

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ANA MARIA PAULOVSKI PEDROSO**

**AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE POZOLÂNICA DO PÓ DE ROCHA GRANÍTICA**

**PONTA GROSSA**

**2022**

**ANA MARIA PAULOVSKI PEDROSO**

**AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE POZOLÂNICA DO PÓ DE ROCHA  
GRANÍTICA**

**Evaluation Of The Pozolanic Reactivity Of Granite Rock Powder**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento Acadêmico Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Juliana Martins Teixeira De Abreu Pietrobelli.

Coorientador(a): Bel.<sup>a</sup> Mariane Hawerth.

**PONTA GROSSA**

**2022**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ANA MARIA PAULOVSKI PEDROSO**

**AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE POZOLÂNICA DO PÓ DE ROCHA  
GRANÍTICA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento Acadêmico Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 04 de novembro de 2022

---

Juliana Martins Teixeira De Abreu Pietrobelli  
Doutorado em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR-PG

---

Cesar Arthur Martins Chornobai  
Doutorado em Química Orgânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR-PG

---

Simone do Rocio Ferraz Sabino  
Mestre em Química Aplicada  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR-PG

**PONTA GROSSA**

**2022**

Ao autor da vida.  
“Pois dele, por ele, e para ele são todas as coisas. A ele seja a glória para sempre! Amém”

Rom 11:36

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço a minha família, sem vocês nada seria possível. Obrigada meu pai Vicente e a minha mãe Lurdes, por todo amor e apoio.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Martins Teixeira De Abreu Pietrobelli, que me mostrou toda a sua atenção, o cuidado e paciências de orientação, provando que a docência vai muito além da sala de aula. Por toda sua generosidade e pelo exemplo de profissional e pessoa.

A minha querida coorientadora Mariane Hawerth, graduada em engenharia química e futura mestre pelo auxílio na conclusão do meu curso e pelas longas conversas e palavras de incentivo que tive o privilégio de ouvir em tardes passadas no laboratório.

Ao professor Dr. Cesar Arthur Martins Chornobai e a Mestre Simone do Rocio Ferraz Sabino por comporem a banca examinadora e ajudarem a enriquecer o trabalho através de seus conhecimentos.

Aos meus amigos e faculdade que me acompanharam desde o início do curso.

Aos meus amigos de estágio, que estiveram presentes no término deste trabalho.

A todos os professores pela dedicação e por todos os conhecimentos compartilhados.

Ao Centro de Caracterização Multiusuário em Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais (C2MM) da UTFPR-PG e a instituição universitária pela disponibilidade das instalações e materiais que possibilitaram a realização deste trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão da minha graduação em Engenharia Química.

## RESUMO

As adições minerais são materiais que podem ser incorporados à composição de concretos e argamassas, com o objetivo de implementar suas propriedades cimentícias como trabalhabilidade e nos preenchimentos dos vazios. A indústria da construção civil é grande consumidora de matérias-primas advindas de fontes não renováveis. Contudo, a exploração não responsável desses recursos acarreta desequilíbrio ambiental. Neste contexto, o uso de adições minerais em substituição parcial do cimento pode ser relevante para a mitigação dos impactos ambientais causados pelo setor produtivo. O subproduto mineral, em estudo, é um material pulverulento proveniente do processo de britagem das pedreiras e a sua destinação precisa ser explorada. Neste trabalho foi feita a caracterização e avaliação do subproduto mineral, visando seu aproveitamento na substituição parcial do cimento para a produção de argamassa e concreto. Os métodos experimentais foram divididos nas etapas de: caracterização do material, análise da morfologia e avaliação da reatividade do subproduto. O material em estudo apresentou baixa reatividade pozzolânica, no valor de 116,91  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ , massa específica de 2,63  $\text{g/cm}^3$  e teor de umidade de 1,19%. Os resultados indicam a classificação do pó de pedra como adições inertes de origem granítica, fíler de granito rosado.

**Palavras-chave:** pó de pedra; substituição; fíler; adições minerais.

## ABSTRACT

Mineral additions are materials that can be added to the composition of concrete and mortar in order to improve their cementitious properties, such as workability and void filling. The cement construction industry is a major consumer of raw materials from non-renewable sources. However, the non-responsible exploitation of these resources leads to an environmental imbalance. In this context, the use of mineral additions in partial replacement of cement can be a direction for mitigating the environmental impacts caused by the productive sector. The mineral by-product is a powdery material coming from the crushing process in quarries and its purpose is still not very explored. In this work, the mineral by-product will be characterized and evaluated, aiming its use in the partial replacement of cement to produce mortar. The experimental methods will be divided into the following steps: material characterization, morphology analysis and evaluation of the by-product's pozzolanic potential. The material tended to show low pozzolanic reactivity, amounting to 116.91 Ca(OH)<sub>2</sub>/g, specific mass of 2.63 g/cm<sup>3</sup> and moisture content of 1.19%. The results indicate the classification of stone dust as inert additions of granitic origin, pink granite filler.

**Keywords:** mineral by-product; substitution; filler; mineral additions.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fotografia 1 - Pó de pedra estocado ao ar livre no pátio da pedreira.....	21
Fotografia 2 - Subproduto mineral, material de estudo do trabalho.....	28
Fotografia 3 – Preparo da amostra para análise do Teor de Umidade.....	30
Figura 1 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.....	27
Figura 2 – Distribuição granulométrica do pó de pedra granítica.....	32
Figura 3 – Resultados da análise de teor de umidade do pó de pedra granítica.....	34
Figura 4 – MEV pó de pedra granítica. Ampliação de 200 vezes.....	35
Figura 5 – Diagrama EDS do pó de rocha granítica.....	36
Figura 6 – Amostra de pó de rocha granítica escaneada pelo EDS, ampliação 250 $\mu\text{m}$ .....	37
Figura 7 – Resultado do teor de hidróxido de cálcio fixado pelo ensaio de Chapelle Modificado.....	38



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais componentes do cimento Portland.....	23
Tabela 2 – Classificação de materiais pozolânicos .....	25
Tabela 3 – Requisitos químicos e físicos para materiais pozolânicos.....	25
Tabela 4 – Percentual do material retido nas peneiras. ....	33
Tabela 5 – Massa específica, pó de pedra granítica.....	33
Tabela 6 – Comparação da massa específica. ....	34
Tabela 7 – Análise de teor de umidade do pó de pedra granítica. ....	35

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
MME	Ministério de Minas e Energia
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
PERS/PR	Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado da Paraná
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

## LISTA DE ELEMENTOS E COMPOSTOS QUÍMICOS

Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Fe	Ferro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro III
HCl	Ácido clorídrico
K	Potássio
Na	Sódio
O	Oxigênio
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício (sílica)
Si	Silício
2CaO·SiO <sub>2</sub>	Silicato dicálcico
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminato tricálcico
3CaO·SiO <sub>2</sub>	Silicato tricálcico
4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ferroaluminato tetracálcico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>17</b>
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	17
2.2	INDÚSTRIA MINERADORA	17
2.2.1	Legislação Ambiental Mineral	18
2.2.2	Subproduto Mineral	20
2.3	INDÚSTRIA CIMENTEIRA	22
2.3.1	Cimento Portland	22
2.3.2	Processo de fabricação do cimento Portland	23
2.3.3	Argamassa	24
2.4	ADIÇÃO MINERAL	24
2.4.1	Reatividade Pozolânicos	25
<b>3</b>	<b>MATERIAS E MÉTODOS</b>	<b>27</b>
3.1	MATERIAL	28
3.1.1	Subproduto Mineral	28
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO pó de pedra granítica	28
3.2.1	Análise granulométrica	28
3.2.2	Massa específica	29
3.2.3	Umidade	29
3.3	ANÁLISE DA MORFOLOGIA	30
3.3.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	30
3.4	POTENCIAL POZOLÂNICO	30
3.4.1	Chapelle modificado	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSÕES</b>	<b>32</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO MINERAL	32
4.1.1	Análise granulométrica	32
4.1.2	Massa específica	33
4.1.3	Umidade	34
4.2	ANÁLISE DA MORFOLOGIA	35
4.2.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	35
4.2.2	Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)	36

4.3	POTENCIAL POZOLÂNICO .....	37
4.3.1	Chapelle Modificado .....	37
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da industrialização, são produzidos anualmente milhões de toneladas de subprodutos e resíduos de usinas e indústrias, como cinzas de carvão mineral provenientes de fornos de usinas termelétricas e materiais pulverulentos resultantes dos processos da indústria mineradora. A geração desses materiais não só representa uma perda de matéria-prima como também uma fonte preocupante de poluição podendo acarretar desequilíbrio ambiental. Com adequada gestão, tais subprodutos podem ser incorporados em setores industriais.

