

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M

**PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE CONCRETO COM  
UTILIZAÇÃO DE CINZAS LEVES**

Vinícius Lampert

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre - RS  
2022

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M

Vinícius Lampert  
Engenheiro Civil

**PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE CONCRETO COM  
UTILIZAÇÃO DE CINZAS LEVES**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia na área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Porto Alegre - RS  
2022

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M

Vinícius Lampert

**PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE CONCRETO COM  
UTILIZAÇÃO DE CINZAS LEVES**

Orientadora: Profa. Dra. Annelise Kopp Alves

BANCA EXAMINADORA:

Dra. Adriane de Assis Lawisch Rodriguez

Dra. Tania Maria Basegio

Dra. Waleska Campos Guaglianoni

Prof. Dr. Afonso Reguly  
Coordenador do PPGE3M

*Dedico esta dissertação à minha esposa Adaiane,  
pelo amor e incentivo ao longo da minha jornada;  
aos meus pais Pedro e Italina; aos meus irmãos  
Bernardete, Adriano, Claudete e Carine  
e a todas as pessoas que de alguma forma  
contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela oportunidade de realização deste trabalho e de crescimento pessoal e profissional.

Ao laboratório LANTAC, por disponibilizar equipamentos para a realização de alguns ensaios, à professora Ângela, ao Ari e ao Airton pelo apoio na realização deste trabalho.

De maneira especial, à minha orientadora Dr.<sup>a</sup> Annelise Kopp Alves, pelos ensinamentos, pela orientação e pela dedicação na realização deste trabalho.

Agradeço à minha esposa, Adaiane, pelo seu amor, companheirismo, apoio e compreensão em todos os momentos, me incentivando a enfrentar sempre novos desafios.

Aos colegas do curso de pós-graduação, pela ajuda e constante troca de experiências durante esse período.

## RESUMO

Cada vez mais pode-se observar a preocupação de empresas em serem mais eficientes na fabricação de seus produtos. Isso contribui para um desenvolvimento econômico e sustentável das atividades industriais. No caso da indústria da construção civil, não é diferente, estudos e pesquisas trazem excelentes resultados na fabricação de produtos, utilizando resíduos em suas composições. Como na fabricação do concreto, por exemplo, utilizar as cinzas leves em substituição parcial ao uso de cimento. O uso desse resíduo contribui na redução de extração de componentes da natureza e causando um menor impacto ambiental. Contudo, o objetivo deste trabalho foi analisar as propriedades físicas e mecânicas de concretos com adição parcial de cinzas leves oriundas da queima de carvão. Para tanto, foram confeccionadas 4 formulações contendo 0, 10, 20 e 30% de cinzas em substituição ao cimento. Para a produção dos concretos, foram utilizados areia, cimento, cinza, brita, aditivo e água. Na produção dos corpos-de-prova, empregaram-se uma betoneira, uma balança de precisão e um *kit slump*. Moldaram-se os corpos-de-prova com uma forma cilíndrica de 100 x 200 mm, aplicando uma camada de desmoldante para facilitar a retirada das amostras. Após o preenchimento dos moldes, aguardou-se 48 horas para remover as peças e, então, submergi-las em água até serem posteriormente ensaiadas. Foram realizados os ensaios de compressão (ABNT NBR 5739) e módulo de elasticidade após 3, 7, 28 e 63 dias de cura. Para os ensaios de índice de vazios, massa específica (ABNT NBR 9778) e absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 9779). Comparando-se os resultados de resistência mecânica à compressão após 3 e 63 dias, observou-se um esperado aumento na resistência, da ordem de 10% para as amostras sem cinzas, e de 88% para as amostras com adição de 30% de cinzas. Contudo, ao se analisarem os efeitos da adição de cinza após 63 dias, a adição de 30% de cinzas elevou em apenas 3% a resistência mecânica à compressão em comparação com os resultados das amostras sem cinzas. Em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, no concreto com adição de cinza, com 63 dias de cura, pôde-se constatar resultados semelhante entre as amostras, com destaque para a amostra contendo 30% de cinzas, que apresentou uma absorção 11% menor do que a amostra sem cinzas. Esse fenômeno foi provavelmente ocasionado pelo menor índice de vazios, também medido para a

amostra com 30% de cinzas. A relevância deste trabalho, do ponto de vista científico e industrial está em apontar às concreteiras a possibilidade de adquirir cimento puro e adicionar cinzas, reduzindo assim o custo do metro cúbico do concreto e contribuindo também com a redução de impactos ambientais e com a logística reversa na construção civil.

**Palavras-chaves:** concreto; cinzas leves; propriedades físicas; propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

More and more companies are concerned about being more efficient in manufacturing their products. This optimized manufacture contributes to the economical and sustainable development of industrial activities. In the case of the construction industry, it is no different. Studies and research bring excellent results in manufacturing products using waste in their compositions. As in the manufacture of concrete, for example, using light ash in partial replacement of the use of cement. Using this residue contributes to reducing the extraction of components from nature and causing less environmental impact.

The objective of this work was to analyze the physical and mechanical properties of concrete with the partial addition of light ash from coal burning. For this, 4 samples were made containing 0; 10, 20 and 30% of ash replacing cement. For the production of concrete, sand, cement, ash, gravel, additive and water were used. In the production of the specimens, we use a concrete mixer, precision scale, the slump kit. The mixing of aggregates in the mixer first occurred with sand, gravel, and a little water, after we used cement and more water, then we used the plasticizer additive. After mixing, we did the slump test, aiming to obtain a 160 mm slump. The specimens were shaped with a cylindrical shape of 100 x 200 mm, applying a layer of release agent to facilitate the removal of the samples. After filling the molds, it was waited 48 hours to remove the parts and then submerge them in water until they were later tested. The compression tests (ABNT NBR 5739) and modulus of elasticity were performed after 3, 7, 28 and 63 days of curing. For the tests of voids index, specific mass (ABNT NBR 9778) and water absorption by capillarity (ABNT NBR 9779) the results were collected at 74 and 73 days, respectively. Comparing the results of compressive strength after 3 and 63 days, an expected increase in strength was observed, of the order of 10% for samples without ash and 88% for samples with addition of 30% ash. However, when analyzing the effects of adding ash after 63 days, the addition of 30% ash increased the compressive strength by only 3% when buying the results of samples without ash. Regarding the capillary water absorption test, with the addition of ash, similar results can be seen between the samples, with special emphasis on the sample containing 30% ash, which showed an 11% lower absorption than the sample without ash, phenomenon probably caused by the lower voids index also measured for the sample with 30% ash. This work is relevant from a scientific and industrial point of view



because concrete companies, for example, will be able to acquire pure cement and add ashes, thus reducing the cost of the cubic meter of concrete; in addition, it also contributes to the reduction of environmental impacts and reverse logistics in civil construction.

**Keywords:** concrete; light ash; physical properties; mechanical properties.

## SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Objetivos	3
2.1	Objetivo geral	3
2.2	Objetivo específico	3
3	Limitações da pesquisa	4
4	Revisão bibliográfica	5
4.1	Concreto	5
4.1.1	Durabilidade do concreto	6
4.1.2	Fatores que influenciam a durabilidade do concreto	6
4.2	Cinzas Leves	9
4.2.1	Composição e classificação das cinzas	10
4.2.2	Características físicas e químicas	11
4.2.3	Aplicação de cinzas leves	11
4.2.4	Influência da aplicação de cinzas no concreto	12
4.3	Cimento Portland, definição e composição	15
4.3.1	Alguns tipos de cimento Portland	15
4.4	Sustentabilidade e concreto	17
5	Metodologia	19
5.1	Materiais	20
5.2	Métodos	20
5.3	CARACTERIZAÇÕES	20
5.3.1	Análise de distribuição granulométrica	20
5.3.2	Caracterização mineralógica	21
5.3.3	Caracterização microestrutural	21
5.3.4	Resistência mecânica à compressão	21

5.3.5	Módulo de elasticidade	21
5.3.6	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	22
5.3.7	Absorção de água por capilaridade	23
6	Resultados e discussão	25
6.1	Composição mineralógica da cinza leve	25
6.2	Distribuição granulométrica da cinza leve	25
6.3	Caracterização microestrutural (MEV)	26
6.3.1	Cinza leve	26
6.3.2	Corpos-de-prova de concreto	27
6.4	Resistência mecânica à compressão	30
6.5	Ensaio de módulo de elasticidade	32
6.6	Absorção de água por capilaridade	34
6.7	Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica	35
7	Conclusão	40
8	Sugestões para trabalhos futuros	41

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Número de publicações relacionadas aos termos “flyash” e “cement”, 2001-2021. ....	2
Figura 2 - Imagem ilustrativa de estrutura de concreto permeável. ....	7
Figura 3 - Fluxograma da metodologia empregada para realização desta pesquisa. ....	19
Figura 5 – Resultado da análise por DRX da cinza leve. ....	25
Figura 6 – Distribuição granulométrica da cinza leve utilizada neste trabalho. ....	26
Figura 7 – Imagem obtida por MEV da cinza leve. ....	27
Figura 8 - Imagens obtidas por MEV da superfície dos concretos: (a) sem adição de cinza, (b) com 10% de cinzas, (c) com 20% de cinzas) e, (d) com 30% de cinzas. ....	28
Figura 9 - Resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão em relação ao tempo de cura e adição de cinzas. ....	31
Figura 10 - Ensaio de módulo de elasticidade dos corpos-de-prova em função das cinzas leves adicionadas, mostrando todo o período de cura das amostras. ....	33
Figura 11 - Imagem fotográfica indicando a altura de água percolada no interior do corpo-de-prova após o ensaio de absorção de água por capilaridade (amostra contendo 0% de cinzas leves). ....	34
Figura 12 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade em função do teor de cinzas leves adicionado. ....	35
Figura 13 – Resultado do ensaio de absorção de água. ....	36
Figura 14 - Resultados do ensaio de Índice de vazios das amostras contendo diferentes teores de cinza leve. ....	36
Figura 15 - Resultados do ensaio de massa específica da amostra seca contendo diferentes teores de cinza leve em comparação com a amostra referência. ....	37

Figura 16 - Resultados do ensaio de massa específica real contendo diferentes teores de cinza leve.....38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ação da cinza leve no procedimento de hidratação do cimento..	13
Tabela 2 - Composição do cimento Portland.....	15
Tabela 3 - Tipos de cimentos disponíveis no mercado brasileiro .....	16

## LISTAS DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	absorção de água
C	absorção de água por capilaridade
CPs	corpos-de-prova
DRX	difração de raios X
$I_v$	índice de vazios
MEV	microscopia eletrônica de varredura
$M_i$	massa do corpo de prova saturado e imerso em água
$M_s$	massa do corpo- de-prova seco
$M_s$	massa específica do corpo- de-prova seco
$M_{sat}$	massa do corpo-de-prova saturado
$M_u$	massa do corpo- de-prova saturado
$P_r$	massa específica real
$P_{sat}$	massa específica da amostra saturada
S	área da seção transversal

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais empregados na construção civil, com aproximadamente dois bilhões de toneladas usadas em todo o planeta de maneira consistente <sup>[1]</sup>. É tão utilizado no Brasil e no mundo que se pode afirmar ser ele o segundo material mais consumido, atrás apenas da água <sup>[1]</sup>. No entanto, seu custo de produção ainda é bastante elevado para as empreiteiras. Também é relevante enfatizar a importância de se buscar alternativas mais sustentáveis para a sua fabricação <sup>[2]</sup>.

A história do concreto remete à história do cimento, seu fundamental componente, que produz a reação química na composição da pasta aderente <sup>[3]</sup>. Entre os componentes da formulação do concreto incluem-se: o cimento Portland (que pode ser encontrado em cinco classes distintas: comum, alto-forno, compósito, pozolânico e de alta resistência mecânica inicial), a água e os agregados (grosso ou fino) <sup>[4]</sup>.

O uso do concreto de cimento Portland teve enorme evolução nas duas últimas décadas <sup>[5]</sup>. Com isso, tem crescido também a demanda pelo uso de recursos naturais disponíveis. Dessa maneira, cada vez mais insumos alternativos são estudados e inseridos na fabricação de materiais como o concreto <sup>[6]</sup>. Ainda, de acordo com Macedo *et al.* <sup>[5]</sup>, a inclusão de alguns recursos naturais ou o reaproveitamento de algum “resíduo” na confecção do concreto pode oferecer diversas vantagens tanto ambientais quanto de tecnologia e econômicas. Afinal, o cimento, componente fundamental do concreto, tem um custo elevado e sua produção também pode provocar prejuízos ambientais. A adição de aditivos como sílica ativa, cinzas, entre outros, tem ganhado uma importância notória na indústria de cimento e concreto. Seu estudo, portanto, tem também grande relevância científica <sup>[6]</sup>.

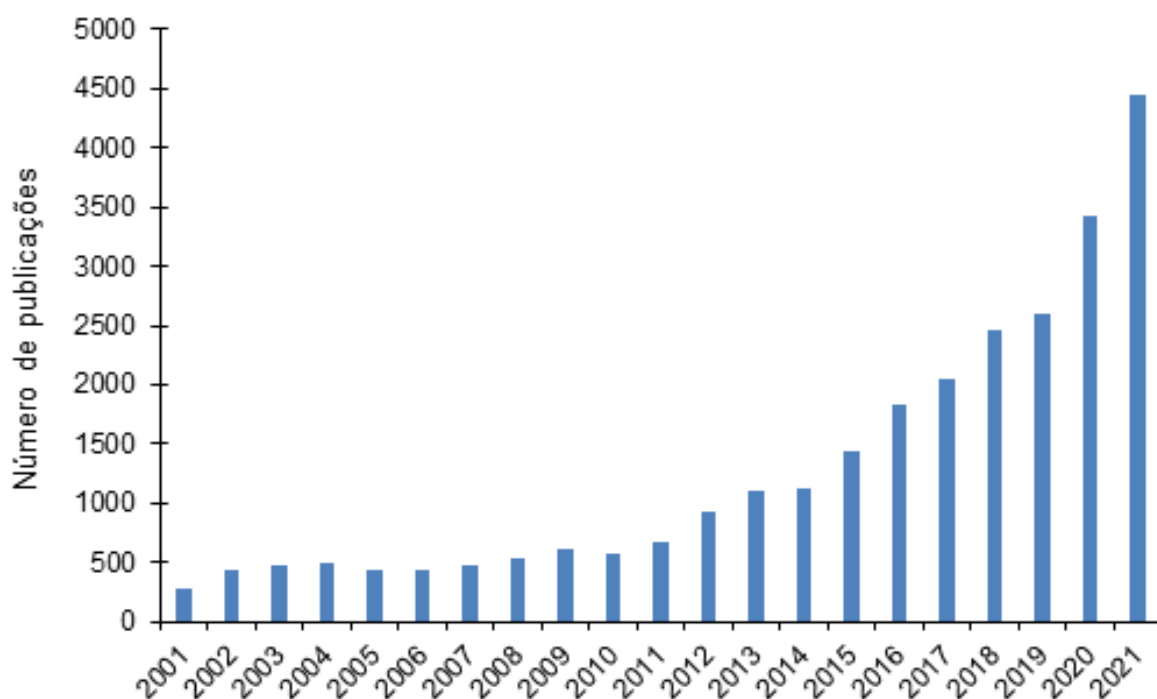
Entre esses materiais que têm várias características físicas, estão as cinzas leves. As cinzas leves compõem um pó oriundo da queima de carvão em termoelétricas. Sua granulometria é mais fina se comparadas a cinzas pesadas, e seu resfriamento é mais rápido, tendo uma formação mais vítrea, contendo em média 60 a 85% de sílica amorfa e alto potencial aglomerante. Ainda, necessitam de pouco beneficiamento quando usada na substituição parcial do cimento para a fabricação de concretos <sup>[7,8]</sup>. De acordo com Hoppe Filho <sup>[9]</sup>, as cinzas leves apresentam ação pozolânica, e, no momento em que são introduzidas nas matrizes cimentícias,



demonstram um comportamento adequado e esperado, contribuindo para o aumento da resistência mecânica do concreto, após os 28 dias de cura.

