



Centro Universitário de Brasília - UniCEUB
Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS
Curso: Engenharia Civil

KATHLEEN BRITO DE ANDRADE

**ESTUDO DOS EFEITOS DA CINZA DA CASCA DE ARROZ E DAS
FIBRAS DE POLIPROPILENO EM ARGAMASSAS**

Brasília
2019

KATHLEEN BRITO DE ANDRADE

**ESTUDO DOS EFEITOS DA CINZA DA CASCA DE ARROZ E DAS
FIBRAS DE POLIPROPILENO EM ARGAMASSAS**

Monografia apresentada como requisito para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas do Centro Universitário de Brasília - UniCEUB.

Orientadora: Prof.^a Elis Regina Lima Siqueira

Brasília
2019

KATHLEEN BRITO DE ANDRADE

**ESTUDO DOS EFEITOS DA CINZA DA CASCA DE ARROZ E DAS
FIBRAS DE POLIPROPILENO EM ARGAMASSAS**

Monografia apresentada como requisito para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas do Centro Universitário de Brasília - UniCEUB.

Orientadora: Prof.^a Elis Regina Lima Siqueira

Brasília, 08 de fevereiro de 2019.

Banca Examinadora

Prof.^a Elis Regina Lima Siqueira
Orientadora

Prof.^o Jairo Furtado Nogueira
Examinador Interno

Prof.^o João Marcos Souza Costa
Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me sustentado e fortalecido durante toda essa trajetória e por ter colocado as pessoas certas para me ajudar.

Aos meus pais, Éden e Isteni, e ao meu irmão Kevin pelo apoio, compreensão e incentivo.

Aos meus familiares e amigos que torceram por mim e tornaram a caminhada mais leve.

A minha orientadora, Elis Regina, pela disponibilidade em me ajudar sempre e por toda a atenção e paciência.

A todo o pessoal do laboratório, Régis, Francisco, Glauco, Gustavo, Diandra e Fabiano por toda atenção e ajuda prestada.

À Iasmin e à Vanessa pelo companheirismo durante a realização dos ensaios.

À professora Érika Regina pela atenção e disponibilidade em me ajudar.

Aos professores João Marcos e Jairo pela atenção e pelas sugestões para a melhora deste trabalho.

Ao UniCEUB por disponibilizar os materiais necessários e o laboratório.

Muito obrigada.

RESUMO

O posicionamento mundial acerca das questões ambientais estimulou a busca por novos materiais, tecnologias e processos alternativos a serem empregados com a finalidade de diminuir os prejuízos causados pelas atividades humanas. Nesse sentido, a incorporação de resíduos industriais, como a cinza da casca de arroz (CCA), na forma de adição mineral ao cimento, mostra-se como uma alternativa ao problema de gerenciamento de resíduos ao mesmo tempo em que colabora para a diminuição do impacto ambiental da indústria cimenteira. A cinza da casca de arroz residual é uma pozolana amplamente disponível cuja utilização confere a matrizes cimentícias características diferenciadas, contribuindo até para uma melhora de durabilidade. Visando ainda atuar nas limitações inerentes aos materiais cimentícios, fibras são adicionadas a essas matrizes como reforço com o propósito de minimizar a fragilidade e os desdobramentos de tal comportamento nas pastas de cimento convencionais. Portanto, o presente trabalho se propõe a investigar as propriedades físicas (absorção de água e índice de vazios) e mecânicas (resistência à compressão e à tração) que a substituição parcial de 25% de cimento por CCA e a adição de 0,5% de fibras de polipropileno ocasionam em argamassas. Para tanto, foram confeccionados corpos de prova de argamassa contendo os respectivos percentuais de cada material, tanto individualmente quanto em conjunto, nas seguintes idades: 1, 3, 7, 28 e 63 dias. A mistura dos dois materiais tem como objetivo o reforço, nas primeiras idades, da matriz composta por CCA, tendo em vista o efeito de retardamento de resistência ocasionado pelas adições minerais nesse período e o custo relativamente baixo das fibras de polipropileno. Como resultado, verificou-se que esse teor de substituição de CCA produz resultados bem semelhantes a argamassa padrão e que as fibras não proporcionam ganho de resistência nas matrizes compostas por cinza, apenas nas convencionais. Quanto à absorção de água e ao índice de vazios, ao fim dos 63 dias, as argamassas produzidas apresentam maiores percentuais se comparadas a referência. Por fim, analisando-se os resultados obtidos e os parâmetros estabelecidos pelo DNIT, a aplicação da CCA em pavimentos rígidos, do ponto de vista técnico, apresenta um bom potencial visto que produz resultado similar e está dentro dos padrões definidos.

Palavras-chave: Cinza da casca de arroz. Fibras de polipropileno. Pavimento rígido.

ABSTRACT

The global positioning on environmental issues has stimulated the search for new materials, technologies and alternative processes to be used in order to reduce the damages caused by human activities. In this sense, the incorporation of industrial residues, such as rice husk ash (RHA), in the form of mineral addition to the cement, shows itself as an alternative to the problem of waste management while at the same time it collaborates to reduce the environmental impact of the cement industry. Residual Rice husk ash is a widely available pozzolan whose use gives differentiated characteristics to cementitious matrices, even contributing to an improvement in durability. Still in order to act on the inherent limitations of cementitious materials, fibers are added to them as a reinforcement with the purpose of minimizing the fragility and the unfolding of such behavior in conventional cement pastes. Therefore, the present work proposes to investigate the physical (water absorption and voids index) and mechanical (compressive strength and tensile strength) properties that the partial replacement of 25% cement by RHA and the addition of 0.5% of polypropylene fibers cause in mortars. For this purpose, mortar specimens containing the respective percentages of each material, individually and together, were made at the following ages: 1, 3, 7, 28 and 63 days. The mixture of the two materials aims to reinforce, in the early ages, the matrix that contains RHA, considering the resistance retardation effect caused by the mineral additions in this period and the relatively low cost of the polypropylene fibers. As a result, it has been found that this RHA substitution content produces very similar results to the standard mortar and that the fibers do not provide resistance gain in the rice husk ash composites, only in conventional ones. As for the water absorption and the void index, at the end of 63 days, the mortars produced had higher percentages when compared to the reference. Finally, analyzing the results obtained and the parameters established by the DNIT, the application of CCA in rigid pavements, from the technical point of view, presents a good potential since it produces similar result and is within the defined standards.

Palavras-chave: Rice husk ash. Polypropylene fibers. Rigid Pavements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de fabricação Cimento Portland	20
Figura 2 - Representação esquemática da formação e da hidratação do cimento Portland.....	26
Figura 3 - Fibras de polipropileno fibriladas (a) e monofilamento (b)	44
Figura 4 - Perfil da estrutura do pavimento	46
Figura 5 - 4 frações granulométricas de Areia Normal Brasileira	54
Figura 6 - Aditivo Superplastificante	55
Figura 7 - Cimento Portland CII F 40	55
Figura 8 - Resíduo de cimento na peneira nº200	57
Figura 9 - Determinação da pasta de consistência normal	58
Figura 10 - Determinação do tempo de fim de pega	59
Figura 11 - Argamassa no misturador durante o período de repouso	61
Figura 12 - CCA após a moagem no moinho de bolas junto com o cimento CP II F 40	62
Figura 13 - Fibras de Polipropileno	62
Figura 14 - Determinação da consistência da argamassa de referência.....	65
Figura 15 - Corpos de prova de CCA + FP rompidos à compressão e à tração	67
Figura 16 - Determinação da resistência à tração.....	67
Figura 17 - Corpos de prova na estufa.....	68
Figura 18 - Corpo de prova na balança hidrostática.....	68
Figura 19 - Corpos de prova no banho maria.....	69
Figura 20 - Coloração REF e CCA	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais componentes do Cimento Portland.....	22
Quadro 2 - Evolução da produção por tipo de cimento (%).....	27
Quadro 3 - Classificação das adições minerais.....	29
Quadro 4 - Requisitos químicos materiais pozolânicos.....	33
Quadro 5 - Requisitos físicos materiais pozolânicos.....	33
Quadro 6 - Propriedades das fibras.....	41
Quadro 7 - Comparativo entre pavimentos rígidos e flexíveis.....	47
Quadro 8 - Exigências físicas e mecânicas para o cimento destinado a pavimentação rígida.....	51
Quadro 9 - Propriedades Superplastificante.....	55
Quadro 10 - Propriedades das fibras de polipropileno.....	63
Quadro 11 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de material para os teores de 0,5% e 1%	53
Tabela 2 - Resistência à compressão e à tração de argamassas com adição de fibras de polipropileno (24 horas)	54
Tabela 3 - Quantidade de material	60
Tabela 4 - Quantidade de material utilizado em cada argamassa.....	66
Tabela 5 - Resultados finura do cimento	70
Tabela 6 - Resultado tempos de pega	71
Tabela 7 - Resultados resistência à compressão do cimento	71
Tabela 8 - Resultados índice de consistência	73
Tabela 9 - Resumo resultados absorção de água.....	83
Tabela 10 - Resumo resultados índice de vazios.....	87
Tabela 11 - Resultado índice de desempenho	89
Tabela 12 - Resistências das argamassas CCA e REF aos 3, 7 e 28 dias	90
Tabela 13 - Resistências das argamassas CCA e REF aos 3, 7 e 28 dias (corrigidas)	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Desenvolvimento típico de hidratação de compostos puros	23
Gráfico 2 - Taxa de liberação de calor do cimento Portland com relação água/cimento igual a 0,4.	24
Gráfico 3 - Resistências de argamassas aos 28 dias com diferentes teores de CCA	38
Gráfico 4 - Resistência a compressão simples dos corpos de prova das argamassas incorporadas com CCA para o traço 1:2:9, após períodos de cura de 28, 63 e 91 dias	39
Gráfico 5 - Resistência à compressão às 24 horas	74
Gráfico 6 - Resistência à compressão aos 3 dias	75
Gráfico 7 - Resistência à compressão aos 7 dias	75
Gráfico 8 - Evolução da resistência à compressão nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias)	76
Gráfico 9 - Resistência à compressão aos 28 dias	77
Gráfico 10 - Resistência à compressão aos 63 dias	77
Gráfico 11 - Evolução da resistência à compressão em idades mais avançadas (7, 28 e 63 dias).....	78
Gráfico 12 - Resistência à tração às 24 horas.....	79
Gráfico 13 - Resistência à tração aos 3 dias	79
Gráfico 14 - Resistência à tração aos 7 dias	80
Gráfico 15 - Evolução da resistência à tração nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias) ..	80
Gráfico 16 - Resistência à tração aos 28 dias	81
Gráfico 17 - Resistência à compressão aos 63 dias	82
Gráfico 18 - Evolução da resistência à tração em idades mais avançadas (7, 28 e 63 dias)	82
Gráfico 19 - Evolução da absorção de água nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias)....	84
Gráfico 20 - Evolução da absorção de água em idades mais avançadas (7, 28 e 63 dias)	85
Gráfico 21 - Evolução da absorção de água em idades mais avançadas (7 e 63 dias)	86
Gráfico 22 - Evolução do índice de vazios nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias).....	87
Gráfico 23 - Evolução do índice de vazios em idades avançadas (7 e 63 dias).....	88

LISTA DE ABREVIATURAS e SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c - relação água/cimento
C₃A - aluminato tricálcico
CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
C₄AF - ferroaluminato tetracálcico ou ferrita
CaO - óxido de cálcio, cal
Ca(OH)₂ - hidróxido de cálcio ou portlandita
CCA - cinza da casca de arroz ou argamassa com 25% de substituição de cimento por cinza
CCA + FP - argamassa com 25% de CCA e 0,5% de fibras de polipropileno
CO₂ - dióxido de carbono
CP - cimento Portland
C₂S - silicato dicálcico
C₃S - silicato tricálcico
C/S - relação entre cal e sílica
C-S-H - silicato de cálcio hidratado
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
MgO - óxido de magnésio ou periclásio
Na₂O - óxido de sódio
NBR - Norma Brasileira
FAO - Food and Agriculture Organization of United Nations
Fe₂O₃ - óxido de férrico
FP - argamassa com 0,5% de fibras de polipropileno
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAP - Índice de atividade pozolânica
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K₂O - óxido de potássio
REF - argamassa de referência, sem nenhum tipo de adição
SiO₂ - dióxido de silício ou sílica
SOSBAI - Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado
SP - superplastificante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 Cimento Portland.....	19
4.1.1 Definição e breve histórico	19
4.1.2 Composição química ou Principais compostos	20
4.1.3 Produtos de hidratação	23
4.2 Adições Minerai s	26
4.2.1 Importância.....	26
4.2.2 Classificação	29
4.2.3 Fíler	30
4.2.3 Materiais Pozolânicos.....	31
4.2.4 Produção de arroz e seus resíduos.....	33
4.2.5 Cinza da casca de arroz (CCA)	36
4.2.6 Uso da CCA em concretos e argamassas.....	37
4.3 Fibras em matrizes cimentícias	40
4.3.1 Fibras de polipropileno	43
4.4 Pavimentação Rígida	46
4.4.1 Contexto Geral	46
4.4.2 Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT.....	48
5 METODOLOGIA	52
5.1 Escolha do teores adotados	53
5.2 Materiais.....	54

5.2.1 Água.....	54
5.2.2 Agregado Miúdo	54
5.2.3 Aditivo Superplastificante	55
5.2.4 Cimento.....	55
5.2.5 Cinza da casca de arroz.....	61
5.2.6 Fibras de Polipropileno.....	62
5.3 Ensaio Preliminares.....	63
5.3.1 Determinação da densidade.....	63
5.3.2 Determinação da consistência	64
5.4 Moldagem dos corpos de prova	65
5.5 Ensaio de resistência à compressão e à tração	66
5.6 Ensaio de absorção de água e índice de vazios	68
5.7 Aplicação em Pavimentos Rígidos	69
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	70
6.1 Finura do cimento.....	70
6.2 Tempos de pega	70
6.3 Resistência à compressão do cimento.....	71
6.4 Densidade	72
6.5 Consistência.....	72
6.6 Resistência à compressão	74
6.7 Resistência à tração.....	78
6.9 Absorção de água	83
6.10 Índice de Vazios	86
6.11 Estudo da viabilidade técnica de aplicação em pavimento rígido.....	89
7 CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS.....	96
APÊNDICE A – Propriedades mecânicas	103

APÊNDICE B – Absorção de água, índice de vazios e massa específica	107
--	-----

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil têm significativa participação nos processos de degradação do meio ambiente uma vez que promove profundas transformações na natureza e é um dos setores que mais geram impacto ambiental devido ao alto consumo de recursos naturais e ao enorme volume de resíduos produzidos. Segundo John (2010), cerca de 40% a 75% das matérias-primas retiradas da natureza são destinadas ao uso como material de construção. Nesse sentido, a indústria cimenteira responsável pela produção do insumo que compõe o material mais consumido no mundo depois da água contribui para o esgotamento dos recursos materiais e o aumento da taxa de emissão de gases poluentes na atmosfera. Segundo Neville (2016), a produção de uma tonelada de cimento gera aproximadamente a mesma quantidade de dióxido de carbono. Portanto, novas alternativas que minimizem tais efeitos negativos terão contribuição ambiental proporcional a relevância dessa indústria no cenário mundial.

