

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

LÉO GUILHERME SAGAZ ROLIM

ANÁLISE DE PASTA GEOPOLÍMERICA MODIFICADA COM A ADIÇÃO DE  
RESÍDUO DE MÁRMORE

Joinville

2022

LÉO GUILHERME SAGAZ ROLIM

ANÁLISE DE PASTA GEOPOLIMÉRICA MODIFICADA COM A ADIÇÃO DE  
RESÍDUO DE MÁRMORE

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Prof. Dr. Luciano Senff

Joinville

2022

LÉO GUILHERME SAGAZ ROLIM

ANÁLISE DE PASTA GEOPOLIMÉRICA MODIFICADA COM A ADIÇÃO DE  
RESÍDUO DE MÁRMORE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 21 de julho de 2022.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Luciano Senff  
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Lisandro Simão  
Membro

Prof. Dr. Marcelo Tramontin Souza  
Membro



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) flow table, (b) espátula e molde para corpo de prova, (c) misturador.....	19
Figura 2 - Corpos de prova desmoldados .....	19
Figura 3 - Corpos de prova: Processo de secagem na estufa, saturados após a imersão em água e durante a pesagem na balança de precisão.....	20
Figura 4 - Abertura na mesa de consistência .....	21

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>5</b>
1.1. OBJETIVOS .....	9
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>9</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>10</b>
2.1. ARGAMASSA: FUNCIONALIDADE E APLICAÇÕES .....	10
2.2. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA .....	11
2.3. CIMENTO PORTLAND .....	11
2.4. GEOPOLÍMEROS .....	12
<b>2.4.1. Matérias-primas</b> .....	<b>12</b>
<b>2.4.2. Metacaulim</b> .....	<b>13</b>
2.5. O MÁRMORE E SEUS RESÍDUOS .....	13
<b>2.5.1. Adição de resíduo de mármore em argamassas</b> .....	<b>14</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>16</b>
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS .....	16
<b>3.1.1. Metacaulim (MK)</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1.2. Hidróxido de Sódio (NaOH)</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1.3. Silicato de Sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)</b> .....	<b>17</b>
3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	17
<b>3.2.1. Definição das formulações e produção das amostras</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2.2. Ensaio no Estado Fresco</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2.3. Ensaio no Estado Endurecido</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2.4. Propriedades Físicas</b> .....	<b>20</b>
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
4.1 MESA DE CONSISTÊNCIA (ENSAIO NO ESTADO FRESCO) .....	21
4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS: ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE E POROSIDADE APARENTE .....	22
4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	23
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>24</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>25</b>

## RESUMO

É de extrema importância que a indústria de construção civil vise um desenvolvimento sustentável, por meio de alternativas capazes de reutilizar resíduos sólidos e inseri-los novamente na cadeia produtiva. Os geopolímeros vêm sendo muito pesquisados por cientistas, indústrias e usuários. O grande atrativo é por serem aglomerantes de alta resistência, de baixa permeabilidade e de ótima resistência à chama. A pesquisa sobre concretos e argamassas geopoliméricas, reutilizando resíduos proveniente de materiais não renováveis, pode ser designada como de extrema importância. Além de ser uma alternativa econômica, a reutilização dos resíduos é ecologicamente viável. Nesta pesquisa, utilizou-se como fonte de aluminossilicato o metacaulim, enquanto, para a solução ativadora, foi usado o hidróxido de sódio (NaOH). Para a produção das pastas geopoliméricas, foram mantidas constantes a concentração do ativador em 10 M, substituindo o metacaulim por resíduo de mármore nas proporções de 0%, 10%,20% e 30%. As amostras foram avaliadas no estado fresco e no estado endurecido, determinando as propriedades físicas (absorção de água, densidade e porosidade aparente), observando seu comportamento na mesa de espalhamento e por fim o teste de resistência à compressão. Como resultado observou-se que quanto maior a concentração de metacaulim era substituída por resíduo de mármore impactava na fluidez das pastas, melhorando sua trabalhabilidade. Os resultados dos ensaios de propriedades físicas e de resistência à compressão não demonstraram queda no desempenho das pastas quando comparada à mistura de referência (pasta geopolimérica sem resíduo).

Palavras chave: Geopolímeros, metacaulim, resíduo de mármore, propriedades físicas.

## ABSTRACT

It is extremely important that the civil construction industry aims at sustainable development, through alternatives capable of reusing solid waste and inserting it back into the production chain. Geopolymers have been heavily researched by scientists, industries and users. The great attraction is that they are high strength, low permeability and excellent flame resistance binders. Research on geopolymer concretes and mortars, reusing waste from non-renewable materials, can be designated as extremely important. In addition to being an economic alternative, the reuse of waste is ecologically viable. In this research, metakaolin was used as aluminosilicate source, while sodium hydroxide (NaOH) was used for the activator solution. For the production of geopolymeric pastes, the concentration of the activator was kept constant at 10 M, replacing the metakaolin with marble residue in the proportions of 0%, 10%, 20% and 30%. The samples were evaluated in the fresh state and in the hardened state (physical properties, compressive strength for 28 days). As a result, it was observed that the higher the concentration of metakaolin was replaced by marble residue, it impacted the fluidity of the pastes, improving their workability. The results of the physical properties and compressive strength tests did not show a drop in the performance of the pastes when compared to the reference mixture (geopolymeric paste without residue).

Keywords: Geopolymers, metakaolin, marble residue, physical properties.





## 1. INTRODUÇÃO

Através dos resíduos gerados em suas obras a construção civil é responsável por contribuir diretamente com o impacto ambiental. Buscando diminuir o dano causado, a reutilização de resíduos vem tendo cada vez mais espaço quando o assunto é construir de maneira sustentável.

Pesquisas vêm sendo realizadas nesse sentido, na tentativa de reduzir os problemas relacionado ao armazenamento, ao manuseio, ao transporte e à destinação final de resíduos sólidos. Novas tecnologias com o intuito de absorver os rejeitos, reduzem o impacto do consumo de recursos naturais, energia, custos e aumentam a competitividade do fabricante no mercado (APOLINÁRIO, 2014). A reciclagem de resíduos apresenta três grandes benefícios: reduzir a procura sobre novos recursos naturais; diminuir a energia necessária para a produção de novos materiais; e usar resíduos que de outra forma teriam o aterro como destino final. Depósitos de resíduos, muitas vezes a céu aberto, degradam o meio ambiente causando danos irreversíveis (SILVA, 2016).

