REJEITO                          |  | SOLO                             |  |
|----------------------------------|--|----------------------------------|--|
| FRX - ELEMENTOS ENCONTRADOS      |  | FRX - ELEMENTOS ENCONTRADOS      |  |
| Intensidade                      | Elemento químico   | Intensidade                      | Elemento químico   |
| Alto                             | Si, Al, O  | Alto                             | Si, O  |
| Médio                            | Fe   | Médio                            | Fe, Al   |
| Baixo                            | Cu, P, Ca, K, Ti, S, P, Mg, Mn   | Baixo                            | Mn,  |
| Traço                            | Zr, Sr, Rb, Zn, Ni, F, Cr, Cl, Na  | Traço                            | Zr, Pb, Zn, Cr, V, Ti, Ca, K, Cl, S, P, Na e Mg                          |
| DRX - FASES MINERAIS ENCONTRADAS |  | DRX - FASES MINERAIS ENCONTRADAS |  |
| Quartzo                          | SiO <sub>2</sub>   | Quartzo                          | SiO <sub>2</sub>   |
| Hematita                         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | Hematita                         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   |
| Caulinita                        | Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>         | Caulinita                        | Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>         |
| Muscovita                        | KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub> | Muscovita                        | KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub> |
| Feldspato                        | (K, Na, Ca)(Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>                          | Goethita                         | FeO(OH)  |
| Clorita                          | ((Mg,Al,Fe) <sub>12</sub> (Si,Al) <sub>8</sub> O <sub>20</sub> )         | Gipsita                          | CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O                                     |
| Apatita                          | Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl,OH)                |                                  |  |
| Calcopirita                      | CuFeS <sub>2</sub>   |                                  |  |
| Pirita                           | FeS <sub>2</sub>   |                                  |  |
| Gibbsita                         | Al(OH) <sub>3</sub>  |                                  |  |
| Gipsita                          | CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O                                     |                                  |  |

Em consonância com a distribuição de tamanhos, a área superficial específica, ASE, mostrou que o rejeito, por ser mais fino, de caráter mais argiloso que o solo, possui área superficial específica três vezes maior que este (ASE rejeito = 13,847 m<sup>2</sup>/g; ASE solo = 4,512 m<sup>2</sup>/g), e o dobro do volume de poros (volume de poros rejeito = 0,023 cm<sup>3</sup>/g; volume de poros solo = 0,010 cm<sup>3</sup>/g). De maneira análoga, quanto maior a proporção de solo, menor o caráter argiloso da mistura, e menor a sua ASE.

O Quadro 1 mostra a composição química e os minerais majoritários presentes nas matérias-primas, determinados por FRX e DRX, respectivamente. Observa-se que em ambos os materiais os elementos Si, O, Al e Fe são os elementos majoritários. Cu, Sr, Rb, e Ni, foram detectados apenas no rejeito e com baixa intensidade ou traço; e Pb e V apenas no solo, também como traço. Quartzo, hematita, caulinita e muscovita, minerais comuns em solos brasileiros, foram identificados tanto no rejeito quanto na amostra de solo.

Os limites de consistência de todas os materiais estudados estão apresentados na Figura 2. Tanto solo quanto rejeito apresentam valores próximos de Limite de Plasticidade (*LP*) e Limite de Liquidez (*LL*). Enquanto o rejeito apresenta *LP* e *LL* de 26,0% e 38,2%, os valores do solo são de 24,0% e 36,0%, respectivamente. O rejeito possui então, *LP* 6,0% e *LL* 8,0% mais altos que o solo, tendência esperada, visto que o rejeito é mais argiloso que o solo; já o índice de plasticidade (*IP*) praticamente não se altera (*IP* rejeito =

12,2%/  $IP$  solo = 12,0%). A redução da proporção de rejeito, e consequente diminuição da fração fina das misturas, contribui para a redução dos seus limites de consistência. Ainda que o traço volumétrico 1:10:0 (sem adição de solo) apresente valor de  $LL$  bem próximo ao máximo permitido, todas as misturas apresentam valores de limites de liquidez e de índice de plasticidade menores do que os limites máximos ( $LL_{máx} = 45\%$ ,  $IP_{máx} = 18\%$ ) recomendados pela NBR 10833 [32].

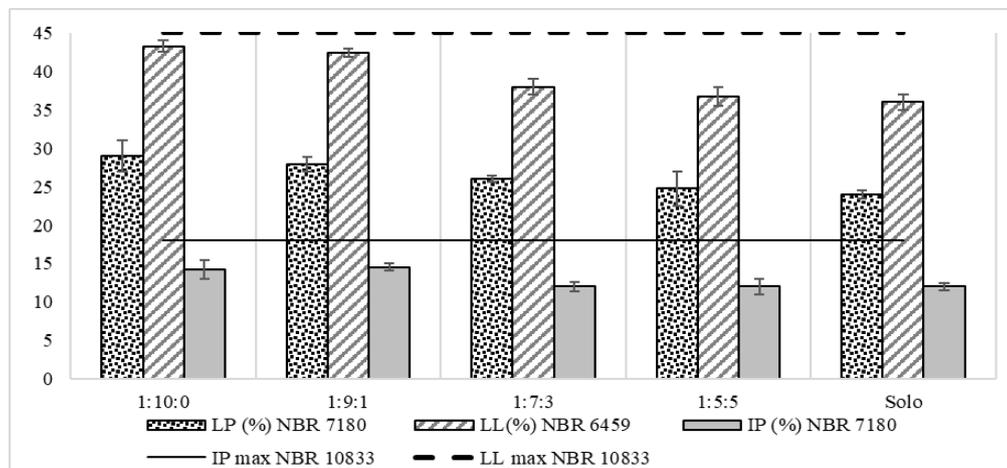


Figura 2: Limites de consistência para as misturas 1:10:0, 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5 e para o solo.