A utilização de cinzas leves em substituição ao cimento é um assunto bastante relevante. O interesse por parte de pesquisadores vem crescendo consistentemente, como pode-se observar pelo levantamento realizado no portal de periódicos Science Direct utilizando as palavras-chave “*flyash*” e “*cement*” em conjunto, buscando publicações no período de 2001 a 2021 (Figura1).

Figura 1 - Número de publicações relacionadas aos termos “*flyash*” e “*cement*”, 2001-2021.



Fonte: Próprio autor.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar as propriedades físicas e mecânicas de concretos com a adição de diferentes teores de cinzas leves oriundas da queima de carvão, com base na substituição parcial de cimento.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o efeito da substituição parcial de cimento (Portland) por cinzas leves, nas propriedades mecânicas e físicas na fabricação de concreto.

### **2.2 Objetivo específico**

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar a cinza leve utilizada (distribuição granulométrica, composição mineralógica e microestrutura) e definir formulações;
- obter corpos-de-prova com diferentes quantidades de cinzas leves em substituição parcial ao cimento;
- avaliar o efeito do percentual de substituição de cimento por cinza leve, em diferentes tempos de cura (3, 7, 28 e 63 dias)
- avaliar a cura das amostras em diferentes idades (3, 7, 28 e 63 dias);
- avaliar a influência da cura dos corpos-de-prova, nas propriedades físicas e mecânicas nos diferentes tempos de cura;

### **3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA**

Os itens abaixo descrevem algumas limitações deste trabalho de pesquisa:

- Nos experimentos, foram utilizadas cinzas leves oriundas da queima de carvão. Outras cinzas também podem ser adicionadas ao concreto. Porém, elas não foram investigadas neste trabalho. Outras cinzas de carvão podem conter composição química e granulometria diferentes das utilizadas neste trabalho, o que possivelmente afetaria os resultados.
- A utilização de outros processos de cura das amostras poderia alterar as características dos corpos-de-prova de concreto, ocasionando resultados diferentes dos encontrados neste trabalho.
- Uma relação de quantidade água-cimento em relação ao aditivo diferente daquela empregada nesta pesquisa poderia interferir nos resultados.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Concreto

O concreto produzido com cimento é um dos materiais mais comuns na construção civil. Algumas características como sua elevada resistência mecânica à compressão e sua resistência à combustão fizeram com que ganhasse amplo espaço na indústria da construção em todo o território nacional. Na indústria da construção civil, nos dias atuais, utiliza-se uma quantidade superior a 10 bilhões de toneladas de concreto anualmente. Há estimativas de que até 2050 ocorrerá um crescimento na demanda anual por concreto de aproximadamente 18 milhões de toneladas por ano. Isso se deve ao crescente aumento da população no período [10, 11].

Pode-se definir o concreto como um material compósito, de partículas aglutinadas [12]. Essa mistura hidráulica é composta de agregados, água, cimento e aditivos. Para cada finalidade, existe um tipo de concreto. Por exemplo aquele que exerce função estrutural, subdivide-se ainda entre variedades de baixa, média ou alta resistência. Os mais usados são os concretos estruturais com moderada resistência mecânica a compressão, em torno de 20 e 40 MPa após os 28 dias de idade [13,14].

A NBR 12655 (ABNT, 2015) [12], caracteriza o concreto por ser uma mistura homogênea contendo agregado miúdo, agregado graúdo, cimento e água. O material é bastante valorizado na construção principalmente pelo fato de ser muito resistente à água e de fácil operação e execução, além de ser normalmente de baixo custo [13,15]. Os agregados configuram cerca de 60 a 75% do volume total dos concretos.

Um dos fatores que podem influenciar as características e as microestruturas do material é a dosagem do concreto. Para se obter a dosagem adequada, é importante que a qualidade e a quantidade dos componentes estejam em equilíbrio [16]. O tempo necessário para se iniciar a pega do aglomerante é denominado de estado fresco do concreto. Esse período é considerado importante por determinar algumas características como trabalhabilidade, tempo de pega e densidade [13,17]. Através do ensaio de abatimento do cone (*slump test*) (ABNT, 1998), pode-se determinar a trabalhabilidade. A mistura final dos componentes do concreto pode ser chamada de estado endurecido. Nesse momento, os componentes não agem entre si. Nesse estado final, o concreto deve ter condições de suportar os esforços necessários para determinado uso.

Existem alguns ensaios para verificar a resistência mecânica do concreto. O mais usado é o de resistência mecânica à compressão. Para verificar a resistência mecânica à compressão, aplica-se uma tensão e se observa o momento em que o material se rompe. Outros ensaios também são importantes, como o de resistência mecânica à tração, cisalhamento, flexão e torção [13,14]. A microestrutura é um fator muito importante no concreto. A avaliação microestrutural do concreto é um método para indicar suas propriedades morfológicas [18].

#### 4.1.1 Durabilidade do concreto

A durabilidade do concreto pode ser definida como a sua capacidade de suportar ações de tempestades e intempéries, bem como de ataques químicos a abrasão, entre outras situações de serviço. Considera-se também a conservação do concreto nos termos da sua vida útil e da manutenção de seu aspecto, suas propriedades e seu potencial de uso quando exposto ao ambiente para o qual foi projetado. Considera-se que sua vida útil chega ao fim quando suas propriedades se tiverem deteriorado ao ponto de tornar seu uso inseguro e caro para manter [13, 14, 19].

Uma das principais causas para a degradação precoce de estruturas de concreto pode ser a corrosão induzida por carbonatação ou ainda por cloretos. Esses fatores podem tornar sua vida útil menor do que a esperada em seu projeto, ocasionando elevados custos de manutenção. O desempenho inadequado de muitas estruturas de concreto quanto à durabilidade tem ocasionado maior preocupação e atenção em todo o planeta. Além da agressividade do ambiente, outros fatores como o dimensionamento da mistura de concreto bem como a execução colaboram para determinar a vida útil do concreto [20, 21, 22, 23, 24].

#### 4.1.2 Fatores que influenciam a durabilidade do concreto

##### a) Permeabilidade e porosidade

Porosidade é definida como a facilidade de movimentação de líquidos e gases no centro do concreto [25]. As propriedades dos poros desempenham um papel importante nas propriedades de permeabilidade do concreto. Aumentando a porosidade, a quantidade de coordenação dos poros aumenta e a organização entre os poros melhora muito. Resultados demonstram que o aumento da porosidade, bem como a redução da tortuosidade e a elevação dos canais de infiltração têm como

resultado um acréscimo da permeabilidade [26]. Na Figura 2, que segue, podemos observar que o concreto pode ter poros permitindo o acesso de água e outros componentes para o interior da peça, fazendo com que se inicie um processo de corrosão.

Figura 2 - Imagem ilustrativa de estrutura de concreto permeável.



Fonte: <http://www.tecnosilbr.com.br/conteudo/?p=298>. Acessado em 08/08/2022.

A água de amassamento é considerada um dos fatores fundamentais para a permeabilidade da pasta de concreto. Através dela, determinam-se o espaço total e o espaço não preenchido, após o total de água ter sido utilizado pelas reações de hidratação, como também pela exalação do ambiente [25]. Quanto maior for a relação agregado/ligante, mais elevada será a permeabilidade. Isso pode ocorrer devido a microfissuras existentes na área de transição na interface da pasta de cimento com os agregados, que posteriormente estabelecem interconexões facilitando a permeabilidade do concreto [13]. A redução do volume de vazios capilares pode ser um dos fatores para controlar a permeabilidade do concreto. Outras condições que ajudam na diminuição da permeabilidade do concreto são a relação água/cimento, a utilização apropriada do ligante e processos de adensamento e cura corretos [13].

#### b) Deterioração superficial por abrasão

É comum ocorrer desgaste por abrasão na superfície do concreto, acarretando perda de massa devido ao atrito gerado pela elevada movimentação de veículos em pavimentos de indústrias e demais setores [13,14]. A deterioração pode ocorrer pelo

atrito ao deslizar objetos sobre a superfície do material, ocasionando raspagem e fricção [27]. A resistência mecânica à abrasão na superfície do concreto pode ser influenciada por vários fatores na sua composição, por exemplo, o tipo de aditivos químicos utilizados, o traço, a capacidade de resistência mecânica do concreto e a proporção de agregados graúdos e miúdos [25, 28]. A cura úmida do concreto por um período prolongado, proporciona um aumento na resistência mecânica à abrasão em sua superfície. As estruturas de concreto que possuem maior resistência mecânica em sua camada de superfície e baixo índice de exsudação apresentam uma maior resistência mecânica à abrasão quando comparado a estruturas feitas com concretos leves e porosos [14,29].

Mehta e Monteiro [13], defendem que se utilize o concreto com resistência mecânica a compressão de pelo menos 41 MPa em ambientes com circulação severa e abrasiva em sua superfície. Outro detalhe que se deve considerar é a proporção água/cimento, que deve ser baixa, e o tamanho dos agregados graúdos, que devem ter tamanho menor que 12,5mm [13]. A resistência mecânica à abrasão do concreto está diretamente ligada à sua funcionalidade. Conhecendo como o material se comporta quando submetido a abrasão, é possível ter maior controle de qualidade e adequá-lo ao uso a que será destinado [30].

A resistência mecânica a abrasão superficial de concretos pode ser definida por três técnicas. Uma dessas técnicas é determinada pela ABNT na NBR 12042 (ABNT, 2012). A segunda metodologia foi produzida pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e identificada como ASTM C 779 (ASTM, 2012). A terceira é uma metodologia da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC, 2016) [14] e estipula o desgaste por abrasão ao simular um caminho de 500 m trilhados por corpos-de-prova de 50 mm x 50 mm, com uma pressão de 0,06 MPa. O material abrasivo usado é o carbetto de silício. O resultado é calculado por meio de uma média do desgaste em cinco pontos do corpo de prova, em milímetros (CIENTEC, 2016) [14].

### c) Agressão causada por sulfatos

Quando ocorre ataque de sulfatos no concreto, pode-se observar fissuras, lascamento, deterioração nas bordas, aparência esbranquiçada e expansão da massa. Quando o concreto tiver fissuras, torna-se conseqüentemente mais

permeável, intensificando sua deterioração. Quando a massa se expande, a estrutura sofre sérios problemas estruturais. O resultado da ação dos sulfatos é a diminuição gradual da resistência mecânica do concreto [13,25,31]. Padilha Júnior *et al.* (2015) indicam que existem duas formas pelas quais o concreto pode ser atacado pela ação de sulfatos: com origem externa ou interna [14,32].

Quando o ataque por sulfato acontece de forma interna, deve-se à contaminação do agregado por gipsita ou, pela presença de um teor elevado de sulfato no cimento no momento da produção do concreto [13,14]. Já os ataques por sulfatos de origem externa ocorrem por devido à contaminação de águas e solos por cálcio, magnésio, sulfato de sódio e potássio, que reagem com os sulfatos da massa de concreto resultando na produção de etringita, que ocasiona a expansão e, posteriormente, a fissura [25].

O cimento Portland possui em sua composição produtos de hidratação. O hidróxido de cálcio e os compostos hidratados contém alumina e são mais vulneráveis a ataques externos. A utilização de materiais com componentes ligantes, que diminuem o volume desses compostos, proporciona um aumento na resistência mecânica a ataques desse tipo.

Existem vários materiais que, quando incluídos, elevam essa resistência mecânica. Dentre eles, pode-se citar a cinza leve [14,30]. Sendo assim, torna-se viável o uso de cimento Portland contendo em sua composição um baixo volume de aluminato tricálcico, que possui resistência mecânica a sulfatos, ou de outros tipos de cimentos, que têm escória ou pozolanas na sua composição.

Outro fator importante a ser observado é a permeabilidade e a densidade do concreto perante ataques por sulfato. Quanto mais permeável e poroso for o concreto, maior será a passagem de água e lixiviado do óxido de cálcio em sua parte superficial. É na superfície que ocorre a reação com o dióxido de carbono, criando o carbonato de cálcio, com manchas esbranquiçadas sobre a superfície do concreto, chamadas também de eflorescência [25].

## 4.2 Cinzas Leves

A NBR 12653 define cinzas como resíduos finamente segmentados originados da combustão de carvão mineral granulado ou fragmentado com ação pozolânica



[14,34]. Na fabricação de cinzas com a produção de energia elétrica em usinas termelétricas, esse carvão é pulverizado passando pela região de queima, onde o carbono e os materiais voláteis são incinerados em temperaturas altas. Ao mesmo tempo, acontece a fusão de algumas das impurezas, como o feldspato, a argila e o quartzo [13]. O material fundido solidifica-se no aspecto de substâncias esféricas vítreas, e é transportado nas áreas com temperaturas mais reduzidas. Grande parte desse material é conduzido por um exaustor de gás e recolhido por precipitadores eletrostáticos [13, 14].

A quantidade que será recolhida pelos precipitadores eletrostáticos corresponde a aproximadamente três quartos do total gerado por meio de caldeiras. Essa fração é chamada de cinzas leves. Outra parte normalmente fica depositada no fundo da caldeira, caracterizando cinzas pesadas [14,35].

As cinzas leves representam um volume acima de 70% das cinzas de carvão residual produzidas. São partículas pequenas processadas em equipamento específico, onde seu tamanho varia de 0,5 a 300  $\mu\text{m}$  [45, 46, 47]. No ano de 2015, as porcentagens de uso de cinzas leves foram 70% na China, de 43% para a Índia e de 53% para os EUA [47].

