

## UM ESTUDO DA PERSPECTIVA DO USO DE RESÍDUO INDUSTRIAL DE SILÍCIO COMO ADIÇÃO MINERAL EM MATRIZES CIMENTÍCIAS: ORIGEM, PROCESSAMENTO E PROPRIEDADES

Marco A. dos Santos<sup>1</sup>, Ana P. de Oliveira<sup>1,2</sup> e Andrielli M. de Oliveira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, 74605-220, GO, Brasil*

<sup>2</sup>*Faculdade de Inhumas - FacMais, Inhumas, 75400-000, GO, Brasil*

**Palavras-chave:** Adição mineral, Resíduo de silício metálico, Substituição de filer calcário.

**Resumo.** A exploração de minerais em atividades metalúrgicas gera resíduos que demandam grande gestão ambiental para armazenamento, reuso e mitigação dos impactos ambientais associados a esta atividade. O aproveitamento desses resíduos, que são potencialmente poluentes ao meio ambiente, pode ser uma opção interessante, especialmente na construção civil, onde outros resíduos industriais já conhecidos são amplamente estudados e utilizados no mercado nacional e internacional, tais como: cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa, dentre outros. De forma específica, o uso destes resíduos em matrizes cimentícias pode aumentar a durabilidade e o desempenho de concretos, submetidos a condições químicas agressivas. Sendo assim, este artigo tem como objetivo analisar o processamento de cinzas provenientes da produção do silício para perspectiva de uso como adição mineral em matrizes cimentícias, a partir da obtenção de finura mínima considerada adequada. O processamento físico do resíduo foi composto por ciclos de moagem em moinho de bolas, analisando-se a influência do tempo de moagem (duas ou quatro horas) e da carga de esferas abrasivas (12 ou 16 esferas) na finura do material. Em paralelo, ensaios de atividade pozolânica com cimento e cal, caracterização físico-química, toxicológica, ambiental e mineralógica foram realizadas. Como resultado obtido, curvas granulométricas associadas as variáveis estudadas foram obtidas e o processamento eficiente com menor consumo energético apresentado e discutido. A composição granulométrica, considerada ótima para o resíduo, pode ser comparada com a do filer calcário. Por fim, o resíduo processado pode ser considerado como material potencial para emprego como finos ou como filer em matrizes cimentícias de concretos e argamassas.

---

Endereços de e-mail: [oliveira.ape@gmail.com](mailto:oliveira.ape@gmail.com), [marco.antonio@discente.ufg.br](mailto:marco.antonio@discente.ufg.br), [andriellimorais@ufg.br](mailto:andriellimorais@ufg.br)\*

## **A STUDY FROM THE PERSPECTIVE OF THE USE OF SILICEOUS INDUSTRIAL WASTE AS MINERAL ADDITION IN CEMENTITIOUS MATRICES: ORIGIN, PROCESSING AND PROPERTIES**

**Keywords:** Mineral addition, Metallic silicon residue, Limestone filler replacement.

**Abstract.** The exploration of minerals in metallurgical activities generates residues that demand great environmental management for storage, reuse and mitigation of the environmental impacts associated with this activity. The use of these residues, which are potentially polluting to the environment, can be an interesting option, especially in civil construction, where other industrial residues already known are widely studied and used in the national and international market, such as: fly ash, high slag furnace, silica fume, among others. Specifically, the use of these residues in cementitious matrices can increase the durability and performance of concretes subjected to aggressive chemical conditions. Thus, this article aims to analyze the processing of ash from the production of silicon for the perspective of use as a mineral addition in cementitious matrices, from the attainment of a minimum fineness considered adequate. The physical processing of the residue consisted of grinding cycles in a ball mill, analyzing the influence of grinding time (two or four hours) and the load of abrasive balls (12 or 16 balls) on the fineness of the material, each thirty minutes. In parallel, tests of pozzolanic activities with cement and lime, physicochemical, toxicological, environmental and mineralogical characterization were carried out. As a result, particle size curves associated with the studied variables were obtained and efficient processing with lower energy consumption presented and discussed. The particle size composition, considered optimal for the residue, can be compared with that of the limestone filler. Finally, the processed residue can be considered as a potential material for use as fines or fillers in cementitious concrete and mortar matrices.

## 1 INTRODUÇÃO

O silício é um elemento indispensável para vários segmentos industriais, como por exemplo, aqueles relacionados à produção de componentes e circuitos eletrônicos, células fotovoltaicas, ligas metálicas, silicones na construção civil e cerâmicas industriais. A previsão de expansão de demanda, especialmente relacionada aos componentes e circuitos eletrônicos e as células fotovoltaicas, torna a cadeia produtiva do silício estratégica para o País. Além disso, a busca de uma matriz energética mais limpa e renovável associada à necessidade de redução de emissões de CO<sub>2</sub> são fatores que fortalecem a necessidade de avanço na cadeia produtiva desse mineral. O principal desafio tecnológico para o desenvolvimento integral da cadeia produtiva de silício no país é o desenvolvimento e domínio de tecnologias e inovações que permitam a identificação de reservas de minerais em território nacional e a produção de concentrados, compostos e metais de silício com pureza grau solar e química para serem utilizados em produtos de alta tecnologia, que propiciem a implantação e o desenvolvimento integral da cadeia produtiva de silício brasileiro [12].

Adicionalmente, critérios de sustentabilidade são importantes para a indústria metalúrgica, além de desafios socioeconômicos e o atendimento pleno de legislações e normativas ambientais.

Resíduos industriais representam uma produção de milhões de toneladas por dia em todo o mundo. Assim, a disposição adequada desses resíduos passou a ser primordial para a sustentabilidade e para preservação ambiental. Desta forma, é urgente a necessidade de se desenvolverem mecanismos que promovam a conscientização e a busca de soluções para implantar tecnologias capazes de, a um só tempo, minimizar os impactos decorrentes da disposição de resíduos industriais no ambiente e reduzir os custos financeiros envolvidos nessa atividade [6, 30].

Nesta visão, a reutilização dos resíduos sólidos industriais pode ajudar a reduzir os custos e prejuízos ambientais relativos ao tratamento e/ou disposição final desses resíduos e na redução dos impactos ambientais decorrentes da extração de matéria-prima diretamente do ambiente. Ao mesmo tempo, o armazenamento destes resíduos é uma etapa do processo que não agrega valor ao produto.