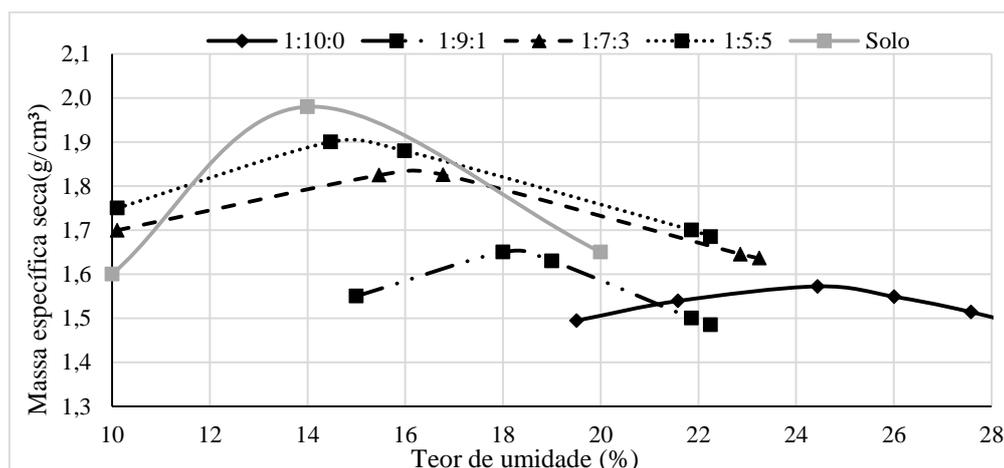


Figura 3: Estudo de dosagem/ Ensaios de compactação para as misturas 1:10:0, 1:9:1, 1:7:3, 1:5:5 e para o solo.

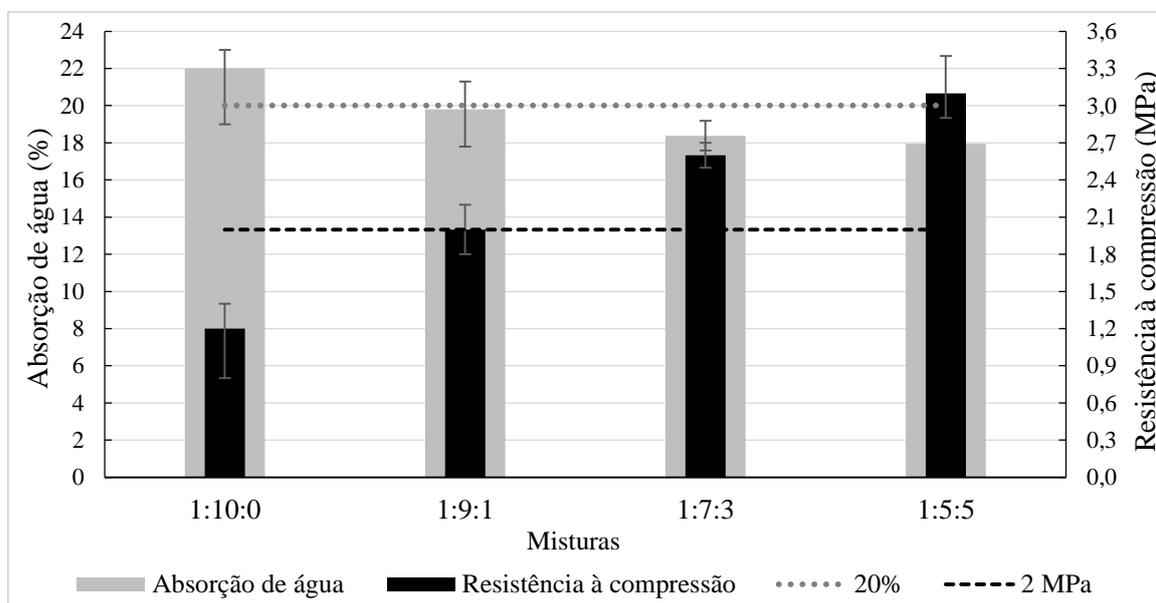
A Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios de compactação do solo e das misturas estudadas. Observa-se que a curva de compactação do traço (1:10:0) apresenta valores menores de peso específico seco máximo e maior teor de umidade ótima, quando comparados aos valores obtidos na curva do solo. Como esperado, na medida que se aumenta a proporção de rejeito nas misturas, ocorre uma tendência de deslocamento das curvas na direção da curva de compactação do rejeito.

Sobre a caracterização dos tijolos produzidos para cada mistura (ou traço volumétrico), segundo a NBR 8491 [8] todos eles se enquadram como tijolo de solo-cimento tipo A (20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 5 cm de altura), como mostra a Tabela 4.

