

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA KAROLINE DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA ADIÇÃO DE CINZAS, PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DA
MADEIRA, COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR NO CONCRETO.**

GUARAPUAVA

2023

BRUNA KAROLINE DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA ADIÇÃO DE CINZAS, PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DA MADEIRA, COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR NO CONCRETO.

Analysis of the addition of ash, from the combustion of wood, as a supplementary cementary material in concrete.

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

Orientador(a): Prof. MSC Marcela Maier Farias Czap.

GUARAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

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

BRUNA KAROLINE DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA ADIÇÃO DE CINZAS, PROVENIENTES DA COMBUSTÃO DA
MADEIRA, COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR NO CONCRETO.**

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

Data de Aprovação: 08/março/2023

Marcela Maier Farias Czap
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Laura Silvestro
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gessica Katalyne Bilcati
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

RESUMO

OLIVEIRA, Bruna Karoline. **Análise da adição de cinza, provenientes da combustão da madeira, como material cimentício suplementar no concreto.** 2023. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2023.

O concreto é um dos principais elementos da construção civil, utilizado em inúmeras áreas do setor. A intensificação de seu uso, estimulou o desenvolvimento de estudos que visam o melhoramento de suas propriedades mecânicas, por meio do acréscimo de materiais alternativos e aditivos ao concreto. Dentre estes, a utilização de materiais com propriedades pozolânicas tem apresentado resultados satisfatórios em estudos recentes. Neste contexto buscou-se por meio desse trabalho analisar as características e propriedades mecânicas de concretos, com a incorporação de cinzas provenientes de queima de madeira como material cimentício suplementar. O estudo analisou as mudanças das características físicas e mecânicas, para o traço de concreto, previamente estabelecido de 1 : 1,24 : 2,62; e para misturas com a substituição parcial de 5%, 10% e 15%, de cimento por cinzas. Foram realizados ensaios de compressão e tração, nas idades de 7 e 28 dias, bem como ensaios para definir o índice de vazios e capacidade de absorção do concreto. Os ensaios apresentaram melhorias na resistência a compressão para o teor de 5% de cinza. No entanto, para percentuais maiores, ocorreu uma redução da resistência a compressão do concreto. A resistência a tração por meio de compressão axial apresentou resultados semelhantes aos do ensaio de compressão. Já para a absorção observou-se uma diminuição no índice de absorção conforme se obtinha um teor de cinza maior. Portanto, o traço bem dosado de cinza, pode garantir resultados favoráveis para a aplicabilidade como concreto estrutural.

Palavras-chave: Concreto. Cinzas. Resistência. Durabilidade.

ABSTRACT

Concrete is one of the main elements of civil construction, used in numerous areas of the sector. The intensification of its use has stimulated the development of studies that aim to improve its mechanical properties, through the addition of alternative materials and additives to concrete. Among these, the use of materials with pozzolanic properties has shown satisfactory results in recent studies. In this context, this study aimed to analyze the characteristics and mechanical properties of concrete with the incorporation of ash from wood burning as a supplementary cementitious material. The study analyzed the changes in the physical and mechanical characteristics, for the previously established concrete mix of 1 : 1.24 : 2.62; and for mixtures with the partial replacement of 5%, 10% and 15%, of cement by ash. Compression and traction tests were performed at ages of 7 and 28 days, as well as tests to define the voids index and absorption capacity of the concrete. The tests showed improvements in the compressive strength for the 5% ash content. However, for higher percentages, there was a reduction in the compressive strength of concrete. The tensile strength by axial compression showed similar results to the compression test. As for the absorption, a decrease in the absorption index was observed as a higher ash content was obtained. Therefore, the well-dosed ash mix can ensure favorable results for applicability as structural concrete.

Keywords: Concrete; Ash; Resistance; Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Peneiras de malhas variáveis e agitador de peneira.....	18
Figura 2 - Curva granulométrica da areia.....	19
Figura 3 - Curva Granulométrica da cinza.....	25
Figura 4 - Composição química para a posição 2 θ	26
Figura 5 - Fluxograma do processo para o método da ABCP para a definição do traço.	27
Figura 6 - Curva de Abrams para a determinação da relação água/cimento em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade.	29
Figura 7 - Representação do molde de tronco cônico e haste de adensamento.	34
Figura 8 – Abatimento do concreto por meio do Slump test.....	35
Figura 9 - Resultados obtidos pelo ensaio de abatimento do cone	39
Figura 10 - Resistência média à compressão.	41
Figura 11 - Gráfico de Resistência à Tração por compressão.	42
Figura 12 - Percentual de absorção médio.....	43
Figura 13 - Percentual do índice de vazios.	44

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	6
1.1.	OBJETIVOS	8
1.1.1.	Objetivo Primário	8
1.1.2.	Objetivos Secundários.....	8
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1.	CONCRETO	9
2.1.1.	Cimento Portland	10
2.1.2.	Agregado Miúdo	11
2.1.3.	Agregado Graúdo	11
2.1.4.	Propriedades do Concreto.....	12
2.2.	ESTUDOS SOBRE O USO DE CINZAS NO CONCRETO	13
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1.	MATERIAIS UTILIZADOS	17
3.1.1.	Cimento Portland.....	17
3.1.2.	Agregado Miúdo	17
3.1.3.	Agregado Graúdo	21
3.1.4.	Cinzas	24
3.1.5.	Definição do traço pelo método ABCP	26
3.2.	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	33
3.3.	PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO	34
3.4.	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO.....	35
3.5.	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	36
3.6.	ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS.....	37
4.	RESULTADOS.....	38
4.1.	PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO	38
4.1.1.	Determinação Da Consistência Pelo Abatimento Do Cone	38
4.2.	PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO	39
4.2.1.	Resistência à Compressão.....	40
4.2.2.	Resistência à Tração por Compressão Diametral	41
4.2.3.	Absorção e Índice de Vazios	42
5.	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS:	47

1. INTRODUÇÃO

Em um contexto em que há uma crescente preocupação com cenário ambiental mundial, ampliou-se a demanda por investimentos em pesquisas e abordagens que visam mitigar os efeitos das ações humanas no ambiente.

Segundo Ramos (2021), é notável o crescente interesse do setor construtivo, em pautas relacionadas à sustentabilidade das edificações e à necessidade de novas estratégias para otimizar a utilização e exploração dos recursos naturais disponíveis. O autor ainda expõe a inevitável demanda no desenvolvimento dos materiais aplicados, como novas tecnologias construtivas.

O concreto é o principal elemento estrutural do Brasil, encontra-se em inúmeras vertentes do setor construtivo como na construção de edificações, pontes, pavimentos, entre outros. Para autores como Couto *et.al* (2013) tal disseminação desse elemento se dá em grande parte à sua praticidade de manuseio, alta resistência, principalmente a água, e a facilidade para obtenção das matérias empregues na fabricação do concreto convencional.

A ABNT NBR 12655 (ABNT, 2022), descreve o concreto como sendo uma mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, podendo ou não ser incorporado a essa mistura, componentes como aditivos químicos e materiais cimentícios suplementares (MSC), que desenvolvem suas propriedades a partir do endurecimento da pasta.

Em pesquisas, relacionadas às atividades do setor, há uma crescente busca por possíveis materiais alternativos ao cimento, que permitam a reutilização de resíduos descartados pela indústria e seus principais setores. Estudos como o de Hilal *et al* (2020), Pyo e Kim (2016), Pereira *et al* (2015) entre outros, destacam a adição de resíduos que apresentam características pozolânicas e apontam benefícios e melhorias nas propriedades do concreto endurecido associadas a adição desses materiais.

Dentre os materiais cimentícios suplementares, apresentados pela literatura, pode-se citar a cinza proveniente de diferentes origens e matérias. Tal material é considerado como descarte e com alto índice de periculosidade ao meio ambiente se descartado irregularmente, sendo assim uma possível alternativa de substituto ao cimento.

A queima da madeira é uma das principais fontes de energia em diversos setores, segundo dados extraídos do Balanço Energético Nacional no ano de 2020 7,5% de toda energia primária produzida no Brasil foi oriunda da queima da madeira, totalizando um consumo anual de 17.723.000 toneladas de lenha.

Cacuro e Waldman (2015) destacam que a utilização das cinzas como MCS apresenta a atenuação dos impactos ambientais e do custo de fabricação relacionado os materiais cimentícios, simultaneamente obtém-se também a redução do volume de cinzas descartadas no ambiente.

Hilal *et al* (2020), reportaram resultados positivos nas propriedades mecânicas, bem como apontaram impactos na durabilidade do concreto após a adição de materiais que possuam atividades pozolânicas. Todavia Hilal *et al* (2020), salientam a importância de um traço bem definido, tal qual, a influência da relação água/cimento (*a/c*) como ponto crucial para o desempenho do concreto.

Diante disso, o estudo teve como objetivo avaliar o comportamento de concretos com diferentes percentuais para a substituição do cimento por cinzas provenientes da queima de madeira. As análises realizaram-se por meio da elaboração de corpos de prova, submetidos aos ensaios de resistência a compressão, ensaio de resistência a tração por compressão axial e ensaio para a determinação da absorção de água e índice de vazios dos concretos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Primário

Analisar a viabilidade da utilização de cinzas, provenientes de combustão de biomassa, para a produção de concretos como substituto parcial para o cimento.

1.1.2. Objetivos Secundários

- Avaliar a influência, da substituição parcial na resistência a compressão e tração dos concretos;
- Avaliar a porosidade dos corpos de prova;
- Classificar os traços quanto a sua viabilidade de uso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Concreto

O concreto é o elemento estrutural com maior uso atualmente, sendo um material constituído por uma pasta de cimento e água, com adições de agregados miúdos e agregados graúdos, com graduação granulométrica variada. Para o melhoramento das propriedades da pasta pode-se ainda ser adicionado aditivos, que tem por finalidade melhorar aspectos isolados da mistura, atendendo as demandas de projeto (COUTO, 2013).

Autores como, Neville (2013), Lima *et al.* (2014) e Couto (2013), apontam fatores que contribuem para a alta disseminação do concreto no mercado, tais como a facilidade de acesso aos materiais necessários para sua a produção, a trabalhabilidade e versatilidade de uso, devido as características plásticas em seu estado fresco, a capacidade de resistência a água e a capacidade de endurecimento atribuindo alta resistência ao material resultante.

Com o crescimento do setor construtivo e do uso do concreto fortaleceu-se a necessidade de buscar soluções para amenizar os danos causados para o meio ambiente, com isso, o emprego de concretos sustentáveis ou concreto verde ganhou força, visto que, enquanto o concreto tradicional é produzido com brita, areia e cimento, o concreto sustentável busca substituir parcialmente tais elementos por resíduos sólidos industriais descartados inadequadamente, com finalidade de reduzir a contaminação dos solos e água, e favorecer a economia de recurso naturais (LIMA *et al.*,2014).

Nas seções subsequentes, serão apresentadas as principais características e propriedades dos elementos fundamentais para a produção do concreto. Tais informações, terão por finalidade nortear a pesquisa e auxiliar na definição dos materiais utilizados.

2.1.1. Cimento Portland

Segundo Lima *et al.* (2016), o cimento Portland é o material mais importante e de maior uso na construção civil, sendo utilizado em diversas áreas. Este produto é classificado como um aglomerante hidráulico, que em contato com água entra em processo físico – químico, tornando-se um material sólido de alta resistência à compressão, a água e sulfatos, quando seco.

O cimento é um material composto de clínquer e adições. O clínquer é o resultado da moagem de calcário e argila, a mistura formada passa pelo forno giratório a uma temperatura de aproximadamente 1450°C, na saída do forno o clínquer encontrasse em forma de pelotas, posteriormente passa pelo resfriamento o material e finalmente pelo processo de moagem das pelotas de clínquer.