Para Calmon (2010), apesar de ser uma das grandes produtoras de resíduos, a construção civil mostra-se capaz de absorver e reciclar os materiais remanescentes por ela produzidos assim como os gerados por outros setores. Isso ocorre a partir da introdução de adições minerais, principalmente, de subprodutos industriais ao cimento o que segundo Silva (2010) contribui para a sustentabilidade da cadeia e têm um forte apelo ambiental, sendo responsável por uma redução no impacto de ambas as indústrias envolvidas.

Além de todos os requisitos ambientais a serem levados em consideração, as exigências do mercado são cada vez maiores no que diz respeito aos padrões de qualidade dos produtos de matrizes cimentícias. Dessa forma, o uso de adições minerais e fibras são uma realidade na moderna tecnologia dos concretos e argamassas, já que tais materiais atuam na melhora do desempenho dos compósitos. Então, visando aproveitar o potencial que os resíduos industriais possuem ao serem utilizados como material de construção é que busca-se empregar a cinza da casca de arroz (CCA) como substituição parcial ao cimento. O interesse nesse resíduo se dá em razão do efeito físico e químico provocado pelas adições reativas, como as

pozolanas, que atuam na redução da porosidade capilar o que conduz, em vista disso, a uma maior durabilidade. (SILVA, 2010; DAL MOLIN, 2011) Além disso, a reação pozolânica contribui para a formação de produtos de hidratação do cimento responsáveis pela resistência.

Nesse sentido, a elevada resistência à compressão, à ação da água e a durabilidade, dentre outras propriedades, são responsáveis pela ampla aplicação de argamassas e concretos. Conforme Figueiredo (2011), buscando-se melhorar características como a baixa resistência à tração e ao impacto, seu comportamento frágil e sua suscetibilidade à fissuração e, por consequência à patologias, é que fibras são utilizadas como reforço. Lucena (2017) aponta que a utilização de polímeros como elementos de reforço em matrizes cimentícias é capaz de realçar as propriedades dessas misturas, uma vez que produz compósitos com características mais apropriadas se comparadas as propriedades dos materiais isoladamente. Dentro desse contexto, destacam-se as fibras de polipropileno que, segundo Figueiredo e Rêgo (2010), são as mais empregadas dentre as fibras poliméricas.

Dessa forma, este trabalho se propõe a analisar os efeitos da cinza da casca de arroz e das fibras de polipropileno, tanto individualmente quanto em conjunto. Para isso, serão realizados ensaios laboratoriais para analisar a resistência mecânica das respectivas misturas bem como avaliar o índice de vazios e a absorção de água. Diante dos ensaios, pretende-se constatar que esses materiais qualifiquem as matrizes cimentícias e com a mistura dos dois espera-se que as fibras atuem como reforço da mistura com cinza nas primeiras idades no sentido de reduzir o efeito de retardamento da resistência das adições nesse período, conforme comentado por Mehta e Monteiro (2014).

Por fim, com a intenção de conferir uma aplicação às misturas produzidas, ao final do trabalho será avaliada a viabilidade técnica de uso da CCA em pavimentos rígidos por meio de parâmetros determinados pelo DNIT. Nessa perspectiva, Pouey (2006) destaca que a coloração mais escura, diferente da usual, que a CCA confere às matrizes cimentícias, ocasiona problemas quanto à aceitação estética e, por consequência, no mercado desses compósitos, representando um empecilho a ampla aplicação. Dessa forma, um dos objetivos de sua tese assim como a de Dafico (2001)

é o clareamento dessa cinza com a intenção de aumentar seu valor comercial e impulsionar sua utilização industrialmente. Portanto, dentro do contexto brasileiro, a aplicação em pavimentos rígidos seria satisfatória uma vez que esse fator não representaria um problema de aceitação, já que o pavimento asfáltico que também apresenta esse aspecto visual está presente como revestimento, segundo Balbo (2010), em cerca de 98% das rodovias brasileiras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos da substituição parcial de cimento pela cinza da casca de arroz e a influência da adição de fibras de polipropileno, tanto individualmente quanto em conjunto, nas proporções de 25% e 0,5%, respectivamente, nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o cimento;
- Analisar a influência das fibras de polipropileno e da cinza da casca de arroz nas propriedades mecânicas (resistência à compressão e à tração) das argamassas;
- Avaliar as propriedades físicas obtidas com a introdução de fibras de polipropileno e da cinza da casca de arroz (absorção de água e índice de vazios);
- Examinar a capacidade de reforço das fibras de polipropileno à matriz com CCA e também à matriz convencional;
- Verificar a capacidade de redução da porosidade capilar com a incorporação de CCA;
- Estudar a viabilidade de aplicação da cinza da casca de arroz como adição mineral em concretos de pavimentos rígidos por meio do Manual de pavimentação rígida do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da norma DNIT 050/2004-EM.

3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura do trabalho encontra-se dividida em 7 capítulos, sendo o primeiro deles a introdução. No segundo, estão o objetivo geral e os objetivos específicos e na sequência, no terceiro capítulo, apresenta-se a organização do trabalho.

Em seguida, no quarto capítulo, para uma melhor compreensão do tema, está a revisão bibliográfica que pode ser subdividida em quatro partes. Na primeira parte, discorre-se sobre o cimento e seus produtos de hidratação para ajudar a entender como a substituição parcial de cimento por CCA altera essa dinâmica e as propriedades do compósito no estado fresco e endurecido. Na segunda, aborda-se sobre a importância das adições minerais e sua classificação, aprofundando-se mais nas pozolanas e comentando-se um pouco sobre o fíler, já que o cimento utilizado é composto por esse material. Além disso, desenvolve-se também sobre os resíduos da produção de arroz e sobre as propriedades da cinza e seu uso em concretos e argamassas. A terceira parte, contextualiza o leitor a respeito da utilização de fibras em matrizes cimentícias e detalha um pouco mais sobre as fibras de polipropileno, suas propriedades e a interação delas com as argamassas. Na quarta e última parte, descreve-se de forma superficial sobre uma das possíveis aplicações para as argamassas produzidas, elencando-se os requisitos dispostos no manual de pavimentos rígidos para que um material possa ser utilizado nesse sentido.

O quinto capítulo apresenta a metodologia utilizada para avaliar as argamassas produzidas. No sexto, os resultados experimentalmente obtidos foram convertidos em gráficos e tabelas para realizar a análise dos dados. E no sétimo e último capítulo estão as considerações finais.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Cimento Portland

4.1.1 Definição e breve histórico

O cimento Portland é um material pulverulento com propriedades aglomerantes que ao se hidratar, endurece, adquire resistência mecânica e permanece estável quando em contato com água. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP), 2002) Tais propriedades, assim como o emprego de matérias primas relativamente abundantes e de baixo custo na sua constituição contribuíram para sua consolidação e largo emprego como material de construção em todo mundo, atuando como principal insumo de concretos e argamassas. (MEHTA; MONTEIRO, 2014; ISAIA, 2011)

Segundo registros históricos, o primeiro aglomerante utilizado pela humanidade na construções de edificações foi a argila, que apesar de quimicamente inativa é capaz de alcançar certa resistência mecânica. (AMBROZEWICZ, 2012) Contudo, provavelmente, o fato de ser um material não hidráulico, instável à ação da água, e, portanto, não estanque e durável, levou a busca por outras alternativas que garantissem mais segurança estrutural às construções, ocasionando, como consequência, uma grande evolução no que se diz respeito ao uso de aglomerantes.

Dessa forma, a utilização de cal, gesso e pozolanas naturais por diversos povos do mundo antigo tiveram importante papel na consolidação do conhecimento necessário ao desenvolvimento do cimento. (ISAIA, 2011) Segundo Battagin e Battagin (2010), em 1756, John Smeaton deu um grande passo nesse sentido ao calcinar calcários moles e argilosos e perceber, ao contrário do que se acreditava, uma melhora no produto final com a utilização de calcários impuros.

Em seguida, em 1818, de acordo com Centurione (1993), Vicat, considerado o pai do cimento artificial, obtém resultados satisfatórios a partir da mistura de calcário e argila e associa esse fato a existência de proporções ideais desses materiais para

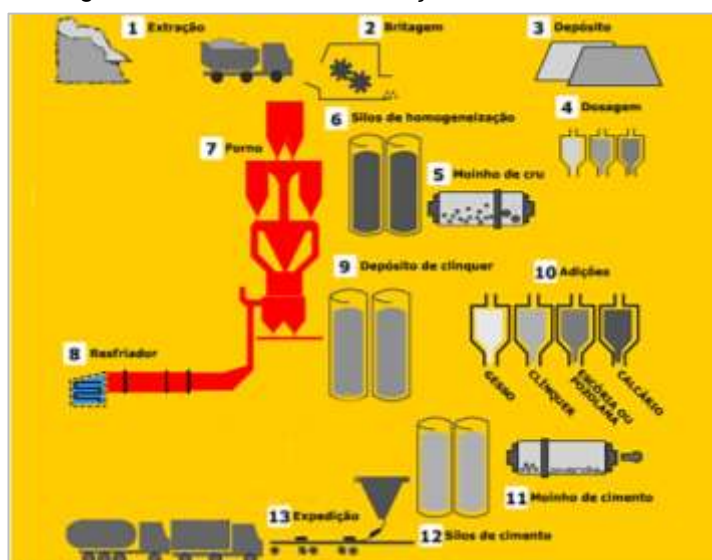
obtenção de aglomerantes de qualidade, constatando-se que isso não estava estritamente relacionado ao uso de rochas calcárias impuras.

Porém, somente em 1824, conforme Ambrozewicz (2012), a partir da calcinação de argila e calcário e posterior moagem é que finalmente o denominado cimento Portland foi patenteado na Inglaterra por Joseph Aspdin. Segundo o autor, foi assim denominado devido à semelhança do material endurecido a uma rocha da região altamente empregada na época. A partir daí, a evolução de técnicas e utilização de equipamentos cada vez mais modernos resultaram no cimento como é conhecido hoje.

4.1.2 Principais compostos

O cimento Portland é um pó fino de coloração acinzentada, constituído, essencialmente, pelo clínquer Portland, produzido por meio da calcinação de uma mistura de calcário e argila, além de um pequeno teor de sulfato de cálcio para o controle de pega e eventuais adições conforme o tipo de cimento (escória de alto forno, pozolana, fíler e etc). (ABCP, 2002) A produção desse insumo pode ocorrer por via úmida ou seca e consiste, de maneira simplificada, na extração das matérias primas, britagem, pré-homogeneização, dosagem, moagem, homogeneização, clínquerização e moagem final com as adições desejadas, conforme esquematizado na Figura 1. (ZAMPIERE, 1989; CENTURIONE, 1993)

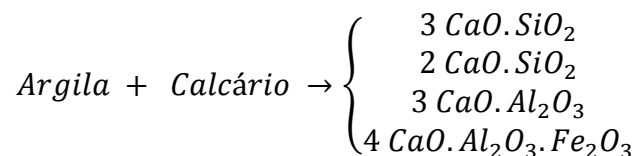
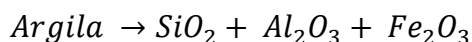
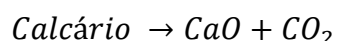
Figura 1 - Processo de fabricação Cimento Portland



Fonte: <<https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao/>>

As matérias primas utilizadas para a produção de cimento contêm em sua composição química: cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), além de impurezas, em porcentagens menores. (BAUER, 2015) O óxido de cálcio é proveniente, principalmente, das rochas calcárias, enquanto que a sílica, o óxido de ferro e a alumina são encontrados, geralmente, nas argilas. Todavia, se algum desses componentes fundamentais apresenta-se em quantidade insuficiente, adiciona-se bauxita, areia e/ou minério de ferro como fontes secundárias. (CENTURIONE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Ao serem homogeneizados em uma proporção adequada, estes óxidos são quimicamente combinados no forno durante o processo de calcinação, convertendo-se nos principais constituintes do clínquer: silicato tricálcico (C₃S), silicato bicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferroaluminato tetracálcico (C₄AF). Segundo Mehta e Monteiro (2014), tal processo pode ser expresso pelas seguintes reações químicas:



A presença desses constituintes fundamentais em proporções variadas é responsável pelas propriedades do produto, de forma que, cada composto apresenta um comportamento diverso e que se complementa na formação dos produtos de hidratação. Portanto, a compreensão das características relacionadas a cada um deles permite prever as propriedades do aglomerante produzido. (BAUER, 2015)

A resistência mecânica é atribuída aos silicatos C₃S e C₂S, que são chamados de alita e belita, respectivamente, em seu estado impuro. Nesse sentido, o silicato tricálcico é responsável pela resistência nas primeiras idades, no primeiro mês, especialmente, enquanto que o silicato bicálcico têm atuação mais acentuada em idades mais avançadas. Os aluminatos, de maneira geral, pouco ou nada contribuem

para a resistência, a não ser no primeiro dia. O C_3A é o componente mais reativo, e que, por conseguinte, gera um alto calor de hidratação e confere resistência a pasta no primeiro dia. (BAUER, 2015) Já a ferrita tem como principal função a resistência à corrosão química, em especial ao ataque de sulfatos e segundo, Brooks e Neville (2013), sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos. Assim, suas respectivas fórmulas químicas, abreviaturas, porcentagens no clínquer e principais propriedades estão listadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais componentes do Cimento Portland

Compostos	Fórmula Química	Abreviatura	% no clínquer	Propriedades
ALITA Silicato Tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S	50-65	Endurecimento rápido. Alto calor de hidratação. Alta resistência inicial.
BELITA Silicato Bicálcico	$2CaO.SiO_3$	C_2S	15-25	Endurecimento lento. Baixo calor de hidratação. Baixa resistência inicial.
ALUMIANATO Aluminato Tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	6-10	Acelera a pega e alto calor de hidratação. Suscetível ao ataque de sulfatos. Aumenta a retração e reduz a resistência final.
FERRITA Ferroaluminato Tetracálcico	$3CaO.Al_2O_3Fe_2O_3$	C_4AF	3-8	Endurecimento lento. Não contribui para a resistência. Resistente a sulfatos e coloração escura.

