

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

EDUARDA ZOTO MORAES

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM RESÍDUO DA  
INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

Joinville

2022

EDUARDA ZOTO MORAES

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM RESÍDUO DA  
INDÚSTRIA DE PAPEL

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: Prof. Dr. Luciano Senff

Joinville

2022

EDUARDA ZOTO MORAES

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM RESÍDUO DA  
INDÚSTRIA DE PAPEL

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.

Joinville (SC), 02 de dezembro de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Luciano Senff  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Orientador/Presidente

---

Profa. Dra. Marilena Valadares Folgueras  
Universidade do Estado de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Claudimir Antônio Carminatti  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, Marcos e Amalia, ao meu irmão Murilo e a minha avó Terezinha, amores da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marcos Freitas de Moraes e Amalia Cristina Zoto agradeço a oportunidade da vida, da educação de qualidade, ao apoio incondicional, a paciência, o incentivo, obrigada por nunca pouparem esforços, mesmo entre dificuldades, sem vocês eu não estaria aqui.

Ao meu irmão Murilo Zoto Moraes, minha avó Climene Terezinha Zoto e ao meu padrinho Carlos Zoto Junior pelas mais sinceras demonstrações de carinho, amor e zelo.

Ao meu noivo João Victor Canabarro, pela motivação, resiliência, força, amor, incentivo e cuidado, por me fazer acreditar num futuro brilhante.

A minha cachorrinha Pipoca, que em um simples pedido de colo demonstra todo apoio do mundo.

As minhas amigas Larissa Vala, Ketlin Maria Bauer, Bianca Cristina Hubner vocês foram meu alicerce e minha família em Joinville – SC.

A Universidade Federal de Santa Catarina, ao meu Orientador Prof. Dr. Luciano Senff, a Universidade do Estado de Santa Catarina, em especial aos colaboradores e discentes dos Laboratórios do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, do Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil, e do Centro Multiusuário, também a todos os colegas, mestres e servidores que de alguma forma cruzaram meu caminho.

## RESUMO

A utilização do Cimento Portland (CP) em construções é histórica e com sólida fundamentação, sendo o segundo material mais usado no mundo, mas é também responsável por 5% das emissões de carbono, implicando na necessidade de desenvolvimento de materiais com características sustentáveis. O geopolímero tem sido estudado como uma solução de substituição, apresentando características semelhantes e aprimoradas se comparadas ao Cimento Portland. Aliado ao geopolímero a utilização de resíduos, como os Dregs, provenientes da indústria de papel e celulose, contribuem nos aspectos sustentáveis e nas características do material. Neste trabalho tem-se o estudo do comportamento de geopolímeros contendo 5, 10 e 15% de Dregs com 45  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$  nas suas propriedades em estado fresco (índice de consistência e tempo de pega) e endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica), avaliados aos 7 e 28 dias de cura. A argamassa geopolimérica, feita a partir de metacaulim, como fonte de aluminossilicatos, foi adicionada em frações de 5%, 10% e 15% do resíduo da indústria de papel, Dregs, como substituição e fonte de óxido de cálcio, utilizando a solução alcalina de hidróxido de sódio com concentração molar em 10 mol/L. Nos resultados obtidos para o índice de consistência (IC), analisando a relação sólido/líquido das misturas, tem-se que os melhores IC foram de 256,70 mm e 243,30 mm, obtidos para as misturas 10% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) e 15% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ), respectivamente. No ensaio de tempo de pega a média do estudo realizado para início de pega foi de 158 minutos e para o fim da pega foi de 361 minutos. Os resultados de resistência à tração na flexão de todas as misturas geopoliméricas com adição dos Dregs (150  $\mu\text{m}$  e 45  $\mu\text{m}$ ) sofreram reduções em relação à argamassa geopolimérica de referência (REF). Os resultados máximos na compressão foram obtidos aos 7 dias com 10% de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) com 53,26 MPa e aos 28 dias com 10% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) com 49,92 MPa. Em relação as propriedades físicas, tem-se a mistura com melhor desempenho nos ensaios de resistência, sendo a de 10% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ , 1,83 g/cm<sup>3</sup>) e comparou-se com a amostra REF (1,79 g/cm<sup>3</sup>) e a mistura com 10% de Dregs (150  $\mu\text{m}$ , 1,81 g/cm<sup>3</sup>). E observou-se que à medida que a massa específica aumentou, a absorção de água diminuiu. Os resultados mostram que a incorporação de resíduos não afeta negativamente a ocorrência de geopolimerização. O melhor desempenho encontra-se na mistura adicionada de 10% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ). O uso de dregs como aditivo em argamassas geopoliméricas é promissor, sendo uma alternativa para redução do impacto ambiental.

**Palavras-chave:** Argamassa. Geopolímero. Resíduo da Indústria de Papel e Celulose. Dregs. Propriedades dos geopolímeros.

## ABSTRACT

The use of Portland Cement (PC) in buildings is historical and has solid foundations, being the second most used material in the world, but it is also responsible for 5% of carbon emissions, implying the need to develop materials with sustainable characteristics. The geopolymer has been studied as a replacement solution, presenting similar and improved characteristics compared to Portland Cement. Allied to the geopolymer, the use of residues, such as Dregs, from the pulp and paper industry, contribute to the sustainable aspects and characteristics of the material. This work studies the behavior of geopolymers containing 5, 10 and 15% of Dregs with 45  $\mu\text{m}$  and 150  $\mu\text{m}$  in their properties in fresh state (consistency index and setting time) and hardened (tensile strength in bending, compressive strength, water absorption, voids index and specific mass), evaluated at 7 and 28 days of curing. The geopolymeric mortar, made from metakaolin, as a source of aluminosilicates, was added in fractions of 5%, 10% and 15% of the waste from the paper industry, Dregs, as a replacement and source of calcium oxide, using the alkaline solution of sodium hydroxide with a molar concentration of 10 mol/L. In the results obtained for the consistency index (CI), analyzing the solid/liquid ratio of the mixtures, the best CI were 256.70 mm and 243.30 mm, obtained for the mixtures 10% of Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) and 15% Dregs (45  $\mu\text{m}$ ), respectively. In the test of setting time, the average of the study carried out for the start of setting was 158 minutes and for the end of setting was 361 minutes. The flexural tensile strength results of all geopolymeric mixtures with the addition of Dregs (150  $\mu\text{m}$  and 45  $\mu\text{m}$ ) were reduced in relation to the reference geopolymeric mortar (REF). Maximum compression results were obtained after 7 days with 10% Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) with 53.26 MPa and after 28 days with 10% Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) with 49.92 MPa. Regarding the physical properties, there is the mixture with the best performance in the resistance tests, being the 10% of Dregs (45  $\mu\text{m}$ , 1.83 g/cm<sup>3</sup>) and compared with the sample REF (1.79 g/cm<sup>3</sup>) and the mixture with 10% Dregs (150  $\mu\text{m}$ , 1.81 g/cm<sup>3</sup>). And it was observed that as the density increased, the water absorption decreased. BR The results show that the incorporation of residues does not negatively affect the occurrence of geopolymerization. Best performance is found in the added mixture of 10% Dregs (45  $\mu\text{m}$ ). The use of dregs as an additive in geopolymeric mortars is promising, being an alternative to reduce the environmental impact.

**Keywords:** Mortar. Geopolymer. Waste from the Pulp and Paper Industry. Dregs. Properties of geopolymers.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Materiais Geopoliméricos – Razão atômica Si/A.....	18
Figura 2 – Aplicação do concreto geopolimérico em laje.....	19
Figura 3 – Aplicação de geopolímero em bloco refratário.....	19
Figura 4 – Estrutura da Universidade de Queensland (Austrália) em geopolímero.....	20
Figura 5 – Pavimento do Aeroporto Brisbane West Wellcamp (Austrália) em geopolímero.....	20
Figura 6 – Representação esquemática simplificada do processo kraft.....	22
Figura 7 – Utilização de Dregs para fertilização do solo.....	23
Figura 8 – Esquema representativo das etapas do plano experimental.....	25
Figura 9 – Matérias primas utilizadas na preparação da argamassa geopolimérica: a) Areia, b) Metacaulim, c) Dregs, d) Solução de Hidróxido de Sódio, e) Silicato de Sódio.....	26
Figura 10 – Análise das fases que compõem o Metacaulim a partir da análise por Difração de Raios X (DRX).....	27
Figura 11 – Análise granulométrica a laser do Metacaulim.....	28
Figura 12 – Análise das fases que compõem os Dregs a partir da análise por Difração de Raios X (DRX).....	29
Figura 13 – Análise granulométrica a laser do Dregs.....	31
Figura 14 – Microestrutura dos resíduos Dregs obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com aumento de 120x.....	32
Figura 15 – Fluxograma da produção das argamassas geopoliméricas.....	35
Figura 16 – Corpos de prova prismáticos no estado fresco.....	36
Figura 17 – Ensaio de Índice de Consistência.....	37
Figura 18 – Aparelho de Vicat para a realização do ensaio de tempo de pega.....	38
Figura 19 – Equipamento para ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão.....	39
Figura 20 – Índice de Consistência da argamassa geopolimérica com adição de Dregs (150 $\mu\text{m}$ ).....	42
Figura 21 – Índice de Consistência da argamassa geopolimérica com adição de Dregs (45 $\mu\text{m}$ ).....	42
Figura 22 – Início e fim de pega de argamassa geopolimérica com adição de Dregs (150 $\mu\text{m}$ ).....	44
Figura 23 – Início e fim de pega de argamassa geopolimérica com adição de Dregs (45 $\mu\text{m}$ ).....	44

Figura 24 – Resistência à tração na flexão avaliando a adição dos Dregs (150 $\mu\text{m}$ ).....	46
Figura 25 – Resistência à compressão avaliando a adição dos Dregs (150 $\mu\text{m}$ ).....	46
Figura 26 – Resistência à tração na flexão avaliando a adição dos Dregs (45 $\mu\text{m}$ ).....	47
Figura 27 – Resistência à compressão avaliando a adição dos Dregs (45 $\mu\text{m}$ ).....	47
Figura 28 – Massa específica da amostra seca, saturada e real das misturas REF, 10% Dregs (150 $\mu\text{m}$ ) e 10% Dregs (45 $\mu\text{m}$ ).....	49
Figura 29 – Absorção de água das misturas REF, 10% Dregs (150 $\mu\text{m}$ ) e 10% Dregs (45 $\mu\text{m}$ ). .....	49
Figura 30 – Índice de vazios das misturas REF, 10% Dregs (150 $\mu\text{m}$ ) e 10% Dregs (45 $\mu\text{m}$ ).....	50
Figura 31 – Correlação entre absorção de água e massa específica das misturas REF, 10% Dregs (150 $\mu\text{m}$ ) e 10% Dregs (45 $\mu\text{m}$ ).....	50

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Análise química do Metacaulim a partir do FRX.....	28
Tabela 2 – Análise química do Dregs a partir do FRX.....	30
Tabela 3 – Análise da granulometria e finura dos resíduos Dregs.....	31
Tabela 4 – Características do Hidróxido de Sódio.....	32
Tabela 5 – Características do Silicato de Sódio.....	33
Tabela 6 – Formulação das amostras, em massa, para produção dos corpos de prova.....	34

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP - Cimento Portland

DR - Dregs

DRX - Difração de Raios-X

FRX - Fluorescência de Raios-X

HS - Hidróxido de Sódio

IC - Índice de Consistência

MAA - Material Alkali Ativado

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MK - Metacaulim

NBR - Norma Brasileira

REF - Referência

SS - Silicato de Sódio

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1. OBJETIVOS .....	16
1.1.1. Objetivo Geral .....	16
1.1.2. Objetivos Específicos .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.2. GEOPOLÍMEROS .....	17
2.2.1 Metacaulim.....	20
2.2.1 Silicato de Sódio.....	21
2.2.1 Hidróxido de Sódio .....	21
2.2.2 Propriedades .....	21
2.2.3 Aplicações .....	18
2.3. RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE – DREGS.....	22
2.3.1. Aplicações .....	23
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
3.1. MATERIAIS .....	26
3.1.1. Metacaulim.....	26
3.1.2. Dregs .....	29
3.1.3. Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio .....	32
3.1.4. Areia.....	33
3.2. METODOLOGIA.....	33
3.2.1. Definições das formulações e produção das amostras.....	33
3.2.2. Ensaio no estado fresco.....	36
3.2.3 Ensaio no estado endurecido .....	38
3.2.4 Propriedades físicas.....	39
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
4.1. ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA .....	41
4.2. TEMPO DE PEGA .....	43
4.3. RESISTÊNCIA A FLEXÃO E COMPRESSÃO .....	45
4.4. PROPRIEDADES FÍSICAS .....	48
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A palavra cimento tem origem no latim *caementu*, que designava, na velha Roma, pedra natural de rochedos. O cimento é o componente básico do concreto, que é hoje o segundo material mais utilizado pelo homem, ficando atrás, somente, do elemento água (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC, 2006). As propriedades de endurecimento do cimento, quando misturado à água, provém da matéria-prima de calcário, um material abundante e relativamente barato, fazendo com que grandes e pequenas obras realizadas em todo o mundo moderno, utilizem o cimento (MAURY; BLUMENSCHNEIN, 2012).