Logo, existe um potencial grande para maior utilização. Além de reduzir os custos e as proporções de descarte, as cinzas leves podem também compensar recursos de valor mais elevado ou não renováveis [45].

A sílica é o principal componente das cinzas leves. Carbono e alumina também estão presentes em menores quantidades. Os componentes existentes nas cinzas são utilizados como medida para determinar sua classificação [36,37].

#### 4.2.1 Composição e classificação das cinzas

A ASTM C 618 (2005) propõe duas classificações distintas para as cinzas leves: classe F e classe C, dependendo de sua composição. Essa classificação se dá pelo percentual de teores de compostos de alumina, óxido de ferro, silicato e cálcio. Quando o montante de teores desses compostos for superior a 50%, as cinzas leves são classificadas como classe C. Quando esse montante supera os 70%, são classificadas como classe F.

As cinzas leves de classe F têm como origem a queima de carvão betuminoso. Por isso, contêm menor quantidade de cálcio. Por consequência, não têm características cimentantes. As cinzas de classe C provêm da queima de carvão subbetuminoso e, por conter elevado teor de CaO, apresentam características cimentícias em presença de água [37].

#### 4.2.2 Características físicas e químicas

As características químicas e físicas das cinzas leves podem diferir significativamente de uma usina termelétrica para outra ter devido a variações químicas entre as jazidas e o carvão. Perdas no procedimento de ignição e em conclusões incompletas dos procedimentos de combustão originam cinzas com altos níveis de carbono. Pesquisas demonstram que as propriedades das cinzas têm se aperfeiçoado bastante nos últimos anos [36,38].

As cinzas leves são constituídas por minerais não combustíveis, uma vez que são produto da porção inorgânica do carvão restante do procedimento de combustão a temperaturas que variam entre 1200 e 1700 °C [14, 39].

As cinzas leves têm, em geral, morfologia esférica e são constituídas por fases cristalinas e amorfas [40, 41]. As fases cristalinas mais comumente presentes são caulinita, ilita, siderita, munita e quartzo [39].

A distribuição granulométrica do material é fina e as partículas podem variar em tamanho de menos que 1 µm até 100 µm de diâmetro [14,37]. Contudo, aproximadamente 50% dessas partículas costuma ser menor que 20 µm [43]. A massa específica das cinzas leves costuma ser de aproximadamente 2,3 g/cm<sup>3</sup> com diâmetro médio das partículas de 25,66 µm [42].

#### 4.2.3 Aplicação de cinzas leves

A cinza leve é usada na fabricação do concreto em substituição parcial ao cimento Portland comum. A cinza tem função de aglutinante nos produtos cimentícios. Essa mistura é benéfica ao meio ambiente pois seu uso diminui a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido para a atmosfera durante o processamento de cimento [52,53]. A cinza leve também confere um melhor desempenho mecânico aos produtos cimentícios por períodos mais longos, aumentando sua durabilidade [53, 53, 54, 55,56].

Na produção de concreto, os agregados reciclados vêm sendo usados de forma considerável, pois a matéria-prima na natureza é de volume limitado. Converte-se com esse fator o apelo em relação à poluição ambiental. Embora o uso de agregados reciclados em concreto seja visto positivamente por contribuir com a sustentabilidade, seu uso pode comprometer a eficiência do concreto devido à sua baixa qualidade e insuficientes propriedades físicas.

As cinzas leves estão entre os agregados reciclados que promovem melhor desempenho para o concreto. Essa inclusão é benéfica pois agrega as características pozolânicas das cinzas ao concreto. Como se compõem de partículas finas, as cinzas preenchem os vazios do concreto, reduzindo a absorção e permeabilidade, conferindo-lhe maior resistência [57].

Existem também outras utilizações das cinzas, como a fabricação de clínquer, no setor agrícola, a estabilização de resíduos e o enchimento em concretos asfálticos [58].

#### 4.2.4 Influência da aplicação de cinzas no concreto

A adição de cinzas leves na produção do concreto promove uma alteração em suas características, como nos estados endurecido e fresco, no desempenho, na durabilidade e nas características mecânicas [59]. A utilização de cinzas leves na produção de concretos altera a maneira de hidratação e com isso influencia na microestrutura do material. Essa modificação se dá no processo de hidratação do ligante. A cinza leve consome hidróxido de cálcio ao se hidratar. Já o cimento Portland se hidrata formando hidróxido de cálcio. Ainda, o contato desses componentes como, por exemplo, a alumina e a sílica resultam na formação de compostos hidratados semelhantes aos que se formam pelo contato do cimento Portland com o hidróxido de cálcio [9, 60].

No início, a cinza leve trabalha como um material inerte, proporcionando um retardo em relação à hidratação no sistema, especialmente nas primeiras 24 horas. Normalmente, é após os 28 dias que a ação pozolânica do concreto com a cinza leve passa a ser notada. O aumento dos hidratos ocorre na camada superficial das partículas da cinza leve e também na superfície do cimento, tendo como resultado a nucleação heterogênea. Ocorre também um acréscimo de hidratação em torno de

16%, compensando o menor grau de hidratação que acontece no início da cura [9, 61]. Na tabela 1, que segue, demonstra a ação da cinza leve no procedimento de hidratação do cimento.

Tabela 1 - Ação da cinza leve no procedimento de hidratação do cimento

<b>Período</b>	<b>Efeito</b>
Pré-indução (10 minutos)	Não altera o calor de molhagem; Adsorção superficial de íons de cálcio; Causa: carga superficial da pozolana. Consequência: consome íons da solução. Menor precipitação de C-S-H; Menor precipitação de etringita; Maior dissolução das fases anidras. Causa: menor concentração de cálcio.
Indução (2 horas)	Diminui a taxa de hidratação; Adsorção superficial de íons de cálcio; Causa: carga superficial da pozolana. Consequência: consome íons da solução. Menor precipitação de C-S-H; Menor precipitação de etringita; Causa: menor concentração de cálcio.
Aceleração (10 a 15 horas)	Aumente o tempo do período; Causa: nucleação heterogênea. Aumenta os tempos de pega; Reduz a taxa de hidratação inicial; Causa: menor concentração de cálcio. Aumenta a taxa de hidratação final; Causa: nucleação heterogênea. Menor intervalo entre os tempos de pega.
Desaceleração (10 a 15 horas)	Diminui o tempo do período; Aumenta a taxa de hidratação; Causa: nucleação heterogênea. Maior precipitação de C-S-H; Maior precipitação de portlandita.

Fonte: Adaptado de Hoppe Filho (2008).

Karumanchi *et al.* conduziram análises de concreto com substituição parcial de cimento por cinza leve em diferentes quantidades como 10, 30 e 50%. Os resultados apontam que o acréscimo de 30% de cinza em substituição ao cimento apresentou melhores propriedades mecânicas [80].

Estudo realizado por Morcharla *et al.* (2022) <sup>[81]</sup> analisou o desempenho de concreto com elevado teor de cinzas leves. O ensaio foi otimizado para alcançar uma resistência satisfatória com a finalidade estrutural. O cimento e areia natural foram substituídos por até 50% de cinzas leves e areia de escória. Analisaram-se suas propriedades e se conduziram alguns ensaios como resistência a compressão, resistência a tração, módulo de elasticidade, microscopia eletrônica de varredura, entre outros. As amostras demonstraram um acréscimo de resistência mais lento em idades precoces, mas foram consideradas muito trabalháveis e de bastante durabilidade <sup>[81]</sup>.

Considerando que o cimento Portland possui alto teor de calor, a utilização de cinzas leves pode ser uma das soluções. Diferentes misturas de cinzas leves foram testadas para determinar a melhor combinação de cinza e cimento em termos de resistência a compressão. As amostras contendo 15, 25 e 35% de cinzas leves classe C e classe F foram submetidas a teste de resistência a compressão, entre outros. A máxima resistência a compressão foi observada na mistura com 25% de cinzas classe F <sup>[82]</sup>.

Um tema que vem sendo estudado pelos pesquisadores da área de engenharia civil é o concreto permeável, pelo fato de que contribui na drenagem das águas nas vias de transportes rodoviários. Aparentemente, a superfície do concreto parece ser convencional, maciça. Porém, a estrutura dos poros se conecta, proporcionando drenar um grande volume de água da superfície. A composição do concreto permeável é praticamente igual à do concreto convencional, diferenciando-se pela quantidade de agregado miúdo utilizado na mistura.

Uma pesquisa realizada por Carmichael, Arulray *et al.* <sup>[83]</sup>, avaliou a resistência mecânica a compressão e a resistência a tração do concreto permeável que contém em sua composição cimento e nano cinzas leves. A composição do traço foi a seguinte: as proporções de cimento/agregado gráudo empregadas foram de 1:4, 1:6 e 1: 8 e as proporções água/aglutinante foram 0,32, 0,33 e 0,34. Para esta pesquisa, substituiu-se de 0% a 50% de cimento por nano cinzas leves, sendo que os ensaios ocorreram aos 7 e 28 dias de cura. Seus resultados foram comparados aos de concreto permeável produzido com a utilização de cimento convencional em sua composição. O melhor resultado obtido entre todas as misturas foi o da amostra com

substituição de 40% de cimento por nano cinzas leves, com proporções cimento/agregado 1:6 e água/aglutinante de 0,34 [83].

### 4.3 Cimento Portland, definição e composição

A maioria das pesquisas em que se introduz cinzas leves em substituição do cimento Portland no concreto apresenta e compara durabilidade e propriedades mecânicas [37, 64].

A composição do cimento Portland é, essencialmente, de óxido de ferro, calcário, sílica e alumina. Esses elementos reagem entre si originando vários outros produtos, até atingir uma condição de estabilidade química [25]. Entre as propriedades fundamentais do cimento Portland está a existência de mais de 50% de silicatos, como também outros teores de componentes descritos no Tabela 2, abaixo [63].

Tabela 2 - Composição do cimento Portland.

Composto	Constituição	Símbolo	Teor (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C3S	42-60
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C2S	10-35
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C3A	6-13
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF	5-12

Fonte: Adaptado de Neville e Brooks, 2013.

#### 4.3.1 Alguns tipos de cimento Portland

No mercado brasileiro, estão à venda atualmente cinco classes básicas de cimento e três tipos especiais, cada um com propriedades específicas. O uso para determinado escopo indicará qual o melhor a ser trabalhado, considerando as características do projeto, de modo a trazer durabilidade e resistência mecânica ao concreto produzido e reduzir os custos de sua produção [65,66]. Na Tabela 3 mostra as variedades de cimentos no Brasil, tipos de adições e normatização.

Tabela 3 - Tipos de cimentos disponíveis no mercado brasileiro

<b>Tipo de cimento</b>	<b>Norma Brasileira</b>	<b>Adições</b>
Cimento CP - I	NBR 5.732	Sem adição
Cimento CP – I S		Contém de 1 a 5% de gesso
Cimento CP – II Z	NBR 11.578	Contém de 6 a 14% de material pozolânico e até 10% de material carbonático.
Cimento CP – II E		Pode conter de 6 a 34% de escória de alto forno e até 10% de material carbonático.
Cimento CP – II F		Contém de 6 a 10% de material carbonático.
Cimento CP - III	NBR 5.735	Contém de 35 a 70% de escoria granulada e até 10% de material carbonático.
Cimento CP - IV	NBR 5.736	Contém de 15 a 50% de material pozolânico e até 5% de material carbonático.
Cimento CP – V ARI	NBR 5.733	Sem adição
Cimento RS	NBR 5.737	Sem adição
Cimento Branco	NBR 12.989	Sem adição
Cimento Portland de baixo calor de hidratação	NBR 13.116	Sem adição

Fonte: Adaptado de ABNT.

O cimento CP-I foi o primeiro produto a ser apresentado ao mercado brasileiro. Ele não contém outros produtos em sua composição, a não ser o gesso, que serve para aumentar o tempo de pega. Devido ao grande controle científico sobre as propriedades do cimento Portland comum, foram desenvolvidos cimentos com adições, como o CP-II, que não teve alterações em relação à formulação do cimento comum, mas aprimoramentos em determinadas características [67]. Algumas regiões do Brasil podem oferecer classes diferentes de cimento, dependendo do material disponível mais próximo. Porém, o cimento CP-II é um produto muito consumido e fácil de ser adquirido nas casas de materiais de construção em geral [65].

Os tipos de cimentos Portland denominados CP-III, também chamado de Alto-Forno, e o CP-IV, que é pozolânico, contêm em suas composições resíduos

industriais, permitindo que o produto final tenha excelentes qualidades. Devido à reação que se produz em contato com o hidróxido de cálcio ou com a água, também ocorre uma diminuição energética relevante na inclusão com o ligante [67].

O cimento CP II F40 possui em sua composição de 11 a 25% de *filler* calcário, destacando-se por um maior grau de finura que possibilita resistências superiores em todas as idades. No entanto, a norma ABNT não prevê a determinação da resistência a compressão a um dia para o cimento CP II F40. Esse cimento pode ser utilizado em aplicações que necessitam de desforma rápida, bem como em concreto, argamassa, concreto armado, concreto para pavimentos, entre outros. Sua cura requer atenção especial, devido à elevada reatividade, principalmente na idade inicial [85].

#### 4.4 Sustentabilidade e concreto

A produção de concreto com a utilização de cimento se dá em escala global com aproximadamente 10 bilhões de toneladas anualmente. Com o crescimento dos centros urbanos e industriais, nos últimos anos, ocorreu um grande aumento na necessidade de produtos feitos de concreto. Pesquisas realizadas no setor de industrialização do cimento apontam que apenas esse setor participa com em torno de 6 a 7% do total de CO<sub>2</sub> emitido na atmosfera. Diante desses dados, com os danos causados ao meio ambiente, deve-se buscar novas técnicas e produtos sustentáveis e renováveis para que se produza um concreto ecológico [68].

Muitas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de encontrar matéria prima alternativa que se possa utilizar em substituição do cimento para diminuir a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Afinal, a produção de mil quilos de cimento, acaba gerando em torno de uma tonelada de CO<sub>2</sub> no ar. Essas pesquisas avaliam a disponibilidade, a eficácia e a eficiência desses produtos, que apresentam em sua composição propriedades pozolânicas [68, 69, 70].

Alguns subprodutos industriais como escória, sílica ativa e cinzas leves concentram em sua composição propriedades pozolânicas, com grande volume de (SiO<sub>2</sub>) e (AL<sub>2</sub>O). Sua utilização na composição do cimento traz benefícios [68, 69, 70].

Pesquisar as características de engenharia e as perspectivas ambientais do concreto confeccionado através de resíduos é de fundamental importância. Segundo dados coletados no ano de 2017, o volume de cimento utilizado no ano de 2010 foi de



3.270 toneladas e estima-se um aumento para 4.830 milhões de toneladas até o ano de 2030. Diante desses números, será de suma importância a utilização de subprodutos na composição do cimento para diminuir a emissão de gases CO<sub>2</sub> na atmosfera, contribuindo para um desenvolvimento econômico e sustentável da indústria da construção civil <sup>[71]</sup>.