Fonte: Ambrozewicz, 2012. (Adaptado)

Além dos silicatos e aluminatos de cálcio, estão presentes no clínquer Portland constituintes secundários como, por exemplo, a cal livre (CaO) e o periclásio (MgO). Em teores elevados a cal livre é indesejada, assim como, o óxido de magnésio na forma cristalina, já que a lenta reação de hidratação dos compostos provoca expansibilidade e por sua vez fissuração, que atua desagregando a pasta endurecida. (CENTURIONE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 2014)

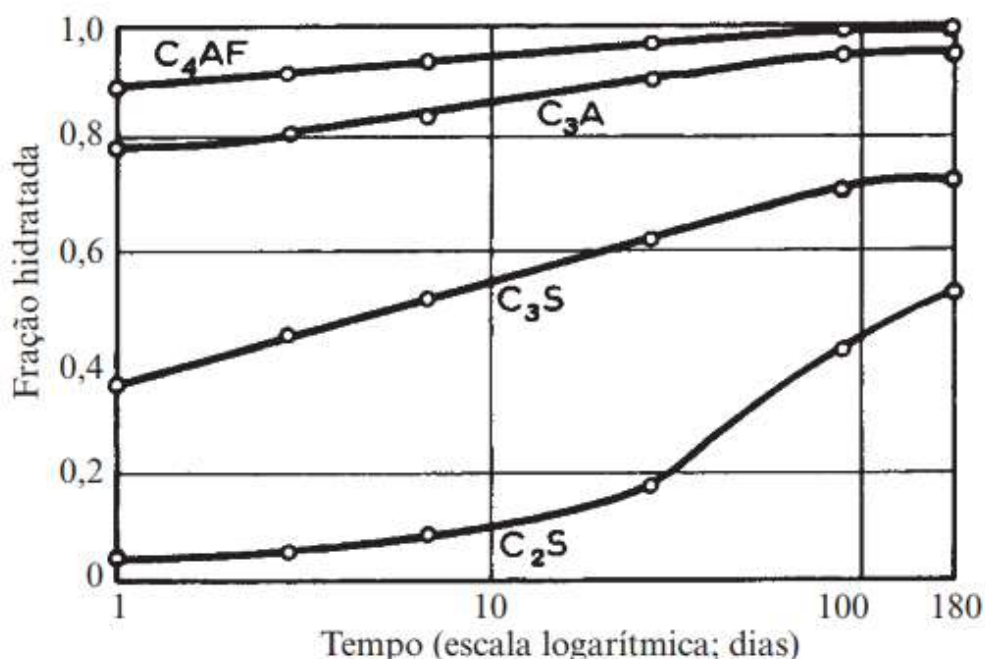
Além disso, conforme Battagin (2011), a presença de CaO livre em quantidades significativas indicam condições insatisfatórias de produção, servindo, assim, como parâmetro de controle de fabricação do cimento.

4.1.3 Produtos de hidratação

Em presença de água, todos os componentes do cimento, passam a sofrer reações químicas que desencadeiam a formação de produtos sólidos responsáveis pelo endurecimento e por todas as propriedades inerentes a pasta hidratada. Apesar de estarem igualmente dissolvidos, os silicatos e aluminatos se hidratam a partir de uma dinâmica diferente, já que suas propriedades particulares se refletem na velocidade da reação, no calor liberado durante a hidratação e nos produtos resultantes. (MINDESS, YOUNG e DARWIN, 2003; NEVILLE, 2016)

Como ilustração disso, o Gráfico 1 exemplifica a evolução e o comportamento das fases anidras puras do clínquer ao longo dos dias ao se hidratarem. Além da composição química e mineralógica, outros fatores como finura, temperatura e relação água/cimento influenciam a reação de hidratação. (NEVILLE, 2016)

Gráfico 1 - Desenvolvimento típico de hidratação de compostos puros



Fonte: Neville, 2016.

Dessa forma, do ponto de vista da cinética do processo, os componentes mais instáveis, e por consequência mais reativos, como os aluminatos são os primeiros a se hidratar. Para Mindess, Young e Darwin (2003), a ordem na qual o processo

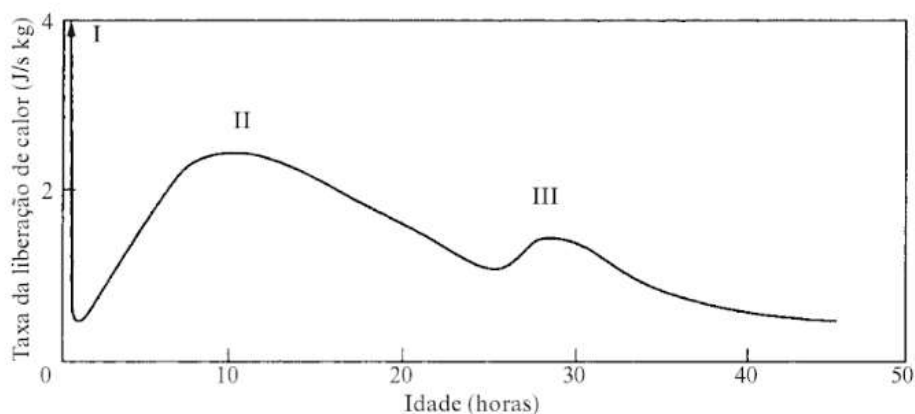
acontece nos primeiros dias pode ser retratado da seguinte forma: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$, levando-se em consideração que o tipo de cimento, a finura, a presença de impurezas e adições pode afetá-la.

A hidratação por dissolução-precipitação e a hidratação no estado sólido ou topoquímico são os dois mecanismos pelos quais o cimento reage com a água e forma seus produtos de hidratação. (TIBONI, 2007) Conforme Silva (2010), no primeiro processo a interação dos compostos do clínquer com água promove a liberação de íons na solução. Visando atingir um estado menos solúvel do que a fase anidra, estes se combinam e se transformam em hidratos. Para Monteiro e Mehta (2014), esse processo é dominante nos estágios iniciais ao passo que o mecanismo topoquímico acontece em momentos posteriores e se processa de forma mais lenta na superfície externa do grão em direção ao seu interior.

Para Neville (2016), como a reação de hidratação é exotérmica, a velocidade de hidratação pode ser descrita através da taxa de liberação de calor ao longo do tempo, que conforme, mostra o Gráfico 2, é marcado por 3 picos de calor.

Gráfico 2 - Taxa de liberação de calor do cimento Portland com relação água/cimento igual a 0,4.

O primeiro pico, de 3200 J/s está fora do gráfico.



Fonte: Neville, 2016.

O pico I corresponde a uma grande liberação de calor em virtude do contato inicial dos compostos com água. Em seguida, instala-se um período de dormência, na qual verifica-se uma diminuição drástica da velocidade. (NEVILLE, 2016) Segundo, Mehta e Monteiro (2014), essa queda se deve a ação do sulfato em solução que atua

inibindo a reação instantânea dos aluminatos. Conforme Mindess, Young e Darwin (2003) essa é a razão pela qual a pasta permanece no estado plástico e, portanto, trabalhável por um determinado número de horas.

Na sequência, o vigor das reações é retomado lentamente até atingir o pico II, e para Mehta e Monteiro (2014) esse calor está associado a dissolução de C_3S e a formação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Por fim, segundo Neville (2016), depois de algumas horas o terceiro pico, menor que os anteriores, é atingido em consequência da reação do C_3A após o consumo da gipsita, nesse momento, a etringita se converte em monossulfoaluminato.

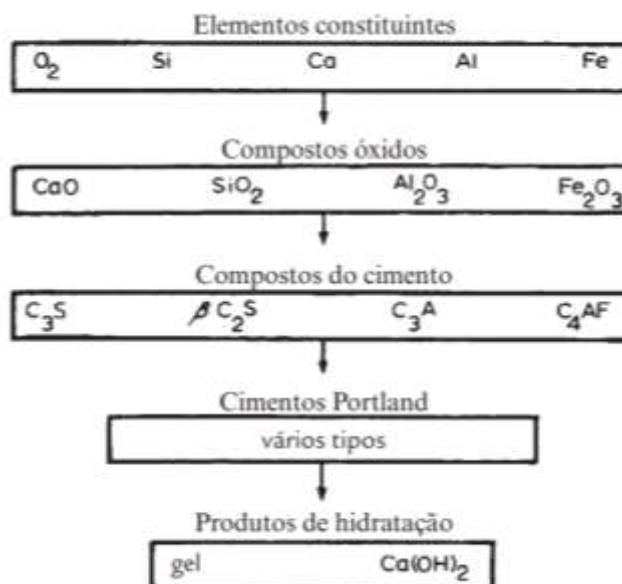
De maneira simplificada, a reação do C_3A com o sulfato de cálcio produz dependendo da relação sulfato/alumina presente na solução trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringita, ou monossulfoaluminato, uma versão mais estável. Outro componente que se combina com a gipsita é o C_4AF cuja reação produz produtos estruturalmente semelhantes aos gerados pelo C_3A , apesar das diferentes composições químicas. Já os silicatos se hidratam e geram silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio. Dessa forma, os principais produtos de hidratação do cimento são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio ou portlandita ($Ca(OH)_2$) e os sulfoaluminatos de cálcio. (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

O C-S-H é descrito dessa forma já que possui uma estequiometria variável e que representa uma infinidade de compostos cuja relação C/S está próxima de 2 (NEVILLE, 2016). Para Mehta e Monteiro (2014), essa é a fase mais importante, que ocupa de 50 a 60% do volume de sólidos e se caracteriza como um composto de múltiplas morfologias.

Já os demais produtos apresentam papéis secundários, de forma que a portlandita ocupa um volume de 20 a 25% da pasta, enquanto que os sulfoaluminatos representam de 15 a 20% do total. (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Para Zampiere (1989), o hidróxido de cálcio praticamente não contribui para a resistência e caracteriza-se como um composto de fácil solubilização, sendo, portanto, suscetível à lixiviação e à carbonatação. Segundo o autor, a portlandita exerce, dessa forma, um efeito negativo sobre a qualidade e a durabilidade das pastas de cimento.

De maneira geral, todo o processo desde a formação dos compostos do cimento até a hidratação pode ser resumido pela Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática da formação e da hidratação do cimento Portland



Fonte: Neville, 2016.

4.2 Adições Mineraiis

4.2.1 Importância

A adição de gesso na moagem final do clínquer se deve à necessidade de garantir que a pasta hidratada permaneça trabalhável por um determinado período de tempo, característica essencial para a eficiência das operações as quais o material é submetido. Por isso, a presença de gipsita para o controle de pega do cimento é fundamental, de modo que, segundo Ambrozevicz (2012), adiciona-se, em geral, sulfato de cálcio numa proporção de 3% da massa total de clínquer. Dessa forma, outras matérias primas, denominadas adições mineraiis, são também acrescentadas para modificar algumas propriedades e melhorar o desempenho do compósito, originando, então, os diversos tipos de cimento comercializados no mercado.

De acordo com Silveira (1996), as adições minerais são utilizadas como substituição parcial ou são inseridas como um percentual a mais em relação a quantidade de cimento. Conforme Silva (2010), a incorporação desses materiais pode ser feita de duas maneiras, no processo de fabricação do insumo ou diretamente na betoneira, obtendo-se resultados semelhantes em ambos os casos. Entretanto, a forma como a adição é realizada varia de um país para o outro, sendo a primeira forma predominante no Brasil e na Europa, ao passo que nos Estados Unidos o uso de adições não é tão usual, de maneira que se forem utilizadas são introduzidas no momento do preparo da mistura. (SILVA, 2010; MINDESS, YOUNG E DARWIN, 2003)

Battagin e Battagin (2010) relatam que o consumo de cimentos aditivados é expressivo no Brasil e demonstram, conforme o Quadro 2, que desde a introdução das adições minerais, o uso de cimento Portland comum vem caindo bastante, apresentando, atualmente, uma participação inexpressiva no mercado. Para os autores, os cimentos compostos possuem características que os qualificam para o uso geral, mas existem algumas situações específicas nas quais sua aplicação torna-se mais adequada às necessidades do consumidor.

O interesse relativo à utilização de adições minerais é crescente e não se resume somente a demanda do mercado por cimentos com características especiais, mas também, segundo Santos (1997), pelos benefícios de ordem técnica, ambiental e econômica que a presença desses materiais confere ao clínquer.

Quadro 2 - Evolução da produção por tipo de cimento (%)

Tipo de cimento	Ano												
	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013
CPI	95	89,7	86,9	80,8	73,2	75	2,9	1,2	2	0,15	0,17	0,15	0,4
CPII	-	-	-	-	-	-	74,1	79,7	65	66,55	63,04	61,1	62,1
CPIII	4,4	7,6	7,1	11,4	10,1	12,3	10,9	6,5	17,5	14,4	15,24	15,37	14,15
CPIV	-	2,1	5,4	7,5	16,2	12,5	9,4	5,8	6,6	11,6	13,44	14,78	14,85
CPV	-	-	0,2	-	-	0,02	2,6	6,7	5,3	7,3	8,11	8,6	8,5
Branco	-	-	-	-	-	0,17	0,12	0,05	0,2	-	-	-	-

Fonte: Battagin; Battagin, 2010; SNIC, 2013.