**Tabela 4:** Caracterização dos tijolos de solo-cimento segundo a NBR 8491 [8].

| PARÂMETROS                                   | NBR 8491 [8]            | MISTURA |       |       |       |      |      |
|--|-------------------------|---------|-------|-------|-------|------|------|
|  |                         | 1:10:0  | 1:9:1 | 1:7:3 | 1:5:5 |      |      |
| Análise dimensional<br>(Valores individuais) | Comprimento (cm)        | Máximo  | 21,0  | 20,7  | 20,5  | 20,1 | 20,0 |
|  |                         | Mínimo  | 19,0  | 19,2  | 19,3  | 19,5 | 19,8 |
|  | Largura (cm)            | Máximo  | 11,0  | 10,6  | 10,5  | 10,2 | 10,0 |
|  |                         | Mínimo  | 9,0   | 9,1   | 9,6   | 9,8  | 9,8  |
|  | Altura (cm)             | Máximo  | 6,0   | 5,9   | 5,8   | 5,7  | 5,7  |
|  |                         | Mínimo  | 4,0   | 4,2   | 4,9   | 4,9  | 5,0  |
| Resistência à compressão                     | Mínimo individual (MPa) | 1,7     | 0,9   | 1,8   | 2,5   | 2,9  |      |
|  | Média 7 tijolos (MPa)   | 2,0     | 1,2   | 2,0   | 2,6   | 3,1  |      |
| Absorção de água                             | Máximo individual (%)   | 22,0    | 25,0  | 21,9  | 19,2  | 18,4 |      |
|  | Média 3 tijolos (%)     | 20,0    | 22,0  | 19,8  | 18,4  | 17,9 |      |

Também pela NBR 8491 [8] dos 10 tijolos escolhidos para cada mistura, 7 devem apresentar a média mínima de resistência à compressão de 2,0 MPa, sendo que o valor individual não deve ser inferior a 1,7 MPa. Os outros 3 passam pela análise de absorção de água cuja média deve ser no máximo 20% e 22% para valor individual. A Figura 4 ilustra os resultados obtidos para os parâmetros normatizados por esta norma técnica. A linha tracejada escura marca o valor mínimo esperado de resistência a compressão de 2 MPa, e as colunas escuras, a média de cada mistura. Já a linha tracejada clara contém os 20% máximos de absorção de água, enquanto as colunas claras, o valor médio de cada mistura avaliada. Dessa forma, os valores compreendidos entre as duas linhas tracejadas constituem os valores aceitáveis pela norma técnica.


**Figura 4:** Caracterização dos tijolos de solo-cimento segundo valores de resistência à compressão e absorção de água.

A mistura 1:10:0 alcançou 1,2MPa ( $f_t$ ) e 22% (A), sendo reprovada segundo a NBR 8491 [8]. O traço volumétrico 1:9:1 teve um aumento na sua resistência e diminuição da porosidade com o acréscimo de solo, chegando a 2,0 MPa ( $f_t$ ) e 19,8% (A). Já a mistura 1:7:3 obteve resultados ainda mais favoráveis, 2,6 MPa ( $f_t$ ) e 18,38% (A). Dentre todas as composições estudadas, a mistura 1:5:5 alcançou o maior valor de  $f_t$  (3,1 MPa) e o menor de A (17,04%). Observa-se que o valor de resistência à compressão encontrado para o traço 1:5:5 é aproximadamente 2,5 vezes maior que a do traço reprovado 1:10:0.

Apenas a primeira mistura 1:10:0, não atendeu às especificações da NBR 8491 [8]; enquanto as de-

mais proporções respeitaram o valor mínimo de resistência à compressão ( $f_t$ ) e máximo de absorção de água (A). Sobre estes resultados e conforme os trabalhos publicados por [15, 19-21, 36], a substituição de parte do rejeito por solo (frações mais grossas) aumenta o grau de empacotamento dos grãos, diminuindo assim a porosidade do tijolo, e, como consequência, a absorção de água é menor. Em adição, uma maior proporção de cimento provavelmente aumentará o valor da resistência dos tijolos. Dessa forma, misturas com maiores porcentagens de solo e estabilizante têm potencial para obter maior  $f_t$  e menor A.

Ainda que o uso de rejeitos vá ao encontro dos princípios da economia circular, estes apresentam características de periculosidade distintas em função da sua geologia e processamento aos quais foram submetidos. Pode-se dizer que cada rejeito de mineração tem características únicas [2-6, 19-22]. Dessa forma, além do rejeito, os tijolos de mistura 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5 foram caracterizadas pela NBR 10004 [23] por atenderem às especificações da NBR 8491 [8].

De acordo com a NBR 10004 [23], tanto o rejeito quanto os tijolos de traço 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5 foram classificados na categoria II A – não perigosos e não inertes. Os materiais foram especificados como “não perigosos” porque não apresentam as características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade definidas pela norma técnica. Todavia, ainda que “não perigosos”, os materiais foram classificados como “não inertes”, por apresentarem concentrações de alguns elementos químicos acima do limite estipulado. Ser inerte diz respeito a interação direta de um determinado material com o meio ambiente. Um material inerte, exposto às intempéries, não libera elementos que possam contaminar o solo ou corpos d’água através da lixiviação ou solubilização de compostos químicos.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros aprovados na caracterização ambiental segundo a NBR 10005 [34], onde, para as três misturas e para o rejeito, todos os parâmetros determinados no lixiviado foram inferiores ao estipulado pela norma. A Tabela 5 também contém os parâmetros orgânicos e inorgânicos encontrados na concentração dos resíduos solubilizados aprovados pela NBR 10006 [35]. Dentre todos os parâmetros apresentados, vale ressaltar a baixa concentração de mercúrio, comumente utilizado na recuperação do ouro; e do arsênio, constituinte da arsenopirita, sulfeto frequentemente associado ao ouro, a pirita e a calcopirita, KLEIN e DUTROW [37], minerais identificados para o rejeito no Quadro1.