As adições que compõem o cimento Portland são alternativas utilizadas para a composição de diversos novos tipos de cimento. As principais matérias primas utilizadas atualmente são a gipsita, que auxilia no tempo de pega da pasta, as escórias de alto forno retiradas de siderúrgicas, materiais pozolânicos, provenientes de rochas vulcânicas, matérias orgânicas fossilizadas, argilas e derivados da queima de carvão e por fim materiais carbonáticos (ABCP, 2002). Assim, os principais tipos de cimento Portland utilizados no Brasil, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais tipos de cimento Portland disponíveis no Brasil.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo		
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25,32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b -		
	Com adição	CP I-S				
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II - E				
	Com material de alto forno	CP II - F				
	Com material pozolânico	CP II - Z				
Cimento Portland de alto-forno		CP III				
Cimento Portland pozolânico		CP IV				
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB			25,32 ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB			-	-

Fonte: NBR 16697 (2018)

2.1.2. Agregado Miúdo

Lisboa (2017) e Fabro *et al.* (2019), classificam os agregados como sendo, elementos de extrema importância na produção do concreto. Suas propriedades influenciam diretamente na definição do traço do concreto, bem como na resistência, porosidade, módulo de elasticidade, zona de transição e massa específica.

Segundo a ABNT NBR 7211(ABNT, 2009), agregado miúdo são aqueles cujo grãos passam pela peneira de abertura de malha de 4,75mm, com ressalvas para limites estabelecidos e ensaiados pela ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2001).

Os agregados utilizados na construção segundo a ABNT NBR 7211(ABNT, 2009) são compostos por grão de origem mineral, duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos e não devem conter substâncias que possam afetar a hidratação e endurecimento do cimento.

2.1.3. Agregado Graúdo

A ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009), descreve agregado graúdo, como sendo o agregado cujos grãos passam pela peneira de 75 mm e ficam retidas na peneira de 4,75 mm. O agregado graúdo é o pedregulho natural, ou a pedra britada proveniente do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, pelo processo industrial da fragmentação controlada da rocha maciça. A brita 1 é mais utilizada na construção civil, muito apropriado para lajes, pisos, tubulões, vigas entre outras ABNT NBR 7211(ABNT, 2009).

A granulometria do agregado graúdo afeta não apenas a trabalhabilidade do concreto, mas a escolha de uma granulometria adequada influencia na resistência, visto que para se alcançar uma alta resistência exige-se um adensamento máximo das partículas da pasta (NEVILLE, 2013).

Mehta e Monteiro (2008), ressaltam características do agregado que influenciam na resistência do concreto, tais como a dimensão, forma, textura superficial, granulometria e a mineralogia do agregado graúdo. Visto que, estas características intervêm sobre as propriedades da zona de transição do concreto.

Mehta e Monteiro (2008), argumentam que uma granulometria com partículas que possuem uma dimensão máxima menor, requer maior quantidade de água de amassamento que partículas maiores. No entanto, partículas maiores, tendem a formar uma zona de transição mais fraca com mais microfissuras.

Mehta e Monteiro (2008), ainda ressaltam vinculação do módulo de elasticidade do concreto com a relação água/cimento da pasta de concreto, que por sua vez possui dependência da forma e granulometria do agregado graúdo.

Para tanto realiza-se ensaios de granulometria para gerenciar a escolha dos agregados de forma que atendam os requisitos desejados para o concreto.

2.1.4. Propriedades do Concreto

Considerando, que as propriedades do concreto endurecido, como a durabilidade, estabilidade e resistência, são amplamente afetadas pela qualidade do adensamento do concreto. Evidencia-se a importância de propriedades como consistência e trabalhabilidade do concreto fresco. Portanto, tais propriedades garantem que o concreto seja transportado, lançado e adensado, sem que a pasta sofra segregação (NEVILLE, 2013).

A trabalhabilidade do concreto pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário para que se obtenha o adensamento por completo da pasta (NEVILLE, 2013). Dentre os fatores que influenciam na trabalhabilidade, Neville (2013), cita a quantidade de água, tipo e granulometria dos agregados, a relação agregado/cimento, a presença de aditivos e a finura do cimento.

Embora, de extrema importância para qualidade e resistência do concreto, não existem ensaios capazes de calcular a trabalhabilidade de forma definitiva, no entanto, há ensaios que dão medidas de referência para a trabalhabilidade.

A resistência a compressão do concreto é a principal propriedade mecânica, responsável pela classificação de suas aplicações. Sendo necessário, que atenda aos requisitos mínimos de resistência, para que seja considerado para uso estrutural.

Segundo a ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015), são classificados como concreto para fins estruturais, aqueles que apresentam resistência superior a 20 MPa com idade de 28 dias, denominados classe C20.

Por via de regra, o concreto não é projetado para resistir à tração direta, contudo segundo Neville (2016), a resistência à tração é importante para a determinação da carga em que a fissura se inicia. A análise das fissuras é de extrema importância para casos de prevenção e manutenção de estruturas.

“A resistência à tração também é interessante para estruturas de concreto simples, como barragens, em condições de terremotos. Outras estruturas, como pavimentos rodoviários e de pistas de pouso, são projetadas com base na resistência à flexão, que implica em resistência à tração.” (NEVILLE, 2016, p. 621)

2.2. Estudos sobre o uso de cinzas no concreto

Estudos que buscam a utilização de cinzas como MCS, vem se popularizando entre as pesquisas do setor. Alguns trabalhos obtiveram resultados positivos e apontam para uma possibilidade de adaptação de novos traços para um concreto mais sustentável com a utilização das cinzas como substituto parcial de seus elementos.

A ABNT NBR 12653 (ABNT, 1992), descreve os elementos considerados como materiais pozolânicos, ou seja, materiais caracterizados por possuírem propriedades aglomerantes, quando finamente divididos e tornam-se reagentes sob a presença de água. A cinza proveniente da queima de matéria orgânica é descrita pela norma como material pozolânico de Classe E.

Carmo *et al.* (2019), após análise de estudos, que utilizaram a cinza de eucalipto como substituto para o cimento, afirmou que para que as cinzas possam ser utilizadas como substituto é imprescindível que as partículas se assemelhem as partículas do cimento, portanto quanto menor a granulometria da amostra de cinza mais próximo ao do cimento e possibilita melhores resultados.

Hilal *et al.* (2020), avaliaram a substituição parcial do cimento por cinza volante e cinza de carvão, resíduos resultantes da produção de churrasco em restaurantes. Para tanto, analisou-se o comportamento do concreto, em seu estado fresco e endurecido, para percentuais de substituição 10%, 20% e 30% de cimento por cinzas volantes e de carvão.

Para as análises quanto ao estado fresco do concreto, os autores realizaram ensaios como *slump flow diameter* e *slump flow time*. Os resultados obtidos indicaram

que a adição de cinzas volantes, reduziu o tempo de espalhamento do concreto, ou seja, ocasionou um aumento na sua plasticidade. Um comportamento semelhante foi observado no ensaio de *slump flow diameter*, onde a cinzas volantes apresentaram um aumento em sua plasticidade de 10%, comparando o traço base ao concreto com 30% de cimento substituído pelas cinzas volantes.

No entanto, para cinzas de carvão, os autores constataram a redução da plasticidade em cerca de 14%, se comparado ao traço base utilizado para o concreto.

Em relação à resistência à compressão, os concretos com percentuais de cinza de carvão de 10% e 20 % apresentaram um aumento de resistência. Porém para a adição de 30 % a resistência teve queda considerável. Uma tendência contrária foi observada no caso da cinza volante, ou seja, redução da resistência nas menores adições (10% e 20 %) e maior resistência para 30% de cinza ao fim dos 28 dias em relação ao traço de referência.

Para resistência a tração nos experimentos de Hilal *et al.* (2020), a adição de 10% de cinza, apresentou redução de 46% em sua resistência para cinzas volante e 16% para a cinza de carvão. No entanto para os demais percentuais analisados, a resistência a tração não apresentou variação considerável.

Pereira *et.al* (2014), descreveram o uso de cinza proveniente da queima de casca de arroz, com tamanho da moagem menor que 12 μm , como substituto parcial do cimento para argamassa e concreto. Como resultados da análise, para adições de cinza de 5% e 10% com idades de 28 dias, atingiu-se um aumento, da resistência a compressão axial, de no máximo 24% para o concreto e 28% para a argamassa.

Golewski (2017), aponta em sua pesquisa que a utilização de cinzas volantes, oriundas dos resíduos de processos industriais, como substituto parcial do cimento no concreto, viabiliza a produção de concreto verde sustentável. Em sua pesquisa concluiu que para adições de cinza em até 30% obteve-se o aumento das características mecânicas, tais como resistência à compressão axial e diametral para idades entre 180 e 365 dias, no entanto, para adições superiores a 30% ocorreu uma redução significativa dessas propriedades. O autor ainda prescreve a não utilização de cinzas em obras onde se busca alta resistência inicial.

Já Pyo e Kim (2016), utilizaram as cinzas de carvão e cinza volantes em sua pesquisa e realizaram ensaios de resistência para idades de 3, 7 e 28 dias. A partir dos ensaios constataram que o concreto com a adição das cinzas obteve para todas

as dosagens uma resistência inicial superior à do concreto de controle, ou seja, a resistência ao final de 3 dias de cura obteve um melhoramento com a adição das cinzas. Quanto às propriedades do concreto fresco, observou-se que amostras com menor módulo de finura, obtiveram melhores resultados quanto a trabalhabilidade.

Camelo e Alcantara (2019) realizaram a substituição parcial do cimento por cinzas de carvão mineral retiradas de uma termoelétrica. O concreto por eles elaborados teria a finalidade para a confecção de paver que seriam utilizados para tráfego de pedestre e veículos leves. Para a elaboração dos corpos de prova, os percentuais de cinza substituídos ao cimento foram de 7,5%, 10%, 12,5% e 15%. Os autores realizaram ensaios de resistência a compressão axial e diametral para definir as resistências a compressão e flexão dos paver. Onde observaram uma redução das resistências analisadas, conforme ocorria o aumento do percentual de cimento substituído. Apresentaram uma redução de 24% para os maiores percentuais (15%).

Akasaki *et al.* (2015), analisaram a influência da adição de cinzas de casca de arroz no tempo de pega inicial e final do concreto. Para o estudo os autores realizaram a adição progressiva de 5% a 10% de cinzas e observaram os tempos de pega inicial e final para cada traço. Para uma adição de 5% o tempo inicial de pega comparado ao traço de controle aumentou em 8 minutos, enquanto tempo de pega final reduziu em 4 minutos. Logo para o traço com adição de 10%, o tempo de pega inicial reduziu em 9 minutos e o tempo final reduziu em 7 minutos. Ao comparar os resultados encontrados com a norma, concluíram que os resultados foram positivos, pois a substituição não causa mudanças significativas no tempo de pega do concreto, estando dentro da margem de alteração prevista.

Borges (2013), realizou a comparação com a adição de cinzas de casca de arroz (CCA), comparando com a adição de sílica ativa e metacaulim no concreto. Analisou-se que concretos com a adição de CCA ou de sílica ativa obtiveram resultados semelhantes quanto a resistência a compressão, atingindo aumento da resistência de 30% e 33% respectivamente, enquanto o metacaulim apresentou aumento de 18% se comparado a resistência do traço de referência. O autor também analisou as variações no módulo de elasticidade, massa específica, índice de vazios e absorção de água, como objetivo de sondar uma relação, entre os resultados obtidos para a resistência a compressão e as propriedades consideradas.

Contudo, pode-se associar o aumento da resistência com a diminuição do índice de vazios e absorção de água pelo concreto. Os resultados seguiram uma

linearidade similar à da resistência, onde apresentou menores valores para o traço com adição de metacaulim, com redução de 6% para ambas as propriedades. Logo, para as adições de CCA e de sílica ativa, apresentaram reduções de 10% e 17% respectivamente para o índice de vazios, também 11% e 16% de redução para a absorção de água pelo concreto.

Bem como Borges (2013) e Akasaki *et al.* (2015) citados acima, Ludwig (2014), propôs em seu estudo a substituição parcial de cimento por cinzas provenientes da queima de casca de arroz. O autor analisou os efeitos dessa adição em percentuais de 3%, 5% e 7%, na resistência à compressão do concreto. No entanto, diferentemente dos trabalhos similares citados, o de Ludwig (2014), não apresentou aumentos significativos, obtendo um aumento apenas 5% na resistência para o traço com 3 % de cimento substituído, uma redução de 18% na resistência para o traço com 5% e se igualando para traços de 7%.