A mineração é um setor que se destaca na contribuição do crescimento socioeconômico do Brasil. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2020), o faturamento do setor mineral cresceu 36% no ano de 2020. No entanto, a crescente atividade mineradora pode gerar consequências prejudiciais para o meio ambiente, pois além de ser responsável por um consumo elevado dos recursos naturais, o processo de britagem gera um grande volume de material pulverulento. A destinação não adequada deste material pode acarretar a degradação visual da paisagem e assoreamento de rios (MENOSSI *et al.*, 2010). Desta forma, o aproveitamento do pó de pedra granítica em outros setores, como o da indústria da construção civil, é uma alternativa que contribui para minimizar os impactos ambientais, redução do consumo de matérias primas e energia.

A utilização de pós minerais tem demonstrado ser relevante no desempenho dos materiais que possuem matrizes cimentícias. Nos processos industriais há geração de subprodutos que podem apresentar certa reatividade pozolânica. Portanto, há uma grande demanda por estudos que avaliem a substituição de parte do cimento do concreto ou da argamassa por materiais com propriedades pozolânicas ou de preenchimento (SANTOS, 2008).

O cimento é um insumo básico da indústria da construção civil, setor de grande importância econômica para o Brasil. Entretanto, a indústria do cimento é responsável por emitir poluição atmosférica devido ao processo de calcinação do calcário e da queima de combustíveis fósseis para fabricação do clínquer (MOURA, 2018).

A substituição parcial do cimento por pós de origem mineral é uma alternativa de reinserir um material de baixo valor agregado como matéria prima

na produção de outro produto, podendo oferecer benefícios econômicos e ambientais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Tendo em vista o aproveitamento do material pulverulento gerado pela indústria mineradora, o projeto busca a avaliação da reatividade pozolânica do pó de pedra granítica possibilitando a substituição parcial do cimento na produção de misturas cimentícias.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar a reatividade pozolânica do pó de pedra granítica para a substituição parcial do cimento na produção de misturas cimentícias.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Determinar a massa específica, umidade e granulometria do pó de pedra granítica.
- Analisar a morfologia do material em estudo.
- Verificar a reatividade pozolânica do pó de pedra granítica.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O pó de pedra granítica, é um subproduto mineral oriundo do processo de britagem de pedreiras, é considerado um material de baixo valor agregado, que até então não possui aplicação para o setor produtivo. Estes materiais finos têm sido apenas estocados em pilhas nas áreas das pedreiras e isto pode gerar sérios danos ambientais, como a poluição atmosférica e assoreamento de rios e leitos de água. Deste modo, legislações ambientais vigentes no Brasil como as estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), determinam que haja uma destinação adequada para esse volume excedente de material pulverulento gerado.

No processo de fabricação do cimento, há um consumo elevado de recursos naturais para o fornecimento de matéria-prima e ocorre uma taxa significativa de emissão de gases poluentes. E por este motivo, a busca pelo equilíbrio entre o crescimento do setor produtivo e o desenvolvimento

sustentável se faz necessário. A possibilidade do aproveitamento de pós de origem mineral na substituição parcial do cimento torna-se relevante pois, caso haja viabilidade, o material pode se transformar em uma ferramenta importante para preservação do meio ambiente.

O presente estudo buscou caracterizar e avaliar a reatividade pozolana do pó de pedra de origem de rochas ígneas intrusivas graníticas (granito rosado), proveniente do processo de exploração mineral de uma empresa mineradora localizada na região dos Campos Gerais, região do estado do Paraná.

A possibilidade da substituição parcial do cimento para produção de misturas cimentícias, pelo pó mineral, visa diminuir os impactos ambientais gerados e o consumo de recursos naturais para a produção do cimento. Além disso, o trabalho busca servir como base e referencial teórico para futuros trabalhos envolvendo o pó de pedra estudado.



## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

O desenvolvimento sustentável baseia-se em atender todas as necessidades das gerações presentes, sem que haja comprometimento ao atendimento das necessidades de gerações futuras. A preocupação por práticas sustentáveis faz com que as organizações públicas, produtivas e sociais, desenvolvam métricas para avaliação do desempenho ambiental acreditando que adotando melhores práticas sustentáveis os ganhos serão maiores a médio ou longo prazo (SANTOS, 2008; SILVA *et. al*, 2017)

De acordo com Donaire (2018), o desenvolvimento sustentável, além do equilíbrio ecológico e da igualdade social, apresenta uma terceira perspectiva, a questão do desenvolvimento econômico. Induz a responsabilidade comum como processo de mudança no qual a exploração de recursos materiais, os investimentos financeiros e as rotas do desenvolvimento tecnológico deverão andar juntas.

Nos últimos tempos, o conceito de desenvolvimento sustentável tem sido cada vez mais aplicado pelos setores produtivos. A consciência de que o gerenciamento dos resíduos é uma questão estratégica para as empresas tem levado muitos pesquisadores a buscar alternativas para o aproveitamento dos resíduos industriais (LEAL e CASTRO, 2012).

### **2.2 INDÚSTRIA MINERADORA**

A atividade mineradora possui origem milenar e tem sido uma das responsáveis pelo intenso desenvolvimento econômico e social ocorrido desde os tempos remotos da Revolução Industrial. Deste então, a indústria de extração mineral consolidou um mercado consumidor crescente, ávido por novidades e em franca e intensa expansão (EGGER *et. al*, 2016).

No Brasil, o interesse pela extração de minérios é originário desde os tempos da Colônia, no qual o país foi explorado por diversas expedições em busca de metais preciosos. Ao longo da história, novas descobertas de depósitos minerais foram feitas, as quais tiveram impacto relevante na economia e no processo de industrialização nacional (ANM, 2020).

No início da atividade no país, a extração mineral era desprovida de técnicas aprimoradas, bem como a existência de legislações políticas e ambientais que direcionassem a atividade industrial (CEREZA, 2018). A demanda pela melhoria da qualidade dos produtos por parte do mercado consumidor, resultou em uma intensa atividade exploratória dos recursos naturais. Diante disso, sociedade e governo passaram a cobrar das indústrias práticas de desenvolvimento sustentável (EGGER *et. al*, 2016).

Nas últimas décadas houve evolução da legislação de proteção aos recursos naturais. No Brasil, cabe aos órgãos governamentais a responsabilidade de definir as diretrizes e regulamentações, bem como atuar na concessão, fiscalização e cumprimento da legislação mineral e ambiental para o aproveitamento dos recursos minerais (IBRAM, 2013).

A atividade mineradora, em geral, se resume a realização de diversos processos em sequência, que passa do licenciamento da jazida, a extração do mineral, a realização do beneficiamento, a estocagem, a disposição final, e inserção no mercado minerador, e diversos outros processos que constituem a mineração. Alguns processos não geram rejeitos, já outros geram quantidades de materiais que não são aproveitados e acabam causando problemas ambientais (BATISTA *et al.* 2018).

Os bens minerais são considerados parte inicial de uma cadeia de produção, suas características tornam o seu uso desejável para o desempenho de uma dada função. A Indústria de Construção Civil é grande beneficiadora da mineração no Brasil, a atividade demanda consumo de produtos derivados de base-mineral e o uso de matéria-prima *in natura*, como a areia, brita e cascalho (DNPM, 2009).

### 2.2.1 Legislação Ambiental Mineral

O controle dos cenários ecológicos é uma preocupação expressiva das organizações mundiais. As ações de prevenção ou de reabilitação devem partir dos órgãos governamentais, a fim de criar mecanismos socioculturais de mudanças de comportamento do modo da exploração dos recursos naturais (EGGER *et. all*, 2016).

A promulgação da Constituição Federal de 1988 estabeleceu o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e

essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. Ainda no art. 225, § 2º, da Constituição, diz: “Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei.” (BRASIL – CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL DE 1988, p.131).

A Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986, considera a mineração uma atividade potencialmente poluidora, bem como estabelece os procedimentos e as condições para o licenciamento da atividade modificadora do meio ambiente. Essa resolução define impacto ambiental como sendo:

[...] qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humana que, direta ou indiretamente, afetam: I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II – as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V – a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA 001/86).

O avanço da atividade mineradora vem cobrando um alto preço ambiental por conta das explorações. Os principais impactos ambientais provenientes da mineração são a remoção da vegetação em áreas de extração, contaminação, produção de resíduos sólidos e entre outros (BATISTA *et. a*, 2018).