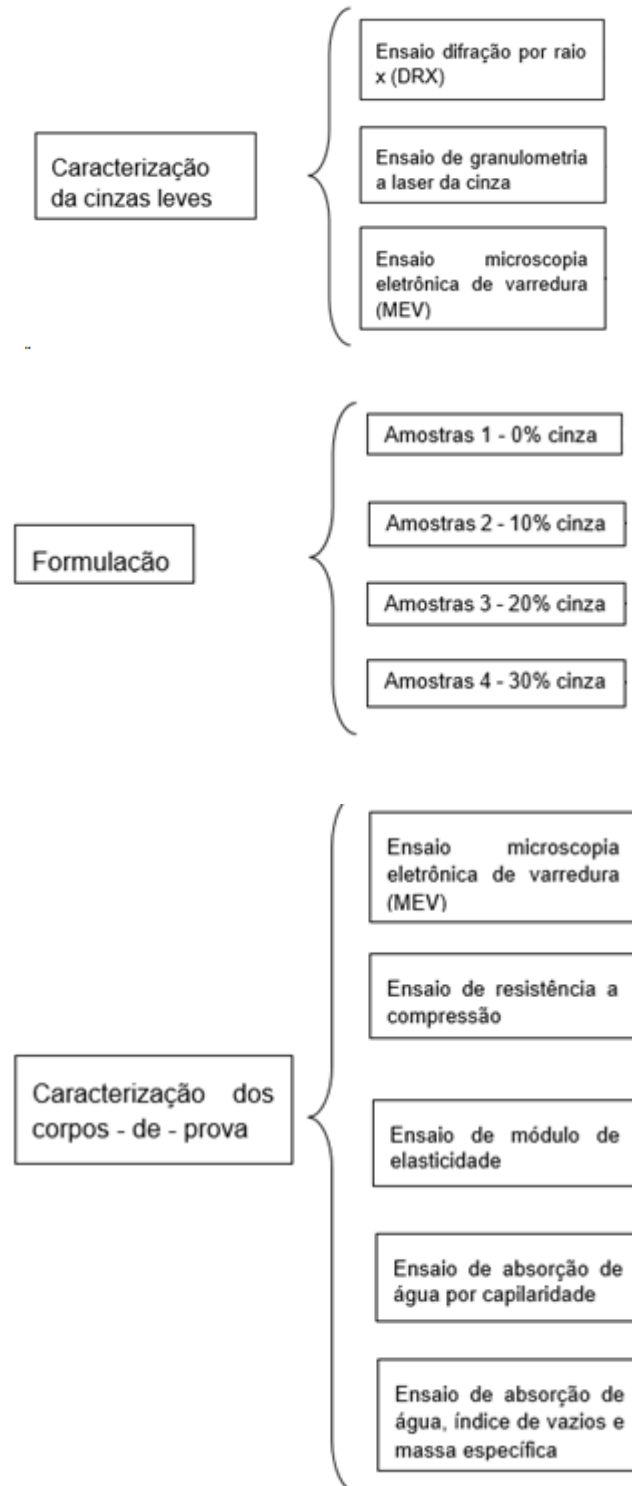
Uma vez que a produção de cinzas leves de carvão aumenta significativamente e tem alto impacto ambiental, tem-se buscado intensificar pesquisas para utilizações alternativas desse subproduto, principalmente na confecção de diferentes materiais ligantes <sup>[72]</sup>. Além do mais, o volume de resíduos industriais supera o de materiais de construção. A combinação de concreto com uma taxa de cinzas leves demonstrou resultados bastante favoráveis no aspecto construtivo <sup>[73]</sup>.

As cinzas FA e BA demonstram capacidade como material para substituir o cimento e agregado miúdo, nesta ordem. Usando cinzas de carvão desse tipo, concretos podem ser produzidos de formas mais sustentáveis e vantajosas, reduzindo o custo final de fabricação do concreto e utilizando menos recursos naturais <sup>[74]</sup>.

## 5 METODOLOGIA

A Figura 3, demonstra a metodologia usada para a realização do presente trabalho, sendo analisadas 3 amostras para cada traço.

Figura 3 - Fluxograma da metodologia empregada para realização desta pesquisa.



## 5.1 Materiais

Para a realização desta pesquisa, principiou-se com a seleção dos materiais a serem adotados como matéria-prima. Os materiais utilizados foram areia (areia natural média e areia natural fina), cimento (CP II F 40), cinza leve (oriundas da queima de carvão mineral), brita 0 (9,5 mm) e brita 1 (19 mm), aditivo plastificante (FK 93) e água.

## 5.2 Métodos

Produziu-se concreto utilizando diferentes traços, onde foram adicionados diferentes teores de cinzas leves (10, 20 e 30%) em substituição parcial e proporcional ao cimento. O traço de referência com 0% de cinza.

A mistura dos agregados foi realizada com uma betoneira, onde se colocaram primeiramente areia, britas e um pouco de água. Após uma mistura inicial, fadicionaram-se cimento e mais água e, posteriormente o aditivo plastificante.

Após a mistura estar pronta, com o objetivo de obter um abatimento de 160 mm, realizou-se o teste de *slamp*. Para esse teste, utilizaram-se cone, régua, haste, uma colher de pedreiro e uma chapa metálica para colocar o concreto. Um segundo teste de *slamp* foi realizado após o concreto ficar na betoneira parada por 20 minutos. Nesse momento, corrigiu-se o abatimento com água, quando necessário.

Os corpos-de-prova (CPs) foram moldados em uma forma cilíndrica de 100 x 200 mm, aplicado uma camada de desmoldante para facilitar a retirada das amostras. Iniciou-se a moldagem dos CPs colocando-se 1/3 de concreto na forma e aplicando 15 golpes com uma haste metálica, repetindo o processo até encher o molde. Estando as formas preenchidas, aguardou-se 48 horas para desformar. Em seguida, as amostras permanecem submersas em água até serem ensaiadas.

## 5.3 CARACTERIZAÇÕES

### 5.3.1 Análise de distribuição granulométrica

Para a análise de distribuição granulométricas das cinzas leves utilizou-se o equipamento Cilas 1180L (faixa de medição 500 a 0,1  $\mu\text{m}$ ) para verificar a granulometria, usando água como meio de dispersão e ultrassom.

### 5.3.2 Caracterização mineralógica

Com o intuito de verificar a composição mineralógica presente nas cinzas, foi realizado o ensaio de difração de raios X (DRX). O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios X, marca *Phillips*, modelo *X'Pert* MDP (tubo de raios X com radiação Cu K $\alpha$ ).

### 5.3.3 Caracterização microestrutural

A caracterização morfológica da microestrutura das cinzas leves utilizadas e dos corpos-de-prova foi realizada após 63 dias por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), Carl Zeiss, MA-10.

### 5.3.4 Resistência mecânica à compressão

A NBR 5739:2007 define o método de ensaio de compressão para corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Seguiram-se as indicações da norma para o procedimento.

O ensaio de compressão foi realizado colocando-se os corpos-de-prova cilíndrico retificado nas duas faces em uma prensa *Emic* com capacidade para 200 kN. A técnica consiste em calibrar o equipamento, posicionar o CP verticalmente na prensa. Nela, ele é submetido a uma carga de cima para baixo com o auxílio de um pistão, com um *software* instalado em um computador e acoplado na prensa, se realize e armazena a leitura dos dados desde o início da carga até a ruptura da amostra.

### 5.3.5 Módulo de elasticidade

Para o ensaio do módulo de elasticidade, foram usadas três amostras sendo elas retificadas nas duas faces. As peças foram colocadas em posição vertical em uma prensa *Emic* com capacidade para 200 kN. Dois sensores foram acoplados nas bordas laterais do CP posicionado verticalmente, aplicando uma força e medindo a resistência mecânica de elasticidade da amostra até seu rompimento. Esses dados foram coletados por um *software*.

### 5.3.6 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

A NBR 9778:2005 define índice de vazios como uma relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Também estabelece a massa específica como a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. Realizaram-se os ensaios seguindo as orientações da norma.

Para os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica, os corpos-de-prova ficaram por 72 h em uma estufa na temperatura de 105 °C. Ao serem retirados, foi realizada a pesagem, obtendo assim a massa seca ( $M_s$ ). Posteriormente, as amostras ficaram imersas em água por 72 h à temperatura de 23 °C. Na sequência, as amostras ficaram em um tanque fervendo à temperatura de 100 °C por 5 h, retiradas e pesadas em balança hidrostática ( $M_{sat}$ ).

Para os cálculos, utilizaram-se as seguintes equações:

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

A = absorção de água (%)

$M_{sat}$  = massa do corpo-de-prova saturado (g)

$M_s$  = massa do corpo-de-prova seco (g)

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$I_v$  = Índice de vazios

$M_{sat}$  = massa do corpo-de-prova saturado (g)

$M_s$  = massa do corpo-de-prova seco (g)

$M_i$  = massa do corpo-de-prova saturado e imerso em água (g)

$$P_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad \text{Equação 3}$$

$$P_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad \text{Equação 4}$$

$$Pr = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$P_s$  = Massa específica do corpo-de-prova seco

$M_s$  = massa do corpo-de-prova seco

$M_{sat}$  = massa do corpo-de-prova saturado

$P_{sat}$  = Massa específica do corpo-de-prova saturado

$M_i$  = massa do corpo-de-prova saturado e imerso em água

$Pr$  = Massa específica real

### 5.3.7 Absorção de água por capilaridade

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade, seguiram-se as orientações da norma ABNT NBR 9779:2012. Essa norma determina o procedimento por meio da ascensão capilar de argamassa e concretos endurecidos. As análises foram praticadas utilizando uma estufa a temperatura de 105 °C. As amostras foram colocadas em um dessecador contendo sílica em seu fundo, com intuito de retirar uma possível umidade restante nas amostras. Elas ficaram no vácuo por um período de 2 h. Posteriormente, foram coletados os dados, obtendo a massa seca.

Para verificar a percolação de água nos corpos-de-prova, os mesmos ficaram com 5 mm de sua face inferior imersos em água em uma temperatura ambiente de 23 °C, mantendo-se o nível de água constante. No período de 3, 6, 24, 48 e 72 h ocorreu a pesagem para verificar a massa saturada e, antes de cada pesagem, o excesso de água foi retirado com a utilização de um pano úmido. Realizada a última pesagem após 72 h, as amostras foram submetidas ao rompimento diametral, conforme a ABNT NBR 7222, verificando com isso, quanto de água se distribuiu em cada amostra.

A equação 6 foi utilizada para o cálculo da absorção de água por capilaridade:

$$C = \frac{Msat - Ms}{S}$$

Equação 6

Onde:

C = Absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)

Msat = Massa específica do corpo-de-prova saturado

Ms = massa do corpo-de-prova seco

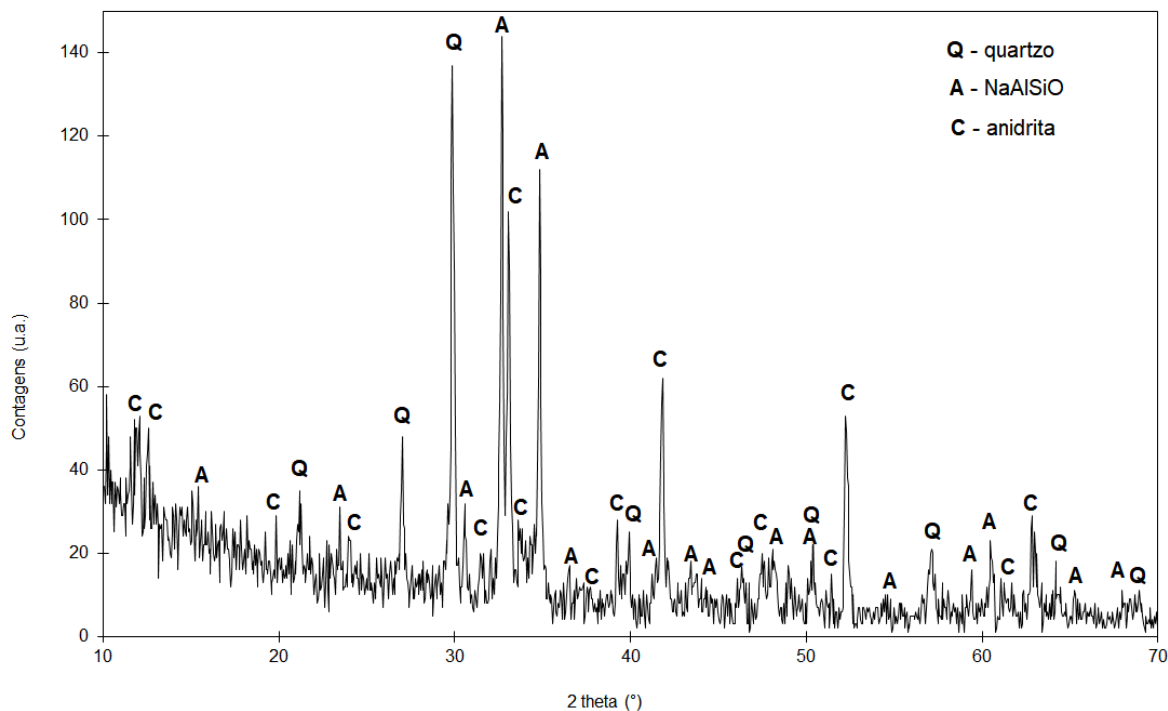
S = Área da seção transversal

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Composição mineralógica da cinza leve

A Figura 5, apresenta o resultado da análise por difração de raios X da cinza leve selecionada para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 4 – Resultado da análise por DRX da cinza leve.



Analisando o difratograma com auxílio das fichas JCPDS observou-se a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$  – JCPDS 01-083-2470) como forma mineralógica principal, além de aluminosilicato de sódio ( $\text{Na}_{1,45}\text{Al}_{1,45}\text{Si}_{0,55}\text{O}_4$  – JCPDS 00-049-0002) e anidrita ( $\text{CaSO}_4$  – JCPDS 00-030-0279). A presença de anidrita na cinza pode ser decorrente da combustão do carvão mineral com dessulfuração interna (adição de calcário na fornalha da caldeira), proveniente da reação do óxido de cálcio (decomposição da calcita) com os gases  $\text{SO}_x$  da combustão do carvão [86].