Em uma visão geral dos estudos apresentados nessa seção, a utilização de cinzas de diferentes origens, como substituto parcial para o cimento, atribuiu melhorias em propriedades como módulo de elasticidade. Bem como, em alguns casos a diminuição no número de vazios e índice de absorção de água do concreto, propriedades que influenciam diretamente quanto a resistência do concreto.

No entanto, para percentuais próximos aos 20%, apresentou-se uma redução da resistência do concreto de até 15 % se comparado aos traços base. Portanto, as substituições apresentaram pontos positivos e negativos, variando conforme o traço, origem da cinza e sua aplicabilidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais utilizados

3.1.1. Cimento Portland

Para a elaboração do trabalho optou-se pela utilização do cimento Votoran para todas as obras do tipo CP-II Z 32. Os cimentos de nomenclatura CP- II, indicam um cimento composto, ou seja, possuem a adição de outros materiais a sua mistura, para este caso a composição CP – II Z indica a presença de materiais pozolânicos na mistura. A disponibilidade e comum comercialização desse material, contribuiu para a escolha deste material.

3.1.2. Agregado Miúdo

Para o agregado miúdo realizou-se os ensaios de granulometria, estipulando o módulo de finura, seguindo as recomendações da ABNT NM 248 (ABNT, 2001), bem como o ensaio para a definição da massa específica, determinada conforme a normativa do ABNT NM 52 (ABNT,2002).

Segundo as recomendações da ABNT NM 248 (ABNT, 2001), a amostra a ser ensaiada necessita estar livre da presença de umidade excedente, para tanto, fez-se necessário a secagem da amostra com a utilização da estufa. A amostra selecionada permaneceu em estufa por um período aproximado de 24 horas, para garantir sua secagem uniforme.

Após o período de secagem, realizou a pesagem e posteriormente colocou-se a amostra em uma série de peneiras padrão com aberturas de 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 600 μ m, 300 μ m, 150 μ m, 75 μ m e a bandeja. Fixou-se as peneiras ao agitador mecânico como mostra a Figura 1. Após 20 minutos, retirou-se a amostra do agitador e foram separadas as amostras retidas nas peneiras de recipientes distintos para a pesagem do material.

Figura 1 - Peneiras de malhas variáveis e agitador de peneira.



Fonte: Autora (2023)

Para cada uma das amostras retidas nas peneiras calculou-se o seu percentual em relação a massa total, determinando o percentual acumulado em cada peneira e posteriormente o módulo de finura com aproximação de 0,01, como apresentado pela Equação 1.

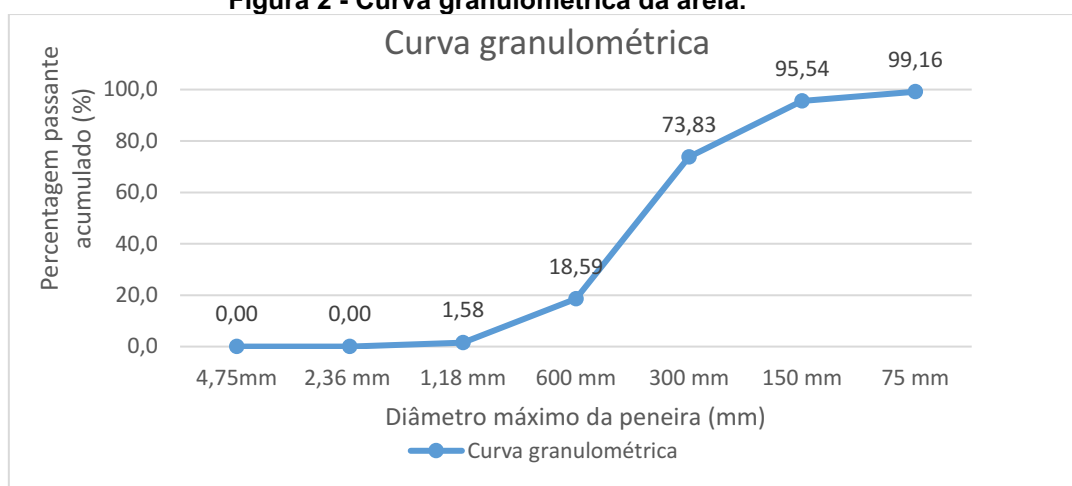
$$MF = \frac{\text{percentual acumulado}}{100} \quad \text{Equação 1}$$

Coletou-se uma amostra contendo 1 kg de areia, como critério de estudo as amostras retidas nas peneiras de 4,75 mm e 2,36 mm foram descartadas. As massas das amostras pesadas, bem como a porcentagem retida em cada peneira e o cálculo do módulo de finura estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise granulométrica e Módulo de finura da areia

Abertura	Peso retido (g)	Porcentagem Retida	Porcentagem Passante Acumulado	Porcentagem que passa
4,75mm	0	0,00	0,00	100,00
2,36 mm	0	0,00	0,00	100,00
1,18 mm	15,65	1,58	1,58	98,42
600 µm	168,86	17,01	18,59	81,41
300 µm	548,21	55,24	73,83	26,17
150 µm	215,5	21,71	95,54	4,46
75 µm	35,89	3,62	99,16	0,84
bandeja	8,34	0,84	-	-
	992,45	100	288,70	
			Módulo de Finura	2,89

Fonte: Autora (2023)

Figura 2 - Curva granulométrica da areia.

Fonte: Autora (2023)

Por meio do ensaio descrito pela ABNT NM 52 (ABNT, 2002), calculou-se a massa específica da areia. Para tanto, empregou-se exclusivamente as amostras que não ficaram retidas pela peneira com abertura de malha de 2,36 mm.

Coletou-se a amostra de 1 kg de areia e depositou-a em um recipiente com água cobrindo toda a porção, conservou-se assim por um período de 24 horas. Completo o tempo sugerido pela norma, retirou-se a água e estendeu a amostra sobre uma superfície plana, submetendo-a uma suave corrente de ar, revirando a amostra constantemente para garantir uma secagem uniforme, até que os grãos não estejam fortemente aderidos entre si.

Assegurando a secagem uniforme da amostra, depositou-se o agregado miúdo em um molde de tronco cônico sem comprimi-lo. Com o auxílio de uma haste de socamento compactou-se a superfície suavemente com 25 golpes e então retirou-se o molde verticalmente. A NM 52 (2002), indica que se a ainda houver umidade superficial a agregado conserva a forma do molde. Diante disso, retorna a amostra para a secagem, revolvendo os grãos de agregados. Repetindo-se o ensaio até que ao retirar o molde a amostra desmorone parcialmente. Para esse estudo repetiu-se por duas vezes o procedimento até obter o resultado desejado.

Certificada que a amostra está livre de umidade superficial, pesou-se 500g da amostra do agregado miúdo, adicionou-se essa parcela em um frasco de vidro, registrou-se a massa do conjunto frasco e areia. Encheu-se o frasco com água até a marca de 500 ml, mantendo a amostra imersa no frasco por aproximadamente 1 hora, finalizado esse prazo completou-se o frasco com água e aferiu a massa do conjunto água, agregado e frasco.

A massa específica do agregado miúdo (d) é expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm^3), segundo a NM52 (2009) seu cálculo é dado pela Equação 2 e está relacionado a massa de amostra seca em gramas (m), o volume do frasco em centímetros cúbicos (V), volume de água adicionado no frasco determinado segundo a Equação 3 e expressa também em centímetros cúbicos, a massa da amostra na condição saturada de superfície seca (m_s) em gramas e a massa específica da água expressa em gramas por centímetros cúbicos.

$$d = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad \text{Equação 2}$$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad \text{Equação 3}$$

Como supracitado o cálculo da massa específica depende das massas saturadas de superfície seca e da massa imersa. Os valores aferidos pelo ensaio, bem como a massa específica calculada pela Equação 2, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados obtidos em ensaio e massa específica do agregado miúdo.

Amostra Saturada	500,000 g
Amostra seca	437,890 g
Frasco + Agregado	640,620 g
Frasco + Agregado + Água	1091,100 g
Volume do Frasco	679,900 cm ³
Volume de Água Adicionado	451,836 cm ³
Massa Específica da Água	0,997 g/cm ³
Massa Específica da Areia	2641,595 kg/m ³

Fonte: Autora (2023)

3.1.3. Agregado Graúdo

Para a caracterização dos agregados graúdos determinou-se a composição granulométrica, seguindo as orientações já descritas para o agregado miúdo, bem como os ensaios de massa unitária, massa específica e índice de absorção do agregado, seguindo as orientações das normas técnicas, ABNT NBR 16972 (ABNT, 2021) e ABNT NBR 16917 (ABNT, 2021) respectivamente.

Para a determinação da curva granulométrica do agregado graúdo coletou-se uma amostra de 10,2 kg. Como definiu-se para esse estudo um diâmetro máximo de agregado de 19 mm, desprezou-se o material retido nas peneiras de 38,1 e 25 mm. Portanto, as massas aferidas, bem como o módulo de finura calculado pela Equação 1, estão indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Curva Granulométrica do agregado graúdo.

Abertura (mm)	Peso retido (g)	Porcentagem Retida	Porcentagem Acumulado	Porcentagem que passa
38,1 mm	0	0,00	0,00	100,00
19,1 mm	14,92	0,15	0,15	99,85
9,5 mm	7862,99	77,73	77,88	22,12
4,75 mm	2237,54	22,12	100,00	0,00
2,4 mm	0	0,00	100,00	0,00
1,2mm	0	0,00	100,00	0,00
0,6 mm	0	0,00	100,00	0,00
0,3 mm	0	0,00	100,00	0,00
0,15 mm	0	0,00	100,00	0,00
FUNDO	0	0,00	-	-
	10115,45	100	678,03	
			Módulo de Finura	6,78

Fonte: Autora (2023).

Para o cálculo da massa específica do agregado graúdo, utilizou-se uma amostra de 5 kg de brita, com material retido pela peneira com malha de 4,75 mm de abertura. A fim de remover toda poeira ou outro material da superfície, lavou-se a amostra até eliminar toda sujeira superficial.

A amostra limpa passou para a etapa de secagem em estufa com temperatura média constante de (105 ± 5) °C, por um período aproximado de 24 horas com a intenção de remover toda a umidade superficial da amostra. Após o período orientado pela norma, retirou-se a amostra da estufa, mantendo-a em temperatura ambiente até o seu resfriamento. Concluído o processo de secagem da amostra, determinou-se a massa da amostra seca (m_s).

Posteriormente, com auxílio de um cesto metálico submergiu a amostra em um recipiente com água, permanecendo submerso por um período aproximado de 24 horas. Finalizado o período de imersão retirou-se a amostra da água e com a contribuição de um pano absorvente, retirou-se a lâmina de água superficial e determinou a massa da amostra saturada (m_{sat}), seguidamente com o auxílio do cesto metálico determinou-se a massa da amostra imersa (m_i).

A ABNT NBR 16917 (ABNT, 2021), traz o cálculo de equações para a massa específica do agregado seco, em estado de saturação com superfície seca e o índice de absorção de água pelo agregado. A norma ainda, define a massa específica em condição seca, como a relação da massa do agregado seco e seu volume, considerando os poros permeáveis. Para tanto, calculou-se valor da massa específica seca e o índice de absorção, obtidos Equação 4 e Equação 5:

$$\rho_s = \frac{m}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 4}$$

$$Abs = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

A ABNT NBR 16972 (ABNT, 2021) descreve o ensaio de para a determinação da massa unitária do agregado. A norma ainda define, massa unitária do agregado graúdo, como a relação entre o agregado lançado em um recipiente e o volume do recipiente, tal relação é relevante ao estudo do traço do concreto.

Segundo a ABNT NBR 16972 (ABNT, 2021) há três modelos de ensaio para tal determinação, de acordo com as dimensões do agregado escolhido e a condição dele. Sendo o modelo A indicado para agregados com dimensão máxima de 37,5 mm ou menor. O modelo B é recomendado quando se tem o emprego de agregados com dimensão máxima superior a 37,5 mm e inferior a 75 mm. E por fim o modelo C, deve ser empregado para determinar a massa unitária do material solto.