A crescente preocupação com a geração dos resíduos provenientes da atividade humana, resultou na necessidade da elaboração de diretrizes legais que atendessem às demandas dos setores produtivos. Em 2010, foi promulgada a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS – Lei nº 12.305; BRASIL, 2010), a qual se baseou na sustentabilidade, estabelecendo seus pilares nos seguintes princípios: Não geração; Redução; Reutilização e Reciclagem. Na lei, são considerados parâmetros ambiental, social, cultural, econômico, tecnológico e de saúde pública, bem como a busca da promoção do desenvolvimento sustentável e da ecoeficiência (SOUZA, 2012).

Dentre os instrumentos da PNRS estão os planos municipais, regionais, estaduais e nacional. A Lei nº 20.607, de 10 de junho de 2021, institui o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado da Paraná – PERS/PR, com o objetivo de orientar caminhos, estratégias, diretrizes e ações sobre o consumo, coleta, reciclagem, tratamento e destinação dos resíduos sólidos no território estadual.

O PERS/PR engloba a mineração no grupo das atividades geradoras de resíduos e ainda estabelece que haja gerenciamento ambiental adequado dos resíduos gerados.

Atualmente a atividade mineradora é regulada pelo sistema de concessão mineral brasileiro, controlado pela Agência Nacional de Mineração (ANM), Ministério de Minas e Energia (MME), em consonância com o licenciamento ambiental executado pelos órgãos estaduais, distrital e federal de meio ambiente. Fica a essas organizações a responsabilidade de atuarem como mecanismos legais para o controle de atividades consideradas de impacto ou que sejam poluidoras, e em mecanismos econômicos e técnicos, para o apoio do desenvolvimento de novas tecnologias (IBRAM, 2013).

### 2.2.2 Subproduto Mineral

O pó de pedra, também denominado como finos de pedreira, é um material fino resultante da britagem de qualquer tipo de rocha, estima-se que o diâmetro das partículas seja inferior a 0,075 mm, apresenta baixo valor agregado, e justamente por isso, acabam não sendo aproveitados pelas pedreiras (ANDRIOLO, 2005; SANTOS, 2008). Quando este material mineral não possui destinação definida, fica estocado ao ar livre nos pátios das pedreiras, por períodos indeterminados, estando exposto à ação de intempéries, podendo gerar danos ambientais como: poluição atmosférica, assoreamento de rios e leitos d'água (SÁ, 2006).

**Fotografia 1 - Pó de pedra estocado ao ar livre no pátio da pedreira**



**Fonte: Menossi (2004).**

O aproveitamento do pó de pedra na utilização como matéria-prima na produção de outro produto, passaria de material mineral não aproveitado para subproduto mineral, promovendo assim, o beneficiamento do mesmo e dando uma utilização ao volume excedente que pode gerar diversos impactos ambientais.

Existem estudos que buscam a reutilização dos finos gerados pelo processo de britagem. Costa (2005) realizou a caracterização tecnológica de finos de pedreiras visando seu aproveitamento como agregado miúdo para construção civil. O estudo evidenciou a possibilidade do uso do material para a finalidade desejada.

Santos (2008) analisou o aproveitamento de resíduos minerais na mistura de argamassa de assentamento e revestimento. Seus resultados evidenciaram a possibilidade da substituição do cimento na formulação das argamassas.

Lima (2010) estudou a avaliação da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo cimento incorporados com pó fino de granito. Em seus resultados, é possível observar a possibilidade da utilização deste material para aplicação em parede monolítica e tijolos para habitação social.

## 2.3 INDÚSTRIA CIMENTEIRA

### 2.3.1 Cimento Portland

O cimento é um material existente na forma de pó fino, com propriedades aglomerantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água e mesmo depois de endurecido, caso seja exposto à ação da água, não se decompõe mais (PAULA, 2009). O material é utilizado desde a antiguidade, a exemplo dos antigos egípcios, que utilizavam uma liga constituída por mistura de gesso impuro. Os gregos e os romanos utilizavam calcário calcinado e, posteriormente, aprenderam a adicionar areia e fragmentos de pedras ou de tijolos à mistura de calcário e água, dando origem ao primeiro concreto da história. Grandes construções como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água. (NEVILLE, 2016; PAULA, 2009).

Em 1756, o inglês John Smeaton deu um grande passo para o desenvolvimento do cimento, descobriu que a mistura calcinada de calcário e argila se tornava, depois de seca, um produto de alta resistência. Contudo, o estudo no desenvolvimento de cimento foi alavancado com o inglês Joseph Aspdin, que em 1824 aperfeiçoou o processo de mistura para a fabricação do cimento, queimado e moendo argila juntamente com pó de pedra calcária, obtendo uma pasta que após secar tornava-se tão dura quanto as pedras utilizadas na época (MOURA, 2018; PAULA, 2009). A mistura foi patenteada pelo inglês com o nome de cimento Portland, pela semelhança às rochas da ilha britânica de Portland (NEVILLE, 2016).

O cimento tem grande importância para a sociedade, as obras e construções contemporâneas, fazem o amplo uso do material como elemento de ligação, concretagem e de estrutura. Desde o início do século XX, o material tem sido a solução econômica tanto para as moradias e assentamentos humanos, como para a construção de grandes obras da engenharia moderna, fato que está diretamente relacionado à melhoria da qualidade de vida das populações. Contudo, o processo de fabricação do cimento gera impactos no meio ambiente e na saúde humana. Há impactos desde a extração de matéria-prima à fase de clínquerização, onde há alto gasto energético e forte emissão de gases de efeito

estufa, principalmente o dióxido de carbono (FORMIGONI *et al*, 2019; MAURY, 2012; MENDONÇA, BLUMENSCHHEIN, 2018).

### 2.3.2 Processo de fabricação do cimento Portland

O cimento é composto basicamente de materiais carbonáticos ( $\text{CaCO}_3$ ) e materiais argilosos à base de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). O processo de fabricação do cimento, de maneira geral, consiste em moer a matéria-prima, misturá-la nas proporções adequadas e queima da mistura em um grande forno rotativo até uma temperatura de cerca de  $1450^\circ\text{C}$ . A esta temperatura, o material é sinterizado e parcialmente fundido, resultando no clínquer. Depois de resfriado, o clínquer é misturado com uma pequena porcentagem de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) finamente moído, para fazer o cimento (NEVILLE, 2016; SIQUEIRA, 2011).

Os compostos formados pelas combinações químicas das matérias-primas no processo de fabricação do clínquer, que constitui o cimento, estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Principais componentes do cimento Portland**

Nome do composto	Composição	Abreviação
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

**Fonte: Neville (1997).**

Atualmente, existem materiais que podem ser empregados em substituição ao cimento, tais como as cinzas volantes, escória de alto-forno, materiais pozolânicos e de fíler calcário. Esses materiais podem proporcionar efeitos distintos, como efeito de reatividade com a mistura e possibilitando a melhora das propriedades do cimento com a reutilização desses materiais resultante de processos industriais (MOURA 2018).

### 2.3.3 Argamassa

Segundo a NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos (ABNT, 2005), define argamassa como sendo uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou sem instalação própria (argamassa industrializada).

A argamassa desempenha uma importante função na construção civil. São utilizadas em construção no assentamento de pedras tijolos e blocos nas alvenarias, onde favorecem a distribuição dos esforços, nos reparos de obras de concreto, e nos trabalhos de acabamento de tetos e pisos (FERREIRA, 2014).

## 2.4 ADIÇÃO MINERAL

As adições minerais podem ser adicionadas à composição de concretos e argamassas com o intuito de implementar suas propriedades cimentícias. A adição é capaz de auxiliar no controle da estabilidade, redução da permeabilidade, aumento da durabilidade, dentre outras possibilidades. O uso de adições minerais também traz benefícios econômicos e ambientais, a substituição do cimento pelas adições possibilita a redução de custos, a diminuição do consumo de recursos naturais e das emissões de CO<sub>2</sub> durante a produção do cimento (DAL MOLIN, 2011; MENDEIROS 2016; OLIVEIRA, 2019).

A origem das adições pode ser natural ou artificial. Os materiais naturais são as terras diatomáceas, os vidros e tufo vulcânicos e as argilas ou folhelhos calcinados, estes compostos de origem de rochas ou solos vulcânicos. Já as adições artificiais podem ser de resíduos ou subprodutos das indústrias de transformação e beneficiamento, que requerem ou não processamento, os principais subprodutos utilizados são a escória de alto forno, a cinza volante, a sílica ativa e cinza de casca de arroz (LIDUÁRIO *et. al* 2016; NEVILLE, 1997).