A mistura entre cimento e água tem-se a pasta, adicionando areia obtém-se a argamassa, e inserindo brita forma-se o concreto. Para o concreto, além dos quatro materiais base, variando em proporções, tem-se a possibilidade de adição de outros materiais, como a cal ou de aditivos, que vão melhorar propriedades como fluidez, resistência, tempo de pega, entre outros, conforme a necessidade.

Segundo Maury e Blumenschein (2012), embora o setor de produção de cimento esteja cada vez mais aprimorado, há impactos e danos à saúde desde a extração da matéria-prima. O impacto é proveniente desde as fábricas de refinamento com a emissão de material particulado, até a fase de clínquerização, com forte emissão de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono. Para as considerações acerca do impacto dessa produção de cimento, o World Business Council For Sustainable Development (WBCSD, 2010), afirmou que as emissões da indústria do cimento, mundialmente, são estimadas em cerca de 5% do total das emissões antrópicas de carbono.

Ainda que o uso de Cimento Portland (CP) apresente vantagens, seu uso também está relacionado a problemas de durabilidade. Muitas estruturas construídas com CP apresentaram patologias e grave deterioração antes de atingir a vida útil planejada, principalmente, construções que estão em ambientes agressivos e corrosivos (ELYAMANY; ELMOATY; ELSHABOURY, 2018). Observando tais impactos, há um crescimento na demanda de materiais com melhor performance em resistência mecânica e durabilidade, além da necessidade de novas tecnologias que reutilizam resíduos visando minimizar riscos ao ambiente e à saúde (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

Surge, então, o geopolímero em 1970, desenvolvido por Joseph Davidovits, com um grande potencial ecológico, bem como com propriedades otimizadas. Com o avanço das pesquisas, foi atestado que esse material apresenta propriedades ligantes, levando ao desenvolvimento do cimento geopolimérico, que pode ser empregado em aplicações estruturais em substituição ao CP. Há também uma vertente para utilização de resíduos industriais e minerais, como materiais cimentícios em substituição parcial ao CP, bem como para a obtenção dos cimentos geopoliméricos (DAVIDOVITS, 1988).

Considerando o desenvolvimento de novos materiais que substituam o CP e visando os principais requisitos para o desenvolvimento sustentável, o intuito de muitas pesquisas é o aproveitamento de resíduos sólidos para gerar materiais alternativos (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014). Uma possibilidade de aproveitamento é o resíduo proveniente das indústrias de papel e celulose, pois, além de grandes produtoras, podem gerar impactos negativos ao meio ambiente. O principal processo utilizado para a obtenção de fibras celulósicas no mundo é a polpação Kraft, gerando significativa quantidade de resíduos sólidos, denominados Dregs (BARBOSA, 2019).

Santos et al. (2018), apontaram que a substituição ou adição parcial de Dregs em relação à massa da cal hidratada é vantajosa do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Os Dregs são ricos em óxido de cálcio (CaO), principal elemento da cal hidratada, podendo contribuir para desempenho técnico similar na argamassa, além de reduzir o consumo e o custo de cal hidratada na produção (BARBOSA, 2019).

Para a formação da argamassa geopolimérica são usados como fonte de aluminossilicatos, principalmente, o metacaulim. Para ativar os aluminossilicatos é necessária uma solução altamente alcalina, que forneça condições para ocorrência da reação de quebra das ligações da matéria-prima original, como o hidróxido de sódio (SANTA, 2016).

Nesse contexto, este trabalho apresenta a produção e avaliação da síntese de argamassa geopolimérica com a utilização de metacaulim como base e variação de 5%, 10% e 15% de adição de Dregs, compondo a fase precursora, e para fase ativadora, silicato de sódio com hidróxido de sódio a 10 mol/L, para então realizar testes para propriedades de estado fresco e endurecido das misturas.

Para execução deste trabalho foi utilizado o Laboratório do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e o Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC, ambos na cidade de Joinville/SC.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a influência da adição de Dregs a argamassa geopolimérica à base de metacaulim para melhoria de suas propriedades físicas e mecânicas, no estado fresco e endurecido.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Produzir três formulações distintas de argamassas geopoliméricas com adição de 5, 10 e 15% de resíduo Dregs;
- Produzir corpos de prova para ensaios físicos (índice de consistência, tempo de pega absorção, índice de vazios, massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa específica real) e mecânicos (resistência à flexão e compressão) aos 7 e 28 dias de cura, a partir de cada formulação desenvolvida;
- Determinar o teor otimizado de Dregs com base na resistência à tração na flexão e na resistência à compressão.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o entendimento do trabalho tem-se a necessidade de definições referenciadas para geopolímeros com adições de resíduos da indústria de papel e celulose como material substituto ao Cimento Portland e sustentável, suas aplicações, a exposição do processo de geopolimerização para correta nomenclatura do material.

### 2.2. GEOPOLÍMEROS

Entre os anos de 1970 e 1973, o pesquisador Joseph Davidovits deu origem aos geopolímeros, patenteados em 1979. Os geopolímeros são polímeros inorgânicos obtidos por meio da polimerização de matéria-prima contendo aluminossilicatos (DAVIDOVITS, 1991). A geopolimerização acontece em temperatura ambiente ou levemente elevada, esse processo ocorre por meio de uma reação química, que produz ligações poliméricas de átomos de silício (Si), oxigênio (O) e alumínio (Al) (GEO-POL, 2013). Conforme Vassalo (2013), a formação de geopolímeros ocorre pelo fenômeno exotérmico devido à policondensação, sendo essencial para que ocorra a geopolimerização, com rápido endurecimento. O processo de dissolução de Al e Si no meio alcalino, por meio da condensação, forma um gel, altamente reativo, de rede tridimensional de estrutura sílico-aluminato.

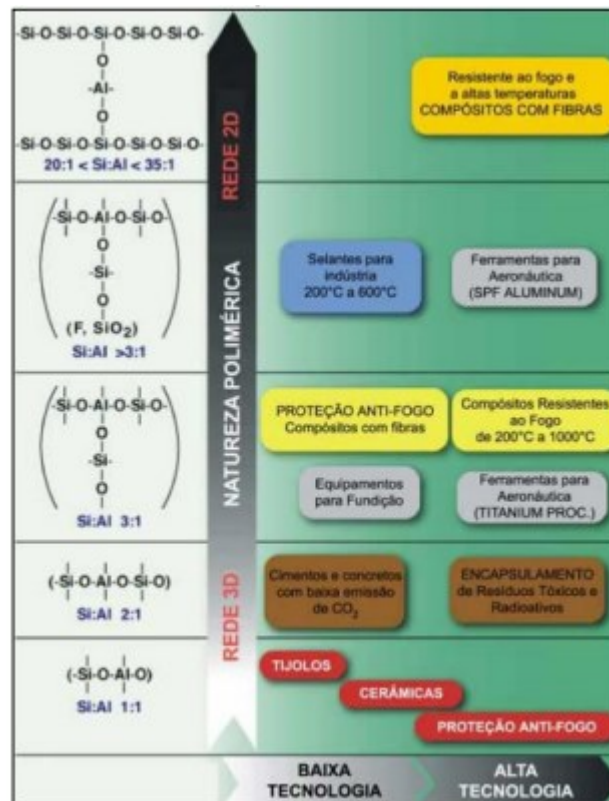
Davidovits (2013) define que, para a fabricação do geopolímero é necessário um material aluminossilicato e um reagente alcalino. Oposto ao Cimento Portland, onde a água dá início à reação de hidratação para formar os silicatos de cálcio hidratados, que são responsáveis pela resistência da matriz, os geopolímeros usam da policondensação dos precursores da sílica e da alumina e um alto teor alcalino para obter resistência estrutural, formando o aluminossilicato hidratado (ELYAMANY et al., 2018).

Para a formação do material geopolimérico, o metacaulim atua como precursor, fonte de aluminossilicatos, de silício e de alumínio. Quando o precursor tiver alto índice de cálcio, será produzido um gel. A solidificação e o endurecimento desse gel que forma o geopolímero é responsável pelo desenvolvimento da resistência (SINGH; SINGH, 2019). Para ativar os aluminossilicatos é necessária uma solução altamente alcalina para que aconteça uma reação de dissolução da matéria-prima original. Geralmente os mais utilizados são os hidróxidos de sódio (NaOH) e potássio (KOH) (SANTA, 2016). A ativação alcalina é um processo químico que condiciona a transformação de estruturas vítreas em um material cimentício (RAMOS, 2017).

## 2.2.1 Aplicações

A composição química dos geopolímeros tem influência nas propriedades e, conseqüentemente, em suas aplicações. A razão molar de Si/Al das estruturas geopoliméricas determina as propriedades, características e aplicações dos produtos obtidos. A aplicação para materiais de construção tem baixo custo e utilização em massa, utilizando materiais mais usuais como matérias-primas, como o metacaulim, resíduos industriais e todos os aluminossilicatos em que a razão de Si/Al esteja compreendida entre 1 e 3. Para a obtenção de materiais mais sofisticados, a razão atômica pode alcançar valores de 35:1, podendo mesmo admitir a incorporação de fibras de diferentes tipos (SCHWAAB, 2019).

Figura 1 – Materiais Geopoliméricos – Razão atômica Si/A.



Fonte: Davidovits (2011)

Para Davidovits (2002) a aplicação dos geopolímeros bem sucedidas realizadas ocorrem com geopolímeros de diferentes tipos em função das razões Si/Al, conforme a Figura 01, envolvendo maior ou menor intervenção tecnológica, na área de engenharia civil, em estabilização do solo, painéis pré-fabricados de edificações, blocos, refratários, compósitos, sistemas de tubos de esgoto, conduítes, retenção de fluidos, estruturas marinhas, cimentos,

adesivos, revestimentos, isolamento, agregados para reparação de rodovias e obras de infraestrutura, mas também se aplica em áreas como encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos, fibras e têxteis, e mesmo a arte. As Figuras 2 a 5 ilustram aplicações dos geopolímeros atualmente, como concreto em laje, bloco refratário, no sistema estrutural da Universidade de Queensland e no pavimento do Aeroporto Brisbane West Wellcamp, respectivamente.

Figura 2 – Aplicação do concreto geopolimérico em laje.



Fonte: ROQUE (2022).

Figura 3 – Aplicação de geopolímero em bloco refratário.



Fonte: ROQUE (2022).

Figura 4 – Estrutura da Universidade de Queensland (Austrália) em geopolímero.



Fonte: HASSEL (2022).

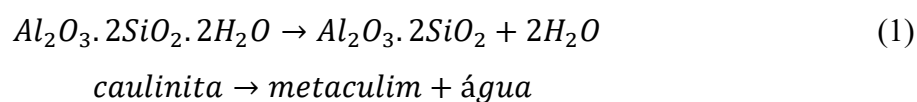
Figura 5 – Pavimento do Aeroporto Brisbane West Wellcamp (Austrália) em geopolímero.



Fonte: GEOPOLYMER (2014).

### 2.2.2 Metacaulim

O Metacaulim (MC) é o nome dado para um mineral aluminossilicoso, produto resultante da calcinação de variados tipos de argilas, como as caulínicas e os caulins de alta pureza. Durante a calcinação ocorre o processo de desidroxilação, onde a caulinita produz o metacaulim e água, conforme a Equação 1 (KRETZER, 2020).



O resultado deste processo gera um material pozolânico de grande reatividade. Na presença de água, o MC, formado de sílica e alumina, reage com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades cimentícias. Como o MC dispõe de grande quantidade de

aluminossilicato amorfo, tem-se sua importância na adição como uma das matérias-primas para à produção de geopolímeros (SCHWAAB, 2019).

### **2.2.3 Silicato de Sódio**

O silicato de sódio (SS) tem o processo de produção simplificado, se comparado ao silicato de potássio, preço reduzido, e surge a partir da calcinação de um carbonato com uma fonte de sílica em uma temperatura entre 1400 e 1500 °C. O SS exerce a função de ligante no processo de síntese do metacaulim, quanto maior for o valor do pH da mistura, maior será sua viscosidade, sendo que este comportamento se obtém a partir de proporções com relações menores (SCHWAAB, 2019). Um estudo comparativo, realizado por Zan *et al.* (2013), para álcali-ativação do metacaulim com hidróxido de sódio e silicato de sódio mostrou que a relação Na/Al no processo de geopolimerização representa maior influência no desenvolvimento das reações do que a temperatura e a relação Si/Al. Também foi observado que o uso de silicato de sódio retorna maiores benefícios, uma vez que ele proporciona uma melhoria no processo de geopolimerização e auxilia na formação de uma pasta mais compacta, conferindo a estes materiais melhores propriedades mecânicas.