O cimento Portland é a matéria prima do concreto, sendo um material que precisa de uma grande quantidade de energia na sua produção. Outro problema é a emissão de gases gerados da produção do clínquer (matéria prima do cimento), tornando o material um grande poluente mundial (MACCARINI, 2015). Uma solução para as altas taxas de emissão de poluentes da produção do cimento Portland é o investimento em alternativas mais sustentáveis, como os geopolímeros, que não geram números expressivos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) lançados na atmosfera, pois são componentes naturais e seu processamento é mínimo (HARTMANN, 2016).

Os geopolímeros vêm sendo muito pesquisados por cientistas, indústrias e usuários. O grande atrativo é por serem aglomerantes de alta resistência, de baixa permeabilidade e de ótima resistência à chama (DUXSON, 2007). A pesquisa sobre concretos e argamassas geopoliméricas, reutilizando resíduos proveniente de materiais não renováveis, pode ser designada como de extrema importância. Além de ser uma alternativa econômica, a reutilização dos resíduos é ecologicamente viável, pois proporciona destino definitivo para os resíduos provenientes da construção civil e indústrias de mineração, como no caso da extração de mármore e de granito.

Dois dos produtos com resíduos que apresentam grande problemática devido aos depósitos inutilizáveis são o mármore e o granito. Segundo Moura (2012), de 25% a 30% dos blocos de rocha extraídos da natureza se transformam em pó, ficando depositados nos pátios

das empresas. Neste contexto, o Brasil é o quarto maior produtor de rochas ornamentais no mundo, produzindo 7% da produção mundial (FILHO, 2018).

O foco desta pesquisa concentra-se em apresentar vantagens na substituição de componentes presentes em argamassas convencionais, em busca da utilização de materiais mais sustentáveis, que apresentem vantagens em seu uso ao avaliar parâmetros físicos e mecânicos, testando a sua viabilidade de utilização na construção civil. Através de ensaios mecânicos, composição mineralógica e granulométrica é possível avaliar o comportamento e o seu desempenho perante os esforços exercidos nos ensaios.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Analisar o desempenho da adição de resíduos de mármore em uma mistura geopolimérica e analisar a quantidade possível de resíduo de mármore que pode ser inserido para obter um ganho desempenho nos ensaios de laboratório e posteriormente ser utilizada como opção viável em campo.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Analisar as propriedades físicas: absorção de água, densidade e porosidade aparente;
- Avaliar o comportamento da mistura no estado fresco na mesa de espalhamento;
- Analisar o comportamento mecânico do material após 28 dias de cura, por meio do ensaio mecânico de resistência à compressão;
- Comparar o desempenho das pastas geopolímeras determinando a quantidade de resíduo de mármore;
- Peneirar o resíduo de mármore, tendo em conta que o tamanho limite dos particulados é de 75 microns.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para avaliar os produtos em comparação, é preciso analisar os componentes, suas propriedades e as vantagens utilização do resíduo de mármore na mistura, sendo possível determinar a viabilidade da inclusão dos detritos de diferentes granulometrias desta rocha metamórfica no comportamento das argamassas.

### 2.1. ARGAMASSA: FUNCIONALIDADE E APLICAÇÕES

Conforme a NBR 13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2005), argamassa é uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, podendo conter ou não aditivos com propriedades de aderência e endurecimento, sendo sua fabricação realizada em canteiro de obra ou industrialmente. Em seu processo de produção a argamassa requer alguns cuidados, como no processo de dosagem, em que a água deve ser controlada na mistura, já que na etapa de cura ocorre a liberação da água em forma de vapor, podendo deixa-la seca e resultando em deterioração e em fissuras. O excesso de água (argamassa úmida) pode resultar na proliferação de fungos no material e causar seu apodrecimento, diminuindo a vida útil.

Na construção civil as argamassas têm sua aplicação ligada a assentamento de blocos de alvenaria, paredes e tetos, revestimento, contrapisos, assentamento e rejuntamento de revestimentos cerâmicos, recuperação de estruturas, entre outras. Dentro dessas, pode-se ressaltar o uso em assentamento de alvenarias e em revestimento de paredes (APOLINÁRIO 2014, apud CARASEK, 2010, p. 43).

A argamassa para o assentamento é empregada em larga escala, para elevar paredes e muros de tijolos cerâmicos ou blocos de concreto. Sua função é promover a união, formando um elemento único, contribuindo para aumentar a resistência aos esforços laterais, além de distribuir as cargas atuantes na parede por toda área resistente dos blocos. As argamassas promovem estanqueidade da parede contra a penetração de água da chuva, absorvem as deformações provenientes da retração por secagem e de origem térmica, que possam vir a acontecer (APOLINÁRIO, 2014, apud CARASEK, 2007).

O reboco é a argamassa de revestimento mais conhecida, sendo utilizada para estanqueidade e regularizar a superfície de acabamento. É essencial que a argamassa tenha bom desempenho ao resistir ao fogo, além de ser capaz de servir como isolamento térmico e acústico.

Enquanto a argamassa ainda está no estado fresco, deve-se apresentar uma adesão inicial, que será responsável por permanecer unida à base (MARQUES, 2005).

Ainda podem ser mencionadas as argamassas de contra piso e de rejuntamento, cujas funções são regularizar as superfícies e vedar as juntas entre peças cerâmicas, ajustando defeitos que possam surgir devido ao alinhamento (FREITAS, 2018 apud MORAES, s. d).

## 2.2. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA

Segundo Tedesco (2016), as argamassas devem ser analisadas em dois estados distintos: fresco e endurecido. No estado endurecido, estuda-se a resistência à compressão das argamassas de assentamento e a resistência à tração e ao cisalhamento das argamassas de revestimento. Como recebem os esforços da retração do próprio material e da movimentação da estrutura, a argamassa tende a distender e a cisalhar, causando fissuras no revestimento.