Mehta e Monteiro (2014) comentam que, provavelmente, foram as razões econômicas o motivo original que norteou essa mudança e, dessa forma, permitiram o rápido desenvolvimento desses novos tipos de cimento, de modo que em pouco tempo, tanto na Europa como na Ásia, a produção de cimentos compostos já superava a de cimentos comuns. Conforme Zampiere (1989), dois tipos de materiais se mostraram bastante vantajosos nessa tentativa de minimização de custos, as escórias de alto forno e os materiais pozolânicos. Para Neville (2016), o uso de materiais suplementares garantia redução de custos na medida em eram mais baratos que o clínquer Portland e se encontravam na forma de depósitos naturais, o que dispensava a necessidade de grandes gastos com beneficiamento, ou, ainda, se tratavam de resíduos industriais. Além disso, segundo o autor, outro fator que impulsionou a introdução dessas adições foi o abrupto aumento do custo de energia na década de 1970 que, por consequência, afetou diretamente o preço do insumo, já que o processo de queima representa entre 40 e 60% do custo de produção. Assim, conforme Battagin (2011), a utilização desses materiais foi se consolidando como uma alternativa ao apreciável consumo de energia dispendido no processo de fabricação do cimento Portland.

Do ponto de vista técnico, a presença de adições minerais reativas confere ao cimento inúmeros benefícios e produzem um material com características diferenciadas. Atuam na modificação da estrutura interna da pasta de cimento hidratada, reagindo química e fisicamente com os produtos de hidratação do cimento, o que confere novas propriedades ao material tanto no estado fresco quanto no endurecido. Tais propriedades incluem maior resistência à agentes agressivos e à expansão pela reação álcali-agregado, redução da porosidade capilar garantindo mais impermeabilidade, diminuição do calor de hidratação e conseqüentemente da fissuração térmica, dentre outros. (DAL MOLIN, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SILVA, 2010) Dessa forma, esses benefícios contribuem para uma maior durabilidade em comparação aos cimentos comuns e justificam tecnicamente a utilização das adições minerais.

Por fim, segundo Silva (2010), seu uso também está relacionado a sustentabilidade da cadeia de construção civil. As adições minerais têm um forte apelo ambiental e são responsáveis por uma redução no impacto ambiental da

indústria cimenteira, principalmente, no que tange a uma economia de energia, de recursos naturais e uma diminuição na emissão de gases poluentes para a atmosfera. Além disso, a aplicação de resíduos industriais como matéria-prima nessa indústria garante um destino final adequado a esses materiais, agrega valor comercial a eles e atua na diminuição dos prejuízos causados por ambas as indústrias envolvidas. (BATTAGIN E BATTAGIN, 2010; DAL MOLIN, 2011; SILVA, 2010)

4.2.2 Classificação

As adições minerais são classificadas, basicamente, em três grandes grupos principais conforme sua ação físico-química: (DAL MOLIN, 2011; SILVA, 2010)

1. **Materiais Cimentícios:** são auto-cimentantes, ou seja, a formação de produtos hidratados, como o C-S-H, não depende da presença de hidróxido de cálcio.
2. **Materiais Pozolânicos:** necessitam da presença de hidróxido de cálcio para a formação de produtos cimentantes, como a sílica ativa, por exemplo.
3. **Materiais Não-Reativos:** são materiais finamente divididos que não possuem atividade química, como o fíler calcário.

Quadro 3 - Classificação das adições minerais

Classificação	Tipos de adições
Cimentantes	Escória granulada de alto forno
Cimentantes e Pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa Metacaulim Cinza de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio Argilas calcinadas Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto forno resfriada lentamente Cinzas de forno Escória de caldeira Palha de arroz queimada em campo
Adições inertes (filler)	Pó de cálcio, pó de pedra

Fonte: Mehta; Monteiro (2008 apud SOKOLOVICZ, 2013).

Dafico (2001) aponta que a sílica ativa, a cinza volante e a cinza da casca de arroz são as adições mais importantes dentre os materiais puramente pozolânicos. Segundo o autor, quando o material possui cálcio em quantidade suficientes para ser auto cimentante, apesar de necessitar de auxílio externo para desenvolver tais propriedades, não pode ser classificado apenas como uma pozolana, mas como cimentício e pozolânico. Exemplo disso, é a cinza volante que é basicamente classificada como pozolana, porém a presença de um alto teor de cálcio confere ao material propriedades pozolânicas e cimentantes conforme consta no Quadro 3, que classifica as adições minerais.

Apesar da escória de alto forno ser um material cimentante, o fato de sua hidratação ser lenta e formar produtos de hidratação insuficientes inviabiliza sua aplicação para fins estruturais, porém ao ser utilizada em conjunto com o cimento sua reação de hidratação é acelerada. (DAL MOLIN, 2011)

4.2.3 Fíler

Fíler é um material carbonático finamente dividido, de origem natural ou obtido por meio do processamento de minerais inorgânicos, utilizado como adição mineral em concretos e argamassas. A ação física desse material, que possui um diâmetro médio próximo ao do cimento, contribui para melhora de algumas características do concreto quando presentes em pequenas quantidades, em teores menores que 15%. Esse efeito benéfico é observado na melhora da trabalhabilidade, capilaridade, permeabilidade, exsudação, tendência à fissuração e etc. (AMBROZEWICZ, 2012; NEVILLE, 2016; SILVA, 2010)

De acordo com a ABCP (2002), a presença de fíler torna os concretos e argamassas mais trabalháveis, funcionando como verdadeiros lubrificantes, uma vez que suas partículas possuem dimensões apropriadas para que esse material se acomode entre os grãos dos demais componentes do cimento.

Conforme Neville (2016), apesar de, em geral, quimicamente inertes, os fílers podem reagir com os produtos da pasta hidratada, atuando como agentes de nucleação e intensificando a hidratação do cimento. Segundo Battagin e Battagin

(2010), a reação com os aluminatos de cálcio permite a formação de carboaluminatos que podem substituir parcialmente o papel do sulfato de cálcio.

4.2.3 Materiais Pozolânicos

Segundo a NBR 12653 (2015, p.2) materiais pozolânicos são:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes.

Ao contrário dos materiais cimentícios, a presença de uma fonte de cálcio é essencial para que a reação pozolânica aconteça. Por isso, a viabilidade dessa reação é garantida por meio de compósitos a base de cimento, uma vez que, segundo Silva (1997), um dos compostos hidratados desse insumo é o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), liberado em grandes quantidades a partir da hidratação dos silicatos. Dessa forma, a sílica presente nos materiais pozolânicos se combina quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos ligantes adicionais como o C-S-H, um dos maiores responsáveis, conforme Mehta e Monteiro (2014), pelas propriedades mecânicas e pela durabilidade do material cimentício, determinante na definição dos atributos da pasta.

Santos (1997) ressalta que a reação pozolânica é capaz de formar silicatos de cálcio hidratados com uma menor relação C/S e, portanto, com menor basicidade e mais estáveis quimicamente. Segundo Rêgo (2004), a forma como a reação pozolânica acontece ainda não é completamente compreendida, pois é muito complexa.

Conforme a definição anteriormente dada pela norma, a composição química das pozolanas não se restringe apenas a sílica, de forma que muitos desses materiais possuem alumina reativa. Esse composto também reage com a portlandita e com os íons sulfato dispersos no sistema, produzindo novas fases sólidas hidratadas derivadas do alumínio. (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Dafico (2001), apresenta alguns aspectos da reação pozolânica e suas consequências técnicas nas propriedades de cimentos pozolânicos e com escória de alto forno. Para o autor, o fato da reação ser lenta, do mesmo modo que a taxa de liberação de calor, tem como consequência um lento desenvolvimento da resistência. O autor continua frisando que o consumo de hidróxido de cálcio, ao invés de produzi-lo, é responsável por uma maior durabilidade da pasta endurecida em meios ácidos. Além disso, ainda segundo o autor, os novos produtos hidratados se mostram eficientes no preenchimento dos vazios capilares, assegurando uma melhor distribuição de poros, o que resulta numa maior resistência e uma menor permeabilidade dos sistema.

Conforme Santos (1997), dentro dos materiais que se encontram sob a denominação de materiais pozolânicos há uma variedade no que se diz respeito a sua origem, composição química e também mineralógica, o que resulta em uma dificuldade de se classificar de forma precisa as pozolanas. Por isso, conforme Rego (2004 apud CORDEIRO, 2009), devido a heterogeneidade desses materiais é que existem diversos métodos que buscam quantificar a reação pozolânica, refletindo portanto essa dificuldade de se encontrar uma metodologia única para todas pozolanas.

A capacidade de um material reagir, em presença de água, com o hidróxido de cálcio e formar produtos cimentantes é conhecida como atividade pozolânica. Cordeiro (2009) aponta que esse conceito é um parâmetro de análise da reatividade do material e que foi introduzido devido a necessidade de se mensurar a eficácia e a qualidade dos materiais pozolânicos existentes no mercado cujo comportamento é diverso.

Dessa forma, a NBR 12653/2015, classifica esses materiais em 3 classes (N, C e E) e delimita requisitos físicos e químicos, presentes nos Quadros 4 e 5, para que sejam utilizados em conjunto com o cimento em concretos, argamassas e pastas. A classe N contempla as pozolanas naturais, que são de origem vulcânica ou de origem sedimentar, e as pozolanas artificiais, provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais, que atendam aos critérios da norma. As cinzas volantes estão

enquadradas na classe C e a classe E abrange as pozolanas que não se encaixam nas demais classes desde que obedeçam aos requisitos da norma.

Quadro 4 - Requisitos químicos materiais pozolânicos

Propriedade	Classe de material Pozolânico			Método de ensaio(*)
	N	C	E	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	ABNT NBR NM 25
(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.				

Fonte: NBR 12653, 2015.

Quadro 5 - Requisitos físicos materiais pozolânicos

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 μm	< 20%	< 20%	< 20%	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	$\geq 6 \text{ Mpa}$	$\geq 6 \text{ Mpa}$	$\geq 6 \text{ Mpa}$	ABNT NBR 5751
(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.				

Fonte: NBR 12653, 2015.

4.2.4 Produção de arroz e seus resíduos

O arroz é um dos cereais mais consumidos e cultivados do planeta, responde por 20% das calorias consumidas pela população mundial, sendo a base da alimentação de mais de 3 bilhões de pessoas. (SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI), 2016)

Segundo pesquisas da Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) (2016), a produção do grão chega a cerca de 631 milhões de toneladas. Conforme a fonte, o Brasil é o nono maior produtor do cereal do mundo com uma produção de 10,6 milhões de toneladas, se destacando como o único país não-asiático a fazer parte dos 10 maiores produtores mundiais. Já no cenário nacional, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2017), o estado do Rio Grande do Sul se destaca como maior produtor com o correspondente a 77% da produção, seguido por Santa Catarina com 8% e Tocantins com 4,5%.

Conforme Mehta e Monteiro (2014), a cada tonelada de arroz produzido são gerados 200 kg de casca de arroz. A casca de arroz, proveniente do processo de beneficiamento do arroz, é um material que possui baixa densidade e elevado volume e apresenta em sua composição 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica. (Rêgo, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2014)

A expressiva participação do país na produção de arroz no mundo corrobora para a geração de uma grande quantidade de casca de arroz que por se tratar de um resíduo volumoso representa um problema aos grandes produtores no que concerne ao armazenamento desse material, provocando um grande acúmulo nos moinhos de arroz. (GONÇALVES et al, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Netto (2006) salienta a lenta biodegradação da casca que permanece inalterada por muito tempo, ocupando grandes áreas devido ao seu baixo valor comercial e a características como dureza, fibrosidade e abrasividade. Rêgo (2004) também aponta a dificuldade de degradação desse material e comenta que devido as baixas propriedades nutricionais não é utilizada na alimentação de animais.

Dessa forma, na indústria do arroz esse resíduo retorna ao processo produtivo como combustível no processo de beneficiamento do cereal, gerando a energia necessária para secagem e parboilização dos grãos. Conforme Cordeiro (2009), o alto poder calorífico e o custo quase nulo são responsáveis pelo emprego desse material em substituição a lenha. Para Folleto (2005), como o material é abundante, a tecnologia para conversão de energia existe e o CO₂ produzido volta para o ciclo do

carbono da biosfera terrestre, essa é, portanto, uma viável alternativa do ponto de vista tecnológico, econômico e ambiental.

Contudo, segundo Pouey (2006), após a queima, 20% da casca de arroz transforma-se em cinza, um resíduo agroindustrial muito comum em regiões produtoras do cereal, que não tem uma destinação final certa, o que acaba gerando, portanto, problemas ambientais. Prudêncio, Santos e Dafico (2003) comentam que as principais consumidoras de casca de arroz como fonte de energia são, geralmente, beneficiadoras de pequeno porte que não possuem um programa de descarte adequado das cinzas, de forma que são lançadas em terrenos baldios ou em mananciais. Folleto (2005) ressalta que ao ser depositada em locais impróprios constitui-se como uma fonte de contaminação, pois a presença de carbono residual em sua composição é um grave poluente para o solo.

Diante disso, conforme Prudêncio, Santos e Dafico (2003), muitos trabalhos foram desenvolvidos para aplicar esse resíduo em outros setores industriais com a finalidade de minimizar o impacto ambiental causado. Folleto (2005) enumera inúmeras alternativas ao simples descarte da cinza da casca de arroz como, por exemplo, sua utilização no ramo de eletrônicos a partir da produção de carbetos de silício, na indústria química como carga em polímeros e na construção civil na produção de cimento, dentre outras aplicações.

Santos (1997) afirma que a CCA tem atraído pesquisadores do cimento devido a suas características pozolânicas. Para a autora, nenhum outro resíduo agrícola quando queimado produz tanta cinza como a casca do arroz e como em países produtores do cereal o volume gerado é bem grande somente a indústria cimenteira seria capaz de consumir tamanha quantidade.

Pouey (2006) apresenta algumas aplicações da CCA na construção civil como, por exemplo, o emprego do material como adição mineral em concretos e argamassas devido seu carácter pozolânico; sua utilização na estabilização de solos e na fabricação de tijolos.

4.2.5 Cinza da casca de arroz (CCA)

O interesse nesse resíduo se deu, principalmente, pelo elevado teor de dióxido de silício em sua composição que varia entre 90 e 95%, conforme constatou Houston (1972 apud DAFICO, 2001) em meio a análises químicas de CCAs provenientes de variadas regiões do mundo. Conforme Santos (2006), as principais impurezas em sua composição química são o óxido de potássio (K_2O) e o óxido de sódio (Na_2O), estando presentes ainda o CaO e MgO em teores que não ultrapassam 1%.