O fíler é um material finamente dividido, constituído de partículas minerais, como o pó calcário. O material quando utilizado em misturas de concreto ou argamassa, possibilita o enchimento dos vazios, modificando a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento. Além de atuar no



preenchimento dos poros, o filler age como pontos de nucleação na hidratação do cimento (BARDINI *et al.*, 2010; DAL MOLIN, 2011).

Diante das vantagens técnicas, econômicas e ambientais envolvendo a utilização das adições minerais, torna-se relevante e necessário uma análise sobre novas opções de matérias para o uso. Este estudo busca a caracterização e avaliação pó de granito rosado, subproduto de origem mineral que ainda não é muito explorado o seu uso.

#### 2.4.1 Reatividade Pozolânicos

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define materiais pozolânicos como aqueles que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, no entanto quando estão na forma de partículas finas e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio, formando assim compostos com propriedades cimentícias. A norma também estabelece os requisitos químicos e físicos que os materiais devem atender para que possam ser classificados como pozolana, as especificações são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

**Tabela 2 – Classificação de materiais pozolânicos**

Classe	Condições
N	Pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos, cherts silicoso, terras diatomáceas e argilas calcinadas
C	Cinza volante proveniente da queima de carvão mineral
E	Quaisquer pozolanas não contempladas nas classes N e C

Fonte: Adaptado NBR 12653 (ABNT 2014).

**Tabela 3 – Requisitos químicos e físicos para materiais pozolânicos**

Requisitos químicos	Classe de material		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70%	≥ 70%	≥ 50%
SO <sub>3</sub>	≤ 4%	≤ 5%	≤ 5%
Teor de umidade	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%
Perda ao fogo	≤ 10%	≤ 6%	≤ 6%
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5%	≤ 1,5%	≤ 1,5%
Requisitos físicos			
Material retido na peneira 45µm	≤ 34%	≤ 34%	≤ 34%
Índice de atividade pozolânica:			
Com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 75%	≥ 75%	≥ 75%
Com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa
Água requerida	≤ 115%	≤ 110%	≤ 110%

Fonte: Adaptado NBR 12653 (ABNT 2014).

As pozolanas são compostas por silicosos ou sílico-aluminosos, ambos na forma amorfa, ou seja, estruturas formadas por átomos com orientação somente de curta distância (NEVILLE 2016; MOURA, 2018).

Segundo Massazza (1993), as pozolanas são formadas por fases ativas capazes de reagir com cal, bem como inerte, insensíveis ou pouco sensíveis à sua presença, sendo as principais fases a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A atividade pozolânica abrange dois parâmetros: quantidade máxima de cal que pode reagir com o material e a taxa de qual tal combinação ocorre. Ambas as condições dependem da natureza das pozolanas e, mais precisamente, da qualidade e quantidade das fases ativas presentes no material. A combinação de hidróxido de cálcio e pozolana varia com os seguintes fatores:

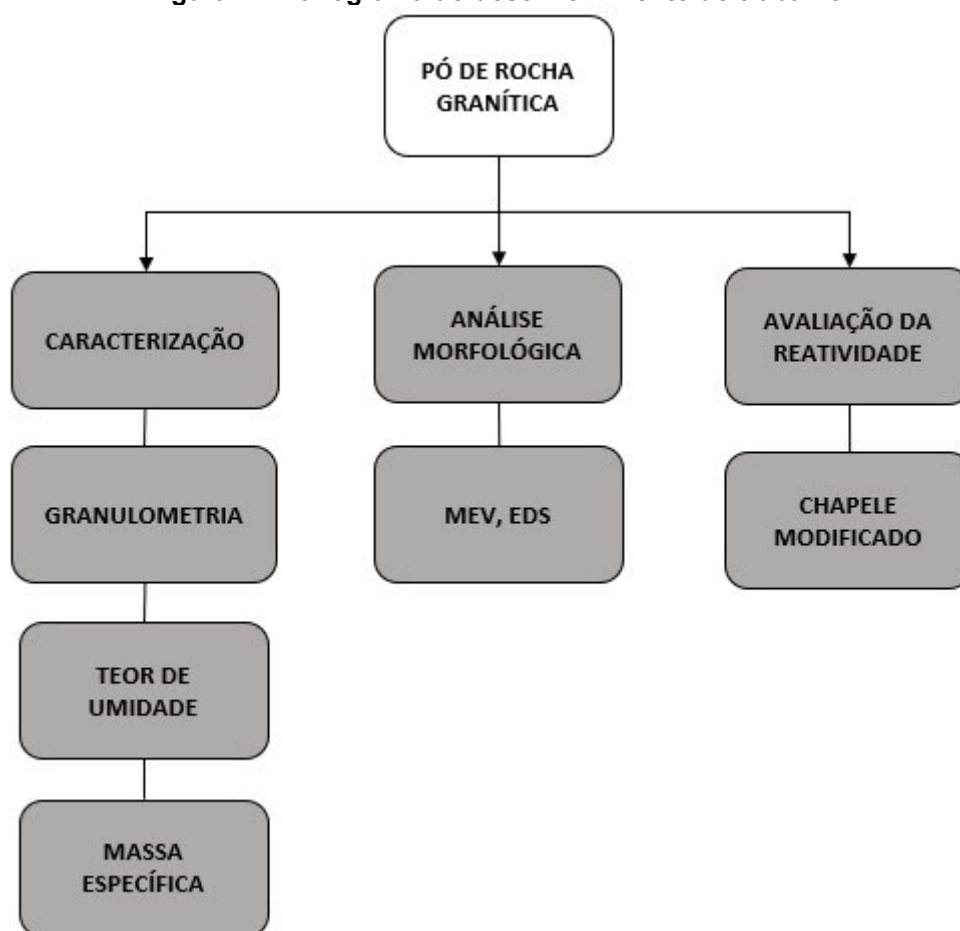
- A natureza das fases ativas da pozolana;
- O conteúdo de pozolana na mistura;
- O teor de dióxido de sílica ( $\text{SiO}_2$ );
- Razão  $\text{Ca(OH)}_2$  / pozolana na mistura.

Além dos métodos de índice de atividade pozolânica citados pela NBR 12653 (ABNT 2014), a determinação pode ser avaliada também pela determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado, pelo método Chapelle modificado. Neste trabalho, a reatividade pozolânica do pó de pedra foi avaliado seguindo a método Chapelle modificado estabelecido pela ABNT NBR 15895 (2010).

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

As metodologias experimentais apresentadas neste capítulo foram utilizadas para a avaliação reatividade pozolânica do pó de pedra granítica para a substituição parcial do cimento em matrizes de base cimentícia. Para isso, foi realizada a caracterização do material, seguida pela análise da morfologia e por fim, a identificação da reatividade pozolânica do pó de pedra granítica. No fluxograma apresentado na Figura 1 consta o resumo das etapas que foram desenvolvidas neste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho



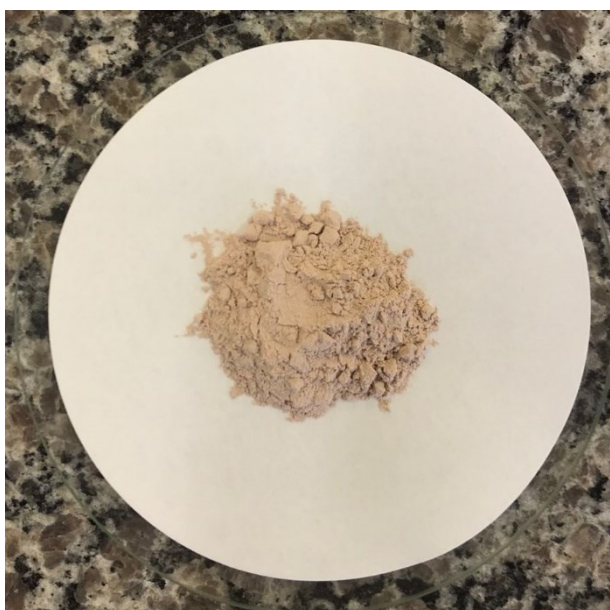
Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.1 MATERIAL

#### 3.1.1 Subproduto Mineral

O material utilizado neste trabalho foi doado por uma empresa mineradora localizada na região dos Campos Gerais. Primeiramente, o pó de pedra granítica passou pelo processo de secagem a temperatura de 30 °C em estufa com circulação e renovação de ar, e peneirado utilizando uma peneira manual, a fim de separar os grãos de maior granulometria.