Além disso, vários estudos avaliaram o uso de resíduos industriais em matrizes cimentícias, como adição mineral pozolânica ou não, em concretos, argamassas, pastas ou ainda como insumo na produção de cimento Portland para construção civil. Estes estudos abordam a influência dos coprodutos em propriedades no estado fresco e no estado endurecido de concretos e argamassas, assim como seu desempenho e durabilidade. A exemplo disso podemos mencionar outros coprodutos como a sílica ativa, a escória de alto forno, a cinza volante, os fileres resíduos de calcário, entre outros [14, 15, 16, 20, 25, 27, 28, 29, 32, 33, 34].

Em especial, esses benefícios, ocasionados pelo acréscimo das adições minerais e, conseqüente, redução de cimento Portland, podem ser físicos e químicos em pastas, argamassas e concretos. Assim, estudos evidenciaram acréscimos na resistência mecânica [21, 23] e aumento do desempenho à corrosão por carbonatação [14], à corrosão por cloretos [20, 28, 29] e ao ataque por sulfatos [22], entre outros. Em paralelo, [29] apresentou a fabricação e processamento de um novo produto, produzido a partir de resíduo de silício metálico, com boas perspectivas para uso como adição mineral em tintas, vernizes, epóxis etc., além de argamassas e concretos.

Este trabalho tem como objetivo analisar o potencial do uso de cinzas provenientes da produção do silício para perspectiva de uso como adição mineral<sup>1</sup> em matrizes cimentícias, a partir do processamento e obtenção de finura mínima considerada adequada. Para tanto, ciclos de moagem do material foram empreendidos, em moinho de bolas, analisando-se a influência do tempo de moagem (duas ou quatro horas) e da carga de esferas abrasivas (12 ou 16 esferas). Em paralelo, ensaios de atividade pozolânica com cimento e com a cal foram realizados. A contribuição do artigo é estudar um material, sob o ponto de vista tecnológico e de engenharia, que tem potencial para reaproveitamento e, com isso, minimizar a quantidade desse resíduo industrial.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, correspondendo a aproximadamente 26,7 %. Entretanto, ele não é encontrado na forma elementar na natureza, estando disponível apenas em combinações com outros elementos, principalmente com o oxigênio, na forma de silicatos e óxidos de silício. Estes, por sua vez, fazem parte da constituição de quase 95 % das rochas existentes no mundo todo.

Vários tipos de silício podem ser produzidos, como o silício metálico (ou silício de grau metalúrgico), largamente utilizado na produção de ligas de alumínio e com altíssimo grau de pureza; o silício de grau químico, utilizado na medicina; o silício sincronizado, presente na indústria eletrônica dos semicondutores e o silício de grau solar, matéria-prima para fabricação de células solares [19, 24].

A produção mundial de silício em 2019 foi de 7 milhões de toneladas. Destas, a China produziu 64 % do total de silício, seguida pela Rússia com 9 %, Noruega com 5 %, Estados Unidos com 5 % e o Brasil com 3% que corresponde a 210 mil toneladas. Considerando-se apenas os dados de produção de silício metálico, o Brasil produz 190 mil toneladas, representando 90% de todo silício produzido no país e um lucro de mais de US\$ 470 milhões de dólares [13, 34].

### 2.1 Silício metálico

O silício metálico é produzido pela função redutora de quartzo (minério de silício), cavaco (madeira) e carvão vegetal em fornos elétricos de redução. A partir disso, o silício líquido é vazado em panelas e muda um refino oxidante das impurezas. Diante disso, as autoras descrevem acerca da reação química para formação do elemento silício (Si) [16] como:



Além disso, de acordo com as autoras, sistemas de despoejamento, constituídos por filtros de manga do tipo ar reverso, são instalados e realizam a captação de gases e do material particulado originado nos fornos de redução [16, 17]. As seguintes equações descrevem a formação desses resíduos na entrada e na saída dos fornos, respectivamente:



<sup>1</sup> Adições minerais podem ser pozolânicas ou não pozolânicas. As pozolânicas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que possuem pouca ou nenhuma atividade cimentante, mas que quando finamente moídos e em presença de água, reagem quimicamente com o Ca(OH)<sub>2</sub>, o qual é um produto da hidratação do cimento Portland no estado endurecido, para compostos cimentantes. As não pozolânicas agem como um fino ou filer e não reagem quimicamente com composto na matriz hidratada de cimento Portland [26].



A poeira gerada pelo sistema de despoeiramento dos fornos constitui a sílica ativa, amplamente utilizada pela construção civil e na indústria de refratários de alto desempenho. As partículas grossas originadas por combustão são retidas em um ciclone pré-separador e constituem um resíduo (cinza de origem vegetal e mineral) [16, 17].

Na Figura 1, é apresentado o esquema da produção do silício metálico, compreendendo etapas desde as matérias-primas utilizadas, o processo de combustão nos fornos com temperatura de queima superior a 2.000 °C e a obtenção do silício líquido, bem como a eliminação do resíduo obtido na etapa do “pré-separador” [16, 17].

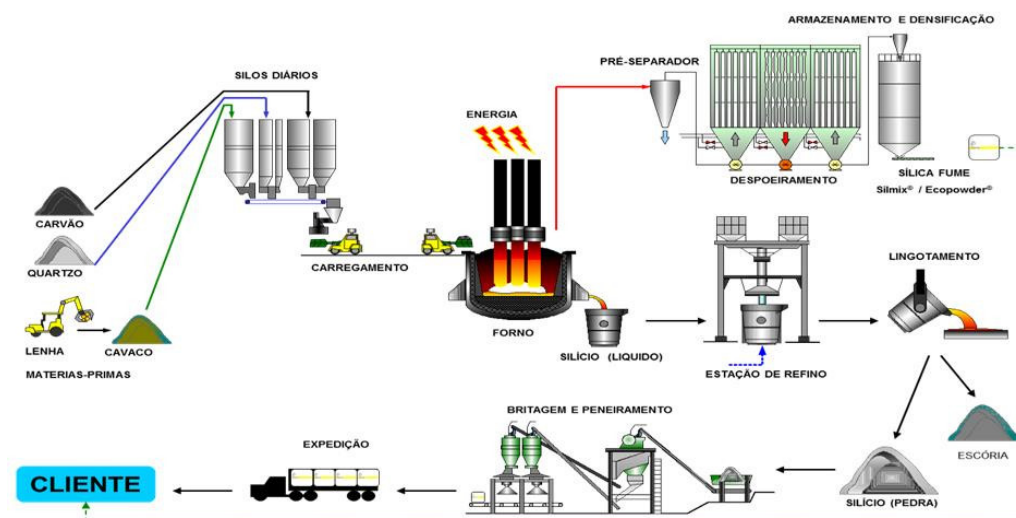


Figura 1: Esquema ilustrativo com as etapas de obtenção do silício metálico [18]