**Tabela 5:** Caracterização ambiental- parâmetros aprovados para o rejeito e para os tijolos de traço 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5.

| <b>CARACTERIZAÇÃO DE EXTRATO LIXIVIADO SEGUNDO A NBR 10005 [34]</b>    |  |
|--|--|
| Parâmetros abaixo do valor máximo permitido                            | As, Ba, Cd, Pb, Cr, F, Hg, Ag, Se                        |
| Parâmetros que extrapolam o valor máximo permitido                     | -----  |
| <b>CARACTERIZAÇÃO DE EXTRATO SOLUBILIZADO SEGUNDO A NBR 10006 [35]</b> |  |
| Parâmetros inorgânicos abaixo do valor máximo permitido                | As, Ba, Cd, Pb, Cl, Cu, Fe,<br>Mn, Hg, N, Ag, Se, Na, Zn |
| Parâmetros orgânicos abaixo do valor máximo permitido                  | Fenóis Totais, surfactantes                              |

A Tabela 6 apresenta a caracterização ambiental para o rejeito e os tijolos de misturas 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5 segundo a NBR 10006 [35]. Observa-se que, ainda que classificado como não perigoso, o rejeito libera cianeto acima do valor máximo permitido. A norma preconiza 0,070 mg CN/L, enquanto foi encontrado 0,118 mg CN/L. A simples adição de cimento e solo faz com que este limite seja alcançado; ou seja, a redução da proporção de rejeito reduz o valor de cianeto solubilizado, e assim, reduzindo a periculosidade ambiental do tijolo. Para os tijolos de traço 1:9:1 e 1:7:3 os valores observados foram de 0,018 e 0,009 CN/L; a concentração de cianeto ficou abaixo do limite detectável para o tijolo de traço 1:5:5.

Acerca da estabilização do cianeto observada, a adição de cimento Portland forma uma matriz sólida que ocorre devido à hidratação dos silicatos no cimento, gerando silicatos e silicoaluminatos de cálcio hidratados (ou produtos C-S-H e C-A-S-H). Estes produtos de hidratação estão relacionados ao ganho de resistência mecânica do cimento e ao preenchimento de espaços vazios, contribuindo também para baixos valores de absorção de água [22, 38]. A matriz sólida formada imobilizou os contaminantes cianeto, cromo, fluoretos e sulfato mostrados na Tabela 6. Pesquisas desenvolvidas por [39-44] também demonstraram a imobilização de compostos químicos através da adição de cimento; e, reportaram que, dentre os agentes ligantes inorgânicos, o cimento Portland tem tido a maior diversidade de aplicação para encapsulamento de diferentes resíduos perigosos. Em adição, quanto maior a proporção de clínquer no cimento Portland, maior a eficiência na estabilização de contaminantes tóxicos. Para VAIDYA *et al.* [43] os aglutinantes são essenciais para restringir a lixiviação de cianetos residuais pois, além da geração de fases minerais, os mesmos diminuem a porosidade do material, o que favorece a sua estabilização. SILVEIRA *et al.* [44] relataram um sistema de estabilização à base de cimento para resíduos industriais contendo cianeto sem qualquer pré-tratamento para sua remoção.

**Tabela 6:** Caracterização ambiental- parâmetros reprovados para o rejeito e misturas 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5.

| Parâmetro                                     | Método Analítico<br>SMEWW | Valor máximo<br>permitido (mg/L) | Concentração solubilizado (mg/L)/ Material |       |       |        |
|---|---------------------------|----------------------------------|--|-------|-------|--------|
|   |                           |                                  | REJEITO                                    | 1:9:1 | 1:7:3 | 1:5:5  |
| Cianeto (mg CN/L)                             | 4500 CN-, B, C, D, E      | 0,07                             | 0,118                                      | 0,018 | 0,009 | <0,002 |
| Alumínio (mg Al/L)                            | 3030, 3120 B              | 0,2                              | 6,4  | 6,5   | 6,0   | 5,66   |
| Cromo Total (mg Cr/L)                         | 3030, 3120 B              | 0,05                             | 0,11                                       | 0,11  | 0,10  | 0,04   |
| Fluoretos (mg F/L)                            | 4110 B                    | 1,5                              | 7,3  | 7,29  | 3,7   | 1,0    |
| Sulfato (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L) | 4110 B                    | 250                              | 840  | 319   | 225   | 100    |

Nota-se também que quanto maior a proporção de solo na mistura, menores as quantidades de cromo total, alumínio, fluoreto e sulfato presentes no tijolo. Sobre a solubilização de sulfato, a gipsita (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) foi encontrada em ambas as matérias-primas (solo e rejeito). Ademais, o elemento S foi encontrado em maior intensidade no rejeito que no solo, corroborando a identificação de sulfetos como pirita e calcopirita. Da mesma forma, para os fluoretos, além da muscovita, a apatita encontrada no rejeito pode conter F (variedade fluorapatita). Já o Cr foi identificado como traço para ambos materiais (Quadro 1). Em contrapartida, o rejeito apresentou menor quantidade de Al que o tijolo de mistura 1:9:1. Isso se deve à adição de cimento nas composições. É sabido que para a produção de clínquer, aditivos corretivos como minério de ferro e bauxita [Al(OH)<sub>3</sub>] são utilizados. Sobre as demais misturas, quanto maior a fração rejeito, maior a quantidade de alumínio solubilizado devido a maior proporção de argilominerais naturais (provenientes da rocha matriz beneficiada) constituídos por Si, Al, Fe, Na, K e Mg [37].