**Fotografia 2 - Pó de pedra granítica, material de estudo do trabalho**



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE PEDRA GRANÍTICA

#### 3.2.1 Análise granulométrica

A caracterização da granulometria do material foi determinada pelo ensaio de peneiramento utilizando o agitador eletromagnético (Bertel – AAKER) por um tempo de 20 minutos. Para a realização do procedimento as peneiras vibratórias com abertura 42, 60, 80, 100, 150, 170, 200, 250, 270, 325, 400 mesh foram utilizadas.

Com o propósito de trabalhar com uma amostra de finos mais homogênea e na granulometria desejada para a realização do estudo, o material utilizado é

o passante da peneira de 200 mesh, devido assemelhar-se a granulometria do cimento.

Para determinar o tamanho médio das partículas do pó de pedra, utilizou-se a definição de diâmetro de Sauter ( $d_{ps}$ ), onde pode ser obtido pela Equação (1).

$$d_{ps} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{d_i}\right)} \quad (1)$$

Em que:

$d_{ps}$ : Diâmetro de Sauter (mm);

$x_i$ : a fração mássica retida na peneira;

$d_i$ : diâmetro médio entre as peneiras  $i$  e  $i-1$  (mm);

### 3.2.2 Massa específica

A caracterização da massa específica foi baseada na metodologia proposta por César *et. al* (2018) utilizando o picnômetro de 100 mL com termômetro acoplado previamente calibrado.

Para a determinação da massa específica da amostra foi, primeiramente, determinada a massa do aparelho de medição vazio, seco e limpo, depois foi pesado o picnômetro com uma pequena quantidade de amostra inserida, seguido pela adição de água e finalizando pela pesagem de todo o conjunto. Com os dados obtidos, a massa específica do material foi calculada pela relação entre massa da amostra pelo seu volume ocupado no picnômetro.

### 3.2.3 Umidade

O teor da umidade do pó de pedra granítica foi determinado conforme a NM 24 (ABNT, 2002). Seguindo metodologia, cerca de 1 g da amostra foi submetida ao processo de secagem em estufa à temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . O período inicial de secagem foi de 30 minutos e períodos subsequentes de 10 minutos até obter-se constância de massa. O processo ocorreu até que a diferença entre duas determinações sucessivas de massa fosse menor que 0,001g, como estabelecido pela norma.

A umidade foi calculada com base na diferença de massa entre a amostra antes e depois da secagem, conforme a Equação (2):

$$U = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

$U$ : umidade da amostra (%);

$m_1$ : massa de material da amostra, antes da secagem (g);

$m_2$ : massa de material da amostra, após a secagem (g);

**Fotografia 3 – Preparo da amostra para análise do Teor de Umidade.**



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.3 ANÁLISE DA MORFOLOGIA

#### 3.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise da morfologia do pó de pedra granítica foi avaliada a partir da microscopia eletrônica de varredura (MEV) em microscópio eletrônico (Tescan – Vega 3) com detector de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) para a microanálise química. O procedimento consiste em investigar a superfície da amostra, pela varredura de um feixe de elétrons focalizado, sendo possível identificar e mapear os elementos químicos presentes no material.

### 3.4 POTENCIAL POZOLÂNICO

#### 3.4.1 Chappelle modificado

A identificação do potencial pozolânico do material de estudo foi avaliada pelo método Chappelle modificado, conforme a NBR 15895 (ABNT, 2010). A

metodologia determina a atividade pozolânica por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado.

Foi preparada uma solução de 1 g do material pozolânico, 2 g de óxido de cálcio (CaO) e 250 g de água isenta de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e a mesma foi mantida sob agitação durante (16 ± 1) h a temperatura de (90 ± 5) °C. Após às 16 h de reação, acrescentou 250 mL de solução de sacarose (240g/L), seguido pela filtração da mistura.

O teor de hidróxido de cálcio fixado da solução preparada foi determinado por meio da titulação com solução de ácido de cloro (HCl) 0,1 mol/L, usando solução de fenolftaleína como indicador. O procedimento também foi efetuado nas mesmas condições para o ensaio em branco.

O índice de atividade pozolânica Chapelle, que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, é expresso em miligramas de Ca(OH)<sub>2</sub> por grama de material pozolânico, conforme expresso pela Equação (3):

$$I_{Ca(OH)_2} = \frac{28 \cdot (V_2 - V_1) \cdot F_c}{m_2} \cdot 1,32 \quad (3)$$

Em que:

$I_{Ca(OH)_2}$ : índice de atividade pozolânica Chapelle obtido no ensaio.

$m_2$ : massa de material pozolânico (g);

$V_2$ : volume de HCl 0,1 mol/L consumido no ensaio com amostra (mL);

$V_1$ : volume de HCl 0,1 mol/L consumido no ensaio em branco (mL);

$F_c$ : fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1 mol/L;

1,32: relação molecular Ca(OH)<sub>2</sub>/CaO.

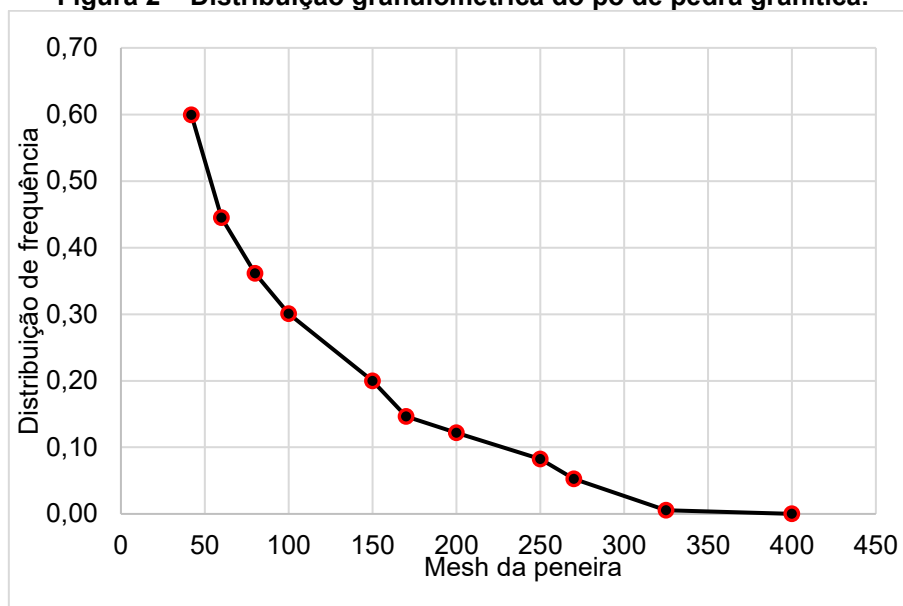
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBPRODUTO MINERAL

#### 4.1.1 Análise granulométrica

Após o material passar pelo processo de secagem a temperatura de 30 °C, em estufa com circulação e renovação de ar, e ser separado dos grãos de maior granulometria, o pó de pedra granítica foi peneirado em agitador eletromagnético de peneiras granulométricas (Bertal – AAKER). A curva de distribuição granulométrica do pó de pedra é apresentada na Figura 2.

**Figura 2 – Distribuição granulométrica do pó de pedra granítica.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Verifica-se a predominância do material na peneira de mesh 42 (40,04%). O diâmetro médio de Sauter determinado a partir da Equação 1 para o subproduto mineral foi de 0,161 mm. A Tabela 4 apresenta os percentuais do pó de pedra retido nas peneiras.



**Tabela 4 – Percentual do material retido nas padeiras.**

Peneira (mesh)	Pó de pedra (g)	%
42	221,76	40,04%
60	85,58	15,45%
80	46,32	8,36%
100	33,52	6,05%
150	56,11	10,13%
170	29,35	5,30%
200	13,79	2,49%
250	21,78	3,93%
270	16,5	2,98%
325	26,08	4,71%
400	2,97	0,54%
Fundo	0,06	0,01%

**Fonte: Autoria própria (2022).**

#### 4.1.2 Massa específica

O material apresentou uma massa específica de aproximadamente 2,631 g/cm<sup>3</sup>. O resultado da caracterização está descrito na Tabela 5.

**Tabela 5 – Massa específica, pó de pedra granítica.**

Etapa	Replicata 1 e 2	
Massa picnômetro vazio (g)	94,848	94,847
Massa picnômetro+amostra (g)	102,042	101,578
Massa picnômetro+amostra+água (g)	209,886	209,573
Massa da amostra (g)	7,194	6,731
Massa da água (g)	107,845	107,995
Temperatura (°C)	27,000	27,000
$\rho_{\text{água}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,997	0,997
Volume água (cm <sup>3</sup> )	108,222	108,373
Volume amostra (cm <sup>3</sup> )	2,722	2,571
$\rho_{\text{amostra}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,643	2,618
$\rho_{\text{amostra médio}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,631	

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Na Tabela 6, registram-se valores de massa específica de estudos encontrados na literatura em comparação ao resultado encontrado em comparação ao resultado obtido no desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa e considerando objetivos semelhantes entre si.