Juntamente com este processo são originadas partículas grossas, retiradas no ciclone pré-separador e provenientes da queima do carvão vegetal. Estas partículas constituem um resíduo que, atualmente é descartado e constitui o objeto de pesquisa deste artigo. A Figura 2 apresenta o fluxograma simplificado, destacando o pré-separador e o resíduo em estudo. Estima-se que haja 12 mil toneladas deste resíduo estocado no pátio da empresa produtora e sem um uso específico.

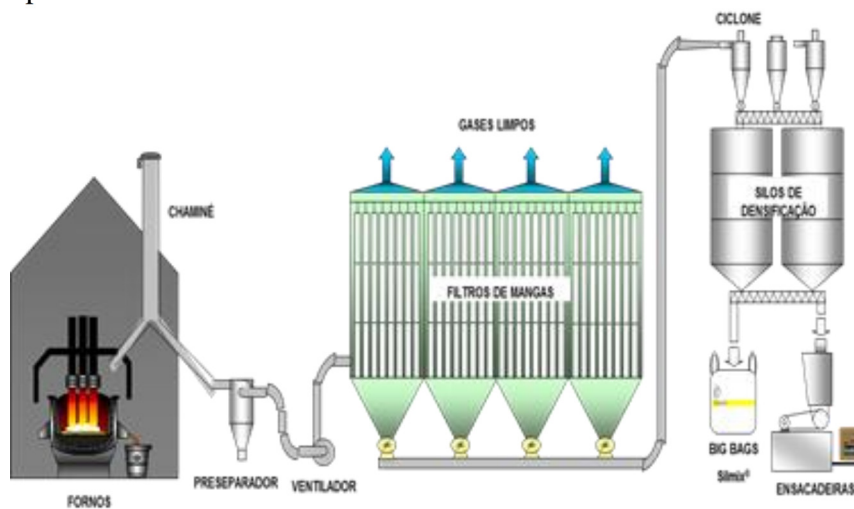


Figura 2: Fluxograma do despoeiramento simplificado [18]

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Resíduo, proveniente da combustão do carvão vegetal, quartzo (minério de silício) e cavaco de madeira, retidos do ciclone pré-separador do sistema de despoeiramento dos fornos de fabricação do silício metálico foi utilizado em duas frações granulométricas, nomeadas de “trash” (Figura 3a) e “heavy” (Figura 3b).



Figura 3: (a) Resíduo fase *trash*; (b) fase *heavy*

O “*trash*” e o “*heavy*” tiveram composição química semelhante aproximadamente e de 70% de SiO<sub>2</sub>, determinada pela literatura [29]. 50% de material “*trash*” e 50% de material “*heavy*” (Figura 3) foram homogeneizados. O teor de umidade do resíduo homogeneizado foi de 0,63%.

#### 3.2 Processamento do resíduo

Foram processados em equipamento tipo ensaio Los Angeles, 5 kg do resíduo sem processamento (2,5 kg de *trash* e 2,5 kg de *heavy*), considerando duas variáveis: o tempo de processamento (duas e quatro horas) e o número de esferas de aço (12 e 16 esferas), com o objetivo de se comparar os resultados obtidos para cada situação e escolher a granulometria mais fina para o desenvolvimento dos ensaios posteriores com o resíduo. O diâmetro médio de 80% das partículas de resíduo sem processamento foi 700 µm (Figura 4).

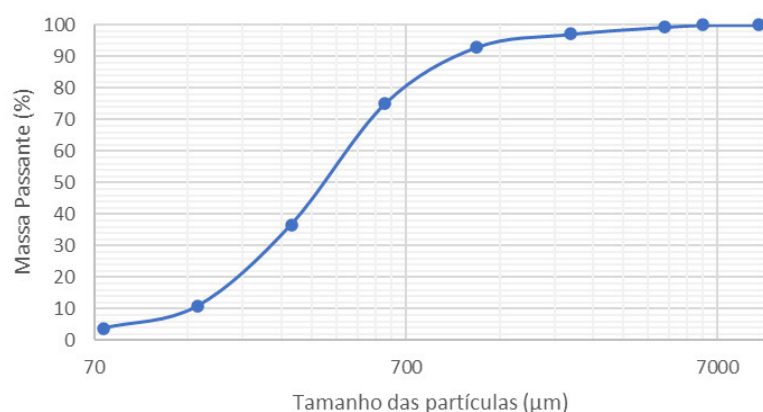


Figura 4: Curva granulométrica do resíduo antes do processamento

A mistura dos resíduos foi realizada com equipamento, utilizado para abrasão Los Angeles com esferas de aço de diâmetro de aproximadamente 48 mm e massa compreendida entre 390 g e 445 g (Figura 5). Objetivou-se com esse processo obter a finura mínima mais adequada para a utilização do resíduo como adição mineral na produção de materiais cimentícios, pois a superfície específica da adição mineral influencia diretamente na atividade pozolânica [15]. Para tal procedimento, foi utilizado o método descrito pela norma técnica ABNT NBR NM 51:2001 [2] durante 2 horas de processamento. O processo de moagem utilizado foi limitado as condições do laboratório.



Figura 5: Esferas utilizadas como cargas abrasivas para o processamento dos resíduos

A composição granulométrica do resíduo sem processamento nas frações *trash* e *heavy* foi realizada conforme a norma técnica ABNT NBR NM 248:2003 [3], com o objetivo de se obter a curva de distribuição granulométrica do material estudado, por meio do resultado médio de duas determinações.