Como a CCA é resultante de um processo de combustão, as condições de queima afetam as propriedades físicas e químicas do material e, por sua vez, sua eficiência como material pozolânico. (DAL MOLIN, 2011; SILVA 2010; TIBONI, 2007) Para Pouey (2006), esse processo é resultado da combinação de 3 parâmetros que influem na reatividade da cinza: temperatura de queima, tempo de exposição e modo de combustão utilizado (a céu aberto, fornalha tipo grelha e leito fluidizado).

Conforme Santos (2006), as condições de queima refletem no surgimento de formas estruturalmente diferenciadas que irão afetar a capacidade de combinação com os produtos de hidratação do cimento. Silveira (1996) observa que tais condições são responsáveis pela formação das proporções relativas de sílica na forma polimórfica (quartzo, tridimita e cristobalita) e amorfa (vítrea). Santos (2006) avalia que quanto maior o teor da última mais reativo é o material, contudo, não necessariamente apresentará um melhor desempenho.

Para Martins (2018), o processo de queima geralmente é feito em fornalhas a céu aberto e resultam em uma cinza residual cristalina ou com baixo teor de sílica amorfa, ao passo que com controle de temperatura gera-se a cinza amorfa, que ocorre de forma menos expressiva.

Tiboni (2007) relata que praticamente todas as pesquisas realizadas concordam que a temperatura de calcinação deve estar entre $500^{\circ}C$ e $700^{\circ}C$ para a produção de uma sílica amorfa. Rêgo (2004) observa que quase todos os autores pesquisados confirmam o aparecimento de fases cristalinas em cinzas submetidas a elevadas temperaturas, especialmente maiores que $700^{\circ}C$. Silva (2010) aponta que é

possível obter resultados satisfatórios com temperaturas entre 700° e 800°C, porém por meio de uma queima rápida.

De acordo com Silveira (1996), o processo de combustão e as mudanças estruturais da sílica mediante a variação de temperatura estão associados aos diferentes tipos de coloração que a cinza pode apresentar, variando entre o preto, o cinza e o branco rosado. Para a autora, quanto maior o teor de matéria orgânica não queimada, maior a proporção de carbono residual e, por consequência, mais escura a cinza. Segundo Cordeiro (2009), longos períodos de retenção ou a exposição a altas temperaturas promovem a completa oxidação do carbono, gerando cinzas de cor branca.

Tiboni (2007) aponta que o grau de moagem modifica as propriedades físicas da CCA como a superfície específica e a finura uma vez que o processo torna as partículas inicialmente aciculadas mais esféricas. Conforme Rêgo (2004), assim como o percentual de sílica amorfa, a finura do material é uma das principais características que contribuem para a reatividade do material, quanto mais fina, mais reativa é a CCA. Para Dafico (2001), mais do que a composição química, a finura das partículas e a composição mineralógica são determinantes na capacidade do material em fornecer sílica e alumina em proporções suficientes para a reação com a cal.

4.2.6 Uso da CCA em concretos e argamassas

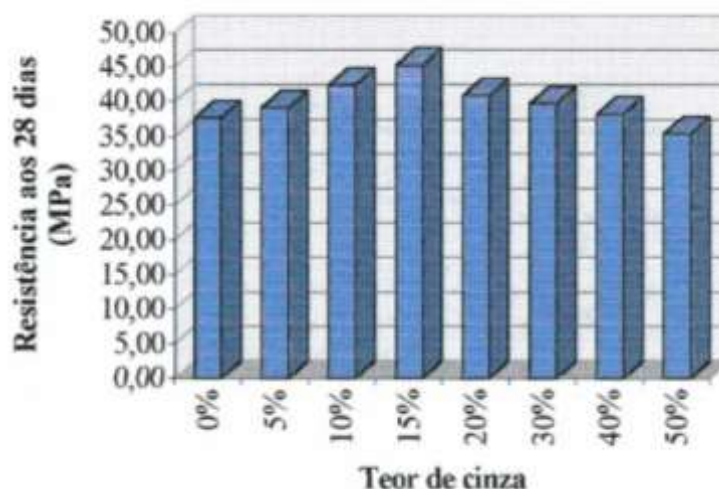
O aproveitamento de subprodutos industriais pozolânicos como substituição parcial do cimento promove uma considerável economia de energia e de custo e garante uma destinação final adequada ao resíduo ao mesmo tempo em que melhora as propriedades do produto final. (MEHTA; MONTEIRO, 2014; RÊGO, 2004)

Conforme Mehta (1992 apud TIBONI, 2007), a substituição de cerca de 10 a 20% de CCA já é o suficiente para garantir a diminuição da permeabilidade frente a agentes agressivos e o aumento de resistência mecânica, apesar de ser possível a utilização de mais de 70% de cinza de casca de arroz. Mehta e Monteiro (2014) comentam que mesmo em pequenas quantidades, em teores menores que 10%, a CCA mostrou-se eficiente ao inibir a reação álcali-agregado. Rêgo (2004) ressalta que

visando a economia e os benefícios técnicos apresentados, como um aumento da ordem de 3% na resistência mecânica, teores de substituição maiores que 20%, considerados altos, merecem ser melhor analisados. Nesse sentido, diversos autores tem reportado melhoras nas propriedades de concretos e argamassas com CCA.

Santos (1997) estuda a viabilidade de utilização de argamassas e concretos com cinzas provenientes de beneficiadoras de Santa Catarina produzidas por diferentes processos de queima e sem controle de temperatura. Por meio de ensaios preliminares com argamassas, verificou que aos 28 dias o teor que proporcionava maior resistência mecânica era o de 15% e que o de 40% apresentava comportamento equivalente ao da argamassa de referência, adotando-os, então, para os ensaios subsequentes, conforme Gráfico 3. A partir dos gráficos, observa-se que até 50% não existem grandes variações de resistência em relação às misturas de controle.

Gráfico 3 - Resistências de argamassas aos 28 dias com diferentes teores de CCA



Fonte: Santos, 1997.

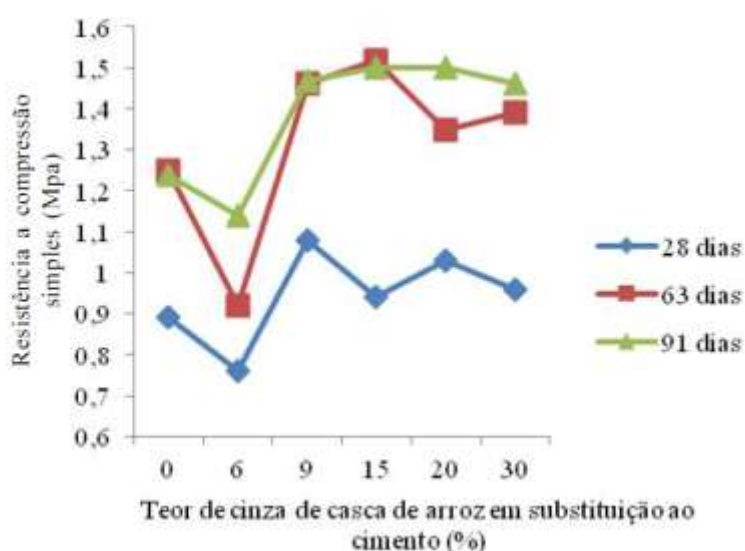
A referida autora também avaliou a correlação entre a resistência de concretos e argamassas confeccionados nos teores de 15 e 40%. Os coeficientes de correlação obtidos foram superiores a 90% o que, conforme Santos (1997), seria um indicativo de que os ensaios com argamassas podem ser utilizados como parâmetros de desempenho da CCA em concretos.

Sokolovicz (2013) investigou por meio de protótipos de concreto expostos à condições ambientais reais, o uso de cinza residual, natural e moída, em teores de

substituição de 15 e 25% em relação a massa de cimento aos 540 dias. Obteve valores de resistência à compressão para as misturas com 25% de CCA moída muito próximas a referência, com um acréscimo médio de 2,2% para todas as relações água/aglomerante verificadas (0,45;0,55;0,65). Por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, observou-se que a mistura com 25% de CCA moída apresentava os valores mais baixos de porosidade, o que se deve, conforme o autor, ao efeito das reações pozolânicas a longo prazo. Já quanto ao risco de penetrabilidade de íons cloreto segundo a ASTM C 1202:2005, verificou-se que todas as misturas com 15 e 25% de CCA moída foram classificadas com um risco muito baixo, em contrapartida, a mistura de referência apresentava risco moderado.

Bezerra et al (2011) analisa a viabilidade de aplicação de CCA em argamassas de assentamento aos 28, 63 e 91 dias em teores de 6, 9, 15, 20 e 30%. A partir do ensaio de absorção de água por imersão, observou-se que os corpos de prova com 6, 9 e 15% de CCA obtiveram os melhores resultados aos 91 dias. Além disso, todas as misturas contendo CCA apresentaram melhor desempenho do que a referência, exceto com 6%. Aos 28 dias, verificou-se que argamassas contendo 15 e 20% de substituição de cimento apresentaram as maiores resistências, conforme o Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resistência a compressão simples dos corpos de prova das argamassas incorporadas com CCA para o traço 1:2:9, após períodos de cura de 28, 63 e 91 dias



Fonte: Bezerra et al, 2011.

Tiboni (2007) avaliou misturas de argamassa padrão com 5, 10 e 15% de CCA predominantemente cristalina e percebeu que quanto maior o teor empregado, menor a resistência a compressão nas primeiras idades, entretanto, segundo a autora, esse comportamento se inverte em idades mais avançadas, quanto maior o teor, maior a resistência. Conforme a autora, tal comportamento está ligado a menor porcentagem de C_3S devido a substituição parcial e também ao lento desenvolvimento da reação pozolânica. Ao realizar o ensaio de determinação de tempo de pega, verificou um acréscimo de até 1h 15 min no início de pega dos cimentos com substituição de 15% por CCA em relação a mistura de referência. Porém, conforme a autora, dentro dos limites estabelecidos pela norma.

Rêgo (2004) ao investigar o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento de cinzas amorfas e cristalinas em variados tempos de moagem, percebe o potencial de utilização de cinzas cristalinas como adição mineral. Segundo o autor, as cinzas cristalinas apresentam bons resultados no ensaio, principalmente quando finamente divididas.

4.3 Fibras em matrizes cimentícias

O advento do cimento Portland, na segunda metade do século XIX, revolucionou a indústria da construção. A boa resistência do material endurecido à ação da água e aos esforços de compressão representaram um marco na utilização de aglomerantes, o que contribuiu para a disseminação e consolidação do uso de concretos e argamassas. Apesar do significativo consumo e dos inúmeros benefícios oferecidos, esses materiais apresentam como limitações a baixa resistência à tração, a suscetibilidade à fissuração e a baixa capacidade de deformação, comportamentos típicos de materiais cerâmicos. (FIGUEIREDO, 2011; ISAIA, 2011)

Nesse sentido, fibras produzidas a partir de variados materiais são empregadas com o propósito de minimizar a fragilidade e os desdobramentos de tal comportamento nas pastas de cimento convencionais. Bentur e Mindess (2007) relatam que a utilização de fibras com tal finalidade remonta aos tempos antigos, mas o uso manufaturado e em maior escala, se deu somente a partir do século XX.

Conforme Figueiredo e Rêgo (2010), a introdução desses materiais como reforço aconteceu desde 1960 com as fibras de asbestos. Segundo Bentur e Mindess (2007), apesar de apresentarem propriedades únicas e um excelente desempenho em matrizes cimentícias, a ameaça que o material representa à saúde humana levou a busca por substitutos que apresentassem um desempenho melhor ou ao menos similar. Dessa forma, com o passar do tempo outros tipos de fibras têm sido amplamente utilizadas, com destaque, segundo Figueiredo e Rêgo (2010), para as de aço, polipropileno e náilon.

Segundo Carnio (2009), as fibras se diferem quanto à forma, ao processo de fabricação, à composição física e química e às propriedades mecânicas, podendo ser classificadas quanto a origem como: metálicas, cerâmicas e poliméricas naturais ou sintéticas. Suas propriedades variam conforme o material a partir do qual são produzidas, o que pode se verificar no Quadro 6.

Quadro 6 - Propriedades das fibras

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4
Carbono	9	1,9	230	2,6	1
Náilon	-	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	-	0,95	0,3	0,7x10 ⁻³	10
Fibra de Madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	18537	1-50	-	0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)	-	2,5	10-45	3,7	0,02

Fonte: Figueiredo (2011 apud BENTUR; MINDESS, 1990).

As fibras podem ser classificadas ainda como fibras de alto e baixo módulo, comparando-se o módulo de elasticidade da fibra com o módulo de elasticidade da matriz cimentícia. Dessa forma, as fibras poliméricas são consideradas como de baixo

módulo enquanto que as fibras de aço são denominadas fibras de alto módulo. Para que as fibras de baixo módulo garantam a mesma capacidade de reforço pós fissuração do que as de alto módulo é necessário o uso de teores maiores. (FIGUEIREDO, 2011)

Já quanto ao volume de fibras, Carnio (2009) afirma que, de modo geral, os teores incorporados a matriz podem ser classificados em baixos, médios e altos. Segundo ele, a adição de até 0,5% é considerado como um baixo teor, entre 0,5 e 1% médio teor e mais do que 1% alto teor.

Mehta e Monteiro (2014) ressaltam que a adição de fibras, independentemente do tipo, ocasiona uma redução de trabalhabilidade uma vez que conferem maior estabilidade a mistura. Segundo o autor, esse efeito é proporcional ao teor de fibras incorporado.

Para Gorninski e Kazmierczack (2010) a presença de fibras nesses compósitos é capaz de melhorar as propriedades da mistura tanto no estado fresco quanto no endurecido. Segundo Mehta e Monteiro (2014), elas se distribuem aleatoriamente na matriz cimentícia e são adicionadas com o objetivo de melhorar a resistência, a tenacidade, a resistência ao impacto, a resistência à fadiga, além de atuar também no controle de fissuração. Carnio (2009) aponta também um melhor desempenho com relação à ductilidade uma vez que a matriz adquire a capacidade de absorver mais energia.