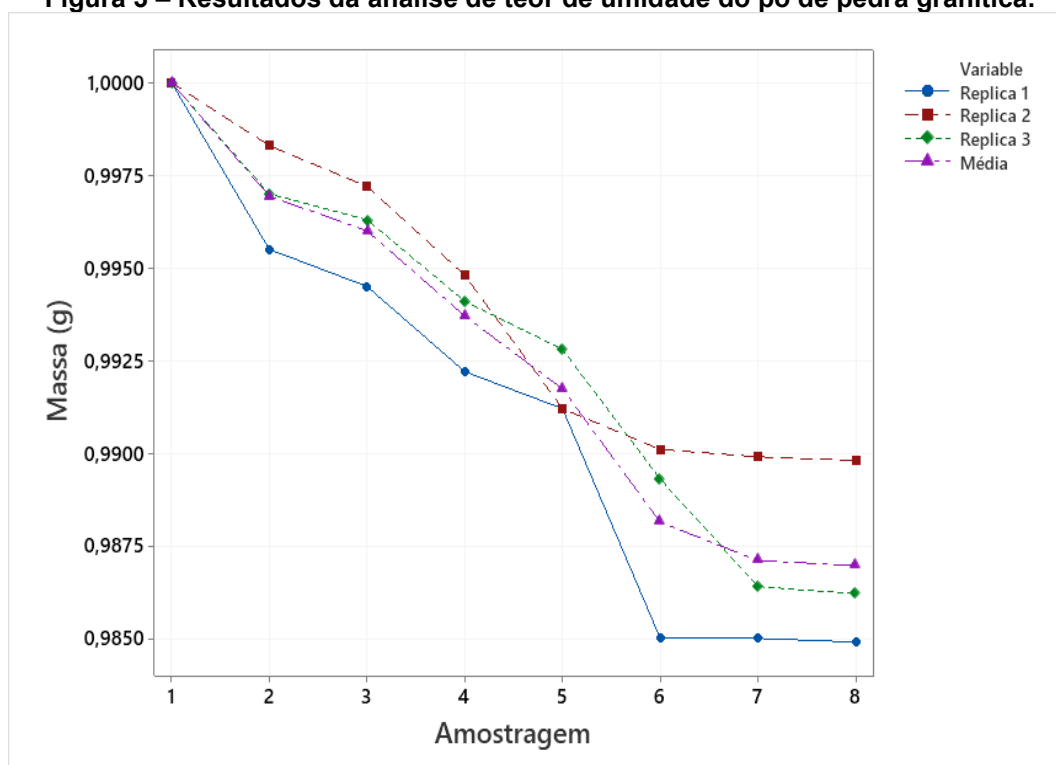
**Tabela 6 – Comparação da massa específica.**

Material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Autor
Pó de pedra granítica	2,63	Presente estudo
Fíler quartzo	2,60	Hoppe et al. (2017)
Pó de concreto	2,39	Brekailo (2017)
Cinza de bagaço de cana-de-açúcar	2,47	Ferreira (2014)

Fonte: Autoria própria (2022).

#### 4.1.3 Umidade

Para a determinação do teor de umidade do material, o procedimento foi feito em triplicada e desenvolvido até obter-se uma diferença de massa entre as amostragens inferiores a 0,001g.

**Figura 3 – Resultados da análise de teor de umidade do pó de pedra granítica.**

Fonte: Autoria própria (2022).

A diferença de massa entre as alíquotas da amostra permaneceu constante após a oitava pesagem das replicatas. O teor de umidade médio foi de aproximadamente 1,19%, abaixo dos 3% esperado para material pozolânico, como estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014). A Tabela 7 apresenta o resultado da análise de teor de umidade final do material de estudo.

**Tabela 7 – Análise de teor de umidade do pó de pedra granítica.**

<b>Amostra</b>	<b>Umidade</b>
Réplica 1	1,50%
Réplica 2	0,99%
Réplica 3	1,07%
Média	1,19%

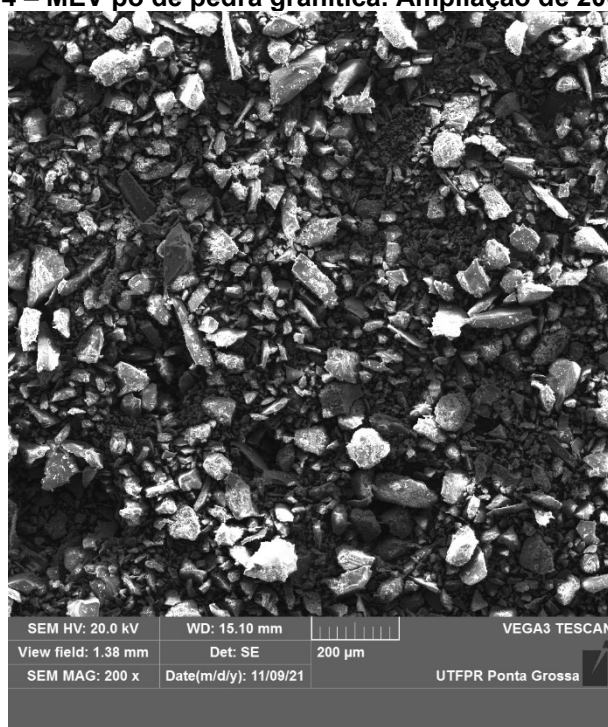
**Fonte: Autoria própria (2022).**

## 4.2 ANÁLISE DA MORFOLOGIA

### 4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para avaliar a morfologia da superfície do pó de pedra granítica, foi obtido micrografias do material com ampliação de 200 vezes, conforme observado na Figura 4.

**Figura 4 – MEV pó de pedra granítica. Ampliação de 200 vezes.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Observou-se na micrografia que o pó de pedra granítica apresenta partículas que possuem uma forma irregular e esférica.

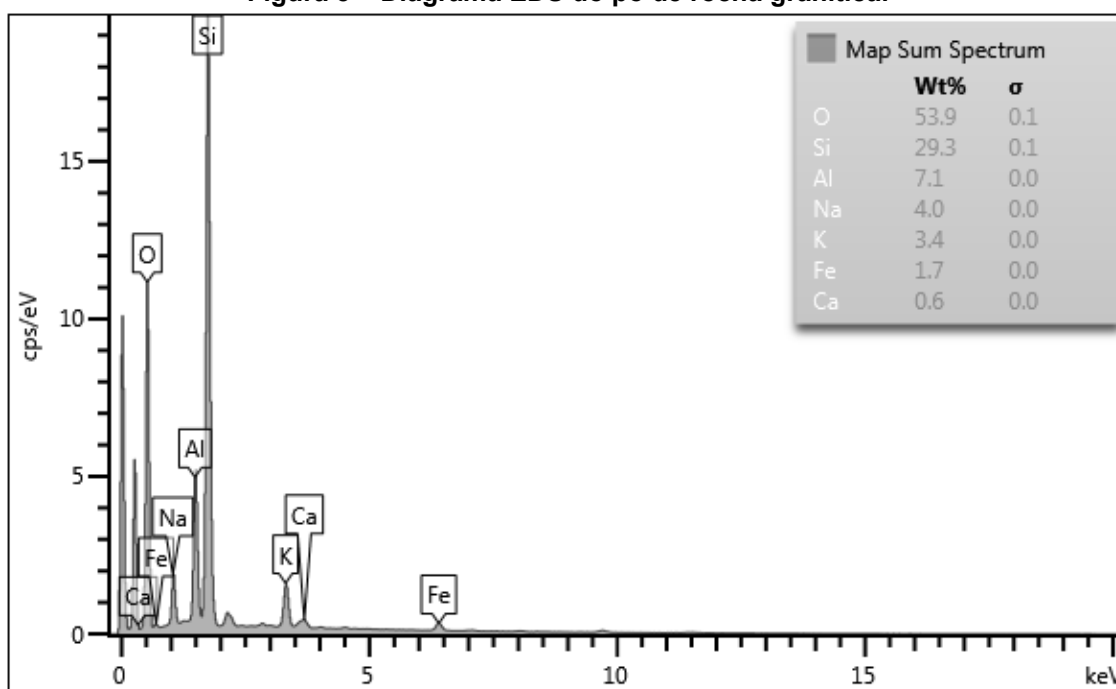
No trabalho de Santos (2008), a morfologia identificada para o resíduo de pedreira de estudo, foi semelhante a morfologia da amostra avaliada neste trabalho. A demanda de água está geralmente relacionada com a forma das

partículas, sendo caracterizado o efeito rolamento para as partículas esféricas que favorecem a trabalhabilidade da argamassa e concretos. Assim, as misturas cimentícias dosadas com o pó de pedra granítica tendem a apresentar uma boa trabalhabilidade.