### 3.3 Métodos de ensaio

Após a escolha da melhor finura do resíduo, foram realizados ensaios descritos nos subitens a seguir.

#### 3.3.1 Caracterização ambiental e físico-química

A caracterização ambiental do resíduo foi realizada para verificar se o material possuiu

toxicidade e seguiu recomendações de normas brasileiras [6, 7, 8, 9].

Para análises químicas por Fluorescência de Raios X – FRX, as amostras foram fundidas, utilizado 0,8 g de material. O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de raios X, modelo ARL PERFORM’X 1500 da Thermo Fisher Scientific.

Foi realizada a caracterização mineralógica do resíduo por meio de Difractometria de raios X (DRX) em difratômetro fabricante Bruker D8 Advanced com varredura de 3 ° a 70 ° (ângulo  $2\theta$ ) e incrementos de 0,02 ° a cada segundo com aproximadamente 10 g de material. As interpretações foram realizadas em computador acoplado ao difratômetro, utilizando-se *software* para captura de dados Diffrac Plus e para interpretação de dados, o software EVA. A massa específica real do resíduo foi determinada por meio do método descrito pela norma técnica ABNT NBR 16605:2017 [11], utilizando o frasco volumétrico de *Le Chatelier*. Ao mesmo tempo, a massa unitária foi obtida por meio do Método C descrito pela norma técnica [1], de modo a determinar a massa unitária de material no estado solto. Para tal ensaio foram realizadas três determinações. A massa unitária do resíduo no estado solto foi obtida pela média entre os valores individuais calculados.

### 3.3.2 Atividade pozolânica com cal e com o cimento Portland

Para verificar a pozolanicidade<sup>2</sup> do resíduo foram realizados ensaios de atividade pozolânica com a cal hidratada [4] e com o cimento Portland [5]. Estes ensaios consistem em moldar argamassas com cal ou cimento com o resíduo.

Assim, o índice de atividade pozolânica com a cal foi medido em função da resistência à compressão dos corpos de prova na idade de sete dias, moldados com e sem resíduos, cal hidratada, areia normal e aditivo químico superplastificante. A norma técnica ABNT NBR 12653:2014 [10] estabelece que os materiais pozolânicos devem apresentar resistência à compressão com a cal aos 7 dias de idade superior ou igual a 6 MPa.

Foi utilizado cimento Portland CP V-ARI (massa específica 3,01 g/cm<sup>3</sup>, massa unitária de 0,92 g/cm<sup>3</sup> e superfície específica de 391,25 m<sup>2</sup>/kg). Foi utilizado, além do resíduo processado, cimento Portland CPV ARI, areia normal e aditivo super plastificante. Foram preparadas duas argamassas com dosagens diferentes, a primeira argamassa (Argamassa A) foi composta apenas pelo cimento Portland, areia normal e água. A segunda argamassa (Argamassa B) foi composta por 25 % em massa de resíduo em substituição parcial à massa de cimento Portland, areia normal e água. A norma técnica ABNT NBR 12653:2014 [10] estabelece que os materiais pozolânicos devem apresentar índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias superior ou igual a 90 %.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Processamento do resíduo

A Figura 6 ilustra a comparação entre as quatro determinações realizadas para cada uma das situações descritas com 12 e 16 esferas, considerando os intervalos de tempo a cada 30 minutos.

<sup>2</sup> Ensaio para verificar se um material possui atividade pozolânica para ser uma adição mineral pozolânica.