Figueiredo (2011) ressalta que a matriz reforçada passa a ter um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil, já que as fibras atuam como pontes de transferência de tensão e promovem a redistribuição de esforços nas regiões de falhas, assegurando uma menor fissuração e diminuição da abertura de fissuras. (FIGUEIREDO, 2011; ISAIA, 2011)

Figueiredo (2011) comenta que a eficiência da atuação da fibra na matriz cimentícia depende de uma série de aspectos. Para o autor, o módulo de elasticidade e a resistência da fibra são as propriedades que mais determinam sua capacidade de reforço.

Para Mehta e Monteiro (2014), o tipo de fibra, sua geometria, a compatibilidade com a matriz e a fração volumétrica incorporada têm uma influência considerável no resultado da mistura, de forma que tais fatores devem ser levados em consideração para que o desempenho desejado seja atingido.

Para que haja uma melhora significativa nas propriedades mecânicas, segundo Carnio (2009), é necessário a incorporação de altos volumes de fibra (>1%), o que em contrapartida ocasiona perda de fluidez da pasta e, conforme Tanesi e Figueiredo (1999), o aumento da incorporação de vazios.

No entanto, segundo Carnio (2009), em teores menores é possível melhorar outras importantes propriedades da matriz como a tenacidade, por exemplo, de modo que atualmente são utilizados teores de até 0,5% na maioria das aplicações estruturais e em casos específicos de 0,5 a 1%.

Para Figueiredo (2011), apesar da capacidade de reforço da matriz como um todo, a utilização de fibras em peças sujeitas a esforços localizados não é economicamente viável. Portanto, segundo, o autor, estruturas contínuas com uma grande superfície exposta, como pavimentos e túneis, seriam uma aplicação mais interessante uma vez que os esforços não estão concentrados em uma região específica. Para Carnio (2009) a aplicação mais expressiva de baixos teores de fibras é em pavimentos de concreto.

4.3.1 Fibras de polipropileno

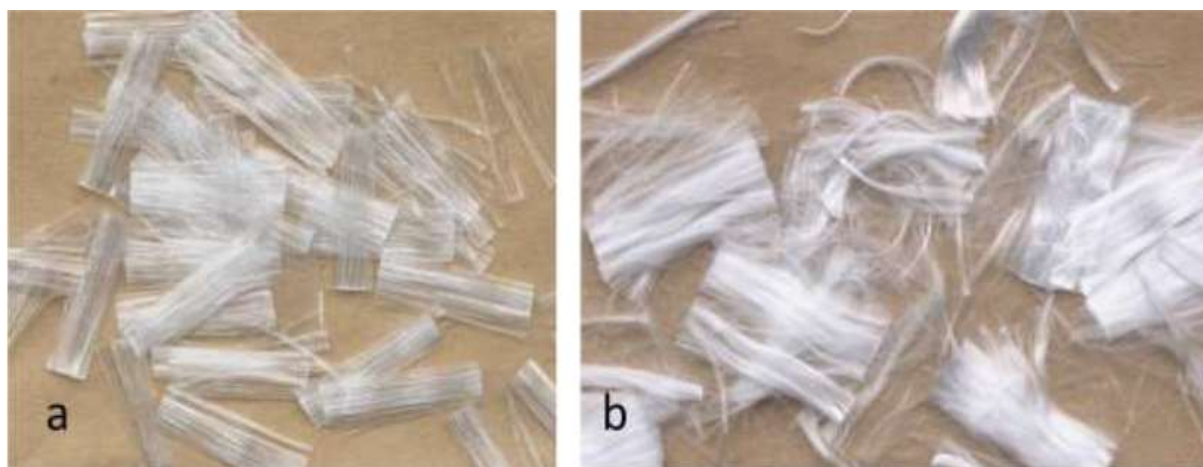
Os polímeros de origem sintética vêm ganhando bastante notoriedade como material de construção devido às inúmeras possibilidades de uso e a características como custo relativamente baixo, facilidade de adaptação a produção em série, baixa massa específica, bom isolamento térmico e elétrico, e resistência à corrosão. (FIGUEIREDO; RÉGO, 2010; ANDRADE, 2010; AMBROZEWICZ, 2012)

O polipropileno possui aplicações nos mais diversos setores, dentre eles, o da construção civil. É fabricado a partir da polimerização do hidrocarboneto propeno e apresenta uma densidade em torno de 0,9 g/cm³.

Por pertencer ao grupo de polímeros termoplásticos, o material têm a capacidade de amolecer e permitir a conformação mecânica ao ser submetido a mudanças de temperatura e pressão. Portanto, pode ser remodelado repetidamente num processo reversível sem perder suas propriedades, o que garante que sejam recicláveis. (FIGUEIREDO; RÊGO, 2010; ANDRADE, 2010; AMBROZEWICZ, 2012; GORNINSKI; KAZMIERCZACK, 2010) Nesse sentido, conforme Padilha (1997 apud FIGUEIREDO; RÊGO, 2010), é possível introduzir restos de produção na fabricação desse material.

Figueiredo e Rêgo (2010) comentam que dentre as fibras poliméricas as de polipropileno são as mais utilizadas em concreto. São produzidas em variadas formas e tamanhos, apresentando-se na forma de monofilamentos cilíndricos e de mutlifilamentos fibrilados, conforme a Figura 3. (FIGUEIREDO; RÊGO, 2010)

Figura 3 - Fibras de polipropileno fibriladas (a) e monofilamento (b)



Fonte: Figueiredo, 2011.

A compatibilidade física, química e mecânica das fibras com a matriz, o custo relativamente baixo e a fácil disponibilidade justificam seu largo emprego como reforço. Além disso, por ser quimicamente inerte, o material não absorve água e não sofre oxidação como o aço. (RODRIGUES; MONTARDO, 2002)

Bentur e Mindess (2007) citam ainda como características o alto ponto de fusão (165°C) e a boa resistência a ambientes alcalinos. Apresentam também, conforme o autor, desvantagens como baixo módulo de elasticidade, baixa resistência ao fogo; e

sensibilidade a luz solar e ao oxigênio. Contudo, ainda segundo o autor, as duas primeiras características não são necessariamente críticas dado que as fibras encontram-se protegidas pela matriz e, portanto, tais problemas podem ser minimizados.

As fibras de polipropileno podem ser utilizadas de diversas maneiras, atuando como reforço primário ou secundário, porém são mais frequentemente empregadas como reforço secundário, em volumes geralmente abaixo de 0,5%, com a intenção de controlar a fissuração decorrente do processo de retração plástica. (BENTUR; MINDESS, 2007; TANESI; FIGUEIREDO, 1999)

Lucena (2017) aponta que a utilização de polímeros como elementos de reforço em matrizes cimentícias é capaz de realçar as propriedades dessas misturas, uma vez que produz compósitos com características mais apropriadas se comparadas as propriedades dos materiais isoladamente. Segundo Tanesi e Figueiredo (1999), mesmo em baixos teores, é possível perceber melhoras com relação à fissuração por retração e também quanto a resistência à fadiga e ao impacto.

Para Tanesi e Figueiredo (1999), o emprego de baixos teores de fibras de polipropileno produz compósitos com uma melhor capacidade de resistir a solicitações dinâmicas, apesar de não contribuir propriamente para o aumento de resistência.

Figueiredo, Tanesi e Nince (2002) comentam que o reforço das fibras de polipropileno alcança somente as primeiras horas uma vez a capacidade de reforço delas diminui conforme ocorre o aumento de resistência e módulo de elasticidade da matriz. Nesse sentido, Figueiredo (2011) ressalta que as fibras de baixo módulo e baixa resistência só são eficientes no estado fresco e no início do processo de endurecimento.

Oliveira (2001) destaca que a presença de fibras de polipropileno contribui para a maior retenção de água na argamassa em virtude do efeito parede entre a matriz e a fibra, gerando forças capilares responsáveis por manter a água dentro da mistura.

4.4 Pavimentação Rígida

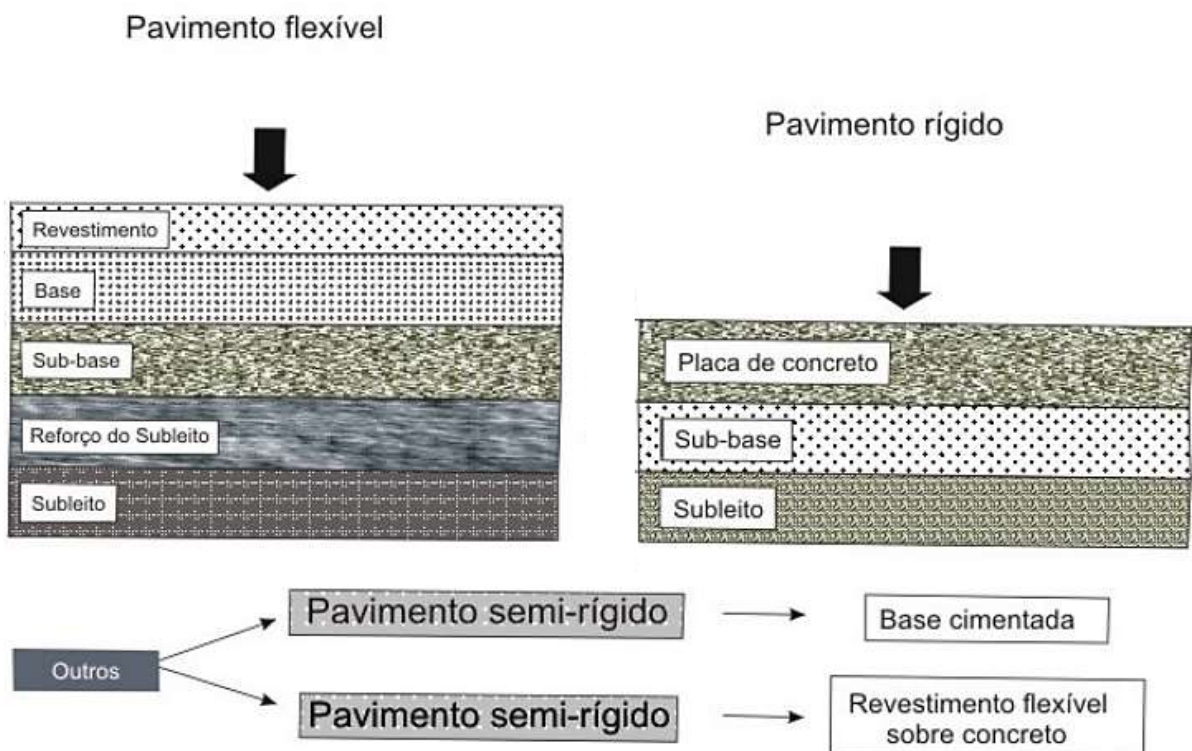
4.4.1 Contexto Geral

Bernucci et al (2010, p.9) define pavimento como uma:

“estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.”

Conforme Senço (2007) os pavimentos classificam-se, de modo geral, como flexíveis, e rígidos. Segundo Bernucci et al (2010) tende-se a chamá-los, respectivamente, de pavimentos asfálticos e pavimentos de concreto de cimento Portland. Na Figura 4 estão expostos o perfil das estruturas de cada um dos pavimentos.

Figura 4 - Perfil da estrutura do pavimento



Nos pavimentos flexíveis o carregamento aplicado se distribui em parcelas equivalentes nas diferentes camadas que o compõem, sofrendo deformação elástica significativa. São, normalmente, dimensionados a compressão e a tração na flexão. Já nos pavimentos rígidos o revestimento, mais rígido que as demais camadas, é pouco deformável e absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, rompendo-se por tração na flexão quando sujeitos a deformações. (DNIT, 2005a; SENÇO, 2007) Nesse tipo de estrutura a camada de rolamento, feita de concreto, funciona ao mesmo tempo como base e revestimento. (BALBO, 2009; DNIT, 2005a). No Quadro 7 estão expostas as principais características dos pavimentos rígidos e flexíveis, comparando-os entre si.

Quadro 7 - Comparativo entre pavimentos rígidos e flexíveis

Pavimentos Rígidos	Pavimentos Flexíveis
Estruturas mais delgadas de pavimento.	Estruturas mais espessas (requer maior escavação e movimento de terra) e camadas múltiplas.
Resiste a ataques químicos (óleos, graxas, combustíveis)	É fortemente afetado pelos produtos químicos (óleo, graxas, combustíveis)
Maior distância de visibilidade horizontal, proporcionando maior segurança	A visibilidade é bastante reduzida durante a noite ou em condições climáticas adversas.
Pequena necessidade de manutenção e conservação, o que mantém o fluxo de sem interrupções.	Necessário que se façam várias manutenções e recuperações, com prejuízos ao tráfego e custos elevados.
Falta de aderência das demarcações viárias, devido ao baixo índice de porosidade.	Melhor aderência das demarcações viárias, devido a textura rugosa e alta temperatura de aplicação (30 vezes mais durável)
Vida útil mínima de 20 anos.	Vida útil máxima de 10 anos (com manutenção)
Maior segurança à derrapagem em função da textura dada à superfície (veículo precisa de 16% menos de distância de frenagem em superfície seca, em superfície molhada 40%)	A superfície é muito escorregadia quando molhada
De coloração clara, tem melhor difusão de luz. Permite até 30% de economia nas despesas de iluminação da via.	De cor escura, tem baixa reflexão de luz. Maiores gastos com iluminação.

O concreto é feito com materiais locais, a mistura é feita a frio e a energia consumida é elétrica	O asfalto é derivado de petróleo importado, misturado normalmente a quente, consome óleo combustível e divisas
Melhores características de drenagem superficial: escoamento melhor a água superficial.	Absorve a umidade com rapidez e, por sua textura superficial, retém a água, o que requer maiores caimentos.
Mantém íntegra a camada de rolamento, não sendo afetado pelas intempéries.	Altas temperaturas ou chuvas abundantes produzem degradação

Fonte: Bianchi; Brito; Castro, 2008.

Senço (2007) comenta que podem ser utilizadas camadas rígidas e flexíveis em um mesmo pavimento o que colabora para uma dificuldade de adoção dessa classificação. Dessa forma, o pavimento semi-rígido surge como uma estrutura mista composta por uma base cimentada e um revestimento asfáltico. (DNIT, 2005a)

Balbo (2007) aponta que os pavimentos de concreto podem ser pré-moldados ou produzidos in loco e que cada técnica possui particularidades que se refletem no projeto, execução, operação e manutenção da estrutura. Conforme o autor esses pavimentos podem ser de blocos intertravados ou constituídos por placas.