### **2.2.4 Hidróxido de Sódio**

O hidróxido de sódio (NaOH) tem a função de dissolver as matérias-primas, pois no processo de síntese dos geopolímeros a presença elevada de íons hidroxila facilita a dissolução dos aluminossilicatos, além de aumentar o grau de polimerização da mistura. É uma base muito utilizada em geopolímeros, apresentando baixo custo e alta disponibilidade. A presença do ativador a base de NaOH promove a formação de uma solução rica em álcalis e uma matriz geopolimérica porosa é observada (KRETZER, 2020)

### **2.2.5 Propriedades**

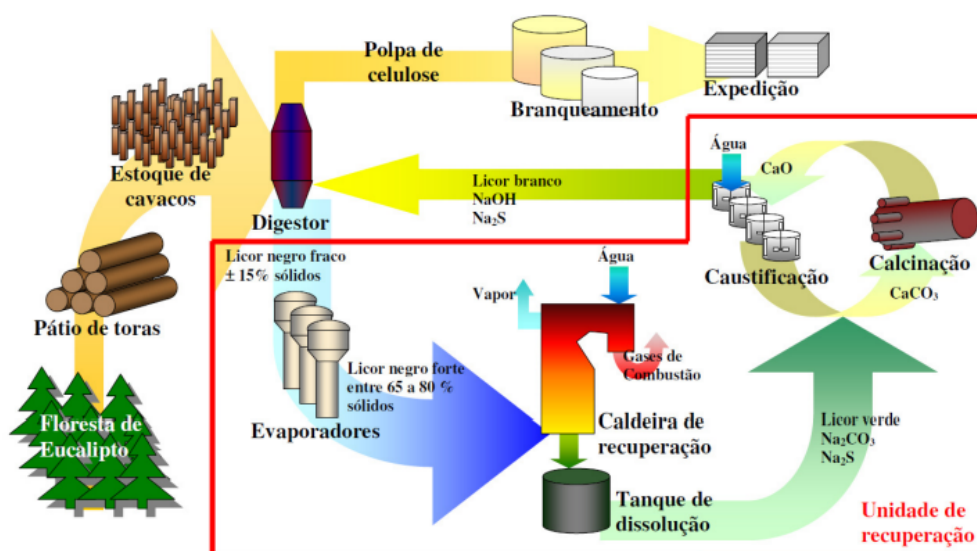
O cimento geopolimérico tem tempo rápido de endurecimento, comparando-se ao CP, e são mais resistentes aos problemas relacionados à durabilidade. A maior parte de sua resistência mecânica é adquirida dentro de 24 horas, formando uma forte ligação com os agregados, com valores de pH menor do que as argamassas de Cimento Portland, significando que raramente a reação álcali-agregado acontecerá. Também apresentam resistência ao calor,

ao fogo, a ácidos, e a ciclos de congelamento e degelo. O tipo de ativador alcalino tem grande influência no desenvolvimento da trabalhabilidade em argamassas geopoliméricas, e quando ativadas por silicato de sódio, apresentam baixos níveis de porosidade na interface e, conseqüentemente, melhor resistência à compressão (KRETZER, 2020).

### 2.3. RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE – DREGS

A indústria de papel e celulose divide sua produção, principalmente, em quatro fases: preparação de matérias primas; deslignificação química; linha de fibras e planta de recuperação. Na Figura 6 tem-se a representação esquemática simplificada do processo Kraft, onde as cinzas são os primeiros resíduos formados no processo de recuperação, consideradas como resíduo inerte de acordo com a classificação da NBR 10004 (ABNT, 2004) e resultam da queima do licor negro concentrado na caldeira de recuperação (RIBEIRO, 2010). Os Dregs são gerados na etapa de clarificação do licor verde na planta de recuperação e as impurezas sólidas insolúveis no licor verde são descartadas, originando então o resíduo designado por Dregs (TORRES S. et al., 2017). Para cada tonelada de celulose produzida são gerados 10 kg do resíduo Dregs (RIBEIRO, 2010). De acordo com a norma NBR 10004 (2004), os resíduos gerados no processo Kraft são classificados em classe II-A, não-perigoso e não-inerte.

Figura 6 - Representação esquemática simplificada do processo kraft.



Fonte: Ferreira (2007).



### 2.3.1. Aplicações

O setor de papel e celulose é um dos mais impactantes em recursos, energia empregada nas indústrias manufatureiras e emissão de poluentes. Dados recentes mostram que a produção mundial de papel aumentou cerca de 1,5% em 2017, gerando impacto econômico e alta produção de resíduos, que geralmente são descartados em aterros, levantando sérias preocupações ambientais devido à presença de metais perigosos como Co, Cr, Cu, Cd, Ni, Pb e Zn em suas composição química. No entanto, destaca-se que alguns desses metais (por exemplo, Cu e Zn) também são conhecidos como nutrientes do solo, havendo a possibilidade de extraí-los para utilizar como fertilizantes, porém é um processo complexo. A estratégia de aproveitamento direto desses resíduos, sem a necessidade de realizar tratamentos químicos caros, é estudada para a produção de materiais de construção ecologicamente corretos e de baixo custo.

Figura 7 – Utilização de Dregs para fertilização do solo.



Fonte: Foelkel (2011).

A busca pelo reaproveitamento de materiais em prol da sustentabilidade se faz cada dia mais necessária, a indústria já está em posição de tirar todo o foco do produto e dar destino útil para seus resíduos, já que evitá-los costuma ser inviável. Portanto, análises das aplicabilidades dos resíduos da indústria de papel e celulose estão em constante produção. Na construção civil, diversos estudos relatam sobre o aproveitamento destes. No entanto, a incorporação de alguns resíduos é particularmente desafiadora, sendo este o caso do licor verde. As borras apresentam pH muito alto (>10), alcalino e teores de óxidos alcalino-terrosos, o que

dificulta sua incorporação em cimento ou concreto. Porém, uma possibilidade interessante é sua utilização na incorporação de borras na produção de geopolímeros, uma alternativa mais amigável ao ambiente em relação aos convencionais Cimento Portland.

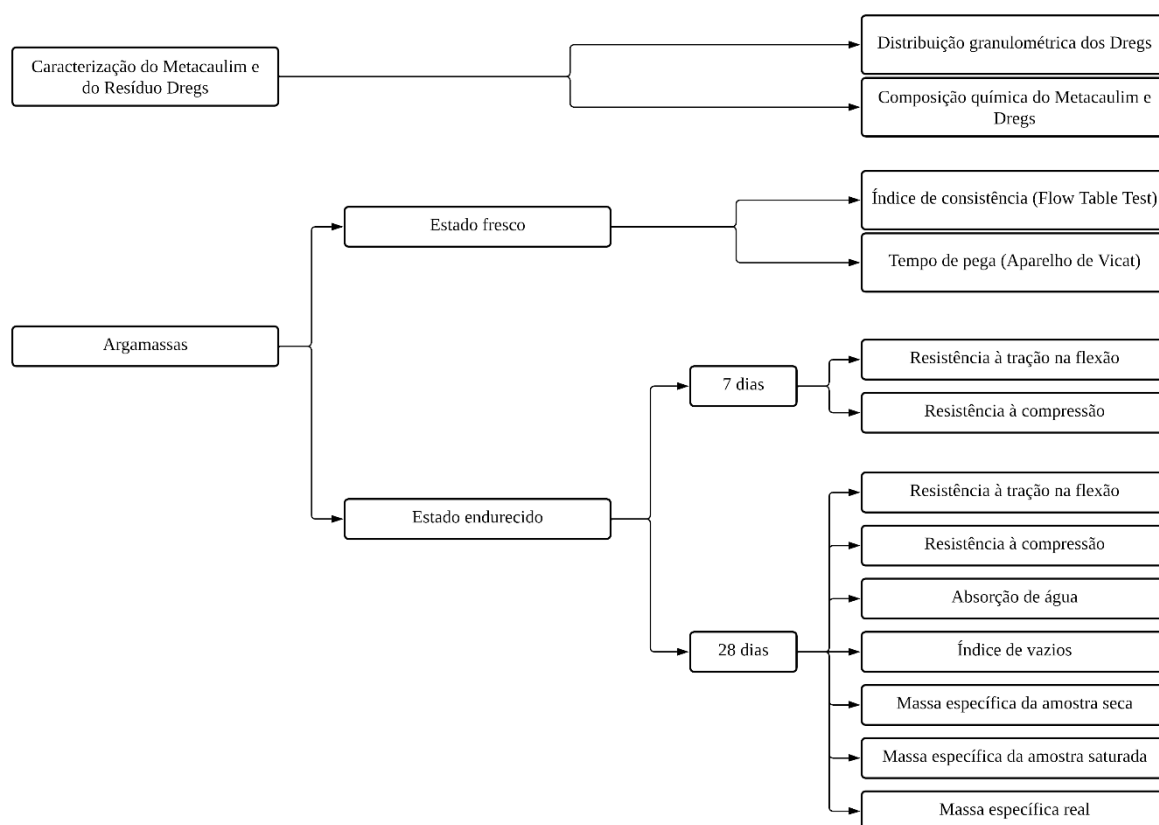
Na produção de argamassas, Bandeira (1996) adicionou parcialmente Dregs em relação à massa total de cimento, e notou que as argamassas com maior teor de Dregs apresentaram maior resistência à compressão. Torres *et al.*, (2017) utilizaram finos de Dregs em relação à massa de cimento Portland. A adição de até 10% de Dregs aumentou a resistência mecânica do concreto produzido, comparado com o concreto de referência. Os autores Novais *et al.* (2018) estudaram a viabilidade de usar as borras como recebidas na produção de aglomerantes, sem comprometer o desempenho das argamassas. Teve-se como resultado um aumento na resistência à flexão (até 71%) e à compressão (até 34%) alcançado para as argamassas contendo as borras em comparação com a referência.



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão detalhados os materiais, métodos e procedimentos adotados para o desenvolvimento da argamassa geopolimérica com adição do resíduo Dregs. Para análise e caracterização das propriedades e efeitos da adição dos Dregs foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido conforme normativas nacionais e/ou internacionais. A Figura 8 esquematiza os ensaios definidos para o estudo.

Figura 8 – Esquema representativo das etapas do plano experimental.



Fonte: Autora (2021).

Ao todo foram produzidos 24 corpos de prova prismáticos no padrão 4 cm x 4 cm x 16 cm, sendo 4 unidades de cada formulação.

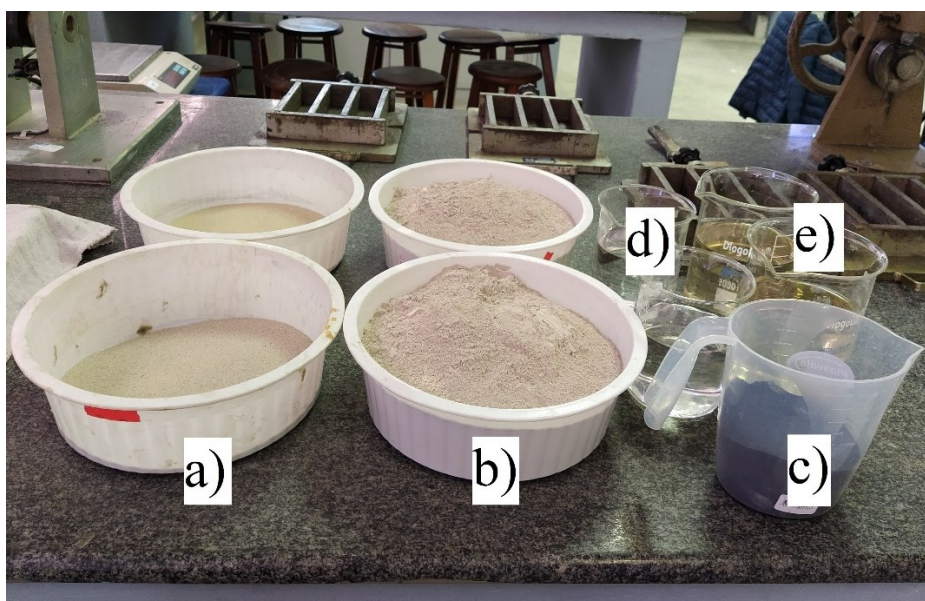
### 3.1. MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste estudo, o material aglomerante utilizado foi Metacaulim, considerado sustentável e base para o desenvolvimento de geopolímeros, com porcentagens do resíduo Dregs. Portanto, a argamassa proposta para este trabalho é composta dos seguintes materiais:

- Metacaulim e Dregs;
- Solução de Hidróxido de Sódio (10 mol/L) e Silicato de Sódio como agentes ativadores alcalino;
- Areia como agregado inerte.

A Figura 9 apresenta as matérias primas utilizadas na produção da argamassa geopolimérica.

Figura 9 – Matérias primas utilizadas na preparação da argamassa geopolimérica: a) Areia, b) Metacaulim, c) Dregs, d) Solução de Hidróxido de Sódio (10 mol/L), e) Silicato de Sódio.



Fonte: Autora (2021).