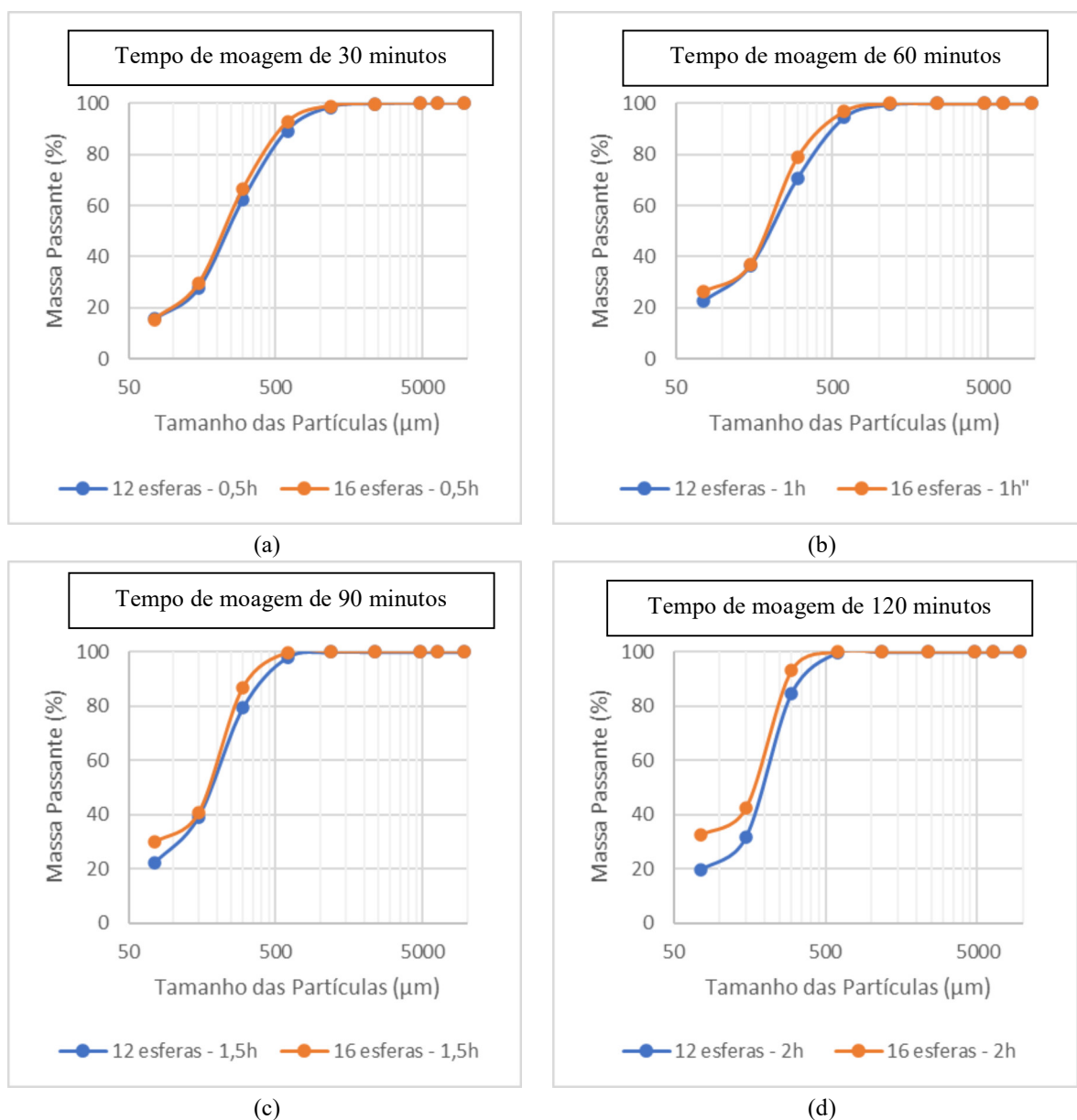


Figura 6: Comparação entre os processamentos realizados com 12 e 16 esferas de aço na máquina “Los Angeles”: (a) granulometria com 30 minutos de processamento, (b) 60 minutos de processamento, (c) 90 minutos de processamento e (d) com 120 minutos de processamento

Nota-se que 77 % de material ficou retido na peneira de 0,075 mm, após o processamento por 2 horas com 12 esferas de aço e 67 % com 16 esferas, indicando a influência do número de esferas abrasivas para a diminuição do tamanho das partículas. Devido aos resultados obtidos, optou-se, então, por realizar um terceiro processamento do resíduo sem processamento, mantendo 16 esferas de aço e aumentando o tempo de ensaio para 4 horas. A Figura 7 apresenta uma comparação dos processamentos do resíduo utilizando 16 esferas.

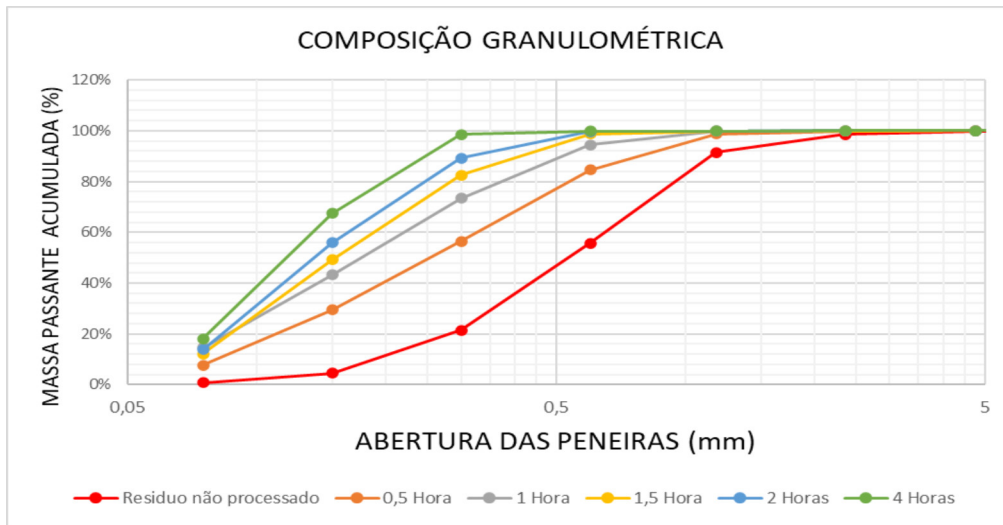


Figura 7: Comparação do tempo de processamento do resíduo utilizando 16 esferas

O último processamento realizado indica uma porcentagem passante na peneira 0,075 mm de 48 %, indicando a eficiência do aumento no tempo de beneficiamento do material, portanto considerou-se que quatro horas compreendia um tempo de processamento adequado para a obtenção de um material suficientemente fino para utilização como adição mineral, dentro das condições do laboratório. Esse foi o material utilizado para a realização dos demais ensaios deste trabalho, como visto na Figura 8, com um comparativo antes e após o processamento e Figura 9a, com vista ampliada do resíduo após processamento. A Figura 9b apresenta a redução da finura do material.

A composição granulométrica do resíduo obtida, após o processamento pode ser comparada com a de filer calcário, estudado por Resende e Vieira [31], com dimensão máxima característica semelhante à do resíduo de silício metálico (0,3 mm), módulo de finura igual a 0,19 e massa específica igual a 2,59 g/cm<sup>3</sup>. Além disso, o resíduo apresentou finura mais próxima a escória de alto-forno e cinza volante. Ressalta-se que o processo de moagem do resíduo foi limitado as condições do laboratório e em pequena escala.

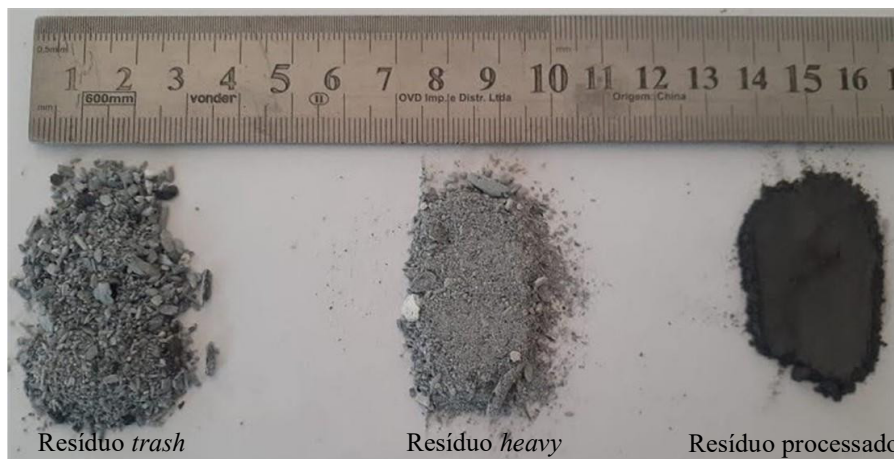


Figura 8: Resíduo estudado: vista a olho nú comparativa entre as etapas pré e pós processamento, nesta ordem *trash*, *heavy* e após processamento