4.4.2 Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT

O Manual de pavimentos rígidos do DNIT dispõe uma série de recomendações a serem aplicadas a pavimentos rígidos no sentido de obter estruturas mais seguras, duráveis e econômicas. A primeira edição do manual é de 1989 e sua versão mais atualizada é composta pelas seguintes partes: (DNIT, 2005b)

- a) Materiais para concreto de cimento Portland;
- b) Estudo dos concretos;
- c) Projeto e dimensionamento;
- d) Execução e controle tecnológico de sub-bases e de pavimento;
- e) Conservação e reabilitação.

Na primeira parte, denominada Materiais para concreto de cimento Portland, são apresentados critérios para seleção dos materiais que compõem o pavimento de concreto: água, agregados, cimento, aditivos e materiais selantes. Como a intenção deste trabalho é analisar a utilização de CCA como adição mineral ao cimento será dada maior ênfase na seção 2.2 do manual (Estudo do cimento Portland).

Não são feitas exigências quanto ao tipo de cimento a ser utilizado, mas ressalta-se que os mais eficientes para essa aplicação são os que possuem um processo de endurecimento mais lento, com exceção aos casos que necessitam de uma rápida liberação da estrutura. Apesar de não haver restrições, o manual prescreve os tipos de cimento mais recomendados, sendo eles o cimento comum, composto, de alto forno e o pozolânico. (DNIT, 2005b)

Quanto as adições minerais, o manual exige que sejam finamente moídas e estabelece critérios para sua utilização. Para os materiais pozolânicos, como a cinza da casca de arroz, exige-se que apresentem uma atividade pozolânica aos 28 dias de pelo menos 75%, que é determinada a partir da NBR 5752 – Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.

A versão mais atualizada da NBR 5752 é de 2014 e o ensaio descrito nessa norma consiste na preparação de 2 tipos de argamassas (A e B). Dessa forma, a argamassa A é composta simplesmente por cimento, água e areia; e a argamassa B é composta pela substituição de 25%, em massa, de cimento pelo material pozolânico, além de água e areia. Para manter o índice de consistência da argamassa B em ± 10 mm do obtido com a argamassa A, a norma recomenda a utilização de um aditivo superplastificante.

São necessários no mínimo 4 corpos de prova de cada tipo de argamassa e a mistura, moldagem, cura e ruptura desses corpos são realizados conforme a NBR 7215. Após os 28 dias, esses corpos de prova são rompidos à compressão e calcula-se a média de resistência de cada argamassa. O índice de desempenho da pozolana utilizada aos 28 dias, em porcentagem, é igual a resistência média de B dividida pela resistência média de A, tudo isso multiplicado por 100.

A NBR 12653 determina que um dos requisitos físicos para que um material possa ser utilizado como material pozolânico é que atinja um índice de desempenho com cimento Portland de pelo menos 90%. Como o manual do DNIT é de 2005, provavelmente têm como referência a norma de 1992, por isso assim como a referida norma tem como parâmetro um valor de 75%.

Segundo o DNIT (2005b), os parâmetros necessários para que um cimento seja utilizado na pavimentação rígida são descritos na Norma DNIT 050/2004-EM. Para comparar com os resultados obtidos neste trabalho, serão utilizados apenas os critérios referentes as exigências mecânicas que constam na Quadro 8.

Por fim, na seção 3.1 o DNIT estabelece que o concreto utilizado na pavimentação rígida deve ter a resistência indicada no projeto, sendo, geralmente da ordem de 4,5 Mpa para tração na flexão. A resistência à tração utilizada neste trabalho é a indireta, determinada pela compressão diametral dos corpos de prova. Para se ter uma noção se a mistura com CCA tem uma resistência à tração na flexão próxima a esse valor será utilizada a relação entre as resistências da NBR 6118 de 2014. Essa norma define na página 23 que a resistência à tração direta pode ser considerada como 90% da resistência à tração indireta ou 70% da resistência à tração na flexão.

Quadro 8 - Exigências físicas e mecânicas para o cimento destinado a pavimentação rígida

Tipo de Cimento Portland	Classe de Resistência	Finura		Tempos de Pega		Expansibilidade (mm)		Resistência à compressão (Mpa)				
		Resíduo na peneira 75 μ (%)	Área específica (m ² /kg)	Início	Fim	A frio	A quente	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CPI CPI-S	25	≤ 12,0	≥ 240	≥ 1	≤ 10 (1)	≤ 5 (1)	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 12,0	≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP II-E CPII-Z CII-F	25	≤ 12,0	≥ 240	≥ 1	≤ 10 (1)	≤ 5 (1)	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 12,0	≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CPIII	25	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 (1)	≤ 5 (1)	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0
	32								≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0
	40								≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	≥ 48,0
CPIV	25	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 (1)	≤ 5 (1)	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0
	32								≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0
CPV-ARI		≤ 6,0	≥ 300	≥ 1	≤ 10 (1)	≤ 5 (1)	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-

(1) ensaio facultativo

Fonte: DNIT, 2004.

5 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e os ensaios utilizados no desenvolvimento deste trabalho para atingir o objetivo geral e os objetivos específicos. O procedimento experimental adotado pode ser dividido em 4 etapas. Na primeira etapa, o cimento foi caracterizado. Na segunda, executou-se os ensaios de consistência e densidade da argamassa para obter as informações necessárias para as etapas seguintes. Na terceira, foram feitos os ensaios de resistência à compressão e à tração para a investigação das propriedades mecânicas. Na quarta etapa, realizou-se o ensaio de absorção de água e índice de vazios para verificação das propriedades físicas. Todos os ensaios da terceira e quarta etapas foram realizados nas idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias.

Para investigar os efeitos da CCA e das fibras de polipropileno, tanto individualmente como em conjunto, foram confeccionadas 4 tipos de argamassa:

REF - Traço de referência, sem nenhum tipo de adição;

CCA - Traço com 25% de substituição, em massa, de cimento por CCA;

CCA + FP - Traço com 25% de substituição, em massa, de cimento por CCA e a adição de 0,5% de fibras de polipropileno, em volume;

FP – Traço com adição de 0,5% de fibras de polipropileno, em volume.

Utilizou-se o método descrito na NBR 5752 – Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (ABNT, 2014) como base para a produção das argamassas. Dessa forma, o traço em massa na proporção de 1:3, a relação água/aglomerante de 0,48 e o cimento composto por fíler adotados para a confecção dos corpos de prova estão de acordo com o estabelecido na referida norma.

5.1 Escolha do teores adotados

A escolha do teor de substituição de cimento por CCA de 25% tem como base a NBR 5752, anteriormente citada. Outros trabalhos utilizam porcentagens menores de substituição, mas visando maximizar os ganhos ambientais e econômicos que um teor maior proporcionaria e investigar os atributos técnicos obtidos com tal porcentagem é que essa quantidade foi escolhida.

Para a seleção da proporção de fibras a ser adicionada, moldou-se 3 corpos de prova tanto para o ensaio de compressão quanto para o ensaio de tração, nos teores de 0,5 e 1%, a serem rompidos 24 horas após a moldagem. Na Tabela 1 constam as quantidades de cada material utilizado.

Tabela 1 - Quantidade de material para os teores de 0,5% e 1%

Material (g)	0,50%	1,00%
Cimento	624 ± 0,4	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Fibra de Polipropileno	5,52	11,04
Areia Normal Grossa	468 ± 0,3	468 ± 0,3
Areia Normal Média Grossa	468 ± 0,3	468 ± 0,3
Areia Normal Média Fina	468 ± 0,3	468 ± 0,3
Areia Normal Fina	468 ± 0,3	468 ± 0,3
Aditivo Superplastificante	4,68	9,36

Fonte: Autora, 2018.

Inicialmente, o teor adotado seria de 1% com a intenção de aumentar a resistência à tração. Após os resultados do teste realizado, exibidos na Tabela 2, constatou-se que apesar dessa quantidade de fibras provocar o aumento da resistência à tração houve uma redução na resistência à compressão. Dessa forma, adotou-se o teor de 0,5%. Assim, busca-se avaliar a capacidade de reforço dessa quantidade nas primeiras idades, quando a resistência e o módulo de elasticidade da matriz ainda são baixos.

Nesse sentido, a incorporação de fibras de polipropileno na argamassa CCA + FP tem como objetivo reforçar essa matriz nas primeiras idades uma vez que, conforme Mehta e Monteiro (2014), as adições minerais têm um efeito retardador

sobre a resistência nesse período o que se deve ao lento desenvolvimento da reação pozolânica, fato comentado por Dafico (2001). Tiboni (2007) também relata tal comportamento, conforme descrito na seção 4.2.6.

Tabela 2 - Resistência à compressão e à tração de argamassas com adição de fibras de polipropileno (24 horas)

Teor de fibras	Compressão (Mpa)	Tração (Mpa)
0,0%	26,27	2,77
0,5%	27,50	3,57
1,0%	21,00	5,33

Fonte: Autora, 2018.

5.2 Materiais

5.2.1 Água

A água utilizada para moldagem e cura das argamassas é proveniente do sistema de abastecimento público da CAESB que, conforme a NBR 15900-1 (Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos), é considerada adequada para uso e não necessita ser ensaiada.

5.2.2 Agregado Miúdo

Figura 5 - 4 frações granulométricas de Areia Normal Brasileira



Fonte: Autora, 2018.

São utilizadas como agregado miúdo quatro frações granulométricas de areia normal brasileira: grossa, média grossa, média fina e fina, produzidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) conforme especificado pela NBR 7214/2015 – Areia normal para ensaio de cimento. (Figura 5)

5.2.3 Aditivo Superplastificante

O aditivo utilizado foi o Superplastificante Polifuncional (Figura 6) para concretos e argamassas da Bautech. As propriedades do aditivo estão expostas no Quadro 9.

Figura 6 - Aditivo Superplastificante



Fonte: Autora, 2018.

Quadro 9 - Propriedades Superplastificante

Propriedades Técnicas	
Aspecto	Líquido Castanho
Densidade	1,18 g/ml
PH	< 4
Teor de Cloretos	< 0,1%
Teor de Sólidos	40%

Fonte: Bautech, 2018.

5.2.4 Cimento

Figura 7 - Cimento Portland CII F 40



Fonte: Autora, 2018.

O cimento utilizado neste trabalho foi o CII F 40. (Figura 7) Visando garantir a uniformidade dos resultados, utilizou-se somente um único saco do aglomerante para a produção dos corpos de prova. Para caracterização do cimento foram realizados 3 ensaios: índice de finura, tempos de pega e resistência à compressão.

5.2.4.1 Índice de finura

A determinação da finura do cimento foi realizada conforme a NBR 11579 de 2013 – Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ m (nº 200).

Inicialmente, todos os materiais necessários a execução do ensaio foram organizados. Na sequência, pesou-se 50g de cimento para a realização do peneiramento, que ocorreu em três etapas. Na primeira etapa, com a peneira nº 200 encaixada no fundo, colocou-se o cimento sobre a tela da peneira. Em seguida, foram imprimidos no conjunto suaves movimentos horizontais de vaivém durante 5 minutos, de forma que o aglomerante se espalhasse sobre a superfície da tela e os grãos mais finos fossem eliminados.

Na etapa intermediária, sem o fundo e com a tampa encaixada, foram dados suaves golpes no rebordo externo da peneira, com o auxílio de uma régua, para o desprendimento de partículas aderidas ao conjunto. Na sequência, toda a superfície inferior da tela foi limpa com um pincel e, em seguida, com uma flanela. Então, com o fundo encaixado, continuou-se o peneiramento com movimentos horizontais por um período de 20 minutos, girando-se o conjunto e limpando a superfície inferior da tela a cada 2 minutos. Ao final desse tempo, o material passante foi descartado e a tela e o fundo foram limpos antes de prosseguir para a próxima etapa.

No peneiramento final, com o fundo e a tampa devidamente encaixados, manteve-se o conjunto numa posição ligeiramente inclinada e durante 1 minuto foram aplicados movimentos rápidos de vaivém, girando a peneira a cada 10s em mais ou menos 60°. Por fim, o material do fundo foi recolhido e transferido para outro recipiente para a pesagem. Como a massa do material passante era superior a 0,05g, tal material foi descartado e a etapa final foi repetida até que o material passante fosse inferior a

esse valor. Ao atingir tal condição, o cimento retido na peneira foi colocado em outro recipiente para a determinação de sua massa em balança de precisão de 0,001g. (Figura 8) Posteriormente, prosseguiu-se ao cálculo da finura do cimento, conforme descrito na NBR 11579 de 2013.

Figura 8 - Resíduo de cimento na peneira n°200



Fonte: Autora, 2018.

5.2.4.2 Tempos de Pega

Para a determinação dos tempos de pega é necessário conhecer qual a quantidade de água necessária à obtenção da pasta de consistência normal, portanto, para obter tal valor procedeu-se à realização do ensaio da NBR 16606/2017 (Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal).

O ensaio consistiu, inicialmente, no ajuste do aparelho de Vicat, abaixando a sonda de Tetmajer até que entrasse em contato com a placa-base para que a escala do aparelho fosse zerada. Em seguida, pesou-se 500g de cimento e também a quantidade de água destilada, que é determinada por tentativa e erro. Para a preparação da pasta, colocou-se a água no recipiente do misturador, adicionou-se o cimento e a mistura permaneceu em repouso por 30 segundos. Na sequência, o misturador foi ligado em velocidade baixa durante 30 segundos, permanecendo depois 60 segundos desligado. Nesse período de repouso, nos primeiros 30 segundos, as paredes da cuba foram raspadas com uma espátula para que toda a pasta aderida ficasse no fundo. Por fim, ligou-se o misturador por 1 minuto na velocidade alta.

Após a preparação, a pasta foi transferida o mais rápido possível para o molde troncônico colocado sobre uma placa de vidro. Em seguida, com o auxílio de uma espátula, a superfície do molde foi regularizada e o conjunto foi levado a base do aparelho de Vicat. Nesse momento, colocou-se a sonda de Tetmajer em contato com a superfície da pasta, fixando-a nesse posição com o parafuso do aparelho. Na sequência, soltou-se a haste e após 30 segundos a leitura da distância da extremidade da sonda até o fundo da placa foi feita (Figura 9). Segundo a NBR 16606 de 2017, uma pasta de consistência normal é a pasta na qual a sonda de Tetmajer penetra e estaciona a uma distância de (6 ± 1) mm da placa base do molde. Dessa forma, variando-se a quantidade de água foram feitos vários testes até que tal condição fosse satisfeita.