Dentre todas as misturas avaliadas, destaca-se o tijolo com adição de 50% de solo (traço 1:5:5) por alcançar valores aceitáveis para a concentração de cianeto, cromo total, fluoretos e sulfato. Porém, o tijolo de traço 1:5:5 é avaliado como não inerte devido à alta concentração de alumínio. O Quadro 1 evidencia que o solo utilizado possui o elemento Al em menor intensidade que o rejeito, dessa forma, uma maior proporção de solo nas misturas tem potencial para adequar este parâmetro a NBR 10006 [35]. Entretanto, acredita-se que o teor de Al solubilizado encontrado (Tabela 6) não deva ser impeditivo para que os tijolos fabricados sejam utilizados em construções de alvenaria.

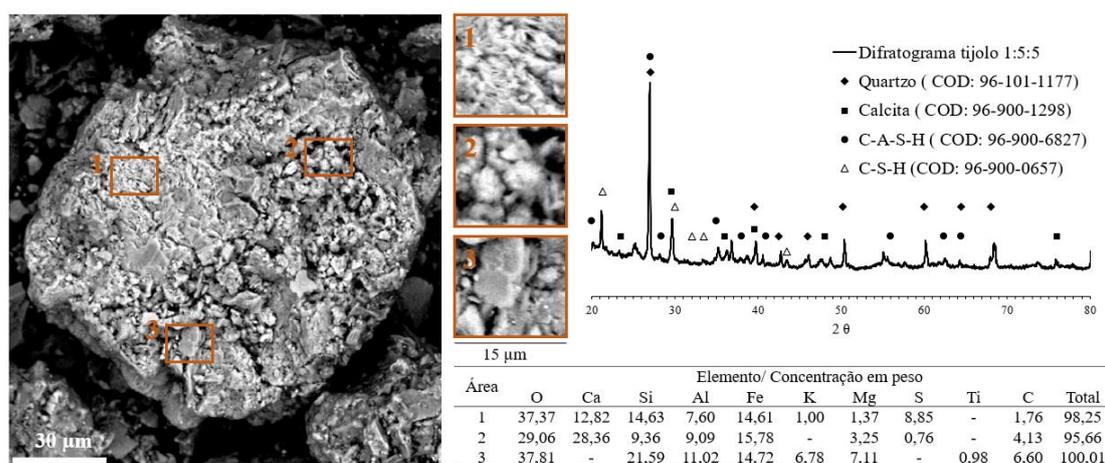
CAGNON *et al* [45] demonstraram, através da caracterização de quatro amostras de solo da cidade de São Paulo, a inadequabilidade da utilização da NBR 10004 [23]. Isso porque espera-se que o solo seja classificado na Classe II B, não perigoso e inerte (a resolução CONAMA 207 [46] considera o solo um material reutilizável). Entretanto, os autores demonstraram que os solos avaliados apresentavam no extrato solubilizado concentrações de Al e Fe acima do normatizado, devido às suas composições minerais naturais, pertencendo então, a Classe II A, não perigosos e não inertes. Dessa forma, as características intrínsecas dos solos brasileiros, podem ser suficientes para que os valores máximos permitidos pelas normativas de solubilização e lixiviação sejam alcançadas. Os autores também discutem sobre a escassez de trabalhos e metodologias a nível nacional e internacional que contemplem estratégias específicas para a caracterização e classificação de solos naturalmente contaminados.

PABLOS *et al.* [47] incorporaram resíduo sólido gerado por areia de fundição na fabricação de cimento utilizado na produção de tijolos de solo-cimento. Os tijolos apresentaram, no extrato solubilizado, Cr acima máximo estipulado, contudo, os pesquisadores discorrem sobre a inexistência de publicações que estabeleçam restrições quanto ao desempenho químico de matrizes solidificadas. LIMA e CABRAL [48] publicaram um estudo em que foram avaliados parâmetros químicos de resíduos de construção civil (RCC), considerados reutilizáveis, na cidade de Fortaleza. Como resultado, foram encontradas teores acima dos previstos no extrato solubilizado para Al, Cr, Pb e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Os autores acreditam que o alto teor de Al esteja relacionado ao óxido de alumínio presente em cimentos Portland, visto que argamassas e concretos fazem parte dos RCC. ULSEN *et al.* [49] também detectaram o alto teor de alumínio em RCC na cidade de São Paulo devido à presença de cerâmica vermelha descartada. BITENCOURT [50] fabricou tijolos cerâmicos com solo argiloso e resíduo de olaria na cidade de Joinville que foram reprovados pela NBR 10006 [35] devido ao alto teor de Al. Todavia, o alumínio solubilizado é proveniente da composição natural do solo que é composto, principalmente, por argilominerais. PINHEIRO [51] afirma que a alta concentração de alumínio detectada no grês porcelanato estudado não representa inconveniências do ponto de vista sanitário, visto que este elemento faz parte da composição das principais matérias-primas utilizadas para a fabricação de massas cerâmicas. HEREK *et al.* [52] caracterizaram tijolos cerâmicos feitos com 10% de resíduo sólido da indústria têxtil que também foram considerados não inertes devido ao alto teor de Al. No entanto, os autores alegam que a finalidade do estudo foi avaliar a utilização dos tijolos na construção civil, os quais terão destino e condições de intempéries diferentes daqueles encontrados para os resíduos. A NBR 10004 [23] diz respeito à classificação de resíduos sólidos para a sua disposição, e não para o seu aproveitamento em outros setores.