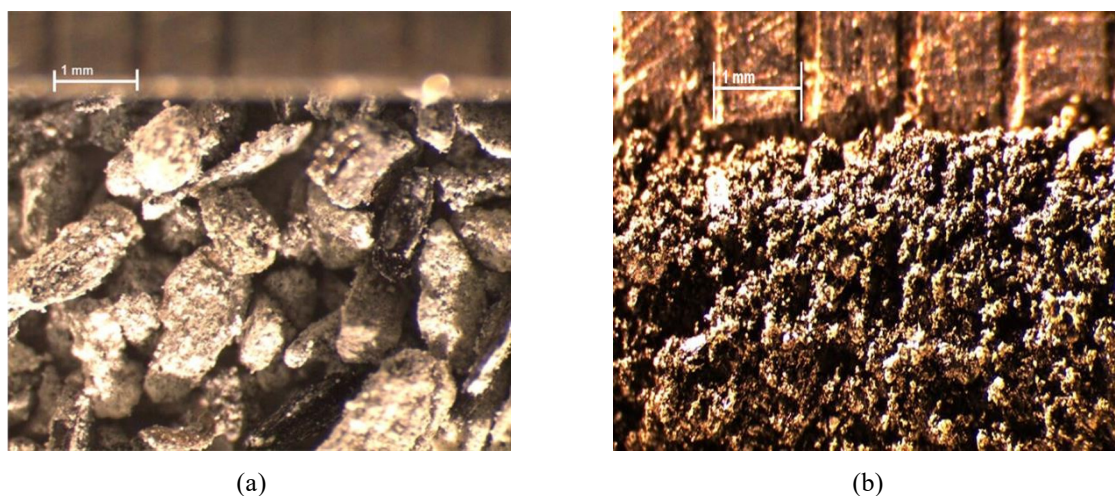


Figura 9: Resíduo estudado: (a) vista com lupa estereoscópica do resíduo sem e (c) após o processamento

#### 4.1.1 Caracterização ambiental e físico-química

As Tabelas 1 e 2 apresentam a caracterização ambiental do extrato do resíduo lixiviado e solubilizado, respectivamente.

Tabela 1: Análise do extrato do resíduo lixiviado.

| Elemento | Concentração permitida (mg/L) [6] | Concentração Lida (mg/L) | Situação   |
|----------|-----------------------------------|--------------------------|--|
| Cádmio   | 0,5                               | -                        | Concentração abaixo do limite de detecção do equipamento |
| Cobre    | -                                 | -                        | O elemento não se encontra no anexo da norma             |
| Cromo    | 5,0                               | 0,3249                   | Abaixo do limite máximo                                  |
| Ferro    | -                                 | -                        | O elemento não se encontra no anexo da norma             |
| Manganês | -                                 | 0,7053                   | O elemento não se encontra no anexo da norma             |
| Zinco    | -                                 | 0,2788                   | O elemento não se encontra no anexo da norma             |

Tabela 2: Análise do extrato do resíduo solubilizado.

| Elemento | Concentração permitida (mg/L) | Concentração Lida (mg/L) | RFSM   |
|----------|-------------------------------|--------------------------|--|
|          |                               |                          | Situação   |
| Cádmio   | 0,0                           | -                        | Concentração abaixo do limite de detecção do equipamento |
| Cobre    | 2,0                           | -                        | Concentração abaixo do limite de detecção do equipamento |
| Cromo    | 0,1                           | 0,2398                   | Acima do limite máximo                                   |
| Ferro    | 0,3                           | -                        | Concentração abaixo do limite de detecção do equipamento |
| Manganês | 0,1                           | -                        | Concentração abaixo do limite de detecção do equipamento |
| Zinco    | 5,0                           | 0,0692                   | Abaixo do limite máximo                                  |

De acordo com a Tabelas 1, observou-se que as concentrações de material lixiviado para ambas as amostras ficaram abaixo do limite normativo. Portanto, as amostras foram

classificadas como não tóxicas. Nas amostras solubilizadas, Tabela 2, o valor para o elemento químico cromo ficou acima do limite máximo para ser considerado atóxicos. Porém, mesmo assim, deu-se andamento nos demais ensaios.

As propriedades físicas-químicas do resíduo após processamento estão apresentadas na Tabela 3. A Figura 10 exibe o difratograma por raios X. Paralelamente, a título de comparação, foram ilustrados resultados de sílica ativa, a qual é uma adição mineral pozolânica, também um tipo de resíduo proveniente da produção de silício.