O estado fresco tem a trabalhabilidade da mistura como principal característica, podendo relacionar a trabalhabilidade como a propriedade no estado fresco, que representa a facilidade em que as argamassas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas e consolidadas em uma condição homogênea (ROCHA, G. J. A. O. G. A, 2014, apud CARASEK, 2007). É muito importante diferenciar os dois estados, sendo que há uma mudança de propriedade do material, além das propriedades do estado endurecido depender diretamente do comportamento da mistura em seu estado fresco.

## 2.3. CIMENTO PORTLAND

O Cimento Portland tem como seus principais constituintes o cal ( $\text{CaO}$ ), a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a magnésia ( $\text{MgO}$ ) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ), que só é acrescentado após a calcinação, com o intuito de retardar o tempo de pega (BAUER, 2005).

O processo de fabricação do cimento Portland consiste em desaglomerar as matérias-primas, em seguida misturá-las em proporções adequadas e posteriormente é levado a uma temperatura de  $1450^\circ\text{C}$  em forno rotativo. Nesta temperatura, o material sofre fusão incipiente formando pelotas, conhecidas como clínquer, que ao serem resfriadas e moídas, tornam-se um pó bem fino. Por fim, acrescenta-se um pouco de gesso à mistura e chega-se ao cimento Portland (NEVILLE, 1997).

O material pronto contém propriedades aglomerantes que atuam como elemento ativo, que na presença de água endurece, tornando-se um material compacto com o passar do tempo. Esta reação é conhecida como a hidratação do cimento. A espessura do produto é importante (pois controla a velocidade da reação de hidratação) e quanto mais fino é o cimento, maior sua resistência, impermeabilidade e trabalhabilidade (BAUER, 2005).

## 2.4. GEOPOLÍMEROS

O criador do termo geopolímero foi Joseph Davidovits, no ano de 1978. O nome foi dado a um polímero gerado a partir de matérias-primas inorgânicas. Seu objetivo foi a criação de um polímero resistente a grandes temperaturas, inclusive ao fogo, característica inexistente em polímeros de matéria orgânica. Segundo Fornasa (2017), os geopolímeros podem ser considerados um novo tipo de cimento, depois dos já existentes cal e do cimento Portland. A produção é possível por meio de uma ativação alcalina de sólidos compostos por alumínio e sílica.

Os geopolímeros também são conhecidos como: cimentos álcali- ativos, geocimentos, polímeros inorgânicos, hidrocerâmicas, entre outros. Todos os materiais mencionados tem em comum o processo químico sofrido: a polimerização do monômero (ALLEM, 2016). Além de ter características cimentícias, os geopolímeros podem ser processados em temperatura ambiente. Sua matéria-prima pode ser considerada um grande diferencial, já que pode ser obtida através de materiais naturais, como também, através de resíduos industriais ricos em aluminossilicatos amorfos ou semicristalinos, que tenham passado por tratamento térmico (MACCARINI, 2015).

Os polímeros inorgânicos apresentam grandes vantagens quando comparados ao cimento Portland. Entre diversas propriedades, pode-se destacar sua elevada resistência mecânica, o ganho de resistência mecânica em curtos períodos de cura, a resistência a ataques ácidos e de sulfatos, a resistência a ciclos de gelo-degelo, a estabilidade estrutural quando submetidos a elevadas temperaturas, entre outros (AZEVEDO; STRECKER; LOMBARDI, 2018).

### 2.4.1. Matérias-primas

A matéria-prima de um geopolímero pode ser qualquer material que seja amorfo e inorgânico, apresentando em sua fonte aluminossilicatos e assim ser matéria-prima no processo

de ativação alcalina. Estes materiais podem ser obtidos na natureza ou podem ser adquiridos através de resíduos agrícolas e industriais, como cinzas da queima de biomassa e escória de alto-forno (ASHIMA, 2012).

#### **2.4.2. Metacaulim**

O metacaulim é uma matéria-prima utilizada em diversos estudos envolvendo ativação alcalina e provém da desidroxilação do caulim. O caulim é um minério e sua microestrutura é composta por silicatos hidratados de alumínio, tendo como um dos principais constituintes a caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), mas também pode ser formado pela haloisita ( $\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4\text{Al}_2\text{nH}_2\text{O}$ ). Sua coloração é branca e seu ponto de fusão está aproximadamente entre  $1650^\circ\text{C}$  a  $1775^\circ\text{C}$  (MÁRTIRES, 2009).

Segundo Boca Santa (2012), por possuir em sua fórmula silício e alumínio, o caulim se encontra presente no cimento Portland branco e vem sendo estudado por diversos pesquisadores como uma das matérias mais interessantes para a produção de geopolímeros. Porém, para produção de geopolímeros o caulim passa por tratamento térmico sob temperaturas previamente definidas para sofrer desidroxilação, transformando-se em metacaulim. O processo torna o material mais reativo e apropriado para sofrer a ativação alcalina.

A composição do metacaulim conta com elementos essenciais para a produção de geopolímeros, como o  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e impurezas compostas por quartzo, feldspato, mica e outros minerais orgânicos (BOCA SANTA, 2012). Diversos pesquisadores desenvolvem seus estudos tendo o metacaulim como principal fonte de aluminossilicato. Davidovits, por exemplo, utilizava a caulinita calcinada (metacaulim) como fonte para sintetizar geopolímeros.

### **2.5. O MÁRMORE E SEUS RESÍDUOS**

O setor da construção civil apresenta grande crescimento no Brasil e no mundo e, com isso, crescem os danos ao meio ambiente. Este problema é proveniente do consumo de matéria-prima oriunda de fontes não renováveis, tais como: rocha, areia, argila, entre outros. Junto ao consumo, pode-se destacar o desperdício de materiais no setor industrial da construção civil, gerando milhões de toneladas de resíduos, que por sua vez ficam armazenados a céu aberto e sem aplicação definida.

Em Portugal, milhões de toneladas de resíduos de mármore são acumulados nas escombeiras de Estremoz, Borba e Vila Viçosa, devido às indústrias extrativas local. Este

desperdício é bastante considerável, representando de 80% a 90% do total de rocha extraída (APOLINÁRIO, 2014).