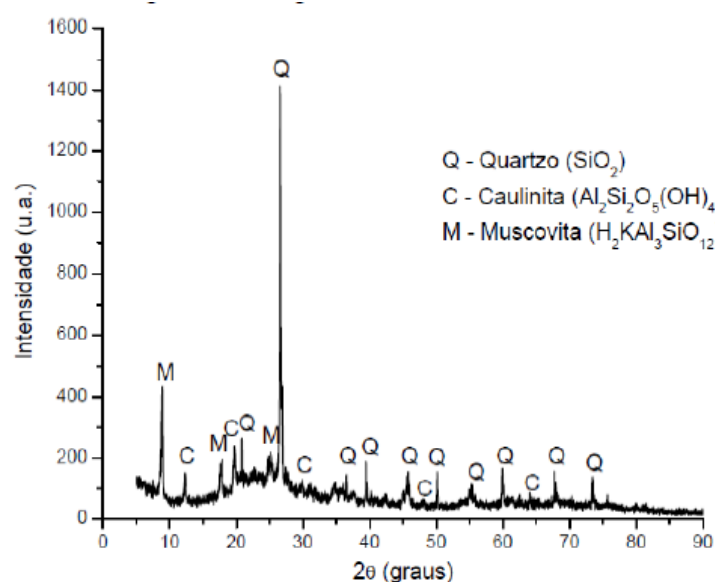
#### 3.1.1. Metacaulim

O metacaulim atua como o precursor principal do geopolímero, sendo utilizada a versão comercial da empresa Metacaulim do Brasil S.A. (SP). A granulometria fornecida pela empresa especifica que 90% dos sólidos possuem tamanho de partícula inferior a 44  $\mu\text{m}$ . O

material aglomerante é fonte de alumina e sílica. A caracterização do material foi realizada no Laboratório de Cerâmicas da UDESC, com ensaios de DRX, Figura 10, FRX, Tabela 1, Análise granulométrica, Figura 11.

A Figura 10 apresenta a análise por difração de raios X (DRX), do metacaulim utilizado no estudo, que apresentou picos cristalinos de quartzo, caulinita e muscovita. Para Alvarenga (2018), a presença de caulinita pode ser relacionada à calcinação incompleta e o quartzo e muscovita a impurezas no caulim.

Figura 10 – Análise das fases que compõem o Metacaulim a partir da análise por Difração de Raios X (DRX).



Fonte: SCOLARO (2019).

O metacaulim (MC) possui massa específica de  $2,70 \text{ g/cm}^3$  e sua composição química está descrita na Tabela 1, onde observa-se a predominância de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e tem-se que a razão molar de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  é de 1,66, valor inferior ao adequado (mínimo 3:1 segundo DAVIDOVITS, 2015), sendo necessária assim uma fonte extra de  $\text{SiO}_2$  para atingir a proporção molar de 3.

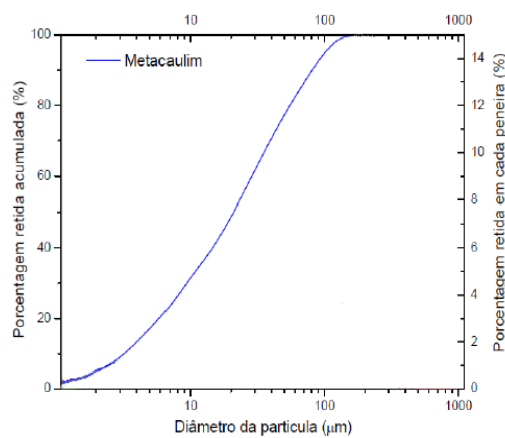
Tabela 1 - Análise química do Metacaulim a partir da análise por Fluorescência de Raios-X (FRX).

Composto	% Comp. Química
SiO <sub>2</sub>	55,790
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,690
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,970
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
SO <sub>3</sub>	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,070
K <sub>2</sub> O	2,980
CaO	0,060
TiO <sub>2</sub>	1,430
MgO	0,890
MnO	2,834
Outros	2,120
PF	2,180

Fonte: SCOLARO (2019).

Da análise granulométrica na Figura 11, o metacaulim possui diâmetro médio de 17,456  $\mu\text{m}$ .

Figura 11 - Análise granulométrica a laser do Metacaulim.



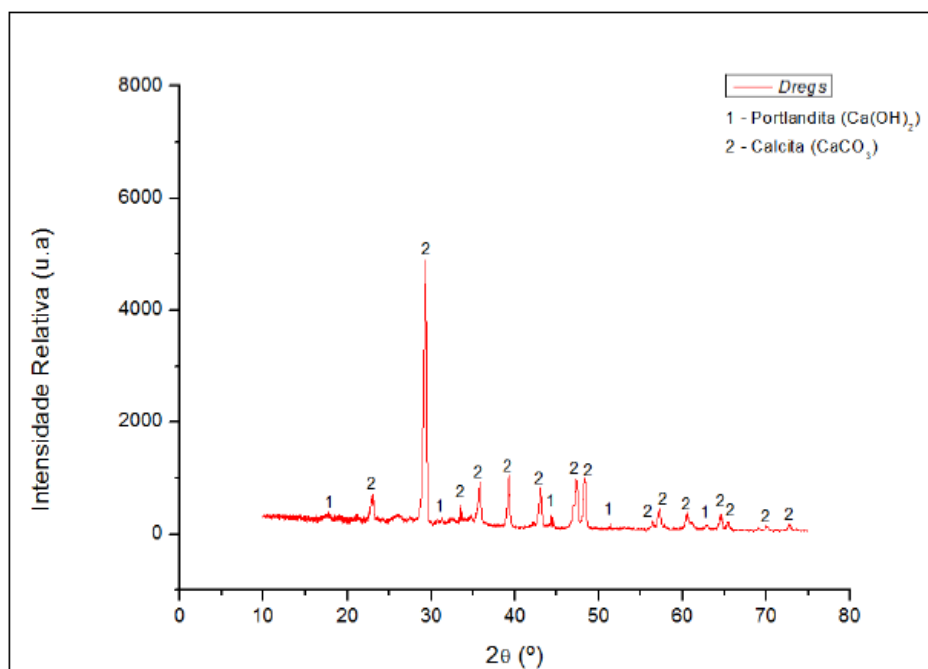
Fonte: SCOLARO (2019).

### 3.1.2. Dregs

O Dregs é um material sólido, de cor escura, constituído por carbonatos de cálcio e sódio, carvão, sílica, sulfuretos de metais e outros sais provenientes da caldeira. As amostras do resíduo foram coletadas com o mesmo lote de material. O material é proveniente da indústria de papel e celulose (COCELPA) do município de Araucária/PR e foram coletados no mês de março de 2018, ficando armazenados em tambores vedados, a fim de evitar umidade e contaminação. A produção média anual de Dregs, na empresa fornecedora, foi de 600 toneladas/ano em 2018 (BARBOSA, 2019).

Para caracterização do material foram realizados ensaios de DRX, Figura 12, FRX, Tabela 2, Análise granulométrica, Figura 13 e análise microestrutural por microscópio eletrônico de varredura (MEV), Figura 14. A partir da Figura 12, no ensaio DRX, tem-se presença predominante de cálcio na forma de carbonato, calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e na forma de hidróxido, portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).

Figura 12 - Análise das fases que compõem os Dregs a partir da análise por Difração de Raios X (DRX).



Fonte: BARBOSA (2019).

Pela Tabela 2, do ensaio de FRX, tem-se que o Dregs apresenta maior concentração de óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e enxofre ( $\text{SO}_3$ ) e impurezas como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{K}_2\text{O}$ .

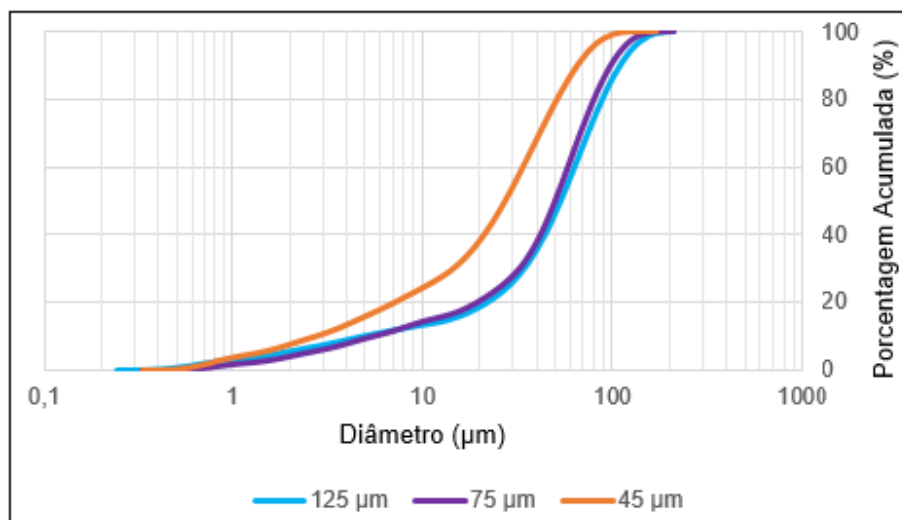
Tabela 2 - Análise química do Dregs a partir da análise por Fluorescência de Raios-X (FRX).

Composto	% Comp.Química
SiO <sub>2</sub>	1,536
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,146
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,033
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,340
SO <sub>3</sub>	5,955
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-
K <sub>2</sub> O	0,262
CaO	37,365
TiO <sub>2</sub>	0,129
MgO	-
MnO	2,834
Outros	0,135
PF	38,870

Fonte: BARBOSA (2019).

O módulo de finura do resíduo utilizado na produção de argamassa foi um fator avaliado, verificando qual a influência do módulo de finura dos resíduos na resistência à compressão das argamassas, tomando como referência a granulometria do Metacaulim. Através da granulometria dos três tipos de módulo de finura utilizados no procedimento experimental (45, 75 e 125 µm) de Barbosa (2019), Figura 12, são apresentadas na Tabela 3 as distribuições do tamanho de partículas para os resíduos Dregs de 45 e 125 µm, considerados nas composições estudadas neste trabalho.

Figura 13 - Análise granulométrica a laser do Dregs



Fonte: BARBOSA (2019).

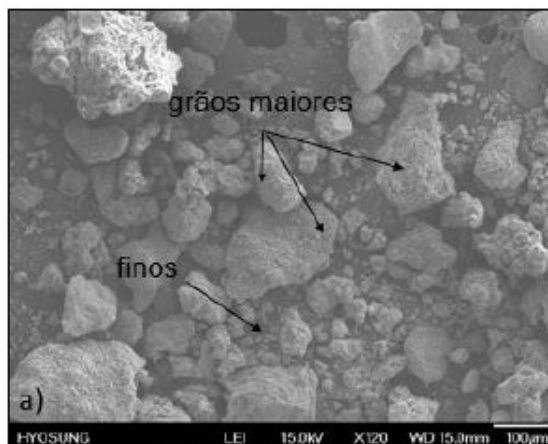
Tabela 3 - Análise da granulometria e finura dos resíduos Dregs.

Distribuição dos	Resíduos de <i>Dregs</i>
Tamanhos de Partículas	# 325 - Tamanhos (45 µm)
10% das partículas abaixo de	2,740
50% das partículas abaixo de	27,230
90% das partículas abaixo de	65,640
Distribuição dos	# 100 - Resíduos de <i>Dregs</i>
Tamanhos de Partículas	Tamanhos (125 µm)
10% das partículas abaixo de	4,860
50% das partículas abaixo de	53,240
90% das partículas abaixo de	110,580

Fonte: BARBOSA (2019).

Por fim, os Dregs foram analisados quanto à microestrutura por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), com o objetivo de definir o formato dos grãos. E na Figura 14, tem-se diferentes tamanhos de partículas em formatos irregulares, com presença de finos e de grãos relativamente maiores, sendo predominantemente constituídos de partículas não homogêneas.

Figura 14 - Microestrutura dos resíduos Dregs obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com aumento de 120x.



Fonte: BARBOSA (2019).

### 3.1.3. Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio

Como materiais ativadores dos aluminossilicatos presentes nos precursores metacaulim e Dregs utilizou-se uma solução de 10 mol/L de hidróxido de sódio (NaOH). O NaOH, ou comercialmente conhecido como soda cáustica, foi disponibilizado pela empresa REALTEC, na forma de escamas e suas especificações técnicas encontram-se na Tabela 4, abaixo.

Tabela 4 – Características do Hidróxido de Sódio.

Grau de Impurezas	99,40%
pH	14,00
Densidade relativa	2,13 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Realtec (2020).

Além do uso do hidróxido de sódio, foi também utilizado silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), que é um líquido viscoso, incolor, fornecido pela empresa Quimidrol, sendo a relação do óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) para óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) de 2,10 a 2,20. Suas especificações técnicas encontram-se na Tabela 5.



Tabela 5 – Características do Silicato de Sódio.

pH	10,5 até 12
Densidade relativa	1,56 a 1,58 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Quimidrol (2020).

O uso da solução de hidróxido de sódio (10 mol/L) está fundamentado em trabalhos realizados anteriormente pela comunidade acadêmica Joinville (HARTMANN, 2016; ARAUJO, 2017; SCHWAAB, 2019; LOBO, 2017).

#### 3.1.4. Areia

A quantidade de areia adicionada à argamassa foi determinada pelo índice de consistência, através da mesa de abatimento, com o objetivo de alcançar a consistência de trabalho de uma argamassa comercial. Foi utilizada areia comercial indicada para uso em argamassas (MF 60/70 ARG), módulo de finura de 1,31, diâmetro máximo de 0,6 mm, massa específica aparente de 2,58 g/cm<sup>3</sup> e massa unitária aparente de 1,50 g/cm<sup>3</sup>, comercializada pela Mineração Veiga, proveniente de cava no município de Araquari - SC, sendo sua composição formada por 99% de sílica.