A critério de escolha do agregado empregado para a composição do concreto, utilizou-se o modelo A para a realização do ensaio e definição da massa unitária dos agregados graúdos.

As dimensões e definições estabelecidas para o recipiente utilizado no ensaio devem atender o requerido pela norma e apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Características do recipiente

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Recipiente		
	Capacidade Mínima (dm ³)	Diâmetro interior (mm)	Altura interior (mm)
$d \leq 37,5$	10	220	268
$37,5 \leq d \leq 50$	15	260	282
$50 < d \leq 75$	30	360	294

Fonte: NBR 16972 (2021)

A amostra utilizada para o ensaio deve ser constituída de 150% da quantidade do material necessário para encher o recipiente. E deverá ter passado por processo de secagem em estufa, à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ (ABNT NBR 16972, 2021).

Seguindo as orientações do método A, pesou-se o recipiente vazio. Em seguida adicionou parte do material até aproximadamente um terço do recipiente, nivelou-se a superfície com os dedos e executou-se o adensamento com a colaboração de uma haste de adensamento, efetuando 25 golpes distribuídos sobre a superfície do material. Continuou-se o abastecimento até atingir dois terços do recipiente e repetiu-se o procedimento de adensamento das camadas.

Enfim, preencheu-se o recipiente, adensando a última camada como as demais. Com a amostra compactada nivelou-se a superfície com auxílio de uma espátula, de forma a rasá-la com a borda superior. Por fim, determinou-se a massa do recipiente com seu conteúdo. A massa unitária (ρ_{ap}) expressa em kg/m^3 e é dada pela Equação 6, em relação a massa do recipiente com o agregado (m_{ar}), a massa do recipiente vazio (m_r) e o volume do recipiente (V).

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad \text{Equação 6}$$

Os valores obtidos para a massa específica e índice de absorção, calculados pela Equação 4 e Equação 5, estão indicados na Tabela 6 e valores de massa unitária estão descritos na Tabela 7.

Tabela 6 - Massa específica e índice da absorção de água do agregado graúdo.

Ensaio de Massa Específica	
Amostra Seca	5000,000 g
Amostra Saturada	5449,140 g
Amostra Submergida	3512,850 g
Massa Específica Aparente	2582,258 kg/m ³
Absorção de água	8,983 %

Fonte: Autora (2023).

Tabela 7 - Massa Unitária agregado graúdo

Massa unitária	
Brita + Recipiente	19,450 kg
Recipiente	1,050 kg
Volume	0,011 m ³
Massa Unitária	1698,593 kg/m ³

Fonte: Autora (2023).

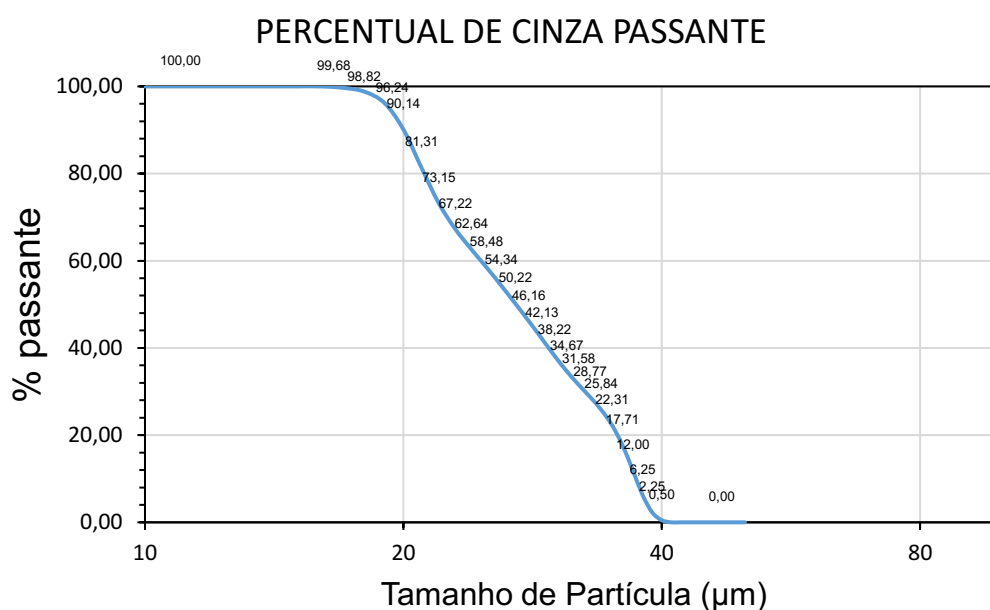
3.1.4. Cinzas

Escolheu-se como material cimentício suplementar, as cinzas provenientes da queima de madeira utilizada como carvão. Para garantir que tal material, apresentará os resultados esperados para os ensaios, é necessário analisar se o mesmo possui características que o definam como um material com atividade pozolânica.

Segundo a ABNT NBR 12653 (ABNT, 2014), as propriedades pozolânicas de materiais, atribui-se a finura do composto. Portanto, para a caracterização da granulometria da cinza de utilizada, efetuou-se o ensaio de distribuição de tamanho da partícula, realizado no equipamento S3500 (Microtrac), com intervalo de detecção de 0,1 a 3500 µm, com operação por via seca.

A Tabela 17 evidenciada no Apêndice A, apresenta os percentuais de cinza passados para cada tamanho de partícula apresentado pelo ensaio. A Figura 3 apresenta a curva granulométrica obtida para as cinzas, relacionando o percentual de cinza passante com o tamanho das partículas analisadas. Já a Tabela 8 apresenta um resumo do percentual passante para tamanhos de 10 μm , 50 μm e 90 μm .

Figura 3 - Curva Granulométrica da cinza.



Fonte: Autores (2023).

Tabela 8 - Percentual passante.

Percentual de cinza passante	
Tamanho da partícula (μm)	% passante
D10	2,596
D50	15,42
D90	52,18

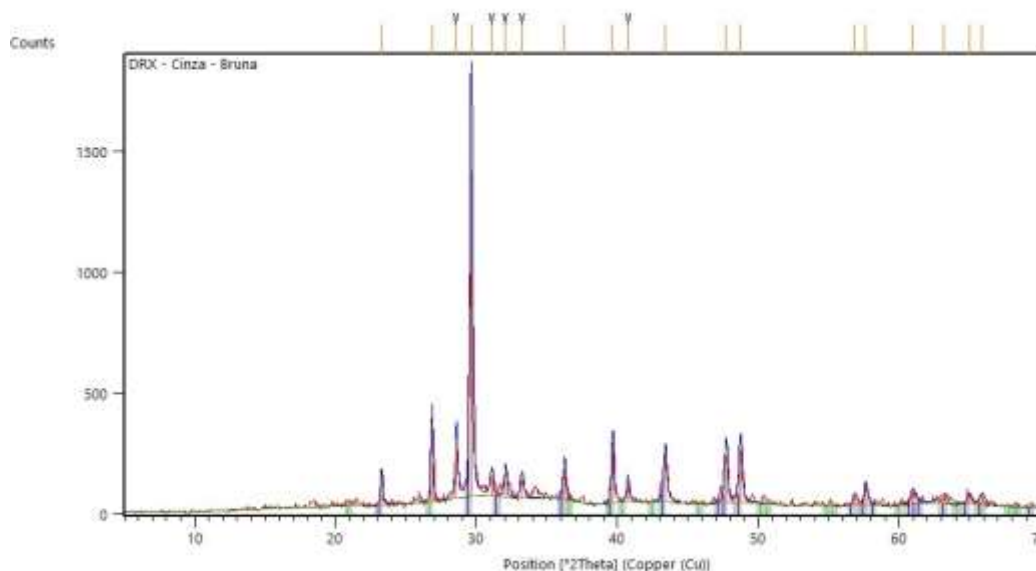
Fonte: Autores (2023).

Para a caracterização química da amostra de cinza, realizou-se o ensaio de difração de raios-X, com auxílio do Difratômetro Miniflex (Rigaku), com 30kV/15mA, radiação $\text{CuK}\alpha$ e intervalo de análise de $5 - 70^\circ 2\theta$ e passo de $0,05^\circ 2\theta$.

A Figura 4, apresenta o gráfico gerado por meio do Software HighScore, para a identificação dos halos amorfos e composição cristalina da amostra de cinza. Ao analisar o gráfico, observou-se picos cristalinos de Calcita - carbonato de cálcio (ICDD

00-005-0586) e Quartzo (ICDD 00-046-1045). Por meio da análise de Software possibilitou a identificação de halo amorfo fraco da amostra. Tal condição define uma baixa possibilidade de possuir propriedades pozolânicas da cinza.

Figura 4 - Composição química para a posição 2 θ .



Fonte: Autores (2023).

3.1.5. Definição do traço pelo método ABCP

No Brasil não dispõe de uma norma vigente ou um método exclusivo para a definição do traço de concreto, existindo uma variedade de métodos disponíveis na bibliografia. Portanto, adotou-se para o trabalho, a metodologia publicada pela Associação Brasileira de Cimento Portland em 1984, sob o título de “Parâmetros de Dosagem do Concreto”, sendo uma adaptação do método publicado pelo *American Concrete Institute* e se caracteriza por ser uma metodologia demasiadamente experimental.

De acordo com Assunção (2002), o método considera a análise de tabelas e gráficos descritos a partir de informações experimentais, que admitem a aplicação dos agregados como disposto na ABNT NBR 7211 (ABNT, 2019).

Inicialmente o método prevê a caracterização dos materiais a serem utilizados para a confecção do concreto, como: resistência característica do cimento aos 28 dias, diâmetro máximo do agregado graúdo, abatimento esperado do concreto fresco

(*Slump test*), módulo de finura do agregado miúdo, massa específica do agregado graúdo, massa específica do agregado miúdo, massa específica do cimento, massa específica da água. Tais características são expostas na Tabela 9.

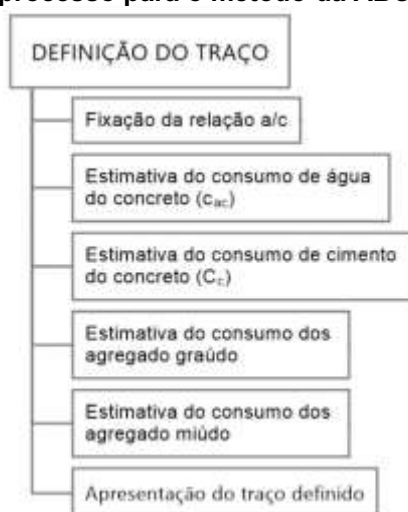
Tabela 9 - Caracterização dos Materiais

Caracterização dos Materiais		
Resistencia Característica Do Concreto Aos 28 Dias (f_{ck})	32	MPa
Diâmetro Máximo Agregado Graúdo	25	mm
Abatimento Concreto Fresco	80 - 100	mm
Módulo De Finura Agregado Miúdo	2,89	
Massa Especifica Do Agregado Graúdo	2582,258	kg/m ³
Massa Especifica Do Agregado Miúdo	2641,595	kg/m ³
Massa Especifica Do Cimento	2960	kg/m ³
Massa Especifica Da Água	977	kg/m ³
Massa Unitária da Do Agregado Graúdo	1698,593	Kg/m ³

Fonte: Autores (2023).

O passo a passo para a definição do traço, por meio do método, é descrito no fluxograma apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma do processo para o método da ABCP para a definição do traço.



Fonte: Autora (2023).

A fixação da relação a/c leva em consideração a resistência média do concreto à compressão com idade de 28 dias. Esse dado é obtido a partir da resistência características do concreto à compressão aos 28 dias, conforme estabelecido pela ABNT NBR 12655 (ABNT, 2015), pela Equação 7.

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \times s_d$$

Equação 7

A resistência característica do concreto foi definida em concordância aos parâmetros estipulados pela ABNT NBR 12655 (ABNT, 2015), de acordo com o cimento escolhido para a confecção dos corpos de prova.

Para o desvio padrão do concreto como não se possui um valor conhecido, utilizou-se a Tabela 6 da ABNT NBR: 12655 (ABNT, 2015), que é apresentada na Tabela 10, a o valor do desvio padrão de acordo com o modo de preparo concreto.