Os tijolos de mistura 1:5:5 foram analisados por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X. A Figura 5 mostra, da esquerda para a direita, a grande área analisada com os pontos que foram submetidos à análise EDS, cada um destes pontos, ademais do difratograma encontrado. Sobre a análise EDS, os elementos encontrados O, Si, Al, Fe, K, Mg, S e Ti são comuns para o rejeito e para o solo (Quadro 1). A presença de C deve-se à preparação da amostra devido ao seu recobrimento com carbono. Já o Ca é explicado pela adição de cimento, cuja matéria-prima principal é o calcário.

Em relação as fases cristalinas encontradas na análise DRX, o quartzo já havia sido observado tanto para o rejeito quanto para o solo. Já a identificação da calcita pode ser justificada pelo alto teor de cálcio na composição do cimento, que ao entrar em contato com o ar passa por processo de carbonatação [38, 53].

Além do quartzo e da calcita, também foram encontradas fases C-S-H e C-A-S-H resultantes da hidratação do cimento. A primeira foi identificada em um silicato de cálcio e manganês hidratado, chamado inesita, de composição  $\text{Ca}_2(\text{Mn}^{2+})_7\text{Si}_{10}\text{O}_{28}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Já a segunda, foi encontrada na observação da paragonita, um aluminossilicato de sódio de fórmula química  $\text{NaAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ . [38, 53] observam que o processo de hidratação do cimento é considerado complexo, e, os produtos C-S-H e C-A-S-H formados têm uma grande variação nas suas composições químicas e podem ser quase amorfos, o que dificulta a sua identificação em análises DRX.



**Figura 5:** Análise química, mineralógica e morfológica dos tijolos de mistura 1:5:5.

Acerca da análise morfológica, foram observadas microestruturas com morfologia fibrosa com dimensões inferiores a 5  $\mu\text{m}$  (área 1), esponjosa com dimensões da ordem de 5  $\mu\text{m}$  (área 2) e granular (área 3) de tamanhos próximos a 8  $\mu\text{m}$ . Segundo [37, 53-55] as morfologias fibrosa e esponjosa podem estar relacionadas aos produtos C-S-H e C-A-S-H. As análises EDS dos pontos 1 e 2 detectam a presença de Ca, Al e Si, corroborando, assim, com a identificação dos produtos de hidratação do cimento.

#### 4. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que rejeitos de mineração tem grande potencial para serem utilizados na fabricação de tijolo de solo-cimento desde que caracterizados e adequados às normas vigentes do país. No Brasil, a NBR 8491 [8] especifica para tijolos de solo-cimento o valor mínimo de resistência à compressão ( $f_t$ ) de 2,0 MPa e máximo de absorção de água ( $A$ ) de 20%. Dentre os tijolos avaliados, o de traço 1:10:0 (cimento:rejeito:solo) não alcançou os valores estabelecidos pela norma. Já as demais composições, 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5 atingiram valores de  $f_t$  de 2,0, 2,6 e 3,1 MPa nessa ordem, e valores de  $A$  de 19,8, 18,38 e 17,04%, respectivamente. Devido ao fato do solo possuir predominantemente uma fração mais grossa, quanto maior a quantidade deste material adicionado, maiores serão os valores de  $f_t$  e menores os valores de  $A$  dos tijolos produzidos, tendo em vista uma maior tendência de redução do seu índice de vazios.

Ainda que as misturas 1:9:1, 1:7:3 e 1:5:5 estejam em conformidade com a NBR 8491 [8] o presente trabalho ressalta a importância da avaliação ambiental em tijolos produzidos com rejeitos de mineração. Enquanto o rejeito possuía concentração de cianeto acima do normatizado, todos as misturas propostas estiveram abaixo desse limite. A avaliação química confirmou a existência de fases C-S-H e C-A-S-H (produtos de hidratação do cimento) no tijolo de mistura 1:5:5. Mesmo com a imobilização de cianeto, o tijolo foi classificado como não perigoso, contudo, não inerte, devido a solubilização de alumínio acima do normatizado pela