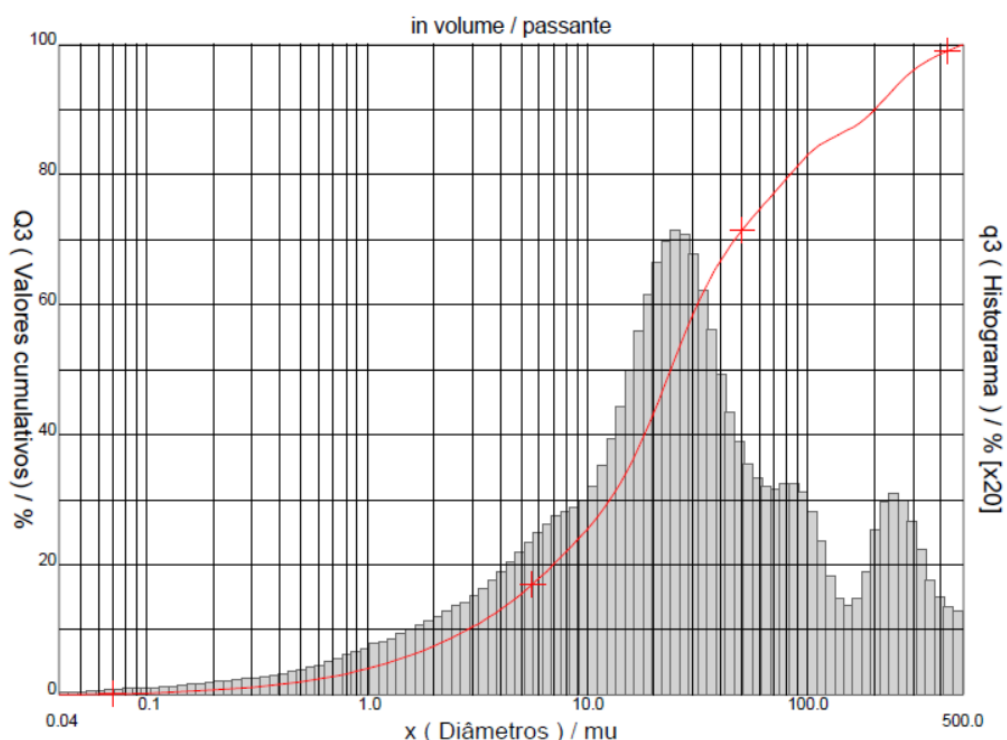
### 6.2 Distribuição granulométrica da cinza leve

Como pode-se observar na Figura 6, com relação à distribuição granulométrica, o diâmetro médio das partículas é de  $60,86 \mu\text{m}$ , com um D50 de  $23,82 \mu\text{m}$ .



De acordo com Fernández-Jimenez e Palomo (2003) [74], para se desenvolver atividade pozolânica mínima é necessário que 80% das partículas de cinza leve possuam dimensão menor que 45  $\mu\text{m}$ . Visto isso, a matéria prima usada para o desenvolvimento dessa pesquisa é composta por materiais particulados apropriado para utilização como material pozolânico.

Figura 5 – Distribuição granulométrica da cinza leve utilizada neste trabalho.

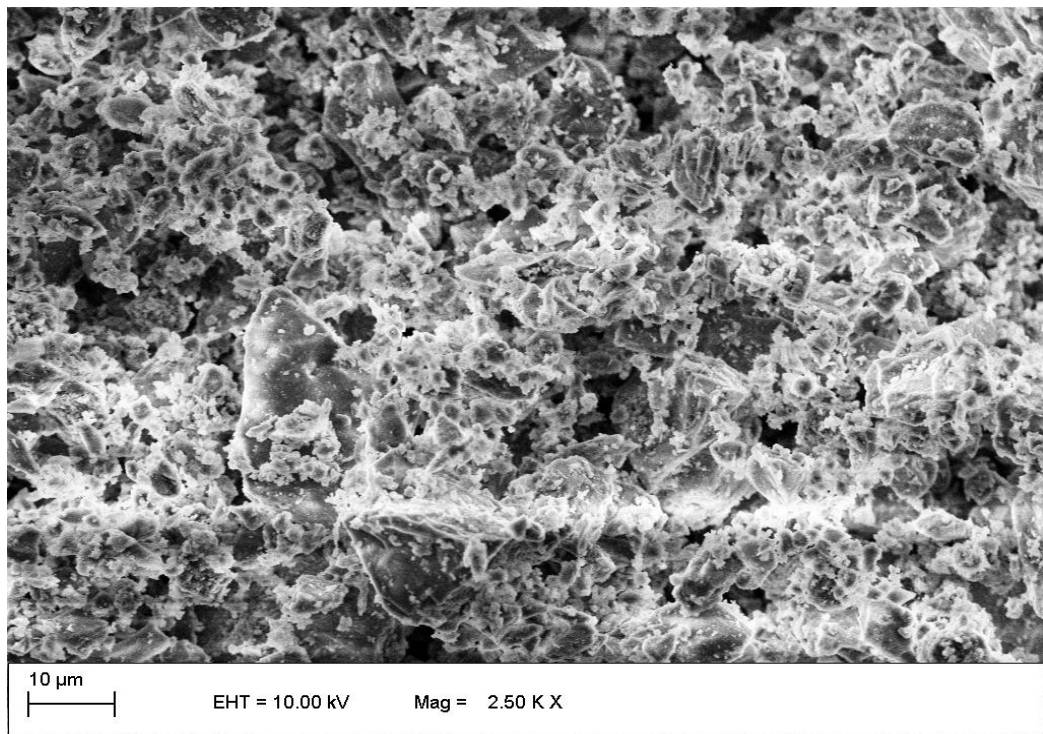


### 6.3 Caracterização microestrutural (MEV)

#### 6.3.1 Cinza leve

Verificou-se por meio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), Figura 7, que a cinza leve é constituída de pequenas partículas aglomeradas, com formato irregular de tamanhos diversos, em acordo com o observado no resultado do ensaio de distribuição granulométrica.

Figura 6 – Imagem obtida por MEV da cinza leve.

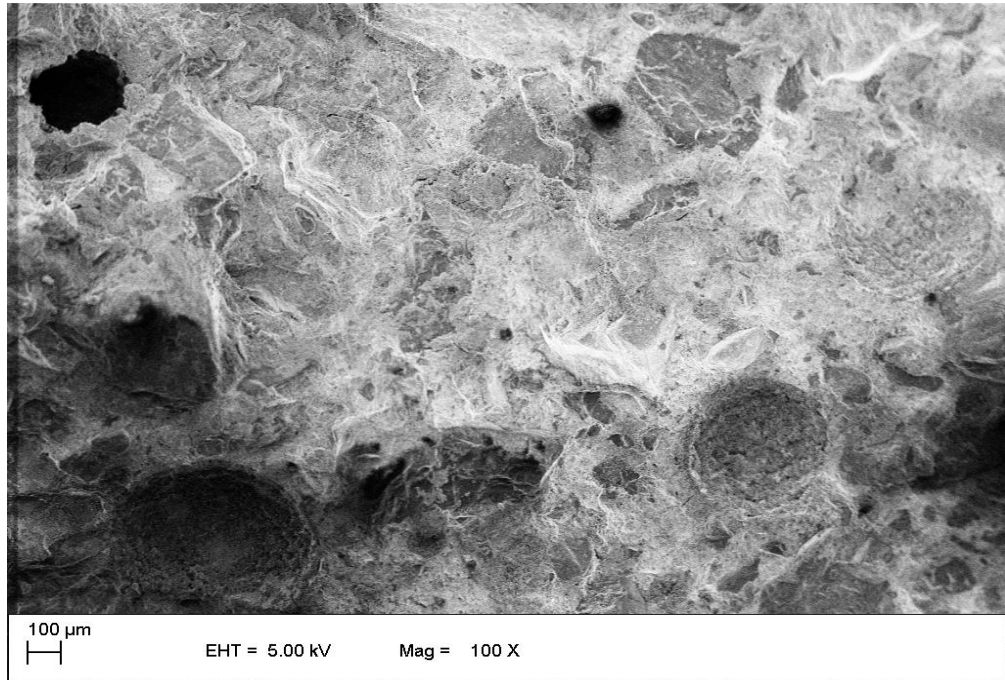


### 6.3.2 Corpos-de-prova de concreto

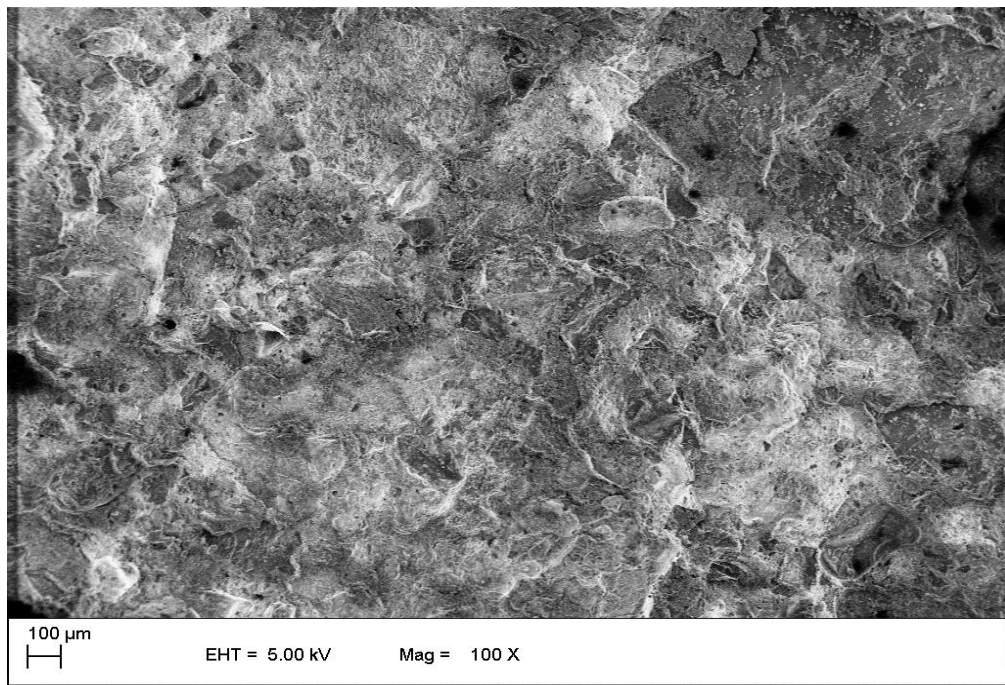
Foi realizada uma análise morfológica das superfícies dos corpos-de-prova, utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV), dos concretos após 63 dias de cura, considerando a amostra referência (0% cinza) (Figura 8 a) e as amostras contendo adição de cinzas leves em substituição parcial do cimento, Figuras 8 b, c, d, para 10, 20 e 30% de cinzas, respectivamente.

A amostra sem adição de cinzas, mostra uma microestrutura coesa, com porosidades. A amostra com 10% de adição de cinzas leves não apresenta fissuras, assemelhando-se à amostra sem adição de cinza. Por sua vez, na amostra contendo 20% de adição de cinzas, é possível visualizar algumas fissuras, o que pode estar associado ao aumento do calor de hidratação. A amostra com 30% de cinza apresenta partículas maiores, possivelmente provenientes das partículas de cinzas que não reagiram.

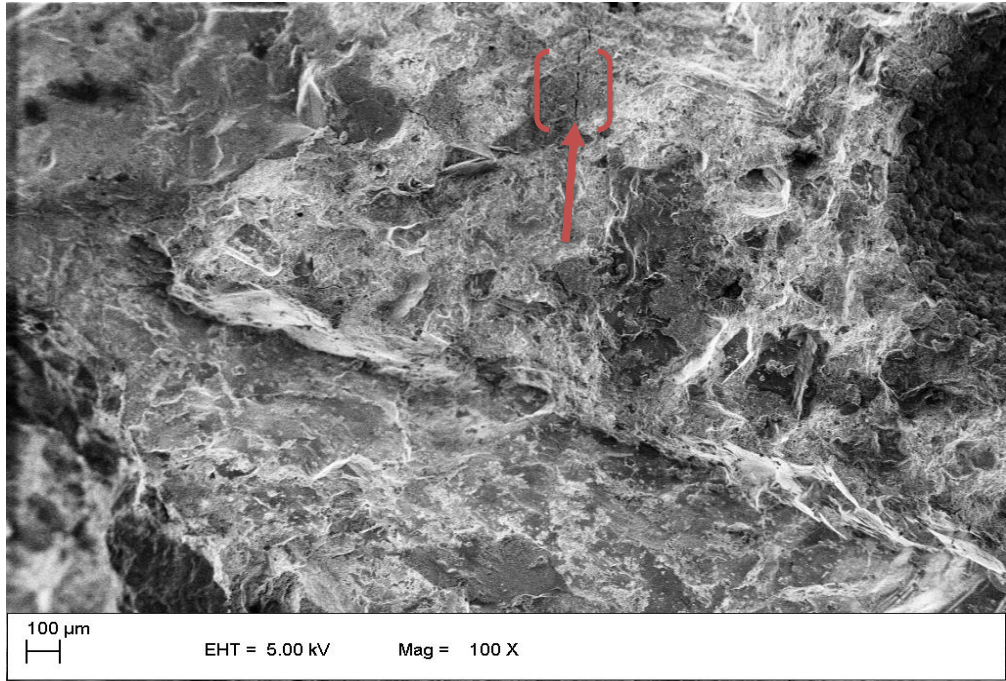
Figura 7 - Imagens obtidas por MEV da superfície dos concretos: (a) sem adição de cinza, (b) com 10% de cinzas, (c) com 20% de cinzas e, (d) com 30% de cinzas.