Tabela 10 - Desvio-padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto

Condição de preparo do concreto	Desvio-padrão MPa
A	4,0
B	5,5
C	7,0

Fonte: NBR12655 (ABNT, 2015)

Como o concreto utilizado, foi preparado com o cimento, a água de amassamento e os agregados graúdos e miúdos medidos em massa e essa condição caracteriza a condição “A”, portanto o desvio padrão do concreto fixado foi de 4 MPa.

Dessa maneira a resistência média do concreto aos 28 dias, fixou-se como sendo,

$$f_{cm,28} = 32 + 1,65 \times 4 = 38,6 MPa$$

Por fim a relação a/c é indicada através da Curva de Abrams, que relaciona a resistência média do concreto aos 28 dias com a resistência característica do cimento utilizado. Segundo a relação das resistências supracitadas e pela análise da Curva de Abrams disponível pela ABCP, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Curva de Abrams para a determinação da relação água/cimento em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade.

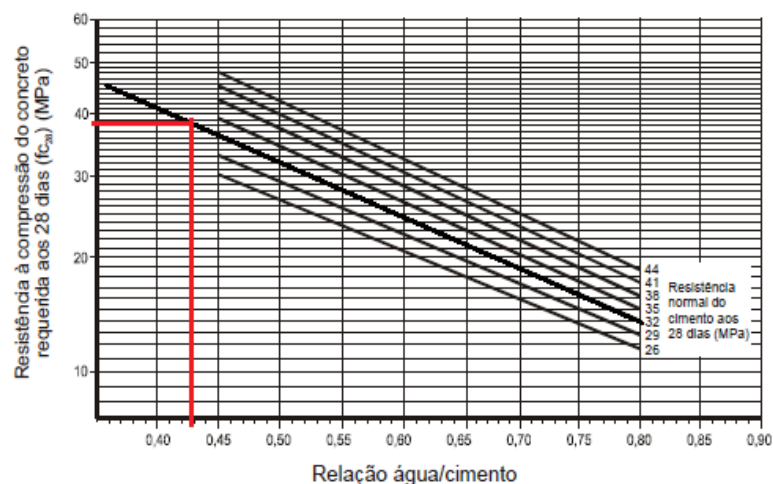


FIGURA 2.14 – Gráfico para a determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade (Rodrigues, 1998).

Fonte: Rodrigues (1998)

Rodrigues (1998), afirma que a quantidade de água requerida para um concreto, com determinada consistência, é determinada particularmente pelas características dos agregados e do consumo de cimento. Portanto, deve-se ser estimado experimentalmente.

No texto publicado por Rodrigues (1989), o autor dispõe de uma tabela com uma estimativa inicial para o consumo de água por metro cúbico de concreto, em função da dimensão máxima do agregado graúdo e a consistência do concreto, pelo abatimento do tronco do cone (*Slump test*). Os valores disponibilizados pelo autor estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto em função do Diâmetro Máximo Característico do Agregado e do abatimento da mistura.

ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (mm)	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO ($\phi_{\text{máx}}$)			
	9,5 mm	19 mm	25 mm	32 mm
40 a 60 mm	215 l/m ³	185 l/m ³	180 l/m ³	175 l/m ³
60 a 80 mm	220 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³	180 l/m ³
80 a 100 mm	225 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³

Fonte: Rodrigues (1998).

Portanto, definiu-se para este estudo a dimensão máxima do agregado graúdo de 19 mm e admitiu-se um abatimento de 80 a 100 mm, em vista disso, a estimativa inicial para o consumo de água fixada é 190 l/m³.

O método recomenda a verificação experimental, por meio do abatimento do cone. Para tal verificação pode-se utilizar da Equação 8, que considera o consumo de água inicial (C_{ai}), o abatimento inicial (ST_i) e o abatimento requerido (ST_r), para estabelecer o consumo de água requerido por metro cúbico de concreto (C_{ar}).

$$C_{ar} = C_{ai} \times \left(\frac{ST_r}{ST_i} \right)^{0,1} \quad \text{Equação 8}$$

Fixada a relação água/cimento e estimado o consumo de água pode-se estabelecer o consumo de cimento por metro cúbico de concreto fazendo uso da Equação 9.

$$C = \frac{C_{ag}}{(a/c)} \quad \text{Equação 9}$$

O consumo de cimento estimado é dado pela Equação 9, e relaciona o consumo estimado de água e a relação a/c.

$$C = \frac{190}{0,428} = 443,925 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Portanto, obteve-se uma estimativa de cimento de 443,925 kg/m³.

A estimativa para o Consumo dos Agregados decorre em função da dimensão máxima característica do agregado graúdo e do módulo de finura da areia. Rodrigues (1998) fornece no documento publicado pela ABCP uma tabela que relaciona o módulo de finura e a dimensão do agregado para obter o volume do agregado graúdo compactado por m³ de concreto, tais valores estão representados na Tabela 12.

Para obter a estimativa do consumo de agregados, deve-se utilizar o valor fixado para volume do agregado, apresentado na Tabela 12 e multiplicá-lo pela Massa Unitária do Agregado (MU), como definido pela Equação 10.

$$C_p = V_{pc} \times MU_c \quad \text{Equação 10}$$

Tabela 12 - Volume do Agregado Graúdo compactado por m³ de concreto

Módulo de Finura da Areia	Dimensão máxima do agregado ($\phi_{\text{máx}}$)			
	9,5	19,0	25,0	32,0
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660

Fonte: Rodrigues (1998)

A Tabela 12 relaciona o diâmetro máximo do agregado e seu módulo de finura, já apresentado na seção 3.1.2.

$$C_p = 0,686 \times 1698,593 = 1165,235 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Portanto o consumo de agregado graúdo pelo método ABCP será de 1165,235 kg/m³.

A definição do consumo de agregado miúdo realizou-se posteriormente a obtenção dos valores de consumo de água, cimento e agregado graúdo.

Considerando que o volume de concreto é constituído pela soma dos volumes de seus componentes. Desse modo para um metro cúbico de concreto, o volume de agregado miúdo utilizado é determinado pela Equação 11.

$$V_a = 1 - \left(\frac{C}{\gamma_c} + \frac{C_p}{\gamma_p} + \frac{C_{ag}}{\gamma_{ag}} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Logo o consumo de agregado miúdo (C_a) por metro cúbico é dado pela relação do volume de areia e sua massa específica (γ_a), dada pela Equação 12.

$$C_a = V_a \times \gamma_a \quad \text{Equação 12}$$

Segundo Rodrigues (1998), para facilitar a apresentação, o traço será expresso em relação a massa de cimento. O método descreve as porções do traço como a divisão das estimativas de consumo de cada material pelo consumo de cimento, como mostra a Equação 13.

$$1: \frac{C_p}{C} : \frac{C_a}{C} : \frac{C_{ag}}{C}$$

Equação 13

$$V_a = 1 - \left(\frac{443,925}{2960} + \frac{1165,235}{2582,258} + \frac{190}{977} \right) = 0,208 m^3$$

$$C_a = 0,208 \times 2641,595 = 549,999 kg / m^3$$

A definição do traço está descrita na Tabela 13.

Tabela 13 - Definição do traço a ser utilizado.

Relação Água e Cimento	0,428
Estimativa Consumo de Água	190,000 l/m ³
Consumo de Cimento	443,925 kg/m ³
Volume do Agregado Graúdo	0,686 m ³
Consumo de Agregado Graúdo	1165,235 kg/m ³
Volume de Agregado Miúdo	0,208 m ³
Consumo de Agregado Miúdo	549,999 kg/m ³

Fonte: Autora (2023).

Apoiado nos valores obtidos de consumo de água, cimento e agregados é possível definir o traço base para o estudo por meio da Equação 13. A partir do traço base definiu-se os novos traços com a adição das cinzas por substituição parcial do cimento, os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Traço base e traços com substituição.

Cinza	Cimento	Areia	Brita	Água
0,00	1	1,24	2,62	0,43
0,05	0,95	1,24	2,62	0,43
0,10	0,90	1,24	2,62	0,43
0,15	0,85	1,24	2,62	0,43

Fonte: Autora (2023).

Quando se iniciou a moldagem do traço base, observou-se visualmente que a pasta apresentava aparência seca, por tanto realizou-se a correção traço,

adicionando água de 100 ml em 100 ml até obter um concreto plástico. Portanto obteve-se uma nova relação água cimento para o novo traço, os novos traços estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Traços com correção da relação a/c.

Cinza	Cimento	Areia	Brita	Água
0,00	1	1,24	2,62	0,51
0,05	0,95	1,24	2,62	0,51
0,10	0,90	1,24	2,62	0,51
0,15	0,85	1,24	2,62	0,51

Fonte: Autora (2023).

3.2. Moldagem e cura dos corpos de prova

Com base nos traços definidos, realizou-se a moldagem dos corpos de provas que foram submetidos aos ensaios. Por questão de disponibilidade, optou-se por realizar a modelagem em corpos de prova cilíndricos. A ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015) prevê que para corpos de prova desse formato, a altura deve ser o dobro do diâmetro, para isso, indica diâmetros de 10, 15, 20, 25, 30 ou 45 cm. Portanto, para este trabalho escolheu-se os corpos de prova com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, atendendo as determinações da ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015).

Para cada traço realizou-se a moldagem de 20 corpos de prova, rompidos para compressão e tração por compressão diametral com idades de 7 e 28 dias de idade e mais 5 para a realização do ensaio de absorção. Portanto, para cada traço totalizou-se 25 corpos de prova.

Anteriormente a moldagem, realizou-se a preparação dos moldes, revestindo-os por uma camada fina de óleo mineral, com a função de facilitar o desmolde após 24 horas de cura e já enrijecidos.

Segundo orientações da ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015) introduziu-se o concreto em duas camadas de volumes similares, e após cada camada realizou-se o adensamento do concreto com auxílio de uma haste de socamento, desferindo 12 golpes de forma uniforme sobre a superfície do molde. Após o adensamento e preenchimento total do molde, com a assistência de uma colher de pedreiro, aplicou-se leves batidas na parte externa do molde, a fim de eliminar possíveis bolhas de ar

aprisionadas. Para finalizar, realizou-se a rasamento da superfície com a borda do molde.

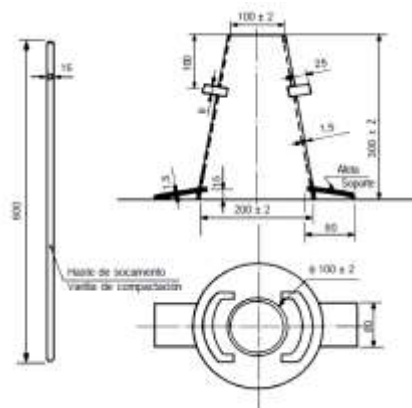
Após a modelagem colocou-se os moldes em uma superfície horizontal e livre de vibrações, onde manteve-se por um período de 24h para a cura inicial do concreto. Finalizadas as 24 horas iniciais, realizou-se o desmolde e os corpos de prova foram levados a câmara úmida, onde permaneceram até atingirem as idades esperadas para os ensaios.

3.3. Propriedades do concreto fresco

Para este estudo, utilizou-se o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do cone, descrito pela Norma do ABNT NM 67 (ABNT, 1998). A norma prescreve seu uso, para concretos plásticos e coesos que apresente abatimento superior a 10 mm e não é aplicável em concretos cuja agregado graúdo possua dimensão nominal superior a 37,5 mm.

O ensaio descrito pela ABNT NBR NM 67 (ABNT, 1998), consiste em compactar uma amostra representativa de todo lote de concreto, em um molde de tronco cônico oco, metálico, não atacável pelo concreto, confeccionado sem protuberâncias, com dimensões de (200 ± 2) mm de diâmetro da base inferior, (100 ± 2) mm de diâmetro da base superior e (300 ± 2) mm de altura, como representado na Figura 7.

Figura 7 - Representação do molde de tronco cônico e haste de adensamento.



Fonte: NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Inicialmente umedeceu-se o molde e a placa metálica, que será utilizada como apoio para o cone. Com o cone apoiado sobre a base metálica, iniciou-se o preenchimento do molde, com os pés posicionados sobre as aletas laterais do molde, para auxiliar na estabilidade. O preenchimento do cone ocorreu em três camadas, realizou-se o adensamento do concreto, com auxílio de uma haste metálica, proferindo 25 golpes verticais para cada camada. Ao final da terceira camada rasou a superfície do concreto com uma desempenadeira. Com a pasta compactada e nivelada fez-se a remoção do molde, levantando-o verticalmente.