Conforme Apolinário (2014), o ciclo de produção de rochas ornamentais pode ser dividido em três etapas: extração das rochas brutas em grandes blocos (medindo 3,0m x 2,0m x 1,5m), seguidamente do beneficiamento primário (caracterizado pela serragem dos blocos, transformando-os em grandes chapas de 2,80m x 1,90m x 0,02m) e, por fim, o beneficiamento secundário (representando os acabamentos finais e polimentos feitos pelas marmorarias, de acordo com o pedido de clientes).

Os resíduos gerados a partir do mármore são geralmente procurados por indústrias que produzem aglomerados de pedra ou agregados para o setor da construção civil. As partículas menores, como as lamas, não são frequentemente aplicadas e geralmente são despejadas em zonas inadequadas e sem nenhum controle (SILVA, 2016).

### **2.5.1. Adição de resíduo de mármore em argamassas**

Segundo Moura (2012), com a adição de resíduo de mármore e granito em 10% de substituição da areia em argamassas, obtém-se elevada resistência à compressão, quando comparado a argamassa estabelecida por norma.

De acordo com Matta et al. (2013), ao utilizar argamassas em ensaios, com traço 1:2,6:0,59 e acrescentando porções de 5%, 10% e 15% de resíduo em relação a massa de cimento (mantendo a relação de água e cimento sem acrescentar aditivos), constatou-se que a substituição de 5% da massa de cimento por resíduo de mármore beneficia a resistência à compressão da argamassa, com ganho de 9%.

A adição de 10% de pó de mármore se mostra viável como substituto do cimento, já que não compromete as características técnicas, além de melhorar a trabalhabilidade da mistura. Todavia, a utilização de altas porcentagens de pó de mármore torna a hidratação da mistura mais lenta, modificando a sua microestrutura porosa (SILVA, 2016 apud VARDHAN, 2015).

O resíduo de mármore também é aplicável em outras áreas da construção civil, como em matérias cerâmicas, indústria que nos últimos anos vem recebendo resíduos sólidos de diversos tipos e origens. Segundo Almeida, Leite e Holanda (2015), em seus estudos sobre a caracterização e a aplicação do resíduo de pó de mármore em materiais cerâmicos, conclui-se que existe potencial para o tornar uma matéria alternativa de baixo custo na fabricação de produtos cerâmicos, dado que seus resultados apontaram resíduos rico em calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) e suas partículas se situam nas frações do silte (entre 0,06mm a 0,002mm).



Silva (2016), aponta que as lamas de mármore, que muitas vezes são inutilizadas e descartadas em lugares indevidos, podem ser utilizadas em diversos setores, tais como:

- Fabricação de cimento;
- Indústria cerâmica;
- Produção de betão (auto-compactável e pré-fabricado);
- Produção de aglomerado de pedra;
- Indústria de papel e cartão;
- Produção de tintas.

Para que sejam aplicadas na área industrial, durante o tratamento das lamas se deve considerar os seguintes parâmetros: granulometria, teor de humidade, controle de qualidade, presença de impurezas, vestígio de metais, custo de processamento, entre outras (SILVA, 2016 apud CELAVOR, 2012).

### 3. METODOLOGIA

Para caracterizar o comportamento de uma pasta geopolimérica modificada com substituição parcial por resíduos de mármore, propõe-se a metodologia de pesquisa de natureza explicativa, que atua por meio da análise e da interpretação de resultados obtidos em ensaios de laboratório. Para este fim, o desenvolvimento científico deve ser guiado por um método de estudo, aplicando técnicas que relacionam dados teóricos, empíricos, ideais e reais, em um determinado objetivo (GIL, 2002).

O delineamento do projeto segue o método de pesquisa experimental, focado em avaliar qual quantidade de resíduo de mármore gera o melhor desempenho. Para tal avaliação, conta-se com a estrutura do Laboratório de Materiais de Construção, localizado no Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina e utiliza-se um plano a ser seguido para o experimento, definindo:

- Formulações das misturas;
- Produção dos corpos de prova;
- Determinação de parâmetros por meio de ensaios em mesa de consistência com o material ainda fresco;
- Ensaio de compressão após a cura;
- Determinação das propriedades físicas;
- Análise dos resultados e comparação do comportamento dos materiais.

#### 3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

##### 3.1.1. Metacaulim (MK)

O material utilizado como fonte de alumina e sílica é o metacaulim, obtido pela empresa Metacaulim Brasil. Os ensaios de caracterização do material foram realizados pelo Núcleo de Pesquisas CERMAT, em 2015. A densidade real igual a  $3,17 \text{ g/cm}^3$  foi determinada com o uso de um picnômetro Ultracycnometer 1200 P/N. O tamanho médio das partículas foi de  $17,05 \text{ }\mu\text{m}$ .

### **3.1.2. Hidróxido de Sódio (NaOH)**

O hidróxido de sódio é uma substância altamente alcalina, com pH igual a 14. Sua forma consiste em um sólido branco, higroscópico, inorgânico e solúvel em água, disponível no mercado na forma de flocos, pó ou pérolas (CESARI, 2015). O ativador alcalino utilizado neste trabalho para a formação do geopolímero é o hidróxido de sódio perolado da marca Lafan Química Fina Ltda, com teor mínimo de 97% de NaOH.

### **3.1.3. Silicato de Sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)**

O silicato de sódio neutro Q-79 é fabricado pela empresa Buschle & Lepper S/A e possui 98% de pureza. A relação de SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O de aproximadamente 3,3.

## **3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

A metodologia experimental consiste primeiramente no peneiramento do resíduo, definição das formulações e a produção dos corpos de prova. Com esta etapa concluída é possível realizar os ensaios propostos realizando a caracterização das amostras. Neste trabalho é analisado: a abertura na mesa de consistência, determinação das propriedades físicas, além de obter a resistência mecânica das amostras no seu estado endurecido e assim poder comparar as diferentes misturas, que apresentam concentrações de mármore diferentes. Foram produzidos 3 corpos de prova prismáticos, no tamanho 4x4x16cm, para cada formulação para os ensaios físicos e mecânicos com 28 dias de cura.