#### 4.2.2 Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

A Figura 5 ilustra o diagrama da análise do EDS do pó de pedra granítica. O resultado da caracterização mostra há presença de Si, O, Al, Na, K, Fe, Ca. A predominância de oxigênio (53,9%), silício (29,3%) e alumínio (7,1%), é devido aos compostos de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presentes em rochas graníticas, que possuem maior representação na composição química comparados aos demais composto do granito.

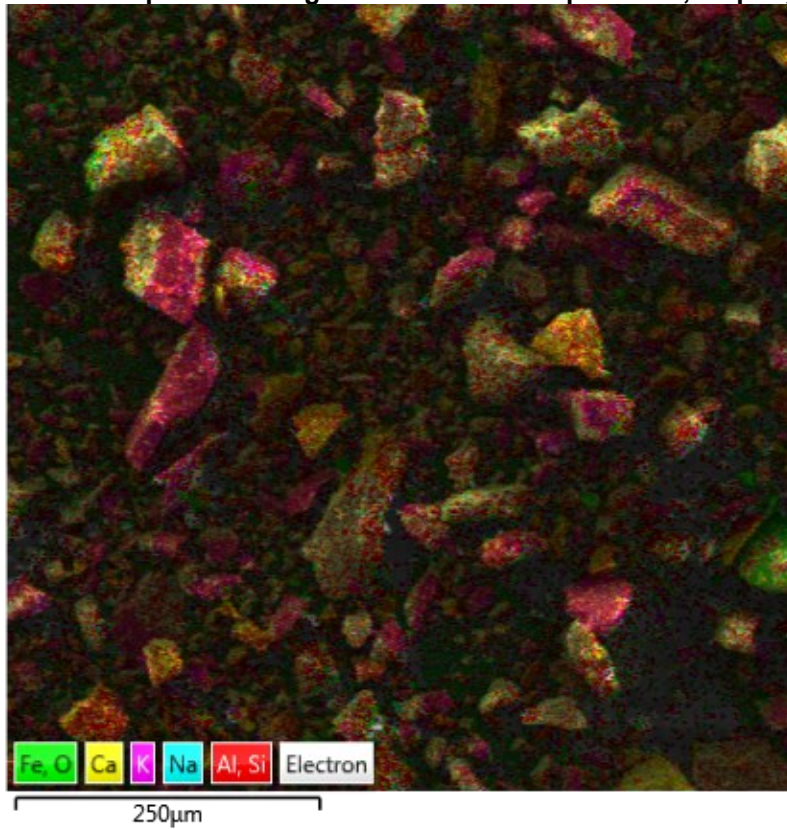
Figura 5 – Diagrama EDS do pó de rocha granítica.



Fonte: Autoria própria (2022).

A ilustração escaneado pela sonda eletrônica pelo detector EDS está representada na Figura 6.

Figura 6 – Amostra de pó de rocha granítica escaneada pelo EDS, ampliação 250 µm.



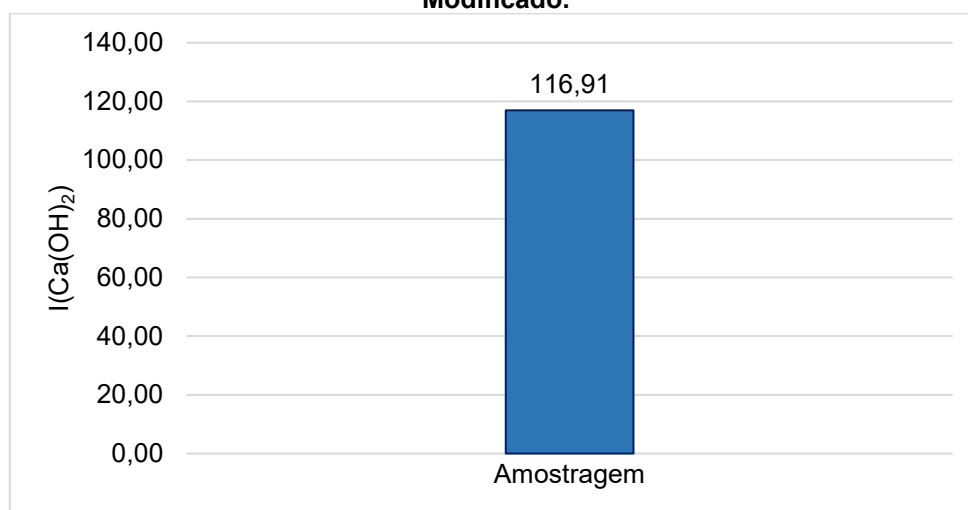
Fonte: Autoria própria (2022).

### 4.3 POTENCIAL POZOLÂNICO

#### 4.3.1 Chapelle Modificado

A Figura 6 apresenta o resultado do pó de pedra granítica no ensaio de Chapelle Modificado.

**Figura 7 – Resultado do teor de hidróxido de cálcio fixado pelo ensaio de Chapelle Modificado.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Gobbi (2014) encontrou valores de 174 e 140 mg de Ca(OH)<sub>2</sub>/g pozolana, ao avaliar o índice de atividade pozolânica das adições minerais de filer calcário e filer quartzoso. Hopper *et al.* (2017), ao avaliar a capacidade de fixação de cal de uma amostra de filer de quartzo, com massa específica de 2,6 g.L<sup>-1</sup>, obteve o consumo de 140 mg Ca(OH)<sub>2</sub>. Ambos os estudos, apresentaram valores similares ao determinado na amostra deste trabalho.

Raverdy *et al.*, (1980), propõem que o valor mínimo do consumo de hidróxido de cálcio para o material ser classificado como pozolânico é de 330 mg CaO/g, correspondendo por 436 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g pozolana. Para o ensaio realizado com pó de pedra, pode ser observado que o consumo de cal de 116,91 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g de adição, não pode ser classificado como pozolana. Desta forma, é possível afirmar que o subproduto mineral não apresentou reatividade, assim deve ser classificado como adições inertes de origem granítica, filer de granito rosado.

## 5 CONCLUSÃO

A partir das análises dos ensaios obtidos no presente trabalho avaliando a pozolanicidade do subproduto mineral do tipo granito rosado, verificou-se que o material atende ao requisito químico referente ao teor de umidade máximo estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), apresentando o teor de umidade de 1,19%.

O material apresentou o valor de 2,631 g/cm<sup>3</sup> na caracterização da massa específica do subproduto mineral. Na análise granulométrica, observou-se que cerca de 40% da amostra analisada ficou retirada na peneira de mesh 42 e 14,66% ficaram retiradas entre as peneiras de mesh 200, 250, 270, 325 e 400. O diâmetro médio de Sauter foi de 0,161 mm.

A análise morfologia pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), micrografia mostrou que o pó de pedra apresenta partículas que possuem uma forma irregular e esférico. O EDS mostrou a predominância de oxigênio (53,9%), silício (29,3%) e alumínio (7,1%), elementos presentes nas sílicas e alumina das rochas de granito.

Na avaliação da reatividade pozolânica do pó de pedra granítica, o material não atingiu o valor mínimo de fixação de hidróxido de cálcio no ensaio de Chapelle modificado.

Com os resultados obtidos é possível observar que o pó de pedra granítica apresentou reatividade pozolânica abaixo dos limites mínimos. Deste modo, o pó de pedra granítica deve ser classificado como adições inertes de origem granítica, fíler de granito rosado, podendo ser utilizados em misturas de argamassas e concretos, atuando no aumento da trabalhabilidade, na diminuição da capilaridade e a permeabilidade e nos preenchimentos dos vazios das misturas cimentícias.

Assim, essa pesquisa abre um leque de possibilidades de estudos utilizando o pó de pedra de origem granítica rosada, como a avaliação da percentagem de substituição do cimento pelo pó de pedra em misturas cimentícias que propicie melhor resistência à compressão.