### 3.2. METODOLOGIA

A metodologia experimental ocorreu em duas etapas. A primeira refere-se as formulações, produção das misturas para moldagem dos corpos de prova e tempo de cura. A segunda etapa consistiu na execução dos ensaios propostos para caracterização das amostras. Os ensaios laboratoriais foram realizados nos Laboratórios do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC, ambos na cidade de Joinville/SC.

#### 3.2.1. Definições das formulações e produção das amostras

As formulações tiveram como objetivo analisar a influência do teor de CaO no comportamento das argamassas geopoliméricas adicionadas do resíduo Dregs. A partir das composições de todas as matérias primas e baseando-se nas relações existentes nas literaturas,

foi definida uma amostra de referência (REF - 0% Dregs), Metacaulim, rico em aluminossilicatos e baixo teor de CaO. Após a definição do referencial, determinou-se as formulações adicionadas de Dregs, nas porcentagens 5, 10, 15% (em massa), buscando do referencial dados do índice de consistência, fixando a concentração da solução ativadora de Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio, o precursor Metacaulim e o agregado miúdo areia, a fim de analisar o comportamento nos estados fresco e endurecido das argamassas geopoliméricas.

Existe uma área, dentro de limites estabelecidos, que atinge melhores resultados para as propriedades, tanto para os precursores quanto para os ativadores. E o teor, em porcentagem, de cada componente do cimento geopolimérico visa reproduzir argamassas comerciais. A fim de definir as formulações de argamassa geopolimérica com quantidades certas de matérias-primas, foi necessário encontrar uma relação S/L adequada para a dosagem escolhida, conferindo uma boa trabalhabilidade à argamassa. A Tabela 6 apresenta as composições, em massa, utilizadas na produção dos corpos de prova.

Tabela 6 – Formulação das amostras, em massa, para produção dos corpos de prova.

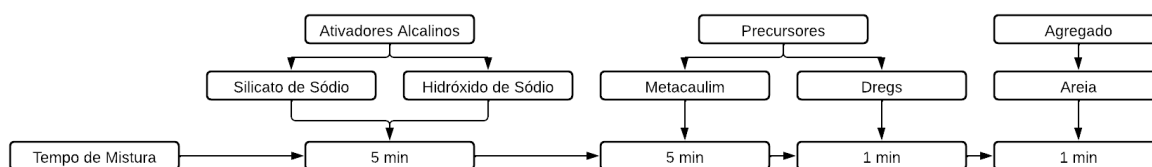
Código	MK (g)	Dregs (g)	HS (g)	SS (g)	Areia (g)	Sólido/ Líquido	Líquido/ Sólido	H <sub>2</sub> O/ Sólido
REF	100,00	0,00	27,27	54,55	45,00	1,22	0,82	0,44
05%DR#150	100,00	5,00	27,27	54,55	41,00	1,28	0,78	0,40
10%DR#150	100,00	10,00	27,27	54,55	41,00	1,34	0,74	0,39
15%DR#150	100,00	15,00	27,27	54,55	41,00	1,41	0,71	0,37
05%DR#45	100,00	5,00	27,27	54,55	41,00	1,28	0,78	0,39
10%DR#45	100,00	10,00	27,27	54,55	41,00	1,34	0,74	0,38
15%DR#45	100,00	15,00	27,27	54,55	41,00	1,41	0,71	0,37

Fonte: Autora (2021).

A literatura indica a razão molar SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ideal para a produção de geopolímeros variando de 3,0 a 5,5 (DAVIDOVITS, 1982; VASSALO, 2013). A razão molar de SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, para o cimento geopolimérico utilizado neste trabalho foi em torno de 2,86. Toda a água da mistura provém da solução de hidróxido de sódio e do silicato de sódio. Dessa forma, as alterações na relação sólido/líquido alterariam a quantidade desses materiais proporcionalmente. Porém, por mais que seja necessário adicionar mais água à medida que aumenta a quantidade de Dregs nas formulações, a sílica presente no silicato de sódio compensa, em partes, a perda que eventualmente pode ocorrer nas propriedades mecânicas do material.

O procedimento de mistura para produção dos corpos de prova prismáticos segue a sequência apresentada na Figura 15. Este procedimento está fundamentado em trabalhos realizados anteriormente pela comunidade acadêmica (HARTMANN, 2016; ARAUJO, 2017; KRAUSE, 2021; JUNIOR, 2017). Iniciou-se colocando a solução ativadora Hidróxido de Sódio 10 mol/L + Silicato de Sódio, na argamassadeira automática, misturando durante 5 minutos. Ao término desse tempo, colocou-se o precursor, Metacaulim, misturando-o manualmente por 1 minuto para melhor homogeneização do material, para então posicionar na argamassadeira e misturar por mais 5 minutos. Após este processo, adicionou-se o resíduo Dregs, acionando o misturador por 1 minuto. Por fim, com o misturador ligado, o agregado miúdo, areia, foi adicionado e misturado por mais 1 minuto.

Figura 15 – Fluxograma da produção das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autora (2021).

Após o processo de mistura, retirou-se o material necessário para os ensaios no estado fresco e com o restante foram moldados os corpos de prova. Os moldes para corpos de prova prismáticos com dimensão 4 cm x 4 cm x 16 cm, e paredes removíveis, foram devidamente lubrificadas com vaselina sólida. Preencheu-se os moldes em duas camadas, Figura 16, espalhadas com o auxílio do nivelador, e levou-se a mesa de adensamento mecânico entre cada camada, aplicando 30 quedas, conforme a norma NBR 13270 (ABNT, 2005b). Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados, e deixados completar a cura, duas unidades foram utilizadas para ensaios no estado endurecido com 7 dias de cura e duas unidades com 28 dias de cura.

Figura 16 – Corpos de prova prismáticos no estado fresco



Fonte: Autora (2021)

### 3.2.2. Ensaio no estado fresco

O índice de consistência da argamassa geopolimérica com adição de Dregs, no estado fresco, foi referenciado nas argamassas convencionais de Cimento Portland, sendo o primeiro ensaio a ser executado para caracterizar o material. Também foi analisado o tempo de início e de fim de pega do material através do aparelho de Vicat.

Após a mistura da argamassa geopolimérica, foi executado o ensaio para determinação do índice de consistência, Figura 17, segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016). A aparelhagem necessária à execução do ensaio consiste na mesa para índice de consistência, molde troncônico, soquete metálico e régua metálica. Após a limpeza da aparelhagem, o molde foi posicionado no centro da mesa, segurado firmemente e preenchido com três camadas de alturas iguais de argamassa, aplicando em cada camada, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete, para distribuí-las uniformemente. Então, foi realizado o rasamento da argamassa com a régua metálica à borda do molde troncônico e retirado o molde verticalmente, acionando a manivela da mesa, de modo que ela suba e caia 30 vezes em 30 segundos. Após a última queda da mesa, mediu-se o espalhamento da argamassa, em três diâmetros uniformemente distribuídos ao longo do perímetro. Por fim, calculou-se o índice de consistência da argamassa com média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros.

Figura 17 – Ensaio de Índice de Consistência.



Fonte: Autora (2021).

Com a argamassa ainda no estado fresco, foi realizado o ensaio para determinação do tempo de pega, segundo a NBR 16607 (ABNT, 2018). Para a realização deste ensaio, utilizou-se o aparelho de Vicat, Figura 18. Como o aparelho é manual, antes de realizar qualquer leitura, deve-se descer a agulha da haste móvel até que ela toque a placa-base, fora do molde e ajustar o indicador na marca zero da escala. Também, antes de iniciar o ensaio, encheu-se o molde com a argamassa e a posiciona no aparelho de Vicat. Após 30 minutos, desceu-se suavemente a agulha até que houvesse contato com a pasta. Então soltou-se as partes móveis, permitindo que a agulha penetre verticalmente na pasta, lendo a indicação na escala 30 segundos após o instante em que a agulha foi solta. A leitura foi registrada na escala e o tempo contado a partir do instante em que a água e o cimento entram em contato (instante zero). O ensaio de penetração foi repetido no mesmo corpo de prova, em posições separadas, que distem no mínimo 10 mm da borda do molde e entre elas, a intervalos de tempo espaçados. A agulha de Vicat deve ser limpa imediatamente após cada penetração. O ensaio parou no tempo em que a distância entre a agulha e a placa-base é de  $(4 \pm 1)$  mm.

Para a determinação do tempo de fim de pega, a agulha de Vicat foi substituída, para facilitar a observação exata de penetrações pequenas. Inverteu-se o molde cheio sobre a placa-base, para que os ensaios fossem realizados na face oposta do corpo de prova, que estava em contato com a placa-base. A realização das medidas segue os padrões citados no parágrafo

anterior, com intervalos de tempo ampliados. O fim do ensaio se deu no instante em que a agulha não deixa marcas na argamassa.

Figura 18 – Aparelho de Vicat para a realização do ensaio de tempo de pega.

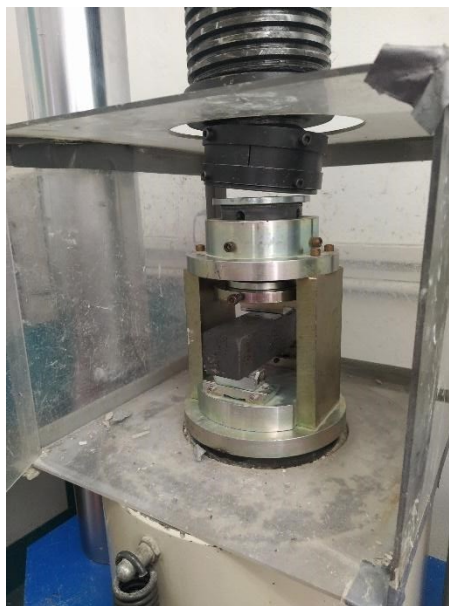


Fonte: Autora (2021).

### 3.2.3 Ensaio no estado endurecido

Os ensaios no estado endurecido, resistência à tração na flexão e à compressão, foram realizados para verificação das propriedades mecânicas do material, utilizando o equipamento EMIC DL3000N, Figura 19, e definidos pela NBR 13279 (ABNT, 2005b). Estes ensaios foram realizados com 7 e 28 dias de cura dos corpos de prova prismáticos. O primeiro ensaio a ser executado foi o de flexão, onde dois corpos de prova 4x4x16 cm, são centralizados no equipamento, um por vez e aplicado uma carga de  $50 \pm 10$  N/s até a ruptura. O ensaio de resistência à compressão foi realizado nos corpos de prova rompidos anteriormente pelo ensaio de flexão, utilizando a prensa hidráulica, modelo PC 220 I, marca EMIC. A carga de 500 N/s foi aplicada até a ruptura dos corpos de prova. A partir dos dados obtidos, foi calculada a resistência média para cada um dos ensaios.

Figura 19 – Equipamento para ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão.



Fonte: Autora (2021).

### 3.2.4 Propriedades físicas

Para o estudo das propriedades físicas foi selecionada a mistura com adição de Dregs que apresentou os resultados de resistência à compressão mais elevados, e analisado a absorção de água, índice de vazios e massa específica, segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005a). No ensaio de absorção de água por imersão, a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis do corpo de provas, tendo como resultado o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis em relação à sua massa em estado seco.

Para executar o ensaio a amostra foi seca em estufa à temperatura de  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  por um período de 72 horas. E então, registrou-se a massa da amostra ( $m_s$ ). Após este processo, a amostra foi imersa em água à temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e mantida durante 72 horas nesta condição. Completada a etapa de saturação, colocou-se a amostra em um recipiente cheio de água, que foi progressivamente levada à ebulição e mantida por um período de 5 horas, mantendo constante o volume da água. A seguir, deixou-se a água esfriar naturalmente até a temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Registrou-se a massa com auxílio de balança hidrostática ( $m_i$ ). Por fim, retirou-se a amostra da água e a enxugou com pano úmido, registrando sua massa ( $m_{sat}$ ). Deste ensaio calculou-se valores para absorção de água, índice de vazios, massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa específica real, conforme as Equações 02 a 06:

Absorção de água (A);

$$A = \frac{msat - ms}{ms} \times 100 \quad (02)$$

Índice de vazios (Iv) - relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra;

$$Iv = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad (03)$$

Massa específica da amostra seca (s) - relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra;

$$s = \frac{ms}{msat - mi} \quad (04)$$

Massa específica da amostra saturada (sat) - relação entre a massa do material saturado o volume total da amostra;

$$sat = \frac{msat}{msat - mi} \quad (05)$$

Massa específica real (r) - relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

$$r = \frac{m}{ms - mi} \quad (06)$$



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

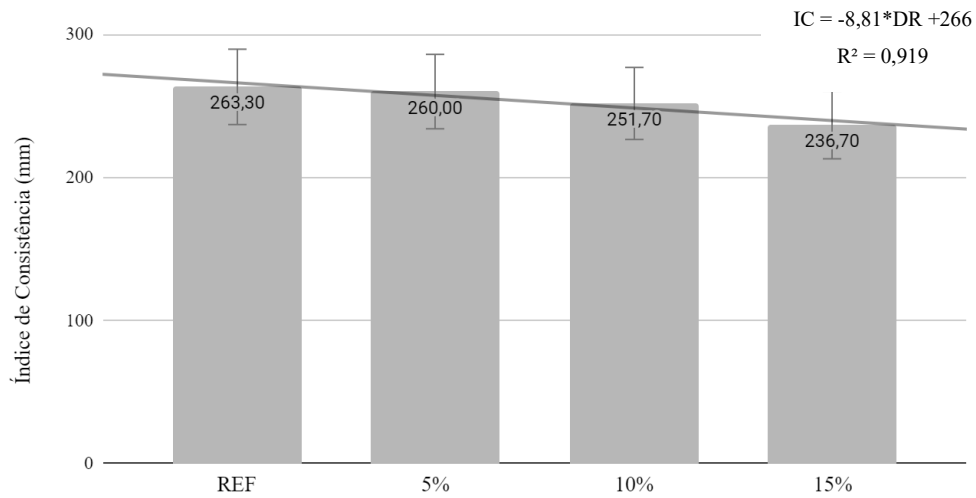
Neste capítulo são apresentados os resultados detalhados obtidos durante os ensaios, conforme especificado na metodologia desta pesquisa.