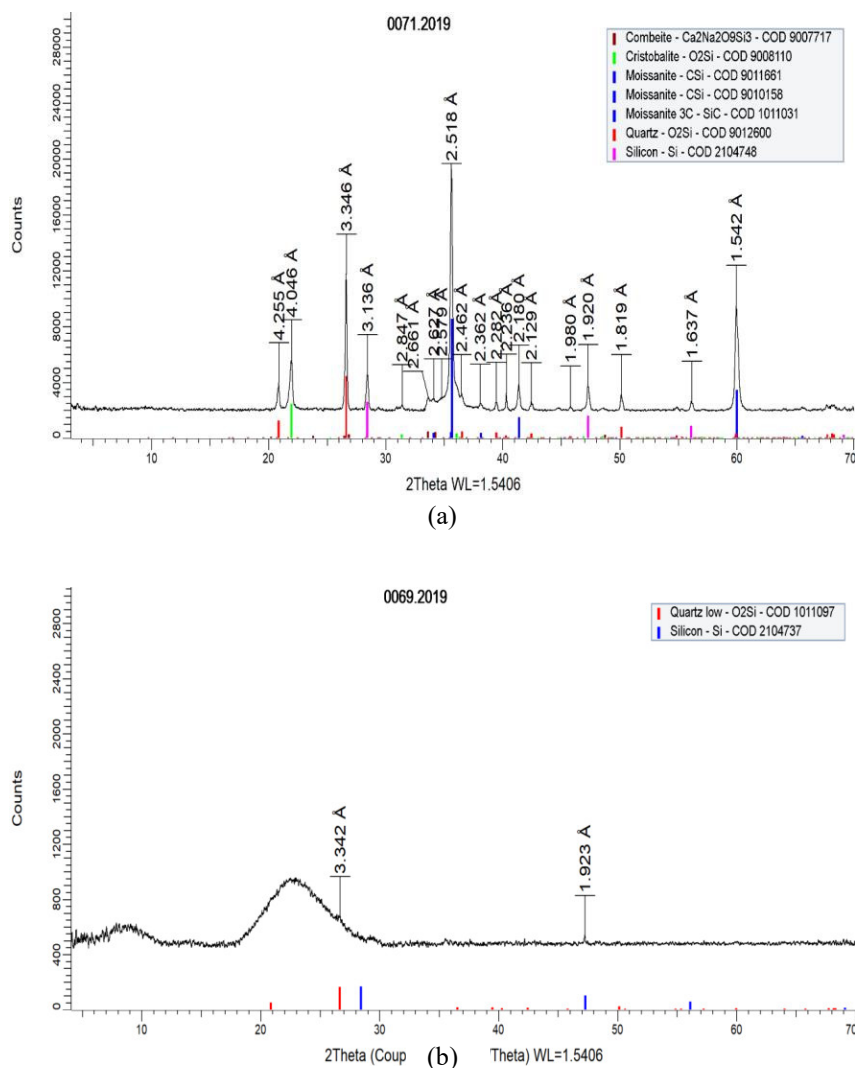


Figura 10: Difratograma de raios X: (a) resíduo estudado e (b) sílica ativa

A Tabela 3 apresenta a predominância de sílica (SiO<sub>2</sub>), o que já era esperado haja vista a origem do material (processo de combustão do carvão, cavaco e quartzo). A relação Si/Al é 124,38 e a soma dos percentuais de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é 81 %, portanto menor que 90 % indicando que o resíduo não é clasificado como adição mineral pozolânica [10].

A figura 10b apresenta uma sílica ativa amorfa, composta de quartzo e sílica. Já o resíduo estudado (Figura 10a) apresenta-se com maior cristalinidade e possui outros minerais em massa: moissanita (carbeto de silício 56,6 %), quartzo (22,2 %) e traços de cristobalita (12,8 %), sílica (4,5 %) e combeita (4,5 %).

Tabela 3 – Resultados de características físico-químicas obtidos.

| Propriedades determinadas |   | Unidade                              | Sílica Ativa | Resíduo estudado |      |
|---------------------------|---|--------------------------------------|--------------|------------------|------|
| Massa Específica          |   | g/cm <sup>3</sup>                    | -            | 2,301            |      |
| Massa Unitária            |   | g/cm <sup>3</sup>                    | -            | 0,726            |      |
| Superfície Específica     |   | g/cm <sup>3</sup>                    | 20.000       | 793,26           |      |
| Finura                    | Área Específica - Método (BET)                      | (m <sup>2</sup> /g)                  | 253,97       | 16,22            |      |
| Componentes Químicos      | Perda ao fogo                                       | (%)                                  | 12,30        | 15,89            |      |
|                           | Sulfato de Cálcio (CaSO <sub>4</sub> )              | (%)                                  | 0,00         | 0,27             |      |
|                           | Anidrido Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )               | (%)                                  | 0,00         | 0,16             |      |
|                           | Óxido de Magnésio (MgO)                             | (%)                                  | 0,12         | 0,34             |      |
|                           | Dióxido de Silício (SiO <sub>2</sub> )              | (%)                                  | 83,66        | 79,60            |      |
|                           | Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    | (%)                                  | 0,04         | 0,65             |      |
|                           | Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | (%)                                  | 0,49         | 0,64             |      |
|                           | Óxido de Cálcio (CaO)                               | (%)                                  | 0,45         | 1,93             |      |
|                           | Óxido de Titânio (TiO <sub>2</sub> )                | (%)                                  | ---          | 0,02             |      |
|                           | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                       | (%)                                  | ---          | 0,09             |      |
|                           | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | (%)                                  | ---          | 0,03             |      |
|                           | Cl  | (%)                                  | ---          | 0,04             |      |
|                           | Álcalis Totais                                      | Óxido de Sódio (Na <sub>2</sub> O)   | (%)          | 2,61             | 0,09 |
|                           |   | Óxido de Potássio (K <sub>2</sub> O) | (%)          | 0,08             | 0,49 |
| Equivalente Alcalino      |   | (%)                                  | 2,66         | 0,41             |      |

#### 4.2 Atividade pozolânica com cal e com o cimento

Os resultados da atividade pozolânica com a cal e com o cimento estão apresentados na Figura 11.

A resistência média à compressão dos corpos de prova, moldados com cal hidratada, foi de 2,4 MPa (desvio padrão de 0,2 MPa e 8 % de coeficiente de variação), nenhum dos corpos de prova apresentou resistência individual que atendesse às recomendações da norma.

Para a atividade pozolânica com o cimento, a argamassa sem resíduo apresentou resistência média à compressão de 36,4 MPa (desvio padrão de 6,2 MPa e coeficiente de variação de 18%) e para a argamassa com resíduo de 28,7 MPa (desvio padrão de 6,5 MPa e coeficiente de variação de 25 %). Com os valores médios de cada argamassa, foi possível calcular o índice de desempenho do resíduo de silício com cimento Portland aos 28 dias, o qual apresentou valor de 79 %. A norma técnica ABNT NBR 12653:2014 [10] prescreve que os materiais pozolânicos devem apresentar índice de desempenho com o cimento Portland de, pelo menos, 90 %. A partir do resultado obtido para tal índice, percebe-se que o resíduo não apresentou o desempenho mínimo da referida norma.