NBR 10006 [35]. Quanto maior a adição de solo, mais a concentração de Al se aproxima do esperado; assim, sugere-se que tijolos com maiores proporções de solo sejam avaliados. Entretanto, acredita-se que o tijolo 1:5:5 possa ser aproveitado pela indústria civil pois o alumínio é um elemento comum em argilominerais. Em adição, a NBR 10004 [23] trata da classificação de resíduos sólidos para a sua disposição, e não para o seu aproveitamento em outros setores. Por fim, a aplicação de rejeito no ramo civil vai ao encontro do que preconiza a economia circular pois aumenta a vida útil de recursos não renováveis e diminui o passivo ambiental associado à mineração.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro; e a empresa Nova Analítica pelo apoio nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Anuário Mineral Brasileiro - Principais Substâncias Metálicas. pp. 37, 2020.
- [2] JONES, H., BOGER, D.V., “Sustainability and waste management in the resource industries”, DOI: <https://doi.org/10.1021/ie202963z>. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 51, n. 30, pp. 10057-10065, Mar. 2012.
- [3] EDRAKI, M., BAUMGARTL, T., MANLAPIG, E., *et al.*, “Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>. *Journal of Cleaner Production*, v. 84, pp. 411-420, Dec. 2014.
- [4] TAYEBI-KRORAMI, M., EDRAKI, M., CORDER, G., *et al.* “Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations”, DOI: <https://doi.org/10.3390/min9050286>. *Minerals*, v. 9, n. 5, pp. 1-13, May. 2019.
- [5] AMARAL, I.B.C., PRAT, B.V., REIS, A.B. “Effect of iron mining tailings as a red ceramic additive for decreased sintering temperature”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1157>. *Matéria*, v. 25, n. 4, Dez. 2020.
- [6] RACANELLI, L.A., OLIVEIRA, R.C., BRITO, W.S., *et al.* “Uso de rejeito de lavagem de bauxita para a fabricação de ligantes geopoliméricos”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0921> *Matéria*, v. 25, n. 1, Abr. 2020.
- [7] DOMINGUES, R.M.V “Avaliação do potencial económico de implementação da construção em BTC”, Tese de M.Sc., Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2015.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8491: Tijolo de solo-cimento – Requisitos, Rio de Janeiro, 2012.
- [9] PACHECO-TORGAL, F., JALALI, S., “Earth construction: lessons from the past for future eco-efficient construction”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>. *Construction and Building Materials*, v. 29, pp. 512-519, Apr. 2012.
- [10] ZHANG, L., GUSTAVSEN, A., JELLE, B., *et al.* “Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047>. *Construction and Building Materials*, v. 151, pp. 504-511, Oct. 2017.
- [11] ZHOU, X.Y., YU, Y.Z., HE, S.X., *et al.* “Study on Production of Burning-Free Brick Using Chinese Kuancheng Iron Ore Tailings”, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.511.146>. *Advanced Materials Research*, v. 511, pp. 146–149, Apr. 2012.
- [12] CASTRO, M.A., COSTA, F.G., BORBA, S.C., *et al.* “Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados com coprodutos siderúrgicos”, DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0064>. *Matéria*, v. 21, n. 3, Set. 2016.
- [13] GIORGI, P., GRIGOLETTI, G.C., LIMA, R.C.A., *et al.* “Avaliação de sustentabilidade e habitabilidade de blocos de solo-cimento segundo a norma ABNT NBR 15575”, DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0511>. *Matéria*, v. 23, n. 3, Out. 2018.
- [14] CORDEIRO, C.C.M., BRANDÃO, D.Q., DURANTE, L.C., *et al.* “Caracterização termofísica de solo laterítico para produção de taipa”, DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0889>. *Matéria*, v. 25, n. 1, Abr. 2020.
- [15] NAGARAJ, H.B., SHREYASVI, C., “Compressed stabilized earth blocks using iron mine spoil waste – An explorative study”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.281>. *Procedia Engineering*, v. 180, pp. 1203-1212, Dec. 2017.

- [16] VIEIRA, G.H.V., “Avaliação de blocos de solo-cimento utilizando o solo de Pato Branco corrigido com areia natural ou areia de britagem”, Tese de monografia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil, 2017.
- [17] REIS, F.M.D., RIBEIRO, P.R., REIS, M.J., *et al.* “Estudo de dosagem para confecção de tijolo solo-cimento utilizando rejeitos de quartzito como agregado miúdo”, In: *Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*, 49-56, São Carlos, Brasil, 14-16 Aug 2019.
- [18] BEZERRA, A.C.S., FRANÇA, S., MAGALHÃES, L.F., *et al.* “Ativação alcalina de cinzas com alto teor de cálcio e rejeitos de minério de ferro e seu potencial de reciclagem em materiais de construção”, DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300327>. *Ambiente Construído*, v. 19, n. 3, pp. 99- 12, Jun. 2019.
- [19] VILELA, A.P., EUGÊNIO, T.M.C., OLIVEIRA, F.F., *et al.* “Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste”, *Construction and Building Materials*, v. 262, Nov. 2020.
- [20] ROY, S., ADHIKARI, G.R., GUPTA, R.N., “Use of gold mill tailings in making bricks: a feasibility study”, DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X07076944>. *Waste Management & Research*, v. 25, n. 5, pp. 475–482, Oct. 2007.
- [21] MALATSE, M., NDLOVU, S., “The viability of using the Witwatersrand gold mine tailings for brickmaking”, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 115, pp. 321-327, Apr. 2015.
- [22] ZHANG, L., “Production of bricks from waste materials – A review”, *Construction and building* DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>. *Materials*, v. 47, pp. 643-655, Oct. 2013.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7181: Solo- Análise granulométrica, Rio de Janeiro, 2018.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6457: Amostras de solo- Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, 2016.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6459: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12023: Solo-cimento — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, BT-111: Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. 3ª ed. São Paulo, pp. 16, 2000.
- [31] CONSELHO ADMINISTRATIVO DE DEFESA ECONÔMICA: Mercado de cimento no Brasil, pp. 176, 2019.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8492: Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- [36] PINTO, C.D.S. “Compactação dos solos”, In: Pinto, C. D. S, *Curso básico de mecânica dos solos*, 3 ed. capítulo 4, São Paulo, Brasil, Oficina de textos, 2006.
- [37] KLEIN, C., DUTROW, B. “Química dos Cristais e Descrições Sistemáticas de Elementos Nativos, Sulfetos e Sulfossais”, In: Menegat, R., *Manual de Ciências dos Minerais*, 23 ed., capítulo 15, Porto Alegre, Brasil, Editora Bookman., 2012.
- [38] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. “Microestrutura do Concreto”. In: Mehta, P. K; Monteiro, P. J. M., *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*, 4 ed., capítulo 2, São Paulo, Brasil, Ibracon, 2014.
- [39] SILVA M.A., MATER L., SOUZA-SIERRA, M. M., *et al.* “Small hazardous waste generators in developing countries: use of stabilization/solidification process as an economic tool for metal wastewater treatment and appropriate sludge disposal”, DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.128>. *Journal of Hazardous Materials*, v. 147, n. 3, pp. 986-990, Aug. 2007.