Imediatamente após a retirada do molde, mediu-se o abatimento do concreto. Determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova desmoldado, como mostrado na Figura 8. O procedimento repetiu-se para todos os traços definidos.

Figura 8 – Abatimento do concreto por meio do Slump test



Fonte: Autora (2023)

3.4. Resistência a compressão

Para a execução do ensaio, realizou-se a regularização das bases dos corpos de prova em conformidade com o estabelecido nas ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015) e ABNT NBR 7680-1 (ABNT, 2015). Realizou-se a retificação dos corpos de prova, de forma a garantir a paridade das bases, não havendo pontos de falhas sobre as superfícies.

Para determinar a resistência mecânica a compressão seguiu-se o estabelecido pela ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018). Fez-se uso da prensa hidráulica. Os ensaios de compressão axial e tração por compressão, foram realizados em 5 corpos de prova para cada idade e para cada traço. Sendo assim foram ensaiados 20 corpos de prova para cada traço, totalizando 80 corpos de prova.

Segundo a ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018), o carregamento deverá ser aplicado de maneira contínua, sem choques e velocidade contínua de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s.

O carregamento deve ser interrompido imediatamente após uma queda de força que indique a ruptura do corpo de prova. O valor da força de compressão resultante é expresso pela prensa em kN devendo por convenção ser convertido para MPa, para isso utilizou-se a Equação 14 para expressar os resultados obtidos.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad \text{Equação 14}$$

3.5. Resistência a tração

Para a realização dos ensaios determinantes da resistência a tração do concreto, utilizou-se a ABNT NBR 7222 (ABNT, 2011) que descreve os procedimentos de ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral.

Para a realização do ensaio a ABNT NBR 7222 (ABNT, 2011), recomenda que os corpos de prova sejam aplicados centralizados deitados, sobre o prato inferior da prensa de maneira que o centro do prato coincida com a linha central do corpo de prova. Os corpos de prova ensaiados são submetidos a uma carga contínua e sem choques, com tensão e velocidade constantes, até a ruptura da peça.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela Equação 15, considerando a força máxima (F), obtida em ensaio expressa em Newtons (N), o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros e pelo comprimento do corpo (l) de prova, também expresso em milímetros.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \times d \times \ell} \quad \text{Equação 15}$$

3.6. Absorção de água e índice de vazios

O índice de vazios presente no concreto está diretamente ligado à sua resistência e durabilidade. Para análise do índice de vazios do concreto e a absorção de água realizou-se o ensaio descrito pela ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005). Para cada traço definido ensaiou-se cinco amostras moldadas conforme estabelecido pela NBR 5738 (ABNT, 2015), com cura em câmara úmida, com idade de 28 dias.

Como orientado pela NBR 9778 (ABNT, 2009), ao final dos 28 dias de cura dos corpos de prova, retirou-os da câmara úmida, onde permaneceram durante o período e colocou-os na estufa a temperatura de (105 ± 5) °C por 72 horas. Após o período de seca dos corpos de prova, com auxílio da balança aferiu-se o peso da amostra seca.

Finalizado o processo de pesagem das amostras secas, imergiu-se os corpos de prova em um recipiente com água a temperatura de (23 ± 2) °C por um período de 72 horas. Completada a etapa de saturação das amostras, determinou-se a massa das amostras ainda em condições de imersão. Posteriormente retirou-se as mostras da água e com auxílio de um pano úmido enxugou-se os corpos de prova e realizou-se a pesagem da amostra satura.

A absorção de água (A) é expressa em porcentagem, calculada pela Equação 16, considerando a massa da amostra satura após imersão (m_{sat}) e a massa da amostra seca (m_s). O índice de vazios (I_v) também será expresso em porcentagem, sendo obtido pela Equação 17, calculado em função das massas das amostras secas, saturadas após a imersão e a massa das amostras saturadas imersas (m_i).

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Equação 16}$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{Equação 17}$$

4. RESULTADOS

Neste capítulo será realizada a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo anterior, tal qual a resistência a compressão e tração, e o índice de absorção dos corpos de prova ensaiados.

4.1. Propriedades do concreto fresco

Neste capítulo será exposto os resultados obtidos para o *Slump test*, ensaio responsável por determinar a consistência do cimento em seu estado fresco.

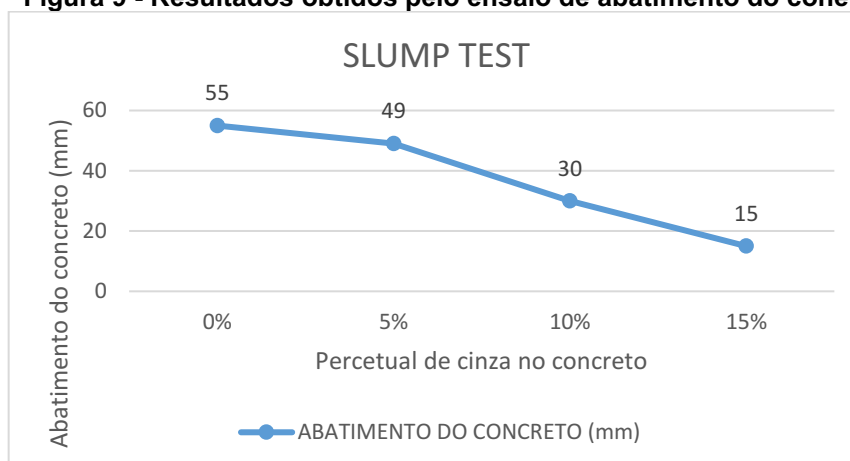
4.1.1. Determinação Da Consistência Pelo Abatimento Do Cone

Para os quatro traços definidos na seção 3.1.5, realizou-se o ensaio de consistência pelo abatimento do cone descritos na seção 2.6. Os resultados obtidos para cada um dos traços estão apresentados na Tabela 16 e Figura 9.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de abatimento do cone dividido por traços.

TRAÇO	ABATIMENTO DO CONCRETO (mm)
Concreto convencional	55
Concreto com 5% de adição de cinza	49
Concreto com 10% de adição de cinza	30
Concreto com 15% de adição de cinza	15

Fonte: Autora (2023).

Figura 9 - Resultados obtidos pelo ensaio de abatimento do cone

Fonte: Autora (2023).

Nota-se que, com o aumento do percentual de cimento substituído, obteve-se um aumento na consistência do concreto, sendo assim a diminuição da trabalhabilidade do mesmo. Portanto, sempre que aplicado a substituição parcial do aglomerante por cinzas, será necessário realizar a correção de viscosidade, seja por meio do aumento da relação água/cimento ou por aditivos superplastificantes.

Mehta e Monteiro (2018), atribuem o aumento na consistência do concreto à relação a/c. Segundo os autores, a substituição parcial do cimento pelas cinzas, incide sobre a relação a/c, logo que, intervindo na quantidade de cimento presente no concreto, altera-se o processo de hidratação do concreto, ocasionando assim o aumento na consistência dos concretos com cinza.

Pyo e Kim (2017), também relacionam os diferentes tamanhos de partículas presentes na cinza, como um fator que influencia nas alterações de consistência do concreto. Segundo os autores, as cinzas que possuem partículas de diferentes faixas de tamanhos, influenciam a reduzir a hidratação do concreto, resultando assim no aumento na consistência do concreto.

4.2. Propriedades do concreto endurecido

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e absorção água, como especificados anteriormente.

4.2.1. Resistência à Compressão

A Tabela 18, disponível no apêndice A, apresenta os valores obtidos do ensaio de compressão axial para os corpos de prova com idades de 7 e 28. Além do mais calculou-se o desvio padrão de cada ensaio, eliminou-se a amostra que estaria fora do desvio padrão e calculou-se a resistência média.

A Figura 10, apresenta um gráfico com as resistências médias obtidas para idades de 7 e 28 dias. Nota-se que, para o concreto com 5% de cimento substituído pelas cinzas, obteve-se um aumento na resistência à compressão se comparado ao traço base do concreto, sem a presença de cinzas. Tal resultado observou-se tanto para a idade de 7 dias quanto para 28 dias.

No entanto, para os percentuais de cimento substituído por cinza de 10% e 15%, observou-se uma redução da resistência à compressão. Trabalhos como de Hilal *et al.* (2020), Golewski (2017), Akasaki *et al.* (2015) e Camelo e Alcantara (2019), apresentaram resultados semelhantes, onde obtiveram resultados positivos para menores percentuais de cimento substituídos, chegando até 15%, dependendo do material cimentício suplementar utilizado. E apresentando resultados negativos para resistência a compressão, para percentuais maiores de cimento substituído pelos MCS.

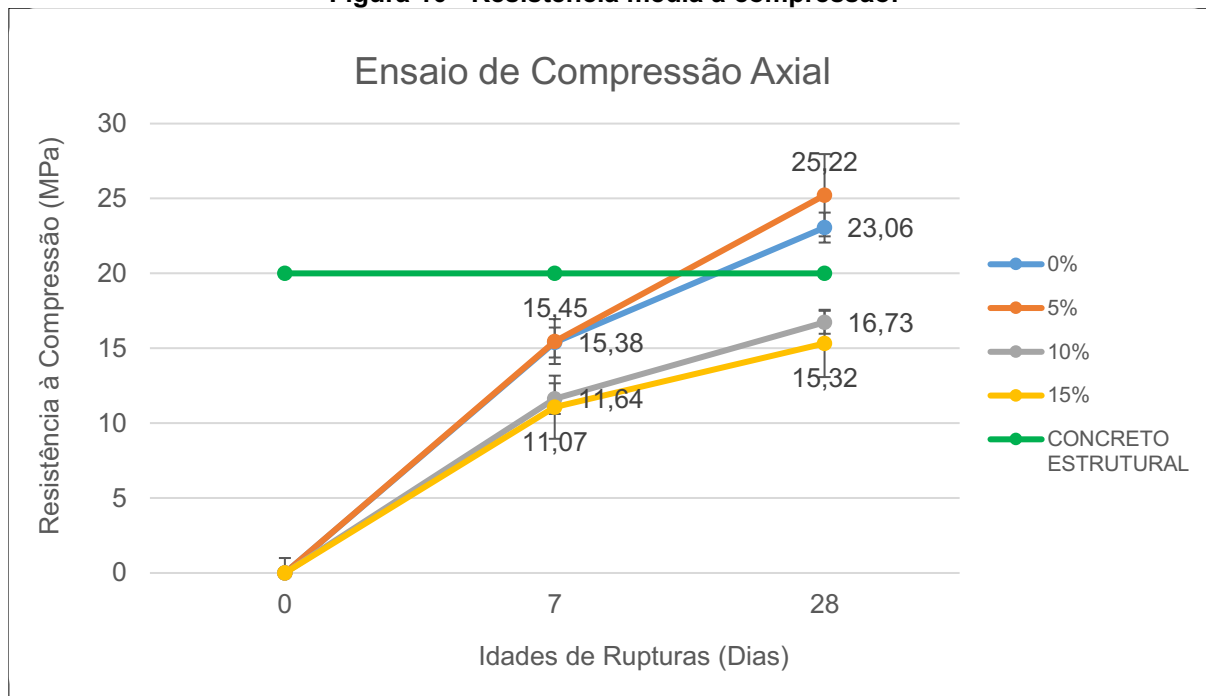
Como pode-se observar na seção 3.1.4 acima, as cinzas utilizadas como MCS apresentam um halo amorfo fraco, ou seja, possui baixa possibilidade de apresentar propriedades pozolânicas. Tal característica pode ser citada como possível agravante, para a redução das resistências dos concretos que possuem maior percentual de cimento substituído.

Outro fator prejudicial, citado por Hilal *et al.* (2020) é a granulometria irregular das cinzas. Tal característica pode ser observada no gráfico presente na Figura 3, que apresenta a curva granulométrica do MCS utilizado. Portanto, podemos utilizar a granulometria irregular e o módulo de finura da cinza, superior ao do cimento, para justificar o comportamento do concreto com índices mais elevados de cimento substituído.