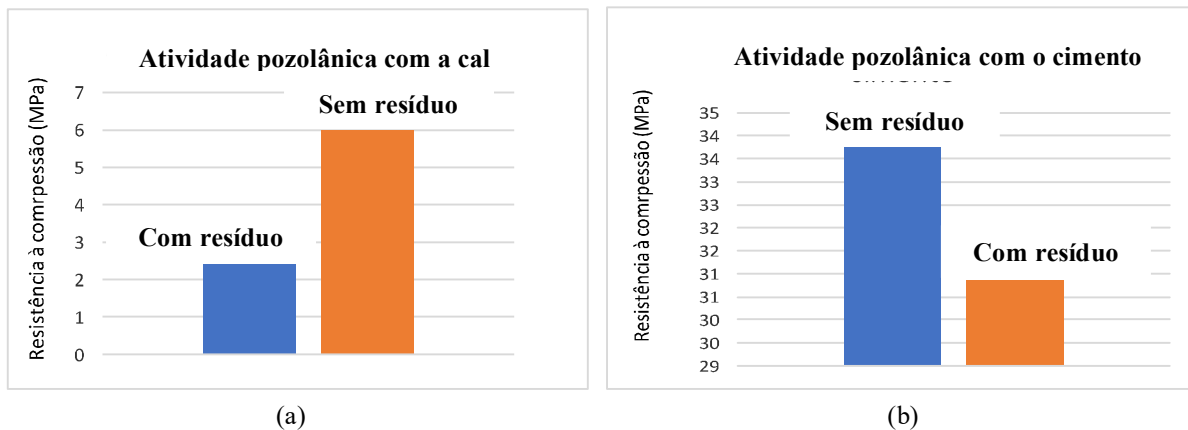


Figura 11: Resultados de atividade pozolânica: (a) com a cal - resistência à compressão na idade de 7 dias e (b) com o cimento: resistência à compressão na idade de 28 dias

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados, possível concluir que:

- pelo processamento do resíduo metalúrgico, nota-se que o aumento do tempo de processamento e maior número de esferas influenciou na finura do resíduo, como esperado;
- o resíduo processado apresenta perspectivas de uso em matrizes cimentícias como adição mineral não pozolânica (efeito físico – filer) com baixa demanda de processamento e beneficiamento;
- os ensaios de atividade pozolânica com a cal e com o cimento portland apresentaram resultados inferiores às exigências mínimas normativas para materiais pozolânicos;
- o resíduo apresentou quantidade de cromo acima do permitido pela norma brasileira; e
- o resíduo possui alto teor de  $SO_2$ , presença de minerais moissanita (carbeto de silício), quartzo e traços de cristobalita, sílica e combeite.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica e a Furnas Centrais Elétricas e aos Senhores Renato Batista, Aloísio Fernando e Oswaldo Cascudo.

### REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR NM 45:2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2006.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR NM 51:2001 – Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2001.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2003.

- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR 5751:2015 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2015.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR 5752:2014 – Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2014.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos – Classificação*. ABNT/CEE-246 Gestão de Resíduos Sólidos e Logística Reversa, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2004.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido*. ABNT/CEE-246 Gestão de Resíduos Sólidos e Logística Reversa, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2004.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. ABNT/CEE-246 Gestão de Resíduos Sólidos e Logística Reversa, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2004.
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR 10007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos*. ABNT/CEE-246 Gestão de Resíduos Sólidos e Logística Reversa, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2004.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR 12653:2014 Versão Corrigida:2015 – Materiais pozolânicos – Requisitos*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2015.
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *ABNT NBR 16605:2017: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2017.
- [12] Brasil. *Plano de ciência, tecnologia e inovação para minerais estratégicos: 2018-2022*. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2018.
- [13] Brasil. *Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico 2019*. Ministério de Minas e Energia, 2019.
- [14] A. Castro. *Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2003.
- [15] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares, E. de M. R. Fairbairn e S. Hempel. Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 33(5): 529–534, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.005>.
- [16] M. Costa, A. M. Oliveira e J. Araújo. Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos produzidos com resíduos da produção de silício metálico. *Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto*. Fortaleza, CE, Brasil, 2010.
- [17] R. R. Costa. Emprego de Resíduo de Silício Metálico na Produção de Cimento Portland Composto. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2017.
- [18] Dow Corning Brasil. *Ciência e Sustentabilidade*. Dow Brasil, 2021.

- [19] H. A. Duarte. Ferro – Um Elemento Químico Estratégico Que Permeia História, Economia E Sociedade. *Química Nova*, 42(10):1146–1153, 2019. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170443>.
- [20] R. B. Ferreira. Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2003.
- [21] M. Ghrici, S. Kenai e M. Said-Mansour. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(7):542–549, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009>.
- [22] M. J. Gomides, D.C.C. Molin and J. H. S. Rêgo. Effect of the incorporation of aggregates with high sulfide content on the mechanical and microstructural properties of concrete with slag cement. *Matéria*, 22:3, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0185>.
- [23] K. E. Hassan, J. G. Cabrera e R. S. Maliehe. The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 22(4):267–271, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00031-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00031-7).
- [24] M. C. Lüdke. A rota metalúrgica do resíduo: da extração do quartzo à obtenção do silício de grau fotovoltaico. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil (ECV), Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, Santa Catarina, SC, Brazil, 2018.
- [25] M. H. F. Medeiros, J. W. Raisdorfer e J. Hoppe Filho. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. *Ambiente Construído*, 17(4):125–139, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400189>.
- [26] P. K. Mehta e P. J. M. Monteiro. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. Ibracon, 2014.
- [27] A. M. Oliveira. Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão nas armaduras induzida por cloretos. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2007.
- [28] A. M. Oliveira and O. Cascudo. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 192:467–477, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.100>.
- [29] A. M. Oliveira, R. A. R. Ferreira e P. C. M. Filho. Production of silica gel from waste metal silica residue. *Materials Letters*, 275:128125, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128125>.
- [30] C. Ren, W. Wang e G. Li. Preparation of high-performance cementitious materials from industrial solid waste. *Construction and Building Materials*, 152:39–47, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.124>.
- [31] D. R. Resende e S. P. Vieira. Efeitos da substituição de filer calcário por rocha fosfática na obtenção de concreto autoadensável. In: *XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, São Paulo, SP, Brasil, 342–355.



- [32] H. Song, S. Pack, S. Nam, J. Jang e V. Saraswathy. Estimation of the permeability of sílica fuma cement concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3):315–321, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.033>.
- [33] B. S. Thomas. Green concrete partially comprised of rice husk ash as supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(3):3913–3923, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>.
- [34] United States. Mineral Commodity Summaries 2020. U. S. Geological Survey, 2020. Disponível em <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>>. Acessado em agosto de 2020.