### **3.2.1. Definição das formulações e produção das amostras**

Uma etapa fundamental para alcançar os objetivos deste trabalho é o ajuste composicional das misturas. Quatro formulações foram produzidas a fim de analisar o comportamento nos estados fresco e endurecido das pastas geopoliméricas, utilizando teores distintos de resíduo de mármore. A quantidade do ativador alcalino NaOH e de silicato de sódio se manteve em 175g e 105g, respectivamente. A concentração de metacaulim nas pastas foi alterada conforme a variação da quantidade de resíduo de mármore (0%, 10%, 20% e 30%) adicionada, desta forma mantendo a mesma massa de sólido + líquido (700 g) em todas as

formulações. A Tabela 1 mostra as quatro formulações e os respectivos valores de material utilizados em cada uma delas.

Tabela 1 - Formulação das amostras, em massa, para produção dos corpos de prova.

%	g				
Marmore	MK	Marmore	Silicato	NaOH	Total
0.0	420.00	0.00	175.00	105.00	700.0
10.0	378.00	42.00	175.00	105.00	700.0
20.0	336.00	84.00	175.00	105.00	700.0
30.0	294.00	126.00	175.00	105.00	700.0

As quantidades exatas de cada material, líquido e sólido foram pesadas separadamente em uma balança com precisão de 0,001g. Primeiramente é colocado no misturador mecânico a solução ativadora, misturando o NaOH e o silicato de sódio por 5 minutos, em velocidade baixa, para homogeneizar a fração líquida. Posteriormente adicionando a parte sólida, que permaneceu durante 10 minutos na velocidade 4.

### 3.2.2. Ensaio no Estado Fresco

O ensaio no estado fresco serve como parâmetros de consistência e plasticidade da pasta, sendo especificado pela norma NBR 13276/16. Segundo especificado na norma, o ensaio deve ser realizado imediatamente após a preparação da mistura. Logo ao sair do misturador a mistura é espalhada na mesa de forma uniforme, e imediatamente são deferidos 30 golpes no intervalo de 30 segundos, ou seja 1 segundo para cada golpe proferido e então é analisado o diâmetro que a mistura atinge. A Figura 01 a seguir apresenta os equipamentos utilizados para realização do ensaio.

O preenchimento dos moldes de corpos de prova foi realizado da seguinte maneira: o material foi despejado em três camadas de mesma altura, o primeiro terço de massa depositado no molde recebeu 15 golpes com um soquete metálico para adensar a mistura, no segundo terço de massa foram proferidos 10 golpes com o mesmo soquete metálico e na última parcela foram proferidos 5 golpes.

Figura 1 - (a) mesa de consistencia, (b) espátula e molde para corpo de prova, (c) misturador.



### 3.2.3. Ensaio no Estado Endurecido

Para a realização dos ensaios no estado endurecido seguiu-se a norma NBR 7215/97 sendo produzidos três corpos de prova de formato prismático no tamanho 4x4x16cm para cada formulação. Com o intuito de acelerar o processo de cura e proporcionar maior resistência mecânica, os mesmos permaneceram dentro de uma estufa a 40°C durante 24 horas. Após esse período, foram desmoldados e colocados em temperatura ambiente até o rompimento para ensaio de compressão com 28 dias (Figura 02).

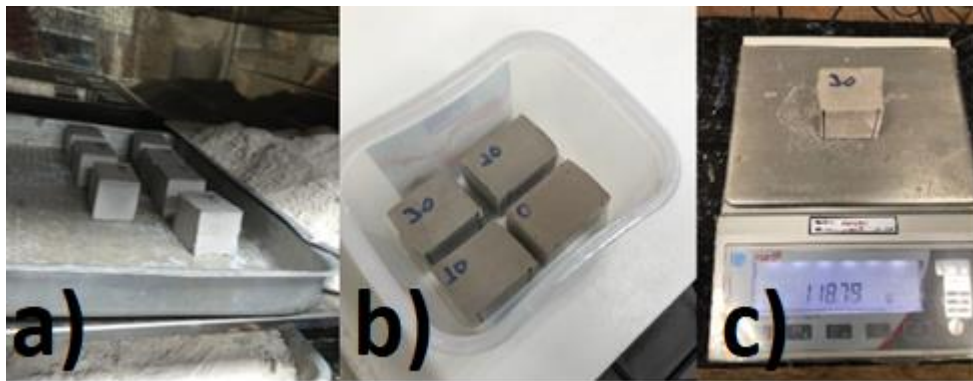
Figura 2 - Corpos de prova desmoldados



### 3.2.4. Propriedades Físicas

A caracterização das propriedades físicas (absorção de água, densidade e porosidade aparente) foi realizada através do Ensaio de Arquimedes, após os 28 dias de cura. Para determinar a massa seca ( $M_s$ ) foi necessário secar as amostras a 105°C por 24 horas. Em seguida, houve a imersão das amostras em um recipiente com água, a fim de promover o preenchimento dos poros. Durante 72 horas após esse período, foi realizada a medição da massa do corpo de prova imerso ( $M_i$ ). A massa saturada com a superfície seca ( $M_{ss}$ ) foi determinada com as amostras saturadas, secando somente sua superfície e pesando diretamente na balança de precisão (Figura 03).

Figura 3 – (a) Processo de secagem na estufa, (b) saturados após a imersão em água e (c) durante a pesagem na balança de precisão.