### 4.1. ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Os resultados obtidos para o índice de consistência (IC) das argamassas geopoliméricas estão apresentados nas Figuras 20 e 21. Analisando ambas as figuras, observa-se que ao adicionar o resíduo Dregs, independente da granulometria utilizada, a mistura apresenta uma diminuição da fluidez. Essa redução segue uma equação do primeiro grau, cujo valor do ajustamento das curvas são 0,92 para adição de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) e 0,85 para adição de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ). Isso significa que 92% dos dados com Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) e 85% dos dados das formulações com Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) podem ser explicados através de uma reta, sendo que 8% e 15% dos dados, respectivamente, são afetados por variáveis não controláveis.

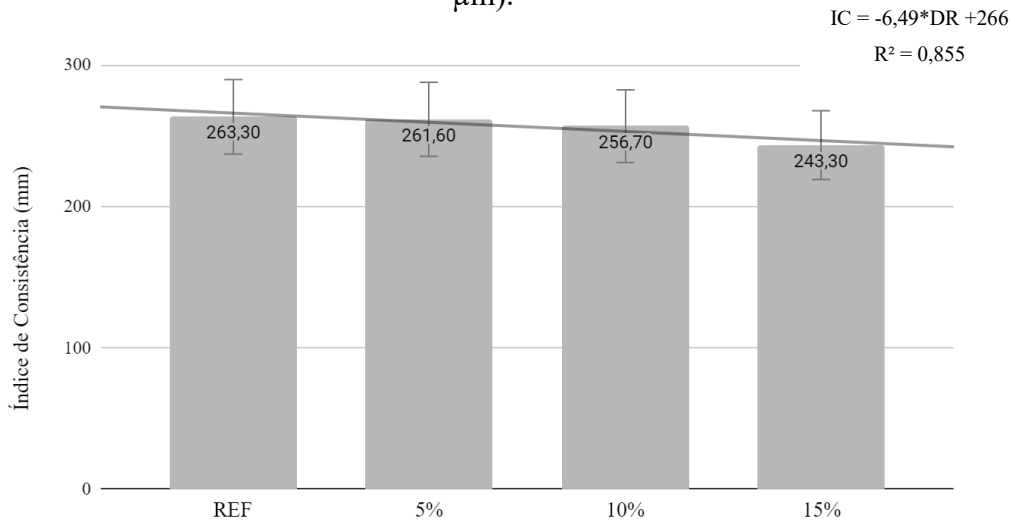
A adição de Dregs a 45  $\mu\text{m}$  apresenta uma redução mais significativa, fato que pode ser comprovado pelo maior coeficiente de inclinação da reta de tendência do espalhamento em relação a adição de Dregs a 150  $\mu\text{m}$ . Comparando os resultados, as argamassas geopoliméricas que alcançaram resultados mais próximos valor estabelecido na norma NBR 16541 (ABNT, 2016) de  $270 \pm 5$  mm e da mistura de referência, onde não há o resíduo Dregs adicionado, foram as com 5% de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ), 10% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) e 15% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ).

Figura 20 – Índice de Consistência da argamassa geopolimérica com adição de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022)

Figura 21 – Índice de Consistência da argamassa geopolimérica com adição de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022)

Os dados das Figuras 20 e 21 mostram que houve uma diferença entre os resultados médios de índice de consistência. No estudo realizado por Novais *et al.* (2018) a argamassa de referência foi a amostra mais fluida, enquanto a com 25% de Dregs apresentou redução de 19% no índice de fluidez (espalhamento), causado pelo incremento da relação sólido/líquido. Para o presente estudo tem-se também a amostra de referência como a mais fluida, enquanto as com maior adição de Dregs, 15% em 45  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ , tiveram uma redução de 7,59% e 10,10%, respectivamente.

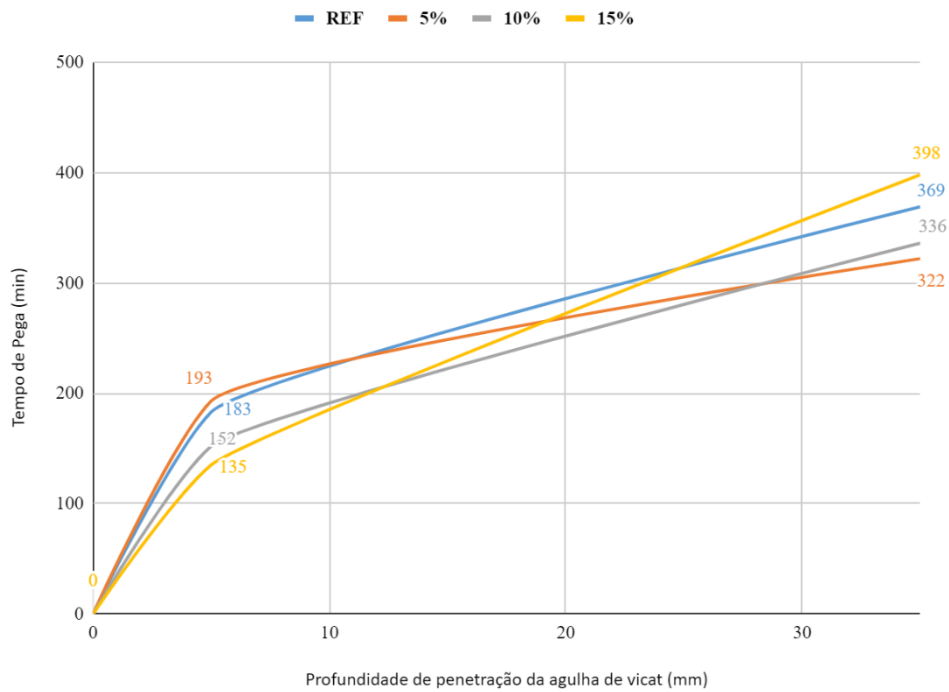
Porém, quando levado em conta o desvio padrão, os resultados não mostram diferença significativa entre si. A 16541 (ABNT, 2016) explica que valores mais altos para o índice de consistência se devem a uma elevada relação água/cimento utilizada na mistura, produzindo argamassas mais fluidas, enquanto os índices de consistência mais baixos são explicados pela menor relação água/cimento utilizada na mistura, produzindo argamassas mais secas, de difícil trabalhabilidade. Portanto, analisando a relação sólido/líquido das misturas, tem-se que os melhores índices de consistência foram as misturas 10% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) e 15% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ).

#### 4.2. TEMPO DE PEGA

O ensaio de tempo de pega foi realizado com todas as misturas. As Figuras 22 e 23 mostram o momento de início de preparação das misturas, e o início e fim da pega segundo a NBR 16607 (ABNT, 2018). A mistura que levou mais tempo para iniciar a pega foi a amostra com 5% de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) e àquela com menos tempo foram as de 15% de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ), 10% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) e 15% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ). Já em relação ao fim da pega a mistura que demorou mais tempo foi a de 15% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) e a com menos tempo foi a de 5% de Dregs a 150  $\mu\text{m}$ . A Figura 22 mostra gráfico de início e fim de pega da mistura de referência, com 0% de Dregs e as misturas de 5%, 10% e 15% de Dregs a 150  $\mu\text{m}$ . E na Figura 23, tem-se o início e fim de pega da mistura de referência, com 0% de Dregs e as misturas de 5%, 10% e 15% de Dregs a 45  $\mu\text{m}$ .

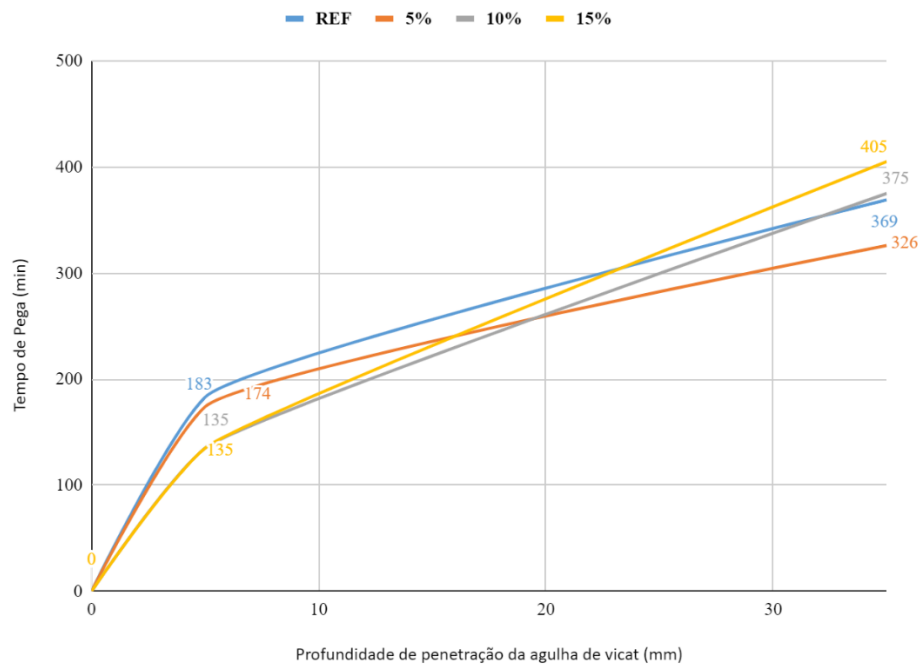
Segundo estudos de Zhang et al. (2018), os geopolímeros alcançam alta resistência à compressão nos primeiros dias devido ao seu rápido tempo de cura. O tempo de pega para cimentos Portland tradicionais é em média de 600 a 720 minutos, enquanto para geopolímeros é em torno de 120 a 240 minutos. A média do estudo realizado para início de pega foi de 158 minutos e para o fim da pega foi de 361 minutos. Espera-se que um aumento no teor de sílica solúvel promova geopolymerização mais rápida (KARAKOÇ *et al.*, 2014) e, portanto, tempo de pega mais curto. Durante a mistura, os resíduos podem revestir parcial ou totalmente algumas partículas de metacaulim, interrompendo fisicamente sua reação com os ativadores alcalinos. A relação entre tempo de pega e a cinética de geopolymerização foi estudada em outras investigações (KARAKOÇ *et al.*, 2014), onde pega mais rápida é associada à dissolução maior e mais rápida das partículas de cinzas volantes moídas que levam a uma melhor polimerização e endurecimento da fase gel, enquanto Novais *et al.* (2018) observaram pega mais curta ao adicionar alumínio em pó às composições.

Figura 22 – Início e fim de pega de argamassa geopolimérica com adição de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022)

Figura 23 - Início e fim de pega de argamassa geopolimérica com adição de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022)

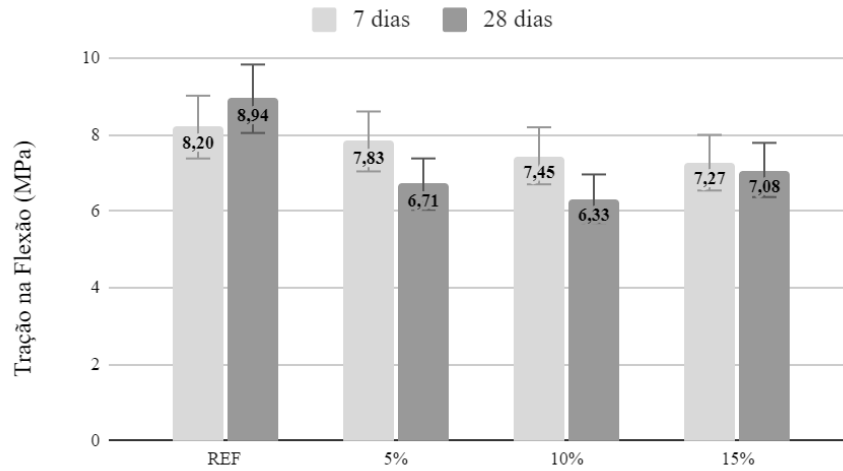
O estudo desenvolvido por Novais *et al.* (2019) mostrou o tempo de pega inicial semelhante para todas as formulações, mas o tempo de pega final variou de 180 a 210 minutos, sendo que os resíduos atrasam fortemente tanto a pega inicial quanto a pega final das composições. Observou-se também um aumento duplo ao adicionar 37,5% em peso de Dregs em comparação com a composição de referência, sem Dregs. Tem-se que a razão para esta grande variação sugere que a incorporação dos Dregs modifica a cinética da geopolimerização. Os Dregs atuam como enchimento - isso significa que eles não são reativos e não contribuem para a geopolimerização (Novais *et al.*, 2018).