## **6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, sugere-se:

- Estudar a atividade pozolânica do subproduto mineral pelo método de índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX);
- Avaliar a influência na substituição do cimento pelo pó de pedra granítica no preparo da argamassa;
- Realizar um estudo de uso do subproduto mineral como agregado miúdo;



## REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7211: Agregados para Concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653: Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 13281: informação e documentação: referências: elaboração**. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 15895: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 24: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade** Rio de Janeiro, 2002.

ANDRIOLO, F. R. **Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto**. In: **Seminário: O uso da fração fina da britagem**. II SUFFIB, São Paulo, 2005. **Anais**, São Paulo, EFUSP, 2005.

ANM – Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas 2019**. Brasília: ANM, 2020.

BARDINI, V. S. S; KLINSKY, L. M. G. FERNANDES JR, J. L. A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas. **Minerva**, v. 7, n. 1, p. 71-78, 2010.

BATISTA, L. S; DANTAS FILHO, M. D; MAIA, Y. W. A; CARBALHO, H.G; SANTOS, L.B. Geração de resíduos atribuída a atividade mineradora no Seridó (RN/PB) brasileiro. 1º CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE. 2018, Gramado – RS, **IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais**. Gramado – RS, UFCG, 2018. p. 1 – 9.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília: Senado Federal, Centro Gráfico, 1988. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm) > Acesso em: 07 nov. 2021.

BRASIL, Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Disponível em:< [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 21 de nov. 2021.

BREKAILO, F. **Avaliação Da Pozolanicidade De Adições De Pó De Cerâmica Vermelha E Pó De Concreto Proveniente De RCD E Seu Efeito Mitigador Do Ataque Por Sulfatos De Sódio Em Barras De Argamassa**. 2017. 98 f. Monografia - Departamento de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2017.

CEREZA, M. I. **Impactos ambientais à mineração de basalto: um estudo no município de Concórdia -SC**. 2018. 42 f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

CÉSAR, J.; PAOLI, M.-A. D.; ANDRADE, J. C. de. A determinação da densidade de sólidos e líquidos. **Revista Chemkeys**, Campinas, SP, n. 7, p. 1–8, 2018. em:

<<https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/chemkeys/article/view/9618>>  
Acesso em: 10 de out. 2021.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986 - Dispõe sobre os critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.** Disponível em: <[http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=745](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745)>. Acesso em: 07 nov. 2021.

COSTA, J. H. B. Aproveitamento dos finos de pedreira do município de Tracuateua/PA – Caracterização Tecnológica (Parte 1). **XXI ENTMME**, Natal-RN p.137-141, 2005

DAL MOLIN, D. C. C. Capítulo 8: **Adições minerais.** In: G. C. Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011.

DONAIRE, D. **Gestão ambiental na empresa.** 3.ed. São Paulo: Atlas, 2018.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia Mineral do Brasil.** Brasília-DF: DNOM, 2009. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1>>. Acesso em: 07 nov. 2021.

EGGER, V. A.; DA FONSECA, F. J.; DA COSTA, A. F. Desenvolvimento Sustentável na Mineração. **Revista Científica Intelletto**, v.1, n.3, 2016, p.27-37, 2016.

FERREIRA. K. C; **Estudo de parâmetros físicoquímicos para a produção de argamassa utilizando resíduos industriais e da construção civil.** 2014 74 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém 2011.

FORMIGONI, M. W; GODINHO, D. S. S; JUNCA, E; ANTUNES, E. G. P. Substituição Do Cimento Portland Por Resíduo De Placa Cerâmica Em Argamassa. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v.16, n.1, 2019: 62-67, 2019.

GOBBI, A.. **Atividade Pozolânica de Adições Minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Relatório Anual de Atividades – janeiro a dezembro de 2020.** Disponível em: <[https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/06/Relatorio-de-atividades\\_2020\\_ATUALIZADO.pdf](https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/06/Relatorio-de-atividades_2020_ATUALIZADO.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2021.

\_\_\_\_\_. **Gestão para a sustentabilidade na mineração: 20 anos de história;** 1.ed. – Brasília: IBRAM, 2013.

Hoppe, Juarez et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX),

termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria** (Rio de Janeiro) [online]. 2017, v. 22, n. 3, 2017.

LEAL, C. L. D; CASTRO, P. F. Aproveitamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como filer em concreto em concreto asfáltico. **Vértices**, v. 9, n. 1/3, p. 9 – 20, 2012.

LIDUÁRIO. A. S; FARIAS. L.A; ANDRADE. M.A.S; BITTERN COURT. R.M. Estudo da influência de adições pozolânicas e minerais no concreto. **Laboratório de concreto de Furnas Centrais Elétricas SA**, 2008. Disponível em: <<https://www.cgti.org.br/publicacoes/estudo-da-influencia-de-adicoes-pozolanicas-e-minerais-no-concreto/>>. Acesso em: 16 nov. 2021.

LIMA, R. DO C. DE O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solocimento incorporados com resíduo de granito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande. 2010.107f.

Maria Beatriz Maury, and Raquel Naves Blumenschein. "Produção De Cimento: Impactos à Saúde E Ao Meio Ambiente." *Sustentabilidade Em Debate* 3.1 (2012): 75-95. Web.

MAURY, M. B; BLUMENSCH E IN, R. N. Produção De Cimento: Impactos à Saúde E Ao Meio Ambiente. **Sustentabilidade em Debate – Brasília**, v. 3, n. 1, p. 75-96, 2012

MASSAZZA, F. Pozzolanic cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 15, p. 185-214, 1993.

MENDONÇA, M. F. (2018). **Substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bambu (Bambusa Vulgaris)**. 2018. 81 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2018.

MENOS SI, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2004.

MENOS SI, R. T; MELGES, J. L. P; AKASAKI, J. L; CAMACHO, J. S; FAZZAN, J. V; TASHIMA, M. M SALL ES, F. M. Pó de Pedra: uma alternativa ou um complemento ao uso da areia na elaboração de misturas de concreto? **Holos Environment**, v. 10, n. 2, p. 209-222, 2010.

PARANÁ, Lei N° 20.607 de 10 de junho de 2021 – Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Paraná (PERS/PR). Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/arquivos/1006lei20607.pdf>>. Acesso em: 29 de nov. de 2021.

QUARCIONI, V. A.; PEREIRA, E. **Resíduo de cerâmica vermelha e filer calcário em composto de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcalisílica**. *Matéria*, vol.21, nº 2, p.282-300. Rio de Janeiro, 2016.

MOURA, A. A. **Argamassa com substituição parcial do cimento por resíduos industriais**. 2018, 107 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PARANÁ, Lei N° 20.607 de 10 de junho de 2021 – Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Paraná (PERS/PR). Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/arquivos/1006lei20607.pdf>>. Acesso em: 29 de nov. de 2021.

PARANÁ (Estado). Governo do Estado do Paraná. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná, Relatório 15 – Produto 15 – Relatório final do plano de ação: manual de orientação**. Curitiba – PR, 2018. 321 p. Disponível em: <[https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos\\_restritos/files/documento/2021-10/r15\\_plano\\_de\\_acao\\_final.pdf](https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2021-10/r15_plano_de_acao_final.pdf)>. Acesso em: 29 de nov. 2021

PAULA, L. G. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-Processamento de Misturas de Resíduos**. 2008, 158p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá 2009.

RAVERDY M., BRIVOT F., PAILLIERE A.M., DRON, R. “Appreciation de l'activite pouzzolanique des constituants secondaires”, In: 7th Int. **Congr. Chem. Cem**. Paris, 1980.

ROMAN, H. R.; MUTTI, C. N.; ARAÚJO, H. N. **Construindo em alvenaria estrutural**. Florianópolis. Ed da UFSC, 1999.

SÁ, M. V. V. A. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos**. 2006. 140f. Tese (Doutorado) – Programa de pós graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2006.

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. 2008, 168 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal 2008.

SILVA, L. C. S; MARINHA, D. Y; SILVA FILHO, C. M; SILVA, E. C. S; ESPINOSA, J. W. M. Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. In: IX SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 9., 2017, São Cristóvão. **Anais** eletrônicos... São Cristóvão: DEPRO/UFS, 2017, p. 260-274. Disponível em: < <https://ri.ufs.br/handle/riufs/7697>>. Acesso em: 21 nov. 2021.

SIQUEIRA, J.S. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas**. 2011, 91 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém 2011.

SOUZA, C. O. M; Política Nacional dos Resíduos Sólidos: uma busca pela redução dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). **InterfacEHS, Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**. v. 7, nº 3, p. 113 – 127, 2012.

Oliveira, T. V. **Formulações de Argamassas Autonivelantes para Contrapiso com Incorporação Parcial de Agregado Reciclado de Concreto**. 2019. 84 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Belém 2019.