Com as fórmulas apresentadas a seguir e os resultados obtidos em laboratório para as pesagens, é possível determinar as propriedades físicas:

$$\text{Absorção de Água} = \frac{M_{ss} - M_s}{M_s} * 100$$

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{M_s}{M_{ss} - M_i}$$

$$\text{Porosidade Aparente} = \frac{M_{ss} - M_s}{M_{ss} - M_i} * 100$$

$M_s$  = Massa seca

$M_{ss}$  = Massa saturada

$M_i$  = massa imersa

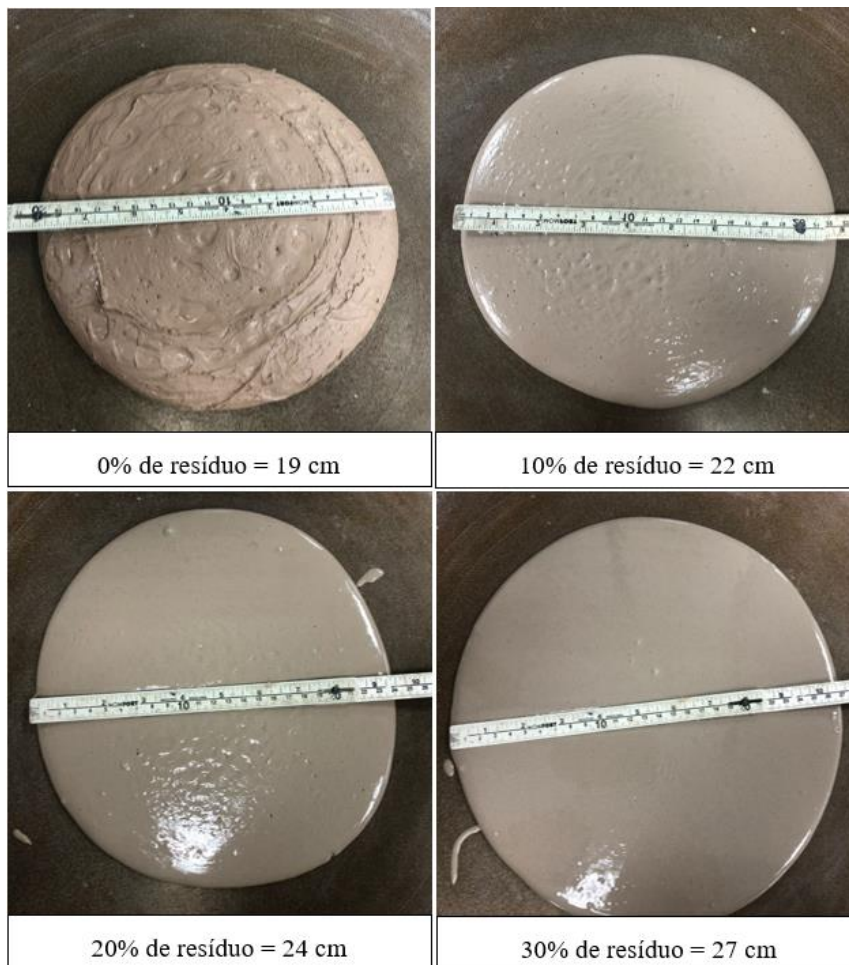
## 4. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados e as discussões referentes aos ensaios de caracterização das formulações testadas.

### 4.1 MESA DE CONSISTÊNCIA (ENSAIO NO ESTADO FRESCO)

A abertura na mesa de consistência é uma importante etapa do trabalho, pois é possível obter a noção da trabalhabilidade de cada mistura, observadas experimentalmente conforme mostra a Figura 04. Das análises realizadas nos materiais, junto com a prática no laboratório, pode-se perceber que as formulações com maior quantidade de resíduo de mármore resultaram numa mistura mais fluida e com melhor trabalhabilidade, consequentemente atingindo diâmetros maiores na mesa de consistência.

Figura 4 - Abertura na mesa de consistência



## 4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS: ABSORÇÃO DE ÁGUA, DENSIDADE E POROSIDADE APARENTE

Os resultados da densidade aparente indicam que os corpos de prova com menor concentração do resíduo atingiram valores maiores de densidade aparente e, conseqüentemente, conforme o resíduo é adicionado à mistura, a densidade aparente decresce.

A porosidade aparente e a absorção de água mostraram comportamento diferente, atingindo valores mais altos na amostra de referência e tendo queda nas amostras de 10% e 20% de mármore. É possível perceber que a mistura com 30% de mármore atingiu resultados semelhantes à de referência, conforme apontam os gráficos abaixo.