Novais *et al.* (2019) observou que um maior teor de água favorece a dissolução da matéria-prima, mas é prejudicial para as reações de policondensação, mostrando que o início da pega ocorre mais cedo, sugerindo uma maior taxa de geopolimerização (dissolução de precursores). No entanto, após algumas horas a cinética de geopolimerização dessas composições muda, sugerindo uma policondensação mais fraca/lenta (reação de liberação de água) devido a um maior teor inicial de água. Esses resultados mostram a possibilidade de adequar o cenário tempo de pega das argamassas pela adição de Dregs, pela água e ativadores, o que pode ser uma vantagem não apenas na produção de geopolímeros, mas principalmente no transporte e armazenamento de misturas.

#### 4.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

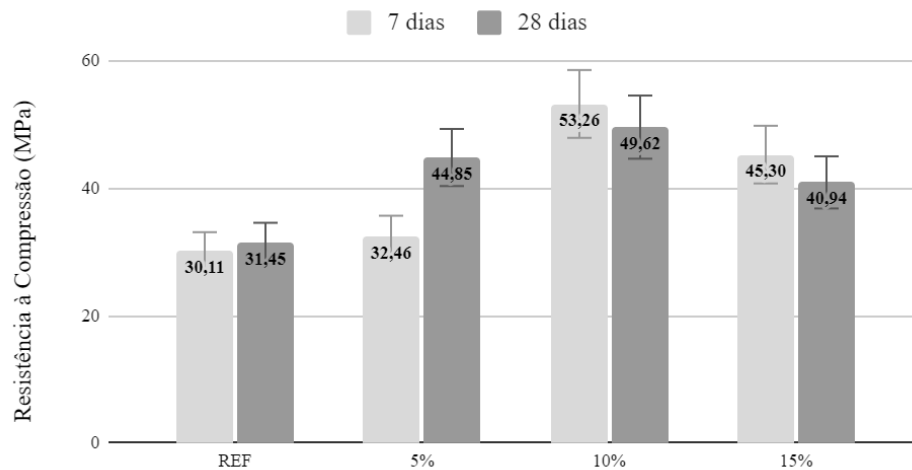
As Figuras 24 e 25 apresentam os resultados dos estudos considerando as adições de 5, 10 e 15% de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) obtidos com os ensaios de resistência à tração na flexão e com a resistência à compressão, aos 7 e 28 dias. As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados dos estudos considerando as adições de 5, 10 e 15% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) obtidos com os ensaios de resistência à tração na flexão e com a resistência à compressão, aos 7 e 28 dias.

Figura 24 - Resistência à tração na flexão avaliando a adição dos Dregs (150  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022).

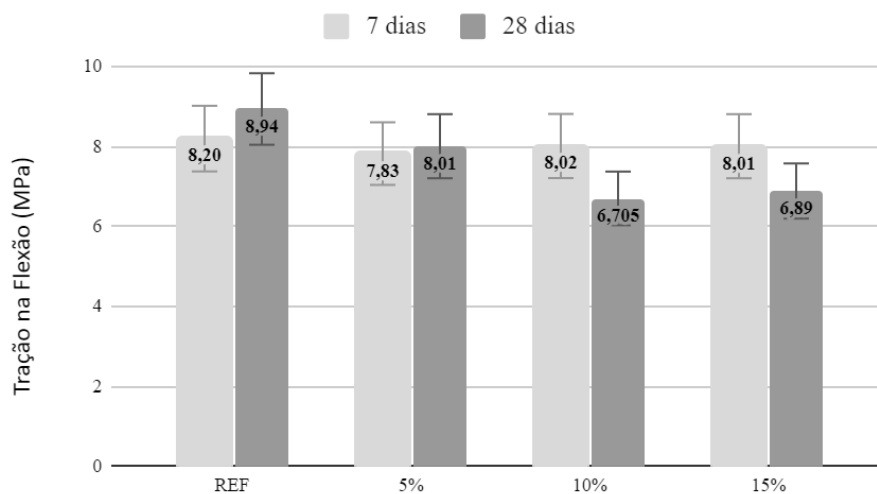
Figura 25 - Resistência à compressão avaliando a adição dos Dregs (150  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022).

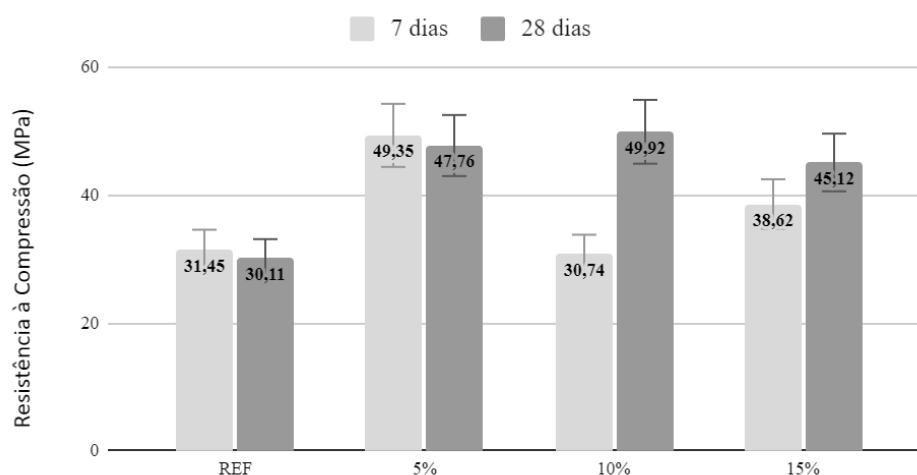
Observa-se nas Figuras 24 e 25, que todas as misturas geopoliméricas com adição dos Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) reduziram a resistência à tração na flexão em relação à argamassa geopolimérica de referência (REF). Já em relação à resistência à compressão, observa-se que todas as misturas com adição dos Dregs apresentaram resultados acima das misturas REF.

Figura 26 - Resistência à tração na flexão avaliando a adição dos Dregs (45  $\mu$ m).



Fonte: Autora (2022).

Figura 27 - Resistência à compressão avaliando a adição dos Dregs (45  $\mu$ m).



Fonte: Autora (2022).

No estudo das misturas geopoliméricas com adição dos Dregs a 45  $\mu$ m, observa-se nas Figuras 26 e 27, que as misturas com Dregs reduziram a resistência à tração na flexão em relação à argamassa geopolimérica de referência sem os Dregs (REF). Assim como em relação à resistência à compressão, têm-se que as misturas com adição dos Dregs obtiveram resultados acima das misturas REF.

Analisando todas as misturas, e a variação da resistência à compressão em 7 e 28 dias de cura, tem-se que as reações mais relevante de geopolimerização ocorrem nos primeiros dias, dando origem a produtos estáveis. Comparando os resultados da tração na flexão com a compressão, nota-se que a disparidade entre a referência e os elementos adicionados de Dregs

é menor na tração e que os valores de resistência à 7 e 28 dias também variam em menor escala. A NBR 6118 (2004) define que a resistência a tração na flexão de argamassas a base de cimento Portland pode ser calculada por  $0,3 * \sqrt{fck}$ . Por exemplo, para uma amostra de argamassa com resistência à compressão de 40 MPa tem-se, aproximadamente, uma resistência à flexão de 1,89 MPa, portanto, a resistência encontrada nas argamassas geopolimérica possuem valores maiores que o tradicional.

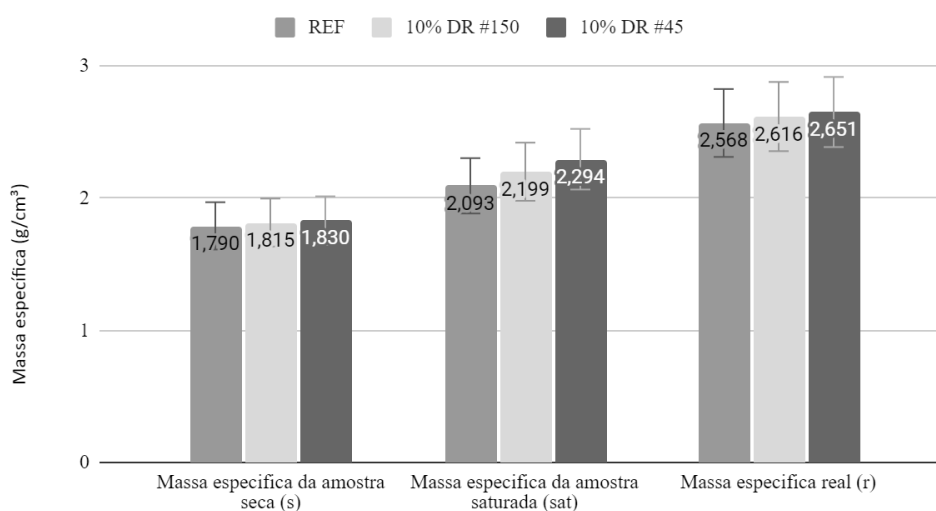
Por fim, os resultados máximos na compressão foram obtidos aos 7 dias com 10% de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) com 53,26 MPa e aos 28 dias com 10% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ) com 49,92 MPa, revelando um ganho de até 69,4% em relação ao geopolímero sem as adições de Dregs. Novais *et al.* (2018) afirmam que o ganho de resistência pode ser devido ao efeito de preenchimento, quando o tamanho de partícula fina melhora a compacidade da mistura. No estudo realizado por Novais *et al.* (2018), a adição de 25% de resíduos teve como resultado da resistência à compressão em 21 MPa, que correspondeu a um aumento de cerca de 34% em relação à argamassa de referência. O estudo também apresentou como resultado a diminuição da resistência à compressão com o tempo em misturas contendo entre 10 e 20% de Dregs, assim como observado nesta pesquisa para adições de 5% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ), 10 e 15% de Dregs (150  $\mu\text{m}$ ).

#### 4.4. PROPRIEDADES FÍSICAS

Em relação as propriedades físicas, foram selecionadas as misturas com 10% de Dregs tanto para 45  $\mu\text{m}$  (1,83  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), como para 150  $\mu\text{m}$  (1,81  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) cujo valores para resistência à compressão foram maiores em relação à amostra REF (1,79  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), analisando-se a absorção de água, índice de vazios, massa específica segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2009). Os ensaios de propriedades físicas foram realizados logo após os ensaios de resistência mecânica, onde as metades que não foram rompidas à compressão foram utilizados para os ensaios, conforme descrito na seção anterior. Os resultados são apresentados nas Figuras 28 e 29.

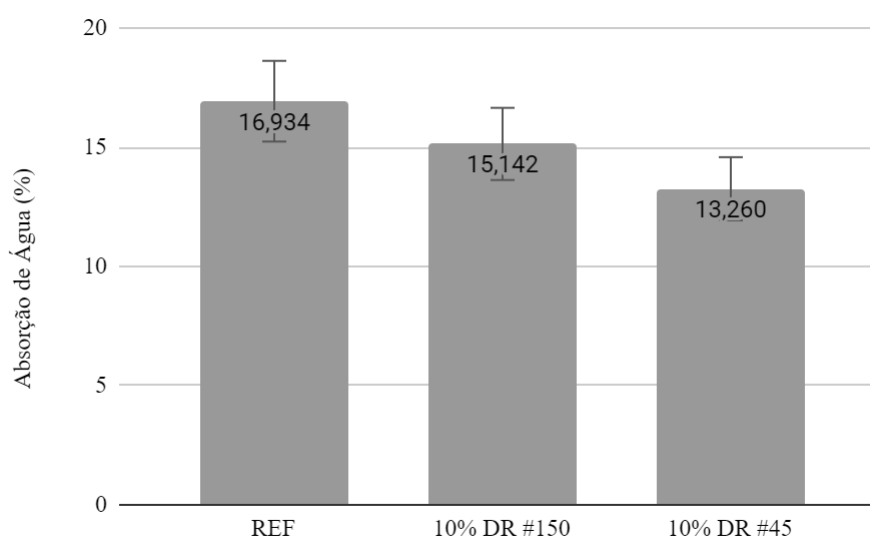


Figura 28 – Massa específica da amostra seca, saturada e real das misturas REF, 10% Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) e 10% Dregs (45  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022).