- [40] KULAKOWSKI, M.P., BREHM, F., KAZMIERCZAK, C.S., *et al.* “Avaliação Ambiental de Produtos e Sistemas Construtivos Inovadores com Resíduos: Lixiviação e Solubilização” In: Kazmierczak, C. S., Fabrício, M. M., *Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade*, 1 ed., capítulo 3, São Carlos, Brasil, Editora SCIENZA, 2016.
- [41] BRAZ, I.G., SHINZATO, M.C., MONTANHEIRO, T.J., *et al.* “Effect of the Addition of Aluminum Recycling Waste on the Pozzolanic Activity of Sugarcane Bagasse Ash and Zeolite”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0342-6>. *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, pp.3493 – 3513, May, 2018.
- [42] BREHM, F.A., KULAKOWSKI, M.P., EVALDT, D.C., *et al.* “Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil”, DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200003>. *Ambiente Construído*, v. 13, n. 2, pp. 15-27, Jun. 2013.
- [43] VAIDYA, R., KODAM, K., GHOLE, V., *et al.* “Validation of an in situ solidification/stabilization technique for hazardous barium and cyanide waste for safe disposal into a secured landfill”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.002>. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 9, pp. 1821-1830, Sep. 2010.
- [44] SILVEIRA, B.I., DANTASBLASQUES, J., SANTOS, R., “Effectiveness of cement-based systems for stabilization and solidification of spent pot liner inorganic fraction”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 98, pp. 183-190, Mar. 2003.
- [45] CAGNON, F.A., FRANCISCO, A.D., VIANA, E., *et al.* “A inadequabilidade técnica da aplicação da NBR 10.004 para a caracterização e classificação de solos escavados com potencial de contaminação”, DOI: <http://dx.doi.org/10.20435/multi.v23i53.1586>. *Multitemas*, v.23, n. 53, pp. 71-90, Mar. 2018.
- [46] CONAMA, 2002. RESOLUÇÃO CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002 Publicada no DOU no 136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, pp. 95-96
- [47] PABLOS, J.M., SICHERI, E.P., IZELI, R.L., “Reutilização de resíduo sólido industrial, constituído por areias de fundição, na fabricação de tijolos maciços e peças decorativas”, DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v0i10p112-125>. *Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo*, v. 10, pp. 112-125, Jul. 2009.
- [48] LIMA, A.S., CABRAL, A.E.B., “Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE)”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000200009>. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, pp. 169-176, Jun. 2013.
- [49] ULSEN, C., KAHN, H., ÂNGULO, S.C., *et al.* “Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo”, DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000200019>. *Revista da Escola de Minas*, v. 63, n. 2, pp. 339-346, Jun. 2010.
- [50] BITENCOURT, E.R., *Utilização de matéria-prima alternativa na fabricação de tijolos de argila vermelha e branca*, Tese de M.Sc., Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brasil, 2004.
- [51] PINHEIRO, B.C.A., Processamento e caracterização de massas cerâmicas incorporadas com o resíduo borra de petróleo encapsulada para fabricação de grês porcelanato, Tese de D.Sc., Universidade Estadual do norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, Brasil, 2009.
- [52] HEREK, L.C S., BERGAMASCO, R., TAVARES, C.R.G., *et al.* “Estudo da solidificação/estabilização do lodo da indústria têxtil em material cerâmico”, *Cerâmica Industrial*, v. 10, n.4, Aug. 2005.
- [53] SCHEINHERROVÁ, L., *Characterization of hydration process of cement pastes by means thermal analysis*, Tese de D.Sc., Faculty of Civil Engineering of Czech Republic, Praga, República Checa, 2018.
- [54] FONSÊCA, N.J.M., Potencial de substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2018.
- [55] SOUZA, J.M., *Tijolos de solo-cimento produzidos com manipueira em substituição à água*. Tese de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2019.

#### ORCID

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Ana Cláudia Franca Gomes     | <a href="https://orcid.org/0000-0002-2354-8381">https://orcid.org/0000-0002-2354-8381</a> |
| Carol Cardoso Moura Cordeiro | <a href="https://orcid.org/0000-0003-3932-657X">https://orcid.org/0000-0003-3932-657X</a> |
| Roberto Aguiar dos Santos    | <a href="https://orcid.org/0000-0003-1014-1854">https://orcid.org/0000-0003-1014-1854</a> |
| Vítor Rodrigues Alves Soares | <a href="https://orcid.org/0000-0001-7230-0051">https://orcid.org/0000-0001-7230-0051</a> |
| Sônia Denise Ferreira Rocha  | <a href="https://orcid.org/0000-0002-4775-6329">https://orcid.org/0000-0002-4775-6329</a> |