Gráfico 1 - Absorção de água

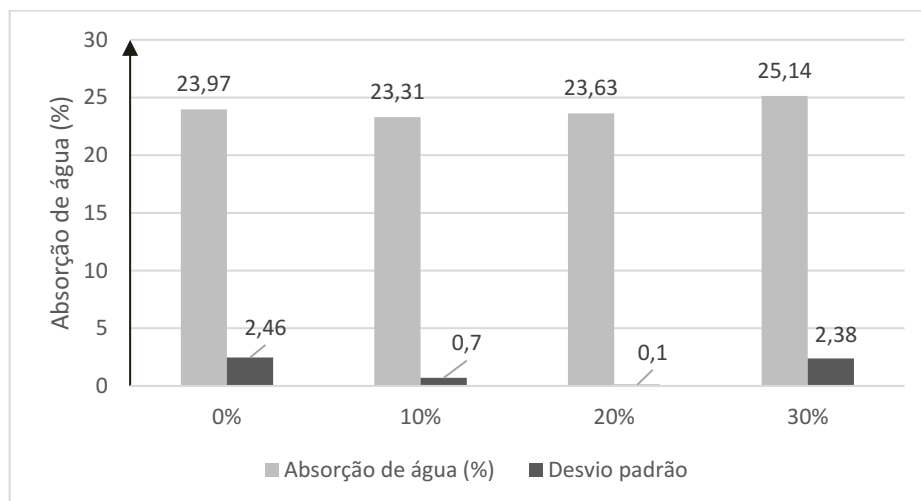


Gráfico 2 - Densidade aparente

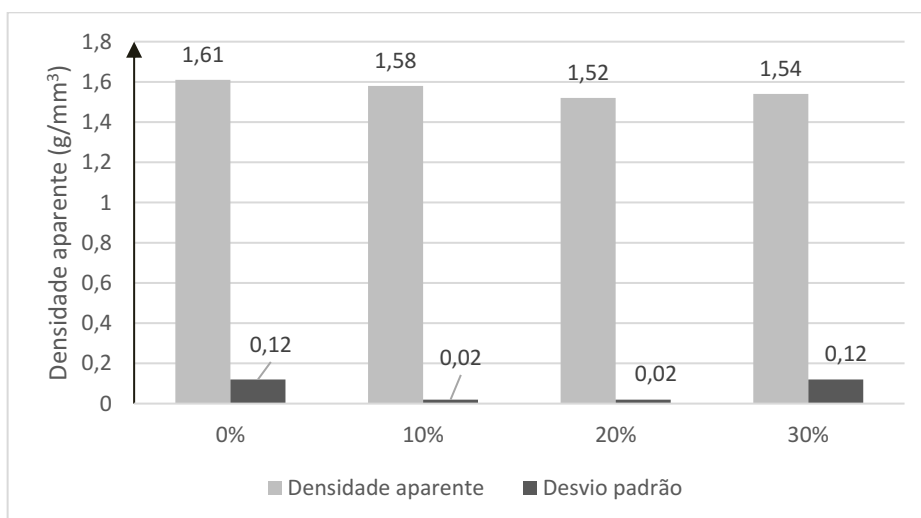
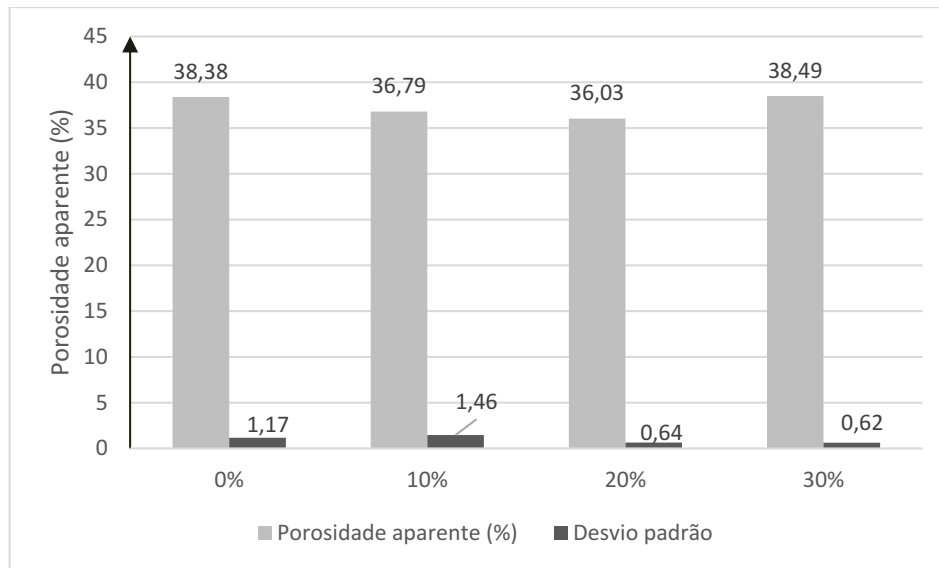




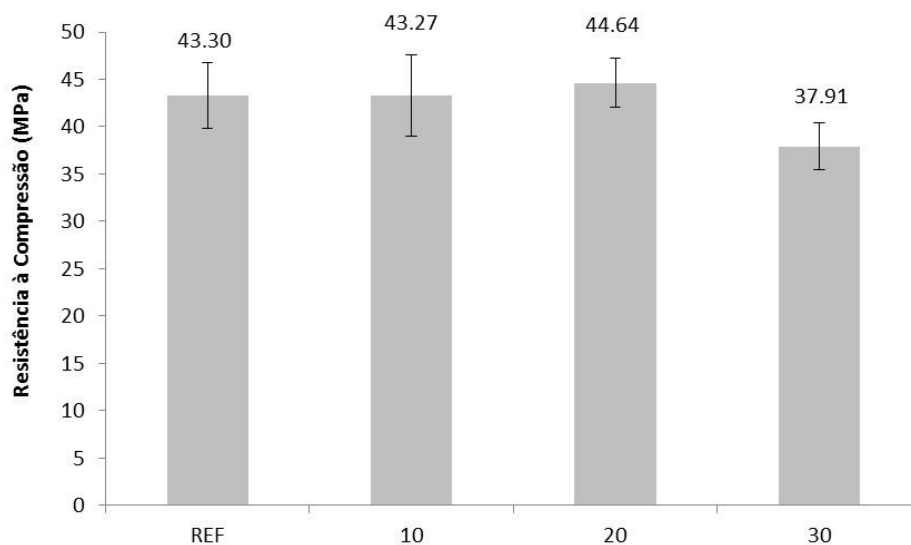
Gráfico 3 - Porosidade aparente



#### 4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão foram obtidos aos 28 dias de cura e os valores são representados pela média de três corpos de provas rompidos, como mostra o Gráfico 4. A formulação com 20% de resíduo de mármore foi a mistura que atingiu as maiores resistências nos ensaios, apresentando uma média de 44,64 MPa. As formulações com 0% e 10% apresentaram valores próximos, porém inferiores.

Gráfico 4 - Resistência à compressão



## 5. CONCLUSÃO

Através dos ensaios de laboratório, observa-se que a substituição parcial de metacaulim por resíduo de mármore apresentou resultados satisfatórios. Em termos de propriedades físicas, os ensaios não revelaram diferença significativa quando comparados com a amostra de referência (REF), tendo em consideração o desvio padrão baixo obtido das misturas.

Os testes de resistência à compressão demonstraram valores muito próximos, reafirmando a consistência obtida nos resultados, quando comparados com a amostra de referência. Porém, é perceptível que há tendência de diminuição na resistência para percentuais acima de 30% de resíduo de mármore, já que a maior variação (6,71MPa) ocorre quando comparamos as amostras de 20% com 30%.

Para as misturas, quando ensaiadas na mesa de consistência, pode-se observar que quanto maior o percentual de resíduo de mármore adicionado, mais fluida fica a pasta geopolimérica. Sendo assim, entende-se que a substituição de parte do metacaulim pelo resíduo melhorou a trabalhabilidade da mistura.

É possível concluir que a substituição parcial por até 30% de resíduo de mármore é viável, mesmo não apresentando ganho de resistência e melhoria nas propriedades físicas, pois mesmo assim permitiu redução da quantidade de metacaulim, que é a matéria-prima com maior valor comercial.