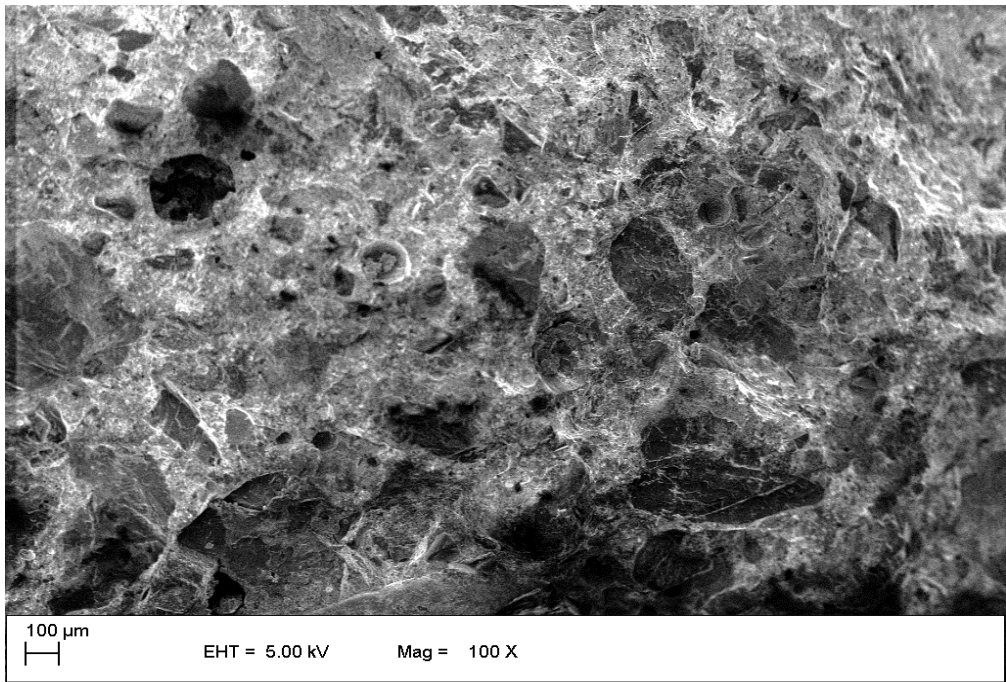
(a)



(b)



(c)



(d)

Conforme pesquisas realizadas utilizando cinzas leves em concretos<sup>[13, 39, 79]</sup>, verificou-se que as reações químicas tem seu início retardado e ocorrem por um período mais prolongado, quando comparadas ao que ocorre com cimento Portland puro. Proporcionando reações de hidratação mais lentas do concreto, com o uso da cinza leve, ocorre uma menor liberação de calor de hidratação, reduzindo o volume



de poros e as fissuras, quando comparado com concretos usuais do mercado. A utilização da cinza leve, proporciona ainda um aumento da resistência a compressão do concreto.

#### 6.4 Resistência mecânica à compressão

A análise de resistência mecânica à compressão em concretos é de fundamental importância para que atenda as determinações de cada projeto.

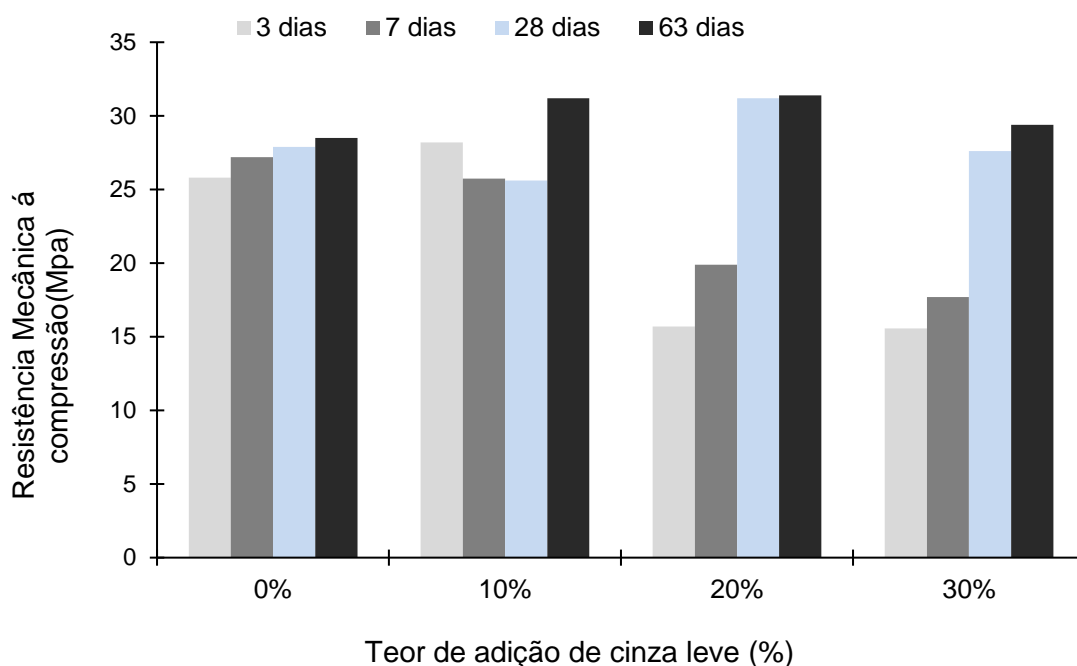
Para este ensaio foram analisadas amostras para cada traço, sendo considerada a média dos resultados.

Na Figura 9 observa-se a variação dos valores de resistência mecânica à compressão do concreto, com o passar do tempo de cura. De maneira geral, observa-se um aumento gradual da resistência mecânica à compressão com o tempo, principalmente ao se observar a amostra sem adição de cinzas. Observa-se que com 3 dias de cura o concreto com 0 e 10% de adição de cinza tiveram maior resistência mecânica à compressão se comparado com as amostras de 20 e 30% de teor de adição de cinza.

Com 7 dias de cura do concreto, pode-se identificar que as amostras com 20 e 30% de teor de cinza em sua composição tiveram um acréscimo de resistência à compressão em torno de 19,9% e 17,7%, respectivamente. A amostra referência com 0% de cinza teve um acréscimo de 5,5% na resistência mecânica à compressão. A adição de 10% de cinza leve não ocasionou aumento na resistência mecânica nesse período.

Com 28 dias de cura, se observou um aumento na resistência mecânica à compressão das amostras com adição de 20 e 30% de cinza, sendo de, respectivamente, 57 e 56%. Em comparação, a amostra sem adição de cinzas teve um aumento de apenas 2,6% neste mesmo período. A amostra com 10% de adição de cinza não teve aumento expressivo de resistência à compressão neste período.

Figura 8 - Resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão em relação ao tempo de cura e adição de cinzas.



Com 63 dias de cura do concreto, as amostras com teor de adição de 20 e 30% de cinza, tiveram um acréscimo de 0,8 e 6,7%, respectivamente, enquanto que a amostra referência sem adição de cinza aumentou 2,5%. A amostra contendo 10% de cinza teve um acréscimo de 22% na resistência mecânica à compressão.

Aos 3 e 7 dias, nenhuma amostra apresentou resultado igual ou superior ao valor desejado de 30 MPa. As amostras com 20 % de adição de cinzas leves em sua composição foram aquelas que obtiveram maior resistência mecânica à compressão após 3 dias de cura (28,2 MPa). Com 7 dias, a amostra sem adição de cinzas foi aquela que apresentou maior resistência mecânica à compressão (27,2 MPa).

Inicialmente a cinza leve age como um material inerte. Ela possui um efeito retardador para a cura do concreto, especialmente na fase inicial, pois a fase vítrea da cinza deve primeiramente se dissolver para então interagir com o hidróxido de cálcio [75].

No período inicial de cura do concreto, ao se utilizar as cinzas leves em sua composição, por ter menor atividade pozolânica, o material apresenta baixa resistência mecânica, porém, passando o tempo de cura do concreto, pode se observar um crescimento elevado de sua resistência mecânica a compressão.

Neste trabalho, observou-se que a atividade pozolânica da cinza leve adicionada ao concreto passa a ser mais significativa após 28 dias de cura. De fato, após 28 e 63 dias, as amostras contendo 20 e 30 % de cinza leve atingiram uma resistência mecânica superior comparando-se ao traço de referência. Esse resultado está de acordo com o estudo de Vaske, 2012 <sup>[75]</sup>, que identificou aumentos na resistência mecânica à compressão com o acréscimo de teor de adição de cinzas.

Em relação às cinzas leves, pesquisas indicam que o período de duração das reações da cinza leve incorporado na produção de concreto, se inicia posteriormente e por um período mais longo, quando comparado com o cimento Portland <sup>[76]</sup>. Com isso, as reações de hidratação do concreto são mais prolongadas e lentas, gerando uma quantidade de calor inferior aos concretos tradicionais, sendo assim, contribui para um menor índice de fissuras no concreto. O uso da cinza leve no concreto, contribui para o refinamento dos poros, proporcionando para um aumento na resistência mecânica a compressão do concreto <sup>[79]</sup>.

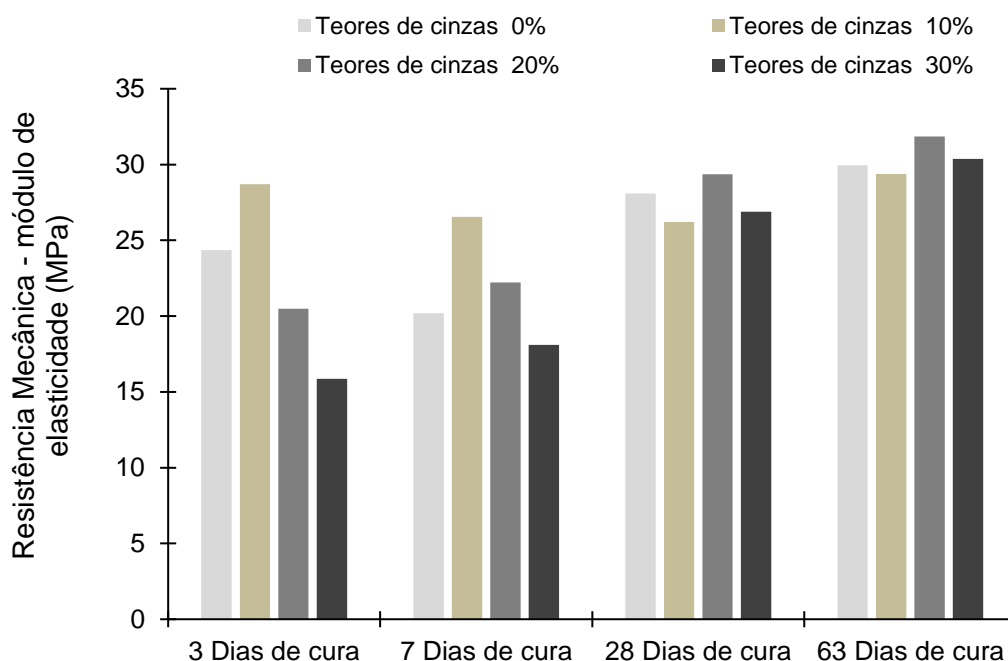
## 6.5 Ensaio de módulo de elasticidade

Realizou-se o ensaio de módulo de elasticidade para avaliar o comportamento elástico das amostras. O valor do módulo de elasticidade (Figura 10) variou de 24,9 a 30 MPa durante os 63 dias de cura da amostra referência. Com a adição de cinzas, o maior módulo de elasticidade obtido foi aquele da amostra contendo 30 %, de 33,6 MPa, após 63 dias de cura.

O resultado obtido para os corpos-de-prova com teor de 10, 20 e 30% de adição de cinza apresentaram do terceiro dia até o sétimo uma variação de módulo de elasticidade de -7,4; 8,5 e 14,1%, respectivamente. Enquanto que a amostra referência teve um acréscimo de 15,8% no mesmo período.

Aos 28 dias de cura do concreto, os resultados indicam para corpos-de-prova com 0, 10, 20 e 30% de adição de cinzas, variação de -0,4; -1,3; 32,1 e 48,6%, respectivamente. Observou-se um aumento significativo nas amostras com maior teor de adição de cinza em sua composição, enquanto que a amostra referência teve uma diminuição no módulo de elasticidade.

Figura 9 - Ensaio de módulo de elasticidade dos corpos-de-prova em função das cinzas leves adicionadas, mostrando todo o período de cura das amostras.



Do 28° ao 63° dia de cura as amostras com 0, 10, 20 e 30% de adição de cinzas, tiveram respectivamente, uma variação de módulo de elasticidade de 6,7; 12,1; 5,6 e 13,6%.

A amostra contendo maior teor de cinza leve teve um desempenho melhor no que trata ao módulo de elasticidade após os 28 dias de cura do concreto. Esse resultado corrobora com o estudo de Hashmim, *et al.* [77], onde com maior teor de cinza e com idades de cura do concreto posteriores a 28 dias obteve-se um desempenho bastante satisfatório no que se refere ao módulo de elasticidade.

Da mesma forma que a resistência mecânica a compressão aumentou com maior teor de cinza em um período maior de dias de cura, o módulo de elasticidade também demonstrou este comportamento. De acordo com Hashmim *et al.* [77], de forma geral, o módulo de elasticidade do concreto está diretamente associado à sua resistência mecânica à compressão.



## 6.6 Absorção de água por capilaridade

No ensaio de absorção de água por capilaridade foram analisadas 3 amostras para cada traço.

Na Figura 11, é possível observar a marca deixada pela absorção de água por capilaridade em uma amostra contendo 0% de cinzas leves. Pode se observar na faixa demarcada em azul claro e coloração mais escura, o quanto a amostra absorveu de água, percolando em torno de 12,5 cm pelos vazios do concreto.

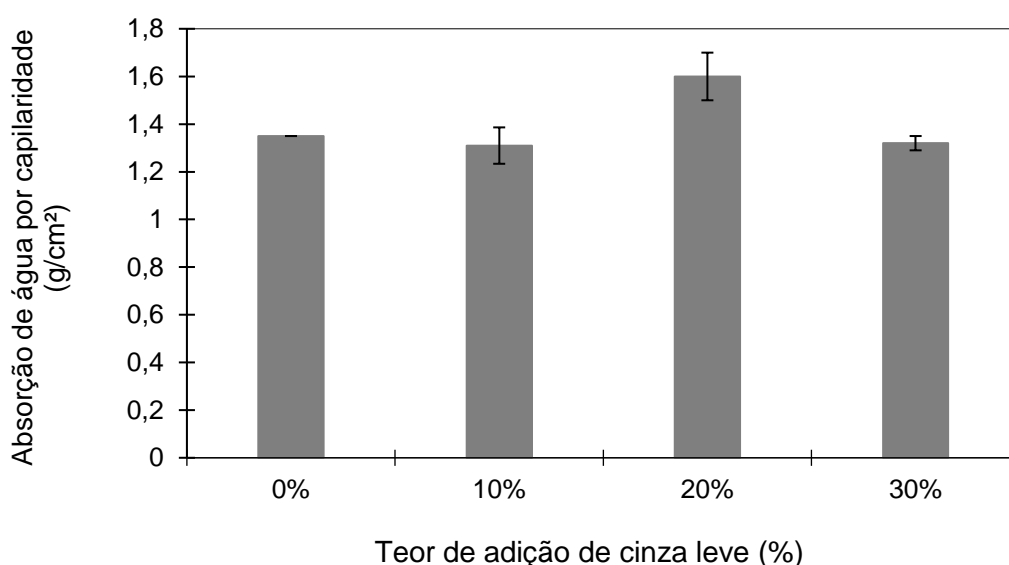
Os resultados das amostras contendo cinzas foram positivos, pois ocorreu uma menor absorção de água na amostra com 10 e 30% de cinzas, percolando na amostra 12 e 10,9 cm, respectivamente, ao se comparar com a amostra referência com 0 % de cinzas onde percolou em torno de 12,5 cm. Com esse resultado, o uso de cinzas apresentou uma eficiência média de 13%, preenchendo os espaços vazios, contribuindo para uma maior eficiência na produção de concretos.