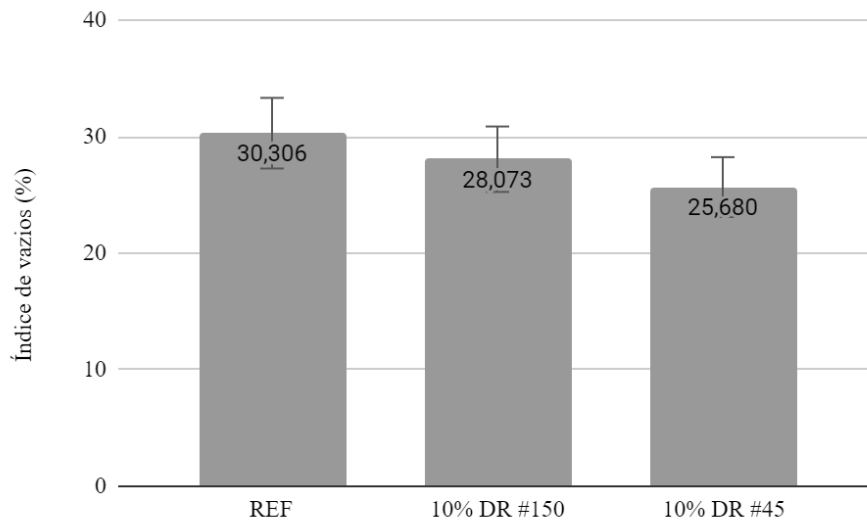
Figura 29 – Absorção de água das misturas REF, 10% Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) e 10% Dregs (45  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022).

Na Figura 30 tem-se os resultados para o índice de vazios. Segundo Novais et al (2018), espera-se que este índice seja menor à medida que a quantidade de resíduos aumente, demonstrando uma diminuição na porosidade das argamassas, sendo possível perceber este efeito nas misturas estudadas.

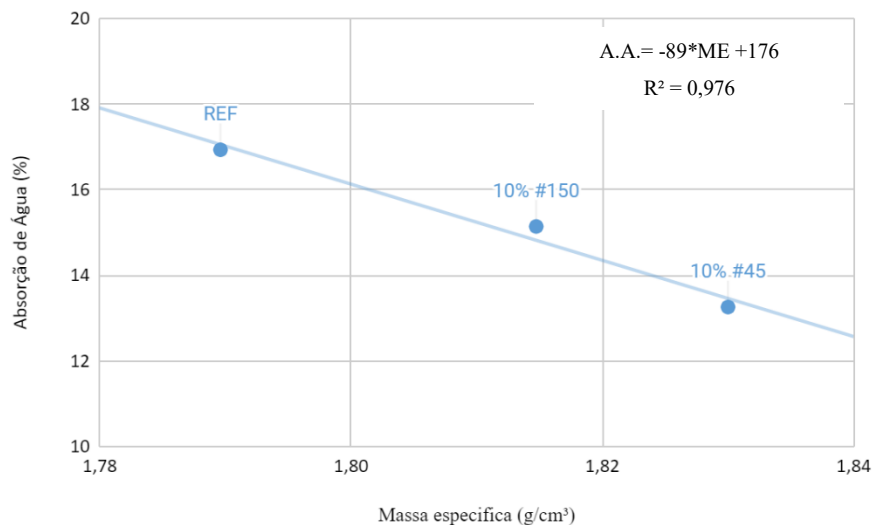
Figura 30 – Índice de vazios das misturas REF, 10% Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) e 10% Dregs (45  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022).

Na Figura 31 é apresentada uma correlação entre a absorção de água e a massa específica, onde à medida que a massa específica aumenta, a absorção de água diminui. Segundo Jerônimo (2022), em termos práticos, os materiais apresentam características habituais em relação aos resultados comuns na área de engenharia de materiais. Observa-se que existe um grau de ajustamento de 0,976, ou seja, aproximadamente 98% dos resultados são descritos por esta reta, e 2% são afetados por variáveis não controláveis.

Figura 31 – Correlação entre absorção de água e massa específica das misturas REF, 10% Dregs (150  $\mu\text{m}$ ) e 10% Dregs (45  $\mu\text{m}$ ).



Fonte: Autora (2022).

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou como objetivo principal investigar o efeito da adição de resíduos Dregs da Indústria de Papel e Celulose nas propriedades de argamassas geopoliméricas, trazendo como possibilidade a reciclagem deste resíduo com alto poder de poluição incorporando-o à construção civil

A caracterização das argamassas no estado fresco foi realizada pelos ensaios de índice de consistência (*Flow table test*) e tempo de pega. Para o índice de consistência obtiveram-se aberturas variando de 236 mm a 263 mm. A argamassa com a menor abertura (236 mm) foi a com maior porcentagem de adição de Dregs, 15%, na granulometria de 150  $\mu\text{m}$ . A adição de Dregs nas argamassas geopoliméricas influenciou na trabalhabilidade, efeito este devido a relação sólido/líquido. Já no ensaio de tempo de pega, a utilização de Dregs em argamassas os tempos de início e fim de pega foram, em média, de 155 e 360 minutos, respectivamente. Em comparação com a mistura de referência, onde os tempos de início e fim de pega foram de 183 e 369 minutos, respectivamente, observa-se uma tendência a diminuição de início de pega, mas com uma estabilidade no tempo de fim de pega.

Embora a trabalhabilidade das argamassas tenha reduzido ao adicionar o resíduo, houve uma melhoria significativa na resistência à compressão, maiores que 45 MPa, observando aumentos de até 77% em relação ao geopolímero sem adição. Já a influência da adição dos Dregs na resistência à tração na flexão é menos significativa, sendo que todas as argamassas produzidas resultaram na faixa de 6 a 9 MPa, e tiveram redução dos valores de resistência à tração. Considerando o custo e o tempo de moagem dos resíduos Dregs, a abertura da peneira para o ensaio de finura característica não expressou mudança significativa nos resultados, sendo o processo desinteressante. A análise das propriedades físicas no estado endurecido foi realizada com as argamassas com melhores desempenhos na resistência à compressão.

A presença de 10% de Dregs nas formulações produziu um aumento da densidade aparente e a diminuição da absorção de água. Os resultados mostram que a incorporação de resíduos não afeta negativamente a ocorrência de geopolimerização, sugerindo que, nessas condições, eles são não reativos ou apresentam fraca reatividade.

Após análise de todos os resultados, tem-se que nas condições estudadas, o melhor desempenho encontra-se na mistura adicionada de 10% de Dregs (45  $\mu\text{m}$ ). Concluí-se também que o uso de dregs como aditivo em argamassas geopoliméricas é promissor, sendo uma alternativa para sua gestão atual de disposição em aterro.

## REFERÊNCIAS

ALVARENGA, C. B. C. S. **Síntese e caracterização de geopolímeros à base metacaulim e micropartículas de vidro soda-cal.** 2018, 81p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ARAÚJO, L. E. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas com o uso de resíduo de construção e demolição.** 2017. 49 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos – Classificações. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607:** Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BANDEIRA, Z. R. **Utilização Racional de Resíduos da Indústria de Celulose como Matéria-Prima para a Construção Civil – Considerações Ambientais.** 1996. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1996.

BARBOSA, L. C. W. **Substituição parcial da cal hidratada pelos resíduos da indústria de papel e celulose - dregs e grits - na produção de argamassa de revestimento.**

2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.

CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B.; **Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus: propriedades relevantes.** *Cerâmica*. v. 60, n. 353, p. 69-76, 2014.

DAVIDOVITS, J.; **30 Years of successes and failures in geopolymer applications. Market Trends and Potential Breakthroughs.** *In: Geopolymer 2002 Conference*. Melbourne: 2002.

DAVIDOVITS, J.; **Geopolymer Cement** review. *In: Geopolymer Science and technics*. Technical Paper. Geopolymer Institute Library. Vol. 21, p. 1-11. 2013.

DAVIDOVITS, J.; **Geopolymers chemistry and properties.** *In: Proceedings of First European Conference On Soft Mineralurgy, Geopolymer '88*. p. 25–48. França, Compiègne, 1988.

Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/265076752\\_Geopolymer\\_Chemistry\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/265076752_Geopolymer_Chemistry_and_Applications). Acesso em: 05 abril 2021.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: Inorganic polymeric new materials.** *Journal of Thermal Analysis*. v. 37, p. 1633-1656, 1991.

ELYAMANY, H. E.; ELMOATY, A. E. M. A.; ELSHABOURY, A. M.; **Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar.** *Construction and Building Materials*. v. 184, p. 111-127, 2018.

FERREIRA, D. J. O. **Análise do escoamento de gases em uma caldeira de recuperação química via fluidodinâmica computacional** – Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Química da UFMG, Belo Horizonte 2007.

FOELKEL, C. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto – Parte 05: Resíduos Minerais.** *In: Eucalyptus Online Book & Newsletter*. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 173p. 2011.

GEO-POL. **Cimento Geopolimérico.** 2013 Disponível em: <http://www.geopolymer.com.br/PDF/GPCimento2013.pdf> . Acesso em 20 de abr. 2021.

GEPOLYMER INSTITUTE. **70.000 tonnes geopolymer concrete for airport.** 2014. Disponível em: < <https://www.geopolymer.org/news/70000-tonnes-geopolymer-concrete-airport/>> . Acesso em: 10 nov. 2022.

HARTMANN, E. **Argamassa geopolimérica utilizando pó de alumínio como agente formador de poros.** 2016. 54 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

HASSELL. **University of Queensland Global Change Institute**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/461298/university-of-queensland-global-change-institute-hassell>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

JUNIOR, S. V. **Desenvolvimento de argamassas geopoliméricas porosas a partir do uso de pó de lâmpada fluorescente e pó de alumínio**. 2017. 63 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

KARAKOÇ, M. B.; TÜRKMEN, I.; MARAS, M. M.; KANTARCI, F.; DEMIRBOGA, R.; TOPRAK, M.U.; **Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar**, Constr. Build. Mater. v. 72, p. 283–292, 2014.

KRAUZER, R. V. **Estudo da influência das fibras de aço e polipropileno nas propriedades do concreto autoadensável**. 2021. 85 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

KRETZER, M. B.; **Argamassas com cimento geopolimérico à base de metacaulim, cinza volante e escória granulada de alto forno ativado por solução alcalina de silicato**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.

LOBO, S. B. **A influência da substituição parcial do metacaulim por cinza de casca de arroz em argamassas geopoliméricas**. 2017. 45 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHEN, R. N. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente**. Sustentabilidade em Debate, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jun. 2012.

NOVAIS, R. M., CARVALHEIRAS, J., SENFF, L., LABIRINCHA, J. A. **Upcycling unexplored dregs and biomass fly ash from the paper and pulp industry in the production of eco-friendly geopolymer mortars: A preliminary assessment**. Construction and Building Materials, n. 184, p. 464-472, 2018.

NOVAIS, R. M., CARVALHEIRAS, J., SENFF, L., SEABRA, M. P., PULLAR, R.C., LABIRINCHA, J. A. **In-depth investigation of the long-term strength and leaching behaviour of inorganic polymer mortars containing green liquor Dregs**. Journal of Cleaner Production, n. 220, p. 630-641, 2019.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J (ed.). **Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications**. Sawston: Woodhead Publishing, 2009.

RAMOS, G. A. **Cimento Geopolimérico contendo resíduo do polimento de placas cerâmicas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2017.

RIBEIRO, A. P. **Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos**. 2010. 142p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ROQUE, Cerâmica. **Soluções Inovadoras em Geopolímeros**. Disponível em: <https://www.ceramicaroque.com.br/web/solucoes-inovadoras-em-geopolimeros>. Acesso em: 10 nov. 2022.

SANTA, R. A. A. B.; **Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2016.

SANTOS, R. F. et al. **Addition of Dregs in mixed mortar: evaluation of physical and mechanical properties**. In: LI, B. et al. Characterization of minerals, metals, and materials series. Springer International Publishing, Cham, 2018. p. 419- 427.

SCOLARO, Letícia Maria. **Argamassas geopoliméricas com areia descartada de fundição obtidas por ativação em meio alcalino sódico**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Área: Cerâmica) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2019.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **SNIC 50 Anos**. Rio de Janeiro 2006. Disponível em: [www.snic.org.br](http://www.snic.org.br). Acesso em: 01 mar. 2021.

SINGH, Jagmeet; SINGH, S. P. **Geopolymerization of solid waste of non-ferrous metallurgy – A review**. Journal of Environmental Management. Vol. 251. 2019.

SCHWAAB, S.; **Efeito de cinzas volantes, escória de alto forno e ativadores nas propriedades de cimentos geopoliméricos**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.

TORRES, S.O.A.; CARVALHO, J.M.F.; ALVARENGA, R.C.S.S.; PEDROTI, L.G.; BRIGOLINI, G.J.; PEIXOTO, R.A.F. **Utilização de finos de dregs na produção de concretos**. In: 59o Congresso Brasileiro de Concreto, 2017, Bento Gonçalves, RS. Anais do 59o Congresso Brasileiro de Concreto, 2017.

VASSALO, E. A. S.; **Obtenção de Geopolímero a partir de Metacaulim ativado**. 2013. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2013.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cement Sustainability Initiative**. Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050. Paris, 2010. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>. Acesso em: 1 maio 2021.

ZHANG, P. et al. **A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar**. Composites Part B: Engineering. v. 152, p. 79-95, 2018.