## REFERÊNCIAS

- ALLEM, P. M. **Avaliação do desempenho mecânico de concreto geopolimérico com o uso de fibra de aço.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/5547>. Acesso em: 03 nov. 2020.
- ALMEIDA, T.; LEITE, F.; HOLANDA, J. Caracterização de Resíduos de Pó de Mármore para aplicação em materiais cerâmicos. *In: I ENCONTRO DE ENGENHARIA, CIÊNCIA DE MATERIAIS E INOVAÇÃO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO.* Rio de Janeiro, 18 a 21 de junho de 2015. Disponível em: <https://www.cepuerj.uerj.br/cursos2.php?tipo=eventos&curso=V00050&ano=2019>. Acesso em: 03 de nov. 2020.
- APOLINÁRIO, E. C. de A. **Influência da adição de resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland.** 2017. Dissertação (Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/15276>. Acesso em: 03 de nov. 2020.
- ARAUJO, E. L. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com o uso de resíduo de construção e demolição.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel no Curso de Graduação de Engenharia de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/177068/TCC%20-%20Lucas%20Araujo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 de nov. 2020.
- ASHIMA, M. M. **Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del Silicoaluminato Cálcico Vítreo.** 2012. Tese de Doutorado (Programa de Doutorado em Engenharia Civil) – Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, 2012. Disponível em: <https://riunet.upv.es/handle/10251/16879>. Acesso em: 03 de nov. de 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. 1 a 3 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- AZEVEDO, A. G. de S.; STRECKER K.; LOMBARDI C. T. **Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha.** 2018. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação de Engenharia Química) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, Minas Gerais, 2018. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132018000300388&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132018000300388&script=sci_arttext). Acesso em: 03 de nov. de 2020.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção 1.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- BOCA SANTA, R. A. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas desadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel.** 2012. Dissertação (Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/99314/305251.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 de nov. de 2020.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, Pennsylvania v. 42, n. 9, p. 2917–2933, may. 2007.

FILHO, C. C. **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Distrito Federal, 2018. Disponível em: [http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/abinoticias/Setor\\_de\\_Rochas\\_Ornamentais.pdf](http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/abinoticias/Setor_de_Rochas_Ornamentais.pdf). Acesso em: 03 nov. 2020.

FREITAS. R. Y. **Estudo do comportamento de argamassas cimentícias e geopolímericas com a incorporação de resíduo de ETA**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel no Curso de Graduação de Engenharia de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018. Disponível em: [https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188174/TCC\\_%20Yasmin.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188174/TCC_%20Yasmin.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 03 de nov. 2020.

FORNASA. B. L. **Utilização de concreto reciclado para a produção de geopolímero**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel no Curso de Graduação de Engenharia de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016. Disponível em: [https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/171778/TCC-Hartmann\\_Eduardo\\_A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/171778/TCC-Hartmann_Eduardo_A.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 03 de nov. 2020.

HARTMANN. E. A. **Argamassa geopolímerica utilizando pó de alumínio como agente formador de poros**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel no Curso de Graduação de Engenharia de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/177092/Trabalho%20de%20conclus%C3%A3o%20de%20curso.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 de nov. 2020.

SOUSA. J. L. A. de O. Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo, **IBRACON**, São Paulo, n. 53, p. 5-9, jan- mar, 2009. Disponível em: [http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/rev\\_construcao/pdf/revista\\_concreto\\_53.pdf](http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf). Acesso em: 03 de nov. 2020.

MACCARINI. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir do uso de metacaulim**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel no Curso de Graduação de Engenharia de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/157147>. Acesso em: 03 de nov. 2020.

MARQUES, A. C. et al. Argamassa com adição de resíduos de borracha submetida à elevada temperatura. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Olinda, 3 a 6 de agosto de 2005. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/1499>. Acesso em: 04 de dez. 2020.

MÁRTIRES.A. C.; SENA.G. L. S. Sumário Mineral 2009, **Departamento Nacional de Produção Mineral**, Distrito Federal, vol. 29, p. 1-109, jun. 2010. Disponível em: <http://antigo.anm.gov.br/portal/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2009>. Acesso em: 04 de dez. 2020.

MATTA, V. R. P. et al. Efeitos da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) no desempenho das argamassas de cimento Portland no estado endurecido. *In: IX FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA*. São Paulo, 7 a 9 de janeiro de 2013. Disponível em: [https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum\\_ambiental/article/view/597/620](https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/597/620). Acesso em: 04 de dez. 2020.

MOURA, W.; GONÇALVES, J.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimentos e confecção das lajotas para piso. **Sitientibus**, Feira de Santana, n. 26, p. 49-61, jan./jun. 2002. Disponível em: [http://www2.uefs.br:8081/sitientibus/pdf/26/utilizacao\\_do\\_residuo\\_de\\_corte\\_de\\_marmore.pdf](http://www2.uefs.br:8081/sitientibus/pdf/26/utilizacao_do_residuo_de_corte_de_marmore.pdf). Acesso em 04 de dez. 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

ROCHA, G. J. A. O. G. A. **Influência do método de aplicação sobre o desempenho de aderência de revestimentos de argamassa**. 2014. Monografia para Conclusão de Curso (Bacharel no Curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2014. Disponível em: [https://www.eec.ufg.br/up/140/o/INFLU%C3%8ANCIA\\_DO\\_M%C3%89TODO\\_DE\\_APLICACA%C3%87%C3%83O\\_SOBRE\\_O\\_DESEMPENHO\\_DE\\_ADER%C3%8ANCIA\\_DE\\_REVESTIMENTOS\\_DE\\_ARGAMASSA.pdf](https://www.eec.ufg.br/up/140/o/INFLU%C3%8ANCIA_DO_M%C3%89TODO_DE_APLICACA%C3%87%C3%83O_SOBRE_O_DESEMPENHO_DE_ADER%C3%8ANCIA_DE_REVESTIMENTOS_DE_ARGAMASSA.pdf). Acesso em 03 de nov. de 2020.

SILVA, F. C. da S. **Resíduos de mármore e resíduos de construção e demolição no cimento**. 2016. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil Especialização em Materiais e Processos de Construção) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/83983/2/135569.pdf>. Acesso em: 03 de nov. 2020.

TEDESCO, T. D. C. **Desenvolvimento de argamassas utilizando granulometrias distintas de perlita**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel no Curso de Graduação de Engenharia de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/165305/TCC%20padr%c3%a3o%20Thais.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 de nov. 2020.