Ainda na Figura 10, é possível observar uma linha fixada em 20 MPa, sendo essa a medida referência estabelecida pela ABNT NBR: 8953 (ABNT, 2015) para a classificação de concreto par fins estruturais. Em vista disto, é possível observar que

apenas o concreto convencional e concreto com 5% de cimento substituído, rompidos com idade de 28 dias, obtiveram resistência superior aos 20 MPa desejados.

Figura 10 - Resistência média à compressão.



Fonte: Autora (2023)

4.2.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral

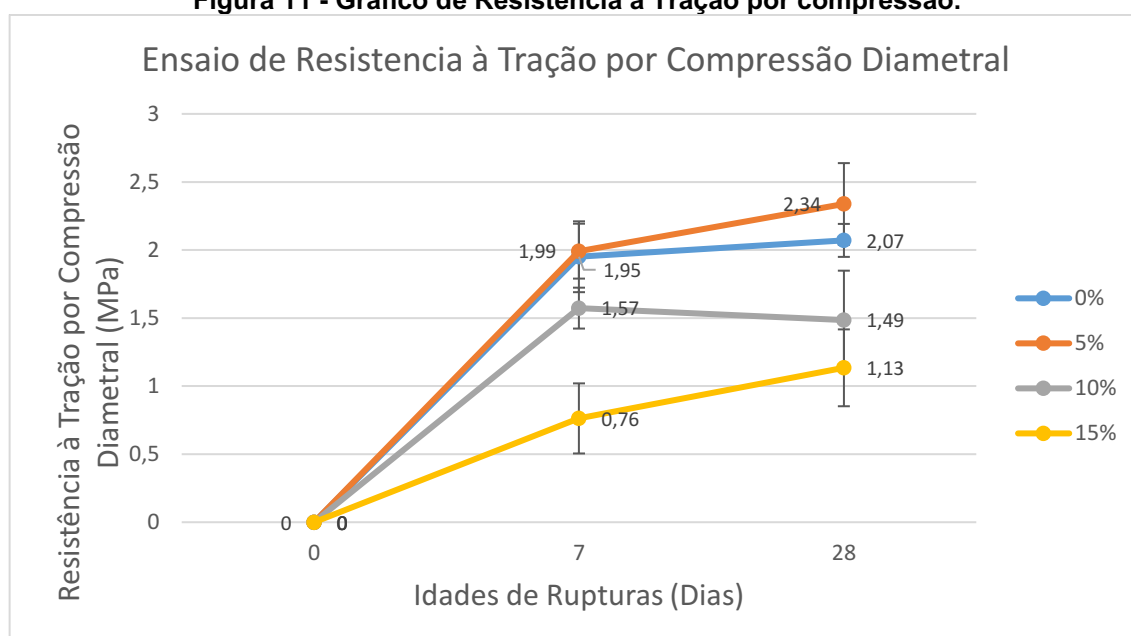
A Tabela 19 evidenciada no Apêndice C, apresenta os valores obtidos do ensaio de resistência a tração por compressão diametral para os corpos de prova com idades de 7 e 28. Como demonstrado na seção anterior, calculou-se o desvio padrão de cada ensaio, eliminou-se a amostra que estaria fora do desvio padrão e obteve-se a resistência média.

A Figura 11, apresenta as resistências médias à tração por compressão diametral. Identifica-se que, assim como para a resistência a compressão, o concreto com a 5% de cimento substituído pelas cinzas apresentou aumento na sua resistência, se comparado ao concreto base analisado. No entanto, os concretos com percentual de cimento substituído pelas cinzas de 10% e 15%, apresentaram uma redução da resistência a tração.

Assim como para a resistência a compressão, podemos citar os trabalhos de Hilal *et al.* e os resultados obtidos para a caracterização das cinzas, como sendo possíveis justificativas, ao comportamento apresentado pelos concretos com maior presença de cinzas.

Ainda podemos salientar que, observando o gráfico da Figura 11, é possível identificar que para o traço com 10 % de cinza as resistências médias para 7 e 28 dias sofreram pouca alteração, mantendo não ocorrendo o aumento esperado para os 28 dias, ao invés disto ocorreu uma pequena redução. Para o traço com 15% de cinza, obteve-se os menores valores de resistência, para 7 dias teve um valor significativamente menor que o alcançado para os demais.

Figura 11 - Gráfico de Resistência à Tração por compressão.



Fonte: Autora (2023)

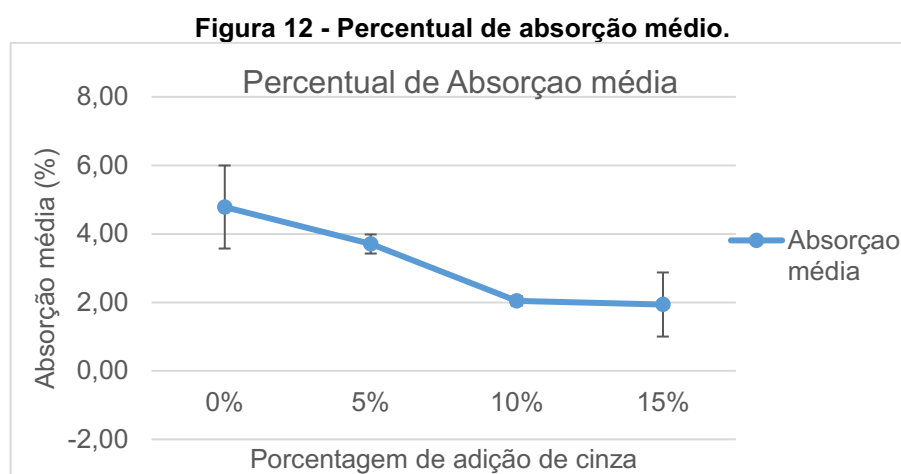
4.2.3. Absorção e Índice de Vazios

Nesta seção será apresentado os resultados obtidos no ensaio de absorção segundo a ABNT NBR: 9778 (ABNT, 2005) descrito na seção 3.6. Para este ensaio separou-se 5 amostras de cada traço elaborado, determinou-se por meio dele a massa seca, massa saturada e a massa imersa de cada corpo de prova e a partir

dessas, pela Equação 16 e Equação 17 calculou-se o percentual de absorção do concreto e o índice de vazios de cada amostra.

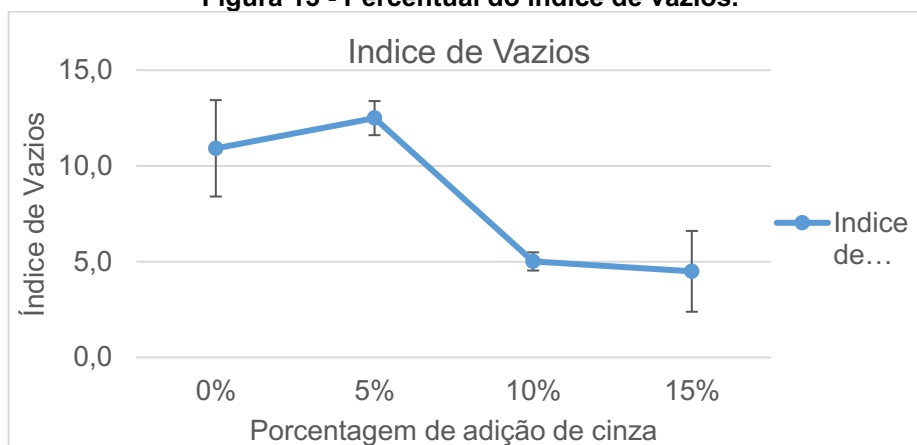
Assim como para o ensaio de tração e compressão, após a coleta de dados calculou-se o desvio padrão dos resultados, eliminou-se à medida que estaria fora do desvio e obteve-se a média dos percentuais esperados. A Tabela 20 presente no Apêndice D, apresenta as massas obtidas no ensaio, de acordo com percentual de cimento substituído pelas cinzas.

A Tabela 21 apresentada no Apêndice D, traz os resultados para o percentual de absorção, bem como seus valores médios, na Figura 12 obtém-se o gráfico comparativo das médias e os desvios padrão calculados, onde é possível observar a uma redução para o percentual médio de absorção dos concretos, conforme aumenta o percentual de cimento substituído por cinzas. Ou seja, a presença de cinzas na mistura do concreto, diminui a incidência de poros do concreto, diminuindo assim a capacidade de absorção do mesmo



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 22, expõe os resultados obtidos para o índice de vazios presente no concreto, demonstra ainda as médias destes índices, que também são apresentadas de forma mais visível na Figura 13.

Figura 13 - Percentual do índice de vazios.

Fonte: Autora (2023)

Observando os dados acima, é possível identificar que se comparado ao traço de concreto convencional, onde não houve a adição de cinza, o concreto com 5% de adição de cinza teve um aumento no índice de vazios dele. Ou seja, a mistura com 5% de adição de cinza possui uma maior relação entre o volume total da amostra e o número de poros permeáveis o que facilita a absorção da água pela amostra.

Já para os concretos de com adição de 10 % e 15%, observou-se uma redução no índice de vazios, sugerindo uma dificuldade maior para a passagem da água através da amostra de concreto e resultando em um número menor de poros na pasta com relação ao seu volume.

5. CONCLUSÃO

Baseado neste trabalho e nos dados obtidos por meio dos ensaios e suas análises, pode-se concluir que ao realizar a substituição do cimento Portland, comumente utilizado para a produção de concreto, por cinzas provenientes da queima da madeira para fabricação de carvão, para as propriedades do concreto em seu estado fresco observaram-se que quanto maior o percentual de cinza utilizado menor é a consistência do concreto, verificou-se ainda de maneira visual que ocorreu alteração no tempo de pega da pasta, que começou a enrijecer mais rápido com índices de cinza mais elevados, vale lembrar que tal conclusão se deu apenas visualmente, para comprovação deve-se analisar por meio de ensaios. Portanto o concreto com adição de cinza não poderia ser utilizado quando há a necessidade de transporte por longos prazos sem que haja a utilização de ativos que melhorem o tempo de pega e plasticidade da pasta.

Quanto as propriedades do concreto endurecido, ocorreu uma diminuição gradual de sua resistência a compressão, conforme era elevado o percentual de cimento substituído. Para o traço analisado as resistências (5%) obtiveram uma redução de aproximadamente 20% para o menor teor de substituição e cerca e 30% de redução para o traço com o maior teor de substituição (15%).

Dos traços analisados, somente o traço sem adição de cinza atingiu resistência suficiente para ser considerado como um concreto estrutural, os demais não atingiram os 20 MPa necessários para tanto e, portanto, não poderiam ser utilizados para fins estruturais. Contudo, a ABNT NBR: 16416 (ABNT, 2015) prevê que concretos abaixo de 20MPa podem ser utilizados para a construção de pavimentos de tráfegos leve e de pedestres.

Com relação a resistência a tração, ocorreu também uma redução gradual da resistência, porém não de maneira tão expressiva quanto à compressão, podendo ser utilizada para os mesmos fins já propostos.

Quanto a absorção e índice de vazios, identificou-se que para 5% ocorreu uma elevação significativa se comparado com o convencional, já para os outros traços tem-se a diminuição do índice de absorção o que não seria recomendado para tal finalidade.

À vista disto, pode-se concluir que a substituição do cimento pela cinza provoca alterações em suas propriedades do concreto fresco e endurecido. Sendo

assim necessário o estudo e análise de um traço ótimo, ao qual limite os resultados a apresentarem melhorias as propriedades analisadas. Observou-se também que, para o traço em estudo, apenas o teor de cinza de 5, poderia ser utilizado como concreto estrutural, já para os demais teores aconselha-se sua utilização em outras aplicabilidades do setor.

REFERÊNCIAS:

AKASAKI, J. L. et al. INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NOS TEMPOS DE PEGA E RETRAÇÃO POR SECAGEM. **Research Gate**. Ilha Solteira, p. 25-32. 02 maio 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 52**: Agregado Miúdo - Determinação de massa específica e massa específica e massa específica aparente. 1 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2002. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1 ed Rio de Janeiro: Moderna, 1998. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2001. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. 3 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2019. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2011. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1**: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência a compressão axial. 1 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2015. 30 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 3 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2015. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2005. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2013. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10786**: Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. 2 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2013. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2014. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. 4 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2022. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2009. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. 1 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2015. 31 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção da água. 1 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2021. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. 1 ed. Rio de Janeiro: Moderna, 2021. 10 p.