Figura 10 - Imagem fotográfica indicando a altura de água percolada no interior do corpo-de-prova após o ensaio de absorção de água por capilaridade (amostra contendo 0% de cinzas leves).



Na Figura 12, pode se observar os diferentes níveis de absorção de água das amostras com e sem adição de cinzas leves. As amostras com 10 e 30% de cinzas apresentaram menor absorção de água. Em comparação com a amostra sem adição de cinzas, houve uma redução de 2,9 e 2,2%, respectivamente, na absorção de água destas amostras.

Figura 11 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade em função do teor de cinzas leves adicionado.

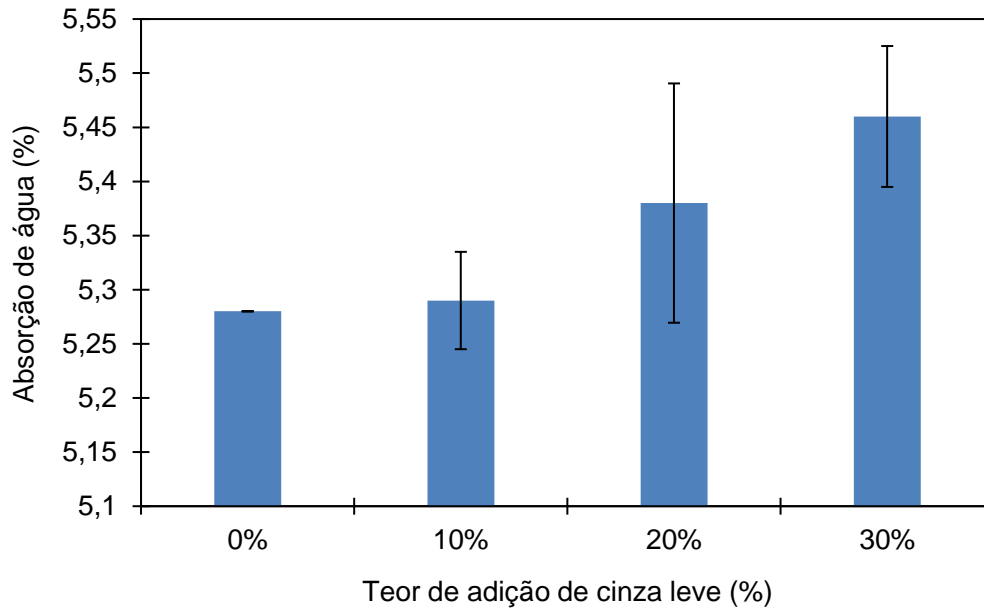


Tal efeito pode ser explicado pela redução na porosidade da matriz cimentícia ao se adicionar cinzas leves, fazendo com que a água percole com menor volume, tendo uma menor absorção de água, quando comparada com o traço de referência.

#### 6.7 Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

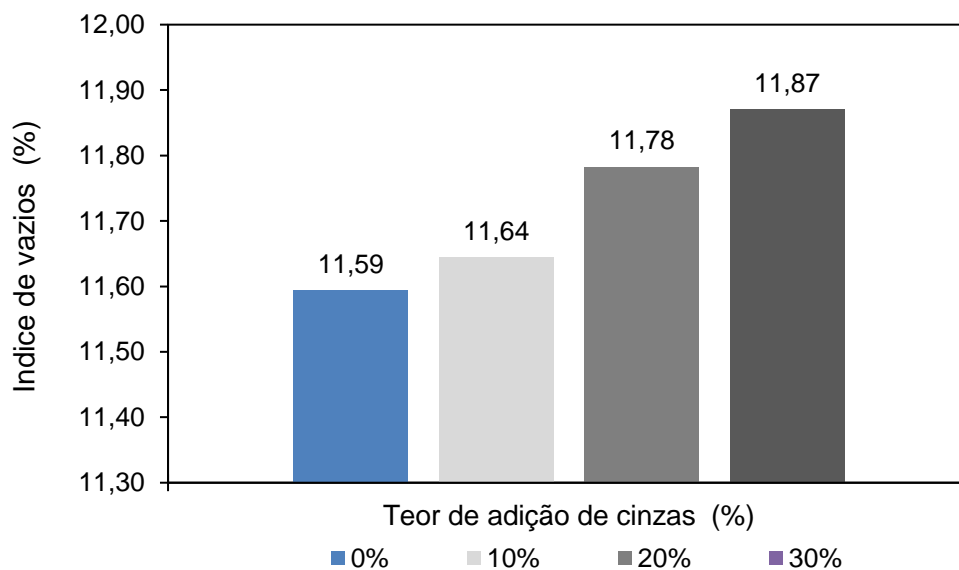
Com o ensaio de absorção de água, se verificou que nas amostras contendo 10% de adição de cinza teve um aumento de 0,6% comparado com a amostra referência, já com 20% e 30 % tiveram respectivamente um aumento na absorção de água de 1,9% e 2,46%.

Figura 12 – Resultado do ensaio de absorção de água.



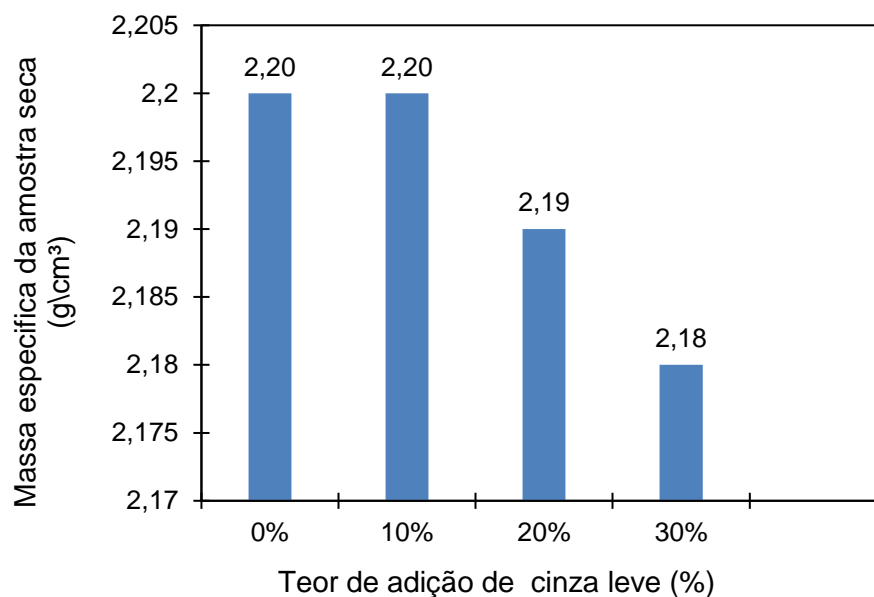
No ensaio de índice de vazios e massa específica analisaram-se 3 amostras de cada composição. Observou-se uma diferença de 2,5% a mais nas amostras com adição de cinza se comparado com a amostra de referência cuja média foi de 11,6 %. As amostras com adição de 10, 20 e 30 % de cinza leve tiveram uma média de 11,6, 11,8 e 11,9 %, respectivamente.

Figura 13 - Resultados do ensaio de Índice de vazios das amostras contendo diferentes teores de cinza leve.



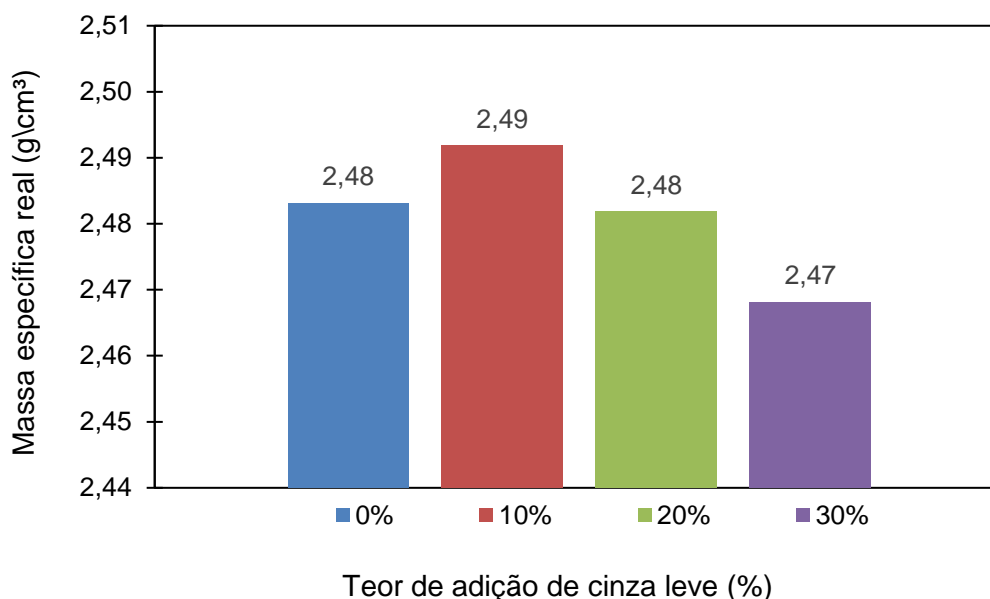
Como a massa específica depende do número de vazios na amostra, observou-se um comportamento inverso daquele apresentado no ensaio de índice de vazios. Isto é, uma maior massa específica para a amostra sem adição de cinzas ( $2,2 \text{ g/cm}^3$ ) em comparação com as amostras com adição de cinzas, em média,  $2,19 \text{ g/cm}^3$ .

Figura 14 - Resultados do ensaio de massa específica da amostra seca contendo diferentes teores de cinza leve em comparação com a amostra referência.



Nas amostras para o ensaio de massa específica real obteve-se o corpo-de-prova contendo 30 % de adição de cinza teve uma diferença de 0,4% se comparado com a amostra de referência, a amostra contendo 20% se manteve praticamente igual a amostra referência e a mostra com 10% de adição de cinza teve um acréscimo de 0,45% em relação a amostra referência com 0% de adição de cinza.

Figura 15 - Resultados do ensaio de massa específica real contendo diferentes teores de cinza leve.



Nos resultados da massa específica real, se observou que as amostras contendo adição de cinzas leves ficaram com valores muito próximos ou superiores a amostra de referência, sem adição de cinza.

Os resultados de índice de vazios têm uma relação direta com a quantidade de poros existentes no material. Observou-se que a amostra contendo 10% de adição de cinzas, se igualou com a amostra referência, já as amostras contendo 20 e 30% de adição, tiveram um acréscimo de aproximadamente 2,5% se comparado com a amostra referência. Observou-se também, que houve um pequeno aumento na absorção da água e índice de vazios nas amostras com 20 e 30% de adição de cinzas.

De acordo com Kengo *et al.* [87], a porosidade teve um acréscimo de 2% em todos os casos, na proporção que os corpos-de-prova permaneciam por um maior tempo de cura.

Uma pesquisa realizada por Moffatt *et al.* [88], verificou-se que ocorreu uma penetração de cloretos em concretos, ultrapassando 100 mm. Porém a presença de cinzas leves na composição, apresentou uma diminuição considerável na profundidade de penetração, ficando em torno de 30 – 40 mm para os exemplares com substituição de um percentual de cimento Portland por cinza leve de 56%.

Assim, observa-se que a utilização de cinzas em substituição parcial do cimento, na composição do concreto, contribui na redução de poros, isso ocorre pelo fato de que a distribuição de tamanho das partículas da cinza promove o preenchimento dos vazios dos demais agregados da composição.

## 7 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos, constatou-se que existe uma influência positiva da substituição parcial de cimento por cinzas leves nas propriedades físicas de concretos. A presença de cinzas leves auxilia no aumento da resistência mecânica a compressão, módulo de elasticidade e massa específica. Se comparando com a amostra referência (100 % de cimento), aos 28 dias de cura, amostras com adição de 20 % de cinzas obtiveram maior resistência mecânica a compressão. Já aos 63 dias, amostras com 10 e 20 % de adição de cinzas obtiveram resultados superiores ao traço referencial. Por outro lado, na fase inicial de cura, com adição de cinza leve não percebeu-se aumento nas propriedades mecânicas do concreto, isso se dá pelo fato de que a ação pozolânica das cinzas leves é lenta.

Em relação aos ensaios de módulo de elasticidade com o acréscimo de 20 % de cinzas aos 28 dias e com adição de 30 % de cinzas aos 63 dias, obtiveram-se resultados superiores ao traço de referência. Em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, as amostras com adição de cinza tiveram resultados bem semelhantes entre si. Com 30 % de cinzas a amostra com menor absorção de água e, ao se comparar com o traço de referência, obteve-se uma diferença a menor de 11 % aproximadamente com 63 dias de cura.

No ensaio de índice de vazios se obteve uma variação de 2,4 % entre o traço de referência e as amostras com adição de cinzas, tendo o menor índice de vazios a amostra sem cinzas. A amostra contendo 30 % de cinzas leves apresentou a menor massa específica entre as formulações analisadas. A adição de cinzas no concreto, se mostrou bastante positivo, visto que, pode-se diminuir o custo de fabricação do concreto e também contribuir com a destinação das cinzas. Entre as amostras realizadas e pelos resultados obtidos, vejo como a melhor opção de traço, a amostra contendo 20% de cinzas leves.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O principal objetivo do presente estudo foi avaliar a viabilidade da substituição parcial do cimento por cinzas leves para a produção de concreto. Portanto, mais pesquisas podem ser desenvolvidas para avaliar outras propriedades.

Logo, ficam algumas sugestões de trabalhos futuros:

- utilização de outras cinzas com diferentes composições mineralógicas;
- utilização de brita leve como agregado;
- avaliar o concreto com outras porcentagens de cinzas leves;
- avaliar a utilização de cinzas leves em concreto auto adensável;
- avaliar as amostras submetendo-as a ação de íons de cloreto.



## REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, C. F. Ferreira *et al.* Evaluation of the penetration of chlorides in concrete elements in the city of Pelotas / RS. Revista ALCONPAT, vol.8, n.2 Mérida may. /ago. 2018.  
<https://doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>
- [2] G.B.Ramesh Kumar, V.Kesavan. Study of structural properties evaluation on coconut fiber ash mixed concrete. Materials today: Proceedings, vol. 22, p. 811 – 816, part 3, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.158>
- [3] ALMEIDA, Diego Henrique de; GRILLO, Rodolfo Henrique Freitasl, *et al.* Properties of concrete manufactured with use of ceramic sanitary ware waste as aggregate. Matéria, vol.24, no.2, Rio de Janeiro, 2019.  
<https://doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0665>
- [4] HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de cimento portland. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais, IBRACON, 2010.
- [5] MACEDO, A. R. S.; SILVA, A. S., *et al.* Study of the effect of diatomite on physicomechanical properties of concrete. Cerâmica, vol.66, no.377, São Paulo Jan./Mar. 2020.  
<https://doi.org/10.1590/0366-69132020663772561>
- [6] KREUZ, A. L. Utilização de cinzas pesadas de termelétricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos. Dissertação (Pós-Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [7] ISAIA, Geraldo Cechella. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, 2017.
- [8] ALTHEMAN, D; FERREIRA, G. C., *et al.* Evaluation of coal fly ash in cementitious matrices. Revista IBRACON Estrut. Mater. vol.10, no.6, São Paulo Nov./Dec. 2017.  
<https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000600009>
- [9] HOPPE FILHO, Juarez. Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade de São Paulo (USP). São Paulo. 2008.
- [10] HAMADA, H.M.; THOMAS, B.S.; *et al.* Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: a comprehensive review. Journal of building Engineering, vol. 40, August 2021, 102286.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102286>
- [11] ISLAM, A. *et al.* Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete. Construction and building materials, vol. 152, pp. 964-977, October 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.092>

[12] NBR 12655 - Concreto de Cimento Portland. Preparo, controle e recebimento, procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

[13] MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

[14] FRANKY B. Witzke. Propriedades de concretos estruturais contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018.