ASSUNÇÃO, José Wilson. **CURVAS DE DOSAGEM PARA CONCRETOS CONVENCIONAIS E ADITIVADOS CONFECCIONADOS COM MATERIAIS DA REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ.** 2002. 254 f. Dissertação - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BORGES, Igor Aguiar. **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ EM COMPARAÇÃO COM METACAULIM E SÍLICA ATIVA.** 2013. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

BRASIL. Marcelo Antônio Cartaxo Queiroga Lopes. Ministério da Saúde. **PORTARIA GM/MS Nº 888.** Rio de Janeiro: Diário Oficial da União, 2021.

CACURO, Thiago A.; WALDMAN, Walter R.. **Cinzas da Queima de Biomassa: aplicações e potencialidades.** Revista Virtual de Química, Sorocaba, v. 7, n. 6, p. 1-12, nov. 2015.

CAMELO, Paulo Rubens Melo; ALCÂNTARA, Perboyre Barbosa. **AVALIAÇÃO DE PAVERS COM ADIÇÃO DE CINZA DE CARVÃO MINERAL ORIUNDA DE TERMELÉTRICA DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2018, Fortaleza. **Proceedings [...].** Fortaleza: Abes, 2022. p. 1-6.

CARMO, Murilo Elias Rosa do et al. **CONCRETO COM INCORPORAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR: uma revisão literária.** Revista de Engenharia e Tecnologia, Palmas, v. 11, n. 2, p. 160-169, 30 ago. 2019.

COUTO, José Antônio Santos et al. **O CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.** **Caderno de Graduação: Ciências exatas e tecnológicas,** Sergipe, v. 1, n. 12, p. 49-58, out. 2013.

CORDEIRO, L. de N. P. C.; PAES, I. de N. L.; SOUZA, P. S. L.; AZEVEDO, C. M. **Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto.** **Ambiente Construído,** Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 45-55, jan./mar. 2019.

GOLEWSKI, Grzegorz Ludwik. Green concrete composite incorporating fly ash with high strength and fracture toughness. **Journal Of Cleaner Production.** Lublin, 09 out. 2017. p. 218-226.

FABRO, F. et al. **Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto**. Ibracon, Cascavel, v. 4, n. 2, p. 202-212, 10 jun. 2011.

GRAUPMANN, Olaf; MARTINS, Mariane Arruda; CONSUL, Marcio; CECHIN, Luana. Análise da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de aterro sanitário. **Revista Matéria**, Mafra, v. 24, n. 02, p. 1-11, 16 abr. 2018.

HILAL, Nahla N. et al. Fresh Behavior and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete Containing Coal Ash and Fly Ash as Partial Replacement of Cement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT INNOVATIONS IN ENGINEERING, 3., 2020, Duhok City. **Materials Science and Engineering**. Duhok City: Icrie, 2020. p. 1-17.

ISAIA, G. C.; ZERBINO, R. L.; GASTALDINI, A. L. G.; SENSALE, G. R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 233-252, abr./jun. 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

LIMA, Caio Ivson Vasconcelos et al. CONCRETO E SUAS INOVAÇÕES. **Cadernos de Graduação**: Ciências exatas e tecnológicas, Maceió, v. 1, n. 1, p. 31-40, maio 2014.

LISBOA, Ederval de S.; ALVES, Edir dos S.; MELO, Gustavo Henrique Alves Gomes D. **Materiais de Construção: Concreto e Argamassa**. Grupo A, 2017. E-book. ISBN 9788595020139.

NEVILLE, AM Propriedades do Concreto. Porto Alegre: Grupo A, 2016. 9788582603666.

NEVILLE, AM Tecnologia do Concreto. Porto Alegre: Grupo A, 2013. 9788582600726. OLIVEIRA, Éder Alves de et al. **ESTUDO DE DOSAGEM PARA DETERMINAÇÃO DE TRAÇO DE CONCRETO**. 2019. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2019.

PEREIRA, Adriana Maria et al. ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ. **Revista Matéria**, Ilha Solteira, v. 20, n. 01, p. 227-238, out. 2014.

PEREIRA, Ana Laura Camargo; RIBEIRO, Keitlin Caroline Campos. **ANÁLISE TÉCNICA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO GRAÚDO POR RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) NO CONCRETO**. 2019. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Faculdade Guarapuava, Guarapuava, 2019.

PYO, Sukhoon et al. Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder. **Construction And Building Materials**. Correia do Sul, p. 459-466. maio 2016.

QUISSANGA, Vencislau Manuel; PIMENTEL, Fabiano. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD). **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 1-11, jan. 2019. Semestral.

RAMOS, Rui Manuel da Silva. **Sustentabilidade na Construção Civil Coberturas “Verdes”**: estratégias de prevenção e segurança contra incêndios. 2021. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2021.

RODRIGUES, Penna Firme. **Parâmetros da dosagem racional do concreto**. In: REUNIÃO DE TÉCNICOS DA INDÚSTRIA DO CONCRETO, 34., 1989, São Paulo. Associação Brasileira de Concreto Portland. São Paulo: Abcp, 1989. p. 1-28.

SIDDIQUE, Rafat; AGGARWAL, Paratibha; AGGARWAL, Yogesh. Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash. **Construction And Building Materials**. India, p. 73-81. nov. 2011.

Apêndice A

Tabela 17 - Granulometria das cinzas utilizadas como MCS.

Tamanho da partícula (µm)	% Passante
1408	100,00
1184	100,00
995,6	100,00
837,2	100,00
704,0	100,00
592,0	100,00
497,8	100,00
418,6	100,00
352,0	100,00
296,0	100,00
248,9	100,00
209,3	100,00
176,0	100,00
148,0	100,00
124,5	100,00
104,7	100,00
88,00	99,68
74,00	98,82
62,23	96,24
52,33	90,14
44,00	81,31
37,00	73,15
31,11	67,22
26,16	62,64
22,00	58,48
18,50	54,34
15,56	50,22
13,08	46,16
11,00	42,13
9,25	38,22
7,78	34,67
6,54	31,58
5,50	28,77
4,62	25,84
3,89	22,31
3,27	17,71
2,750	12,00
2,312	6,25
1,945	2,25
1,635	0,50
1,375	0,00
1,156	0,00
0,972	0,00
0,818	0,00
0,688	0,00
0,578	0,00
0,486	0,00
0,409	0,00
0,344	0,00
0,2890	0,00

Apêndice B

Tabela 18 - Resultado resistência à compressão e resistência média

% De Cinza	CP	Idade De Ruptura	Ensaio Compressão (Mpa)	Desvio Padrão	Resistência Média (Mpa)
0%	CP 1		13,499		
	CP 2		14,022		
	CP 3	7	16,663	1,360	15,385
	CP 4		16,155		
	CP 5		14,700		
	CP 6		21,954		
	CP 7		21,429		
	CP 8	28	22,591	1,230	23,058
	CP 9		24,175		
	CP 10		24,037		
5%	CP 26		12,575		
	CP 27		12,883		
	CP 28	7	14,096	1,500	13,590
	CP 29		14,808		
	CP 30		16,267		
	CP 31		20,117		
	CP 32		23,214		
	CP 33	28	24,405	2,745	25,218
	CP 34		26,036		
	CP 35		27,215		
10%	CP 51		9,913		
	CP 52		10,955		
	CP 53	7	11,071	1,024	11,640
	CP 54		11,928		
	CP 55		12,605		
	CP 56		15,952		
	CP 57		16,334		
	CP 58	28	17,016	0,765	16,735
	CP 59		17,637		
	CP 60		17,655		
15%	CP 76		8,453		
	CP 77		9,646		
	CP 78	7	12,063	2,108	11,065
	CP 79		13,007		
	CP 80		13,155		
	CP 81		11,818		
	CP 82		15,101		
	CP 83	28	15,802	2,246	15,324
	CP 84		16,595		
	CP 85		17,781		

Apêndice C

Tabela 19 -Resultado resistência à tração por compressão diametral e resistência média.

% de Cinza	CP	Dias de Quebra	Resistencia à Tração (MPa)	Desvio Padrão	Resistência Média (MPa)
0%	CP 11		1,669		
	CP 12		1,696		
	CP 13	7	1,944	0,202	1,950
	CP 14		2,079		
	CP 15		2,084		
	CP 16		1,872		
	CP 17		1,921		
	CP 18	28	2,236	0,300	2,071
	CP 19		2,254		
	CP 20		2,616		
5%	CP 36		1,482		
	CP 37		1,856		
	CP 38	7	1,882	0,260	1,992
	CP 39		2,076		
	CP 40		2,152		
	CP 41		2,137		
	CP 42		2,198		
	CP 43	28	2,377	0,121	2,338
	CP 44		2,386		
	CP 45		2,393		
10%	CP 61		1,496		
	CP 62		1,523		
	CP 63	7	1,607	0,150	1,573
	CP 64		1,665		
	CP 65		1,874		
	CP 66		1,377		
	CP 67		1,409		
	CP 68	28	1,481	0,363	1,485
	CP 69		1,673		
	CP 70		2,255		
15%	CP 86		0,579		
	CP 87		0,666		
	CP 88	7	0,857	0,257	0,763
	CP 89		0,948		
	CP 90		1,235		
	CP 91		0,964		
	CP 92		1,016		
	CP 93	28	1,113	0,282	1,134
	CP 94		1,445		
	CP 95		1,607		

Apêndice D

Tabela 20 - Massas do Ensaio de Absorção.

% de Cinza	Corpo de prova	m_s (g)	m_i (g)	m_{sat} (g)
0%	CP 1	3843	2383	3997
	CP 2	3903	2370	4061
	CP 3	3776	2252	3963
	CP 4	3841	2380	4076
	CP 5	3868	2382	4126
5%	CP 1	3844	2932	3967
	CP 2	3778	2854	3928
	CP 3	3755	2798	3893
	CP 4	3831	2847	3966
	CP 5	3757	2874	3894
10%	CP 1	3530	2109	3593
	CP 2	3621	2139	3690
	CP 3	3594	2207	3667
	CP 4	3666	2258	3743
	CP 5	3737	2349	3816
15%	CP 1	3454	2010	3498
	CP 2	3502	2157	3563
	CP 3	3330	1927	3418
	CP 4	3676	2167	3682
	CP 5	3302	1928	3371

Tabela 21 - Índice de Absorção Médio

Índice de Absorção				
% de Cinza	Corpo de prova	Absorção	Desvio Padrão	Absorção Média
0%	CP 1	4,000	1,213	4,783
	CP 2	4,050		
	CP 3	4,955		
	CP 4	6,127		
	CP 5	6,685		
5%	CP 1	3,200	0,279	3,704
	CP 2	3,970		
	CP 3	3,675		
	CP 4	3,524		
	CP 5	3,647		
10%	CP 1	1,786	0,136	2,040
	CP 2	1,918		
	CP 3	2,042		
	CP 4	2,096		
	CP 5	2,106		
15%	CP 1	1,272	0,935	1,936
	CP 2	1,748		
	CP 3	2,641		
	CP 4	0,167		
	CP 5	2,083		

Tabela 22 - Índice de Vazios

Índice de Vazios				
% de Cinza	Corpo de prova	Índice de Vazios	Desvio Padrão	Índice Médio
0%	CP 1	9,523	2,517	10,919
	CP 2	9,347		
	CP 3	10,932		
	CP 4	13,876		
	CP 5	14,821		
5%	CP 1	11,884	0,891	12,496
	CP 2	13,966		
	CP 3	12,603		
	CP 4	12,064		
	CP 5	13,431		
10%	CP 1	4,248	0,476	5,011
	CP 2	4,477		
	CP 3	5,026		
	CP 4	5,175		
	CP 5	5,366		
15%	CP 1	2,953	2,111	4,494
	CP 2	4,356		
	CP 3	5,898		
	CP 4	0,405		
	CP 5	4,768		