[15] STEIN, Ronei Tiago. Características de pastas de cimento Portland com adição de cinza de Lodo de ETA. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

[16] KOSMATKA, S. H.; PARANESE, W. C. Design and control concrete mixtures. 3rd ed., United States: Portland Cement Association, 205p. 1994.

[17] SCHWAAB, Samoel. Efeito da adição de aditivo plastificante retardador de pega nas propriedades de concretos usinados de cimento Portland usando planejamento fatorial. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, 2015.

[18] THEENATHAYALAN, R.; THIRISHA, S.N.; SUGANYA, R. Impact of different concrete ingredients on the microstructure of lightweight concrete – a comprehensive review. Material today: proceedings, available online 20 may 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.886>

[19] HARIHANANND, M.; RAJASHEKHAR, REDDY K. Study on durability of concrete by using rice husk as partial replacement of cement. Materials today proceeding, vol.52, p. 1794 – 1799, part 3, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.448>

[20] NGANGA, G., *et al.* Practical implementation of the durability index performance-based design approach construct. Vol. 45, p. 251-261, August 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.069>

[21] AIRE, C. *et al.* Durable concrete specification development and implementation for the New International Airport of Mexico. Case Studies in construction materials, vol. 11, December 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00286>

[22] Q. Li *et al.* Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong-Zhuhai-Macau sea link project. Structural Safety, vol. 53, pág. 1-12, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.11.002>

[23] HINO JUNIOR, J.R. *et al.* Comparison of test methods to determine resistance to chloride penetration in concrete: sensitivity to the effect of fly ash. Construction and building materials, vol. 277, 29 march 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122265>

- [24] WALLY, Gustavo Bosel; MAGALHÃES, Fábio Costa; FILHO SILVA, Luiz Carlos Pinto. From prescriptive to performance-based: An overview of international trends in specifying durable concretes. *Journal of Building Engineering*, vol. 52, 15 July 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104359>
- [25] NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do concreto*. 2 ed. São Paulo: BOOKMAN, 2013.
- [26] SHAN, Jingsong; ZHANG, Yuan, *et al.* Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. *Construction and Building Materials*, vol. 327, 11 April 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126874>
- [27] KUMAR, Rakesh. Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. *Construction and Building Materials*. vol. 124, n. 11, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.077>
- [28] RAO, S. Krishna; SRAVANA, P.; RAO, T. Chandrasekhar. Abrasion resistance and mechanical properties of roller compacted concrete with GGBS. *Construction and Building Materials*. v. 114, n. 13, 2016.
- [29] NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do concreto*. 2 ed. São Paulo: BOOKMAN, 2013.
- [30] SILVA, Cristina Vitorino da. *Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2011.
- [30] HOPPE FILHO, J. *et al.* Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. *Cerâmica*, v. 61, n. 358, p. 168-178, 2015.
- [31] ZHANG, Jinrui *et al.* External sulfate attack to reinforced concrete under drying-wetting cycles and loading condition: numerical simulation and experimental validation by ultrasonic array method. *Construction and Building Materials*, v. 139, n.10, 2017.
- [32] PADILHA JUNIOR; Marcos Antônio *et al.* Estado da arte do estudo do ataque por sulfatos em concretos: avaliação de ensaios acelerados versus ensaios de campo. In: *Congresso Técnico e Científico de Engenharia e da Agronomia*. 1. 2015.
- [33] TALAAT, Abdalla. Factors affecting the results of concrete compression testing: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, p. 205 - 221, March 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.015>
- [34] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653. *Materiais pozolânicos - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2014b.

- [35] FUNGARO, Denise Alves; SILVA, Magali Guilherme da. Utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de carvão como adsorvedor de metais em água. *Química Nova*. São Paulo, v. 25 n. 6b, p. 1081-1085, 2002.
- [36] RECENA, Fernando Antônio Piazza. Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2011.
- [37] CEZAR, Daiana de Souza. Características de durabilidade de concretos com cinzas volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2011.
- [38] MEYER, C. The greening of the concrete industry. *Cement and concrete composites*. v. 31, n. 8, p. 601-605, 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>
- [39] AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and Combustion Science*. v. 36, n. 6, p. 327-363, 2010.
- [40] ARGIZ, C.; MENÉNDEZ, E.; SANJUÁN, M. A. Efecto de la adición de mezclas de ceniza volante y ceniza de fondo procedentes del carbón em la resistencia mecánica y porosidad de cementos prtland. *Materiales de construcción*. v. 63, n. 309, 2013.
- [41] XIE, Z.; XI, Y. Hardening mechanism of an alkaline-activated class F fly ash. *Cement and concrete research*. v. 31, n. 9, p. 1245-1249, 2001.  
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00571-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00571-3)
- [42] CESARI, Vanessa Fernandes. Influência do uso de aditivos e dispersantes em pastas de geopolímeros produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro Tecnológico. Florianópolis. 2015.
- [43] ISAIA, Geraldo Cechella. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2v, 2007.
- [44] SOARES, Edgar *et al.* Desempenho mecânico de alvenaria de BTC estabilizados através de ativação alcalina de cinzas volantes In: Congresso Nacional de Geotecnia, 15. 2016. Porto. Anais. Porto. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2016.
- [45] BHATT, Apita; PRIYADARSHINI, Sharon *et al.* Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: a global review. *Case Studies in Construction Materials*, vol.11, December 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00263>
- [46] KOUKOUZAS, N.K.; ZENG, R. *et al.* Mineralogy and geochemistry of Greek and Chinese coal fly ash. *Fuel*, vol. 85, Issue 16, p. 2301-2309, November 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.02.019>

- [47] YAO, Z.T.; JI, X.S. *et al.* A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth - science reviews*, vol. 141, p. 105-121, February 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
- [48] ANJANI, R.K. Gollakota *et al.* Progressive utilisation prospects of coal fly ash: a review. *Science of the total environment*, vol. 672, p.951-989, 1 July 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
- [49] CHOUSIDIS, N. *et al.* Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes. *Construction and Building Materials*. v. 126, n. 11, p. 86-97, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.024>
- [50] BLANCO, F.; GARCIA, *et al.* Variation in fly ash properties with milling and acid leaching. *Fuel*, vol. 84, Issue 1, p. 89-96, January 2005.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.05.010>
- [51] SUSHIL, Snigdha; BATRA, Vidya. Analysis of fly ash heavy metal content and disposal thermal power plants in India. *Fuel*. v. 85. n. 12. 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.04.031>
- [52] PARK, Byoungsun; CHOI, Young Cheol. Effects of fineness and chemical activators on the hydration and physical properties of high-volume fly-ash cement pastes. *Journal of Building Engineering*. vol. 51, 1 July 2022, 104274.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104274>
- [53] Z. Heren *et al.* The influence of ethanolamines on the hydration and mechanical properties of portland cement. *Cement and Concrete research*, vol. 26, Issue 5, p. 701 - 705, May 1996.  
<https://doi.org/10.1016/S0008-8846>
- [54] BULLARD, J.W. *et al.* Mechanisms of cement hydration. *Cement and concrete research*, vol. 41, Issue 12, p. 1208 - 1223, December 2011.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>
- [55] SNELSON, D.G. *et al.*  
Heat of hydration of portland cement–metakaolin–fly ash (PC–MK–PFA) blends. *Cement and Concrete research*, vol. 38, Issue 6, p. 832 – 840, June 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.004>
- [56] J. Payá *et al.* Early-strength development of portland cement mortars containing air classified fly ashes. *Cement and concrete research*, vol. 25, Issue 2, p. 449 – 456, February 1995.  
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00031-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00031-3)
- [57] ADESINA, Adeyemi; AWOYERA, Paul O. Influence of fly ash in physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete. *The Structural Integrity of Recycled aggregate concrete produced with fillers and pozzolans woodhead publishing series in civil and structural engineering*, p. 25 - 37, 2022.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824105-9.00004-4>

[58] MODESTO, Rivana B. *et al.* Estudo mineralógico de carvão e cinzas volantes de usinas termelétricas: prevenção de depósitos de recuperação. In: Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. 9. 2014, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ABES, 2014.

[59] SUA-IAN, Gritsada; MAKUL, Natt. Utilization of coal- and biomass-fires ash in the production of self-consolidating concrete: a literature review. *Journal of Cleaner Production*. v. 100. n. 15. p. 59-76, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.038>

[60] FU, X. *et al.* Studies on blended cement with a large amount of fly ash. *Cement and Concrete Research*. v. 32, n. 7, p. 1153-1159, 2002.  
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00757-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00757-3)

[61] HANEHARA, S. *et al.* Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. *Cement and Concrete Research*. v. 31, n. 1, p. 1073-1077. 2001.  
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00441-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00441-5)

[62] HORNAIN, H.; MIERSMAN, F.L.; MARCHAND, J. Influence of residual carbon in fly Ash on microstructure and strength development of mortars and concretes. *ACI*, 1992.

[63] NOGUEIRA, Josiane Ramos. Reciclando cinzas: estudo de viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir da cinza volante residual de um reator de leito fluidizado. 2011. 169 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos. São Carlos. 2011.

[64] CANTARELLI, Gustavo Martins. Percolação de água em protótipos de concreto com elevados teores de escória e cinza volante com adição de cal. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2007.

[65] PUGLIESI, Nataly, Cimento: diferentes tipos e aplicações. 2016.

[66] BATTAGIN, Arnaldo Forti; RODRIGUES, Hugo. Recomendações sobre o uso dos distintos tipos de Cimento Portland nas diferentes aplicações. *Concreto e construções*. São Paulo. v. 1, n. 73, 2014.

[67] Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP. Guia básico de utilização de cimento Portland – boletim técnico. São Paulo: ABCP, 2002.

[68] HAMADA, Hussein M.; THOMAS, Blessen Skariah *et al.* Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: a comprehensive review. *Journal of Building Engineering*. Vol.40, August 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102286>

[69] MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J. Concrete microstructure, properties and materials. 2017.

[70] ISLAN, A. *et al.* Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete. *Construction and building materials*, vol. 152, p. 964 – 977, October 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.092>

[71] HUSSEIN, M. Hamada; AL- ATTAR, Alya'a A. *et al.* Effect of high-volume ultrafine palm oil fuel ash on the engineering and transport properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials*. vol. 12, June 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00318>

[72] GÓMEZ CASERO, M.A. *et al.* Physical, mechanical and thermal properties of metakaolin-fly ash geopolymers. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, vol. 26, May 2022, 100620.  
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100620>

[73] BEHL, Vishal; SINGH, Vinay *et al.* Characterization of physico-chemical and functional properties of fly ash concrete mix. *Material today proceeding*, vol. 50, p. 941 - 945, part. 5, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.353>

[74] RAFIEIZONOOZ, Mahdi; KHANKHAJE, Elnaz, *et al.* Assessment of environmental and chemical properties of coal ashes including fly ash and bottom ash, and coal ash concrete. *Journal of Building Engineering*, vol. 49, 15 May 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104040>

[75] VASKE, Nei Ricardo. Estudo Preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de ciclo mult ciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

[76] HASHMI, A. Fuzail *et al.* Uma investigação sobre resistência dependente da idade, módulo de elasticidade e deflexão de concreto de baixo teor de cinzas volantes de cálcio para construção sustentável. *Construction and building materials*, vol. 283, 10 de maio de 2021, 122772.

[77] HASHMIM, Fuzail; BAQI, Shariqa. An investigation into age dependente strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction. *Construction and building materials*, vol. 283, 10 May 2021, 122772.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122772>

[78] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PALOMO, A. Characterization of Fly Ashes: potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*. v. 82, n. 18, p. 2259-2265, 2003.

[79] BRIZOLA, Rodrigo Matzenbacher. Microestrutura do cobrimento de concretos com altos teores de escória e cinza volante ativadas por cimento portland e cal

hidratada. 2007. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2007.

[80] KARUMANCHI, Meeravali; BELLUM, Ramamohana Reddy *et al.* Influence on mechanical properties of concrete of cement replacement with fly ash and river sand replacement with foundry sand. *Material Today Proceedings*. Available online 20 June 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.146>

[81] MOCHARLA, Indrakiran Reddy; SELVAM, R. *et al.* Performance and life-cycle assessment of high-volume fly ash concrete mixes containing steel slag sand. *Construction and building materials*, vol. 341, 25 July 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127814>

[82] MAHADEVAN, Jayanth; KURIAKOSE, Nelvin Mani *et al.* Rheological and strength properties of fly ash incorporated rapid hardening cement mix. *Material Today*, proceeding, vol. 46, p. 4795 – 4799, part. 10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.315>

[83] CARMICHAEL, M. Jemimah; ARULRAJ, G. Prince; MEYYAPPAN, P.L. Effect of partial replacement of cement with nano fly ash on permeable concrete: A strength study. *Material Today Proceeding*, vol. 43, p. 2109-2116, part. 2, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.891>

[84] CUI, Yunpeng, WANG, Licheng *et al.* Impact of particle size of fly ash on the early compressive strength of concrete: Experimental investigation and modelling. *Construction and building materials*, vol. 323, 14 March 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126444>

[85] ITAMBÉ, cimento para toda a obra. <https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-ii-f-40/> Acessado em 22/06/2022.

[86] Rocha Junior, C.A.F., Santos, S.C.A, Souza, C.A.G., Angélica, R.S., Neves, R.F. Caracterização de cinza leve de caldeira e possibilidade de uso industrial. *Anais do 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 2010.

[87] KENGO, Nakamura; YUUSU, Kelnoue; TAKESHI, Komai. Consideration of strength development by three-dimensional visualization of porosity distribution in coal fly ash concrete. *Journal of Building Engineering* Vol. 35, March 2021, 101948. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101948>

[88] MOFFATT, E. G.; THOMAS, M. D. A.; FAHIM, A. Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment. *Cement and Concrete Research*, v. 102, 2017.