Figura 9 - Determinação da pasta de consistência normal



Fonte: Autora, 2018.

Tendo conhecimento da quantidade de água necessária para a produção da pasta de consistência normal, partiu-se, finalmente, para o ensaio de início e fim de pega conforme a NBR 16607/2017 (Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega). Primeiramente, o aparelho de Vicat foi calibrado e a agulha de Vicat para a determinação do início de pega foi devidamente instalada no aparelho. Em seguida, a pasta foi preparada e o molde foi preenchido conforme as instruções descritas na NBR 16606/2017. Então, passados 30 minutos após o preenchimento do molde, com o conjunto sobre a base do aparelho de Vicat, desceu-se a agulha até que entrasse em contato com a superfície da pasta, fixando-a nessa posição. Na sequência, a agulha

foi solta e após 30 segundos a leitura foi realizada. Após o processo, a agulha foi limpa para a realização das próximas leituras que aconteceram de 30 em 30 minutos até contadas 2 horas do momento em que o cimento entrou em contato com a água. Nas repetições do ensaio, tomou-se o cuidado para que as posições de penetração da agulha estivessem a uma distância mínima de 10 mm da borda e dos demais pontos de leitura. Logo depois, terminado esse período, com vistas a uma maior precisão diminuí-se as leituras para intervalos de 15 minutos até as 2 horas e 30 minutos do ensaio e para 5 minutos na sequência. As leituras foram determinadas até que a distância entre a agulha e a placa de vidro fosse de (6 ± 2) mm, o que segundo a referida norma caracteriza o tempo de início de pega.

Após essa primeira etapa, a agulha de início de pega foi trocada pela de fim de pega e o molde troncônico foi invertido para que as medições fossem feitas na face oposta do corpo de prova (Figura 10). As medições foram feitas, inicialmente, em intervalos de 30 minutos, mas à medida que o ensaio se aproximava do final e havia uma variação maior entre as determinações, esses intervalos foram encurtados pra garantir uma maior precisão. No instante em que o acessório não provocou mais qualquer marca no corpo de prova e penetrou pela primeira vez apenas 0,5 mm na pasta, o ensaio foi finalizado. Tal condição configura o tempo de fim de pega, conforme o que está estabelecido na norma.

Figura 10 - Determinação do tempo de fim de pega



Fonte: Autora, 2018.

5.2.4.3 Resistência à compressão

O ensaio foi feito conforme a NBR 7215/1997 (Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão). A princípio, todos os materiais necessários a confecção dos corpos de prova de argamassa foram pesados, conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de material

Material	Massa (g)
Cimento	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia Normal Grossa	468 ± 0,3
Areia Normal Média Grossa	468 ± 0,3
Areia Normal Média Fina	468 ± 0,3
Areia Normal Fina	468 ± 0,3

Fonte: NBR 7215, 1997.

Logo depois, os moldes cilíndricos foram untados com óleo desmoldante e seguiu-se para a execução da argamassa no misturador mecânico. Primeiramente, colocou-se a água na cuba e, na sequência, o cimento foi despejado no recipiente durante o período de 30s, com o misturador na velocidade baixa. O horário no qual o cimento entrou em contato com a água foi registrado. Ao término desse período, adicionou-se as quatro frações de areia, previamente misturadas, atentando-se para que todo o conteúdo do agregado fosse colocado durante 30 segundos. Após esse tempo, a velocidade do misturador foi modificada para alta, de modo que todos os materiais fossem homogeneizados por 30 segundos. Então, desligou-se o misturar por 1 minuto e 30 segundos e nos primeiros 15 segundos desse período, com o auxílio de uma espátula, as paredes da cuba e a pá foram raspadas para a retirada de material aderido.

Depois, o recipiente foi coberto por uma flanela úmida até o término desse tempo (Figura 11). Por fim, misturou-se a argamassa por 1 minuto na velocidade alta. Após o preparo, prosseguiu-se para a moldagem dos 6 corpos de prova. Com a espátula, preencheu-se os moldes em quatro camadas com 30 golpes homogeneamente distribuídos em cada uma delas, regularizando-se a superfície do corpo de prova ao final. Após a moldagem, os 6 corpos de prova foram agrupados e

sua face superior foi protegida por uma placa de vidro. Permaneceram nessa condição por 24 horas para que fosse desmoldados no dia seguinte. Após a devida identificação de cada um deles, os corpos de prova foram imersos em água até a data da ruptura, exceto aqueles que foram rompidos em 24 horas. Tal procedimento foi repetido mais uma vez, totalizando, então, 12 corpos de prova, 4 para cada idade, rompidos aos 3, 7 e 28 dias. Após o rompimento, a resistência final em cada uma das idades foi calculada de acordo com a norma.

Figura 11 - Argamassa no misturador durante o período de repouso



Fonte: Autora, 2018.

5.2.5 Cinza da casca de arroz

A cinza da casca de arroz utilizada neste trabalho é proveniente de uma indústria de arroz próxima a região do município de Blumenau/SC. Apesar de moída, a cinza apresentava cerca de 75% de sua massa retida na peneira 75 μ m (n^o200), conforme verificado por meio do ensaio de finura da NBR 11579/2013. Segundo a NBR 5752/2014, o material pozolânico deve ser moído até que o resíduo na peneira 45 μ m (n^o325) seja inferior a 20%, preferencialmente, entre 10 e 15%. Dessa forma, o material foi submetido a um moinho de bolas e depois passado na peneira 45 μ m. (Figura 12)

Figura 12 - CCA após a moagem no moinho de bolas junto com o cimento CP II F 40



Fonte: Autora, 2018.

5.2.6 Fibras de Polipropileno

Figura 13 - Fibras de Polipropileno



Fonte: Autora, 2018.

Segundo o fabricante, as fibras de polipropileno utilizadas (Figura 13) são indicadas para pavimentos, concreto projetado, pré-fabricados, pisos e revestimentos; são compostas por filamentos extremamente finos produzidos através do processo de extrusão; e atuam na melhora do desempenho de concretos e argamassas quanto: à

fissuração, ao desgaste, à exsudação, ao impacto e ao fogo. As características da fibra constam no Quadro 10.

Quadro 10 - Propriedades das fibras de polipropileno

Propriedades Físicas	
Diâmetro (μm)	18
Seção	circular
Comprimento (mm)	6
Alongamento (%)	80
Peso específico (g/cm_3)	0,91
Propriedades Mecânicas	
Temperatura de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	160
Temperatura de ignição ($^{\circ}\text{C}$)	365
Resistência à tração (MPa)	300
Módulo de Young (Mpa)	3000

Fonte: Maccaferri, 2008.

5.3 Ensaio Preliminares

5.3.1 Determinação da densidade

Antes da moldagem dos corpos de prova, prosseguiu-se à determinação da densidade da argamassa de referência para que o teor de fibra utilizado pudesse ser medido em volume, conforme descrito na literatura. Dessa forma, a densidade foi determinada com base na NBR 13278/2005. O ensaio dividiu-se em duas etapas.

Na primeira etapa, procedeu-se à calibração do recipiente, procedimento necessário ao cálculo de seu volume. Inicialmente, registrou-se a massa do recipiente vazio. Na sequência, após o preenchimento do recipiente com água destilada, registrou-se novamente sua massa.

Na segunda etapa, a cuba do misturador mecânico e os materiais necessários a produção da argamassa de referência foram pesados. Então, preparou-se a mistura como descrito na NBR 7125. Na sequência, pesou-se a cuba cheia de argamassa.

Em seguida, a argamassa foi transferida para o recipiente calibrado em 3 camadas de altura aproximadamente iguais, aplicando-se 20 golpes de soquete em

cada uma delas. Logo depois, deixou-se cair o recipiente a uma altura de 3cm da superfície da mesa. Por fim, a superfície do recipiente foi regularizada com a espátula e a massa do conjunto foi anotada. Após o término do ensaio, os cálculos indicados na NBR 13278 foram realizados para determinar a densidade da argamassa no estado fresco.

Assim, com os demais dados coletados no processo descrito, determinou-se a massa da argamassa e partir de sua densidade, o volume. Dessa forma, conhecendo o volume de fibra necessário para atingir o teor escolhido, definiu-se com base na densidade da fibra de polipropileno (fornecida pelo fabricante) a quantidade em gramas a ser adicionada.

5.3.2 Determinação da consistência

Conforme determinado pela NBR 5752, antes da produção dos corpos de prova, determinou-se a consistência das argamassas como indicado no Anexo B da NBR 7215; definindo-se, então, por meio de testes a quantidade de superplastificante necessária para o ajuste da consistência de cada traço em relação a argamassa de referência.

Para a realização do ensaio, primeiramente, a mistura da argamassa foi feita segundo descrito na NBR 7215. Após a preparação, com a mesa do aparelho de consistência limpa por uma flanela úmida, apoiou-se o molde troncônico em seu centro com a base maior voltada para baixo. Com o auxílio do técnico do laboratório, manteve-se o molde na mesma posição enquanto a argamassa era colocada no recipiente. O preenchimento da forma se deu em três camadas de mesma altura, aplicando-se 15, 10 e 5 golpes com um soquete, distribuídos uniformemente, respectivamente, na primeira, segunda e terceira camada. Ao término dessa operação, a superfície do molde foi regularizada com o auxílio de uma espátula e, em seguida, a mesa foi novamente limpa com uma flanela (Figura 14a). Então, depois do enchimento, o molde foi retirado e acionou-se o aparelho, previamente configurado. (Figura 14b) Após 30 quedas da mesa de consistência em 30 segundos, mediu-se com um paquímetro o diâmetro da base do tronco de cone, realizando-se duas medições. (Figura 14c) Por fim, realizou-se a média das duas medidas, determinando-

se o índice de consistência da argamassa. O procedimento foi repetido caso houvesse uma diferença maior do que 5mm entre as medições.

Dessa forma, o índice de consistência da argamassa de referência serviu como parâmetro para o ajuste dos demais traços. Portanto, tal procedimento foi repetido, variando-se o teor de superplastificante, até que o índice de consistência das demais argamassas estivesse dentro do intervalo de ± 10 mm.

Figura 14 - Determinação da consistência da argamassa de referência



Fonte: Autora, 2018.

5.4 Moldagem dos corpos de prova

Em concordância com a NBR 5752, a mistura dos materiais e a confecção dos corpos de prova foram realizados com base na NBR 7215. No entanto, percebeu-se que para garantir uma homogeneização mais adequada das fibras de polipropileno à matriz foi necessário o acréscimo de mais 1 minuto em velocidade alta no tempo de mistura. Portanto, adicionou-se esse tempo no preparo de todas argamassas.

Primeiramente, os materiais necessários foram pesados de acordo com o traço desejado (Tabela 4) e os moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100mm de altura foram untados com óleo desmoldante. Antes de serem introduzidos no misturador, assim como recomendado pela norma, o cimento e a cinza foram misturados, da mesma forma, as fibras de polipropileno foram misturadas as 4 frações de areia. A seguir, os materiais foram colocados dentro da cuba do misturador mecânico na ordem e no tempo instruídos pela norma, conforme as ressalvas descritas anteriormente. Após o término do processo de homogeneização, os moldes foram preenchidos com argamassa em quatro camadas, aplicando-se 30 golpes,

homogeneamente distribuídos, com o auxílio do soquete. Posteriormente, regularizou-se a superfície dos molde com uma espátula e, em seguida, os 6 corpos de prova produzidos foram organizados e tiveram seu topo coberto por uma placa de vidro. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, devidamente identificados e imersos em água, exceto os de 24 horas, até completarem a idade necessária para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples, à compressão diametral ou ainda o ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Tabela 4 - Quantidade de material utilizado em cada argamassa

Material (g)	REF	CCA	CCA + FP	FP
Cimento	624	468	468	624
CCA	-	156	156	-
Água	300	300	300	300
Fibra de Polipropileno	-	-	5,52	5,52
Areia Normal Grossa	468	468	468	468
Areia Normal Média Grossa	468	468	468	468
Areia Normal Média Fina	468	468	468	468
Areia Normal Fina	468	468	468	468
Superplastificante	-	3,74	9,98	6,24

Fonte: Autora, 2018.

5.5 Ensaio de resistência à compressão e à tração

A determinação da carga de ruptura à compressão simples e à compressão diametral das argamassas produzidas se deu em conformidade, respectivamente, com a NBR 7215/1997 (Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão) e a NBR 7222/2011 (Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos). Para cada tipo de argamassa, foram rompidos 3 corpos de prova em cada uma das 5 idades estudadas (1, 3, 7, 28 e 63 dias) tanto à compressão quanto à tração. (Figura 15)

Ao atingir a idade de rompimento especificada, os corpos de prova foram retirados da cura e, em seguida, as dimensões de cada um deles foram retiradas para o cálculo posterior, conforme indicado na norma aplicável.

Na sequência, as amostras que seriam rompidas à compressão simples eram verticalmente posicionadas no centro dos pratos da prensa utilizada. (Figura 16). Enquanto aqueles que seriam rompidos à tração, eram posicionados, horizontalmente, com duas tiras de madeira nos pontos de contato com a prensa, conforme descrito na norma, sendo fixadas por meio de ligas de borracha. Então, rompeu-se os corpos de prova, anotando-se a carga de rompimento de cada um deles para realização dos cálculos descritos nas respectivas normas.

Figura 15 - Corpos de prova de CCA + FP rompidos à compressão e à tração



Fonte: Autora, 2018.

Figura 16 - Determinação da resistência à tração



Fonte: Autora, 2018.

5.6 Ensaio de absorção de água e índice de vazios

O ensaio foi feito conforme descrito na NBR 9778 (Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica). Para a realização deste ensaio foram utilizados 2 corpos de prova para cada uma das idades estudadas (1, 3, 7, 28 e 63 dias), confeccionados conforme o item 5.4.

Após atingirem a idade especificada para o ensaio, os corpos de prova foram retirados da cura e colocados na estufa a uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, permanecendo lá por um período de 72 horas (Figura 17). Após esse tempo, registrou-se a massa de cada uma dessas amostras e então, após esfriarem até a temperatura ambiente, os corpos de prova foram imersos em água por 72 horas. Completado o processo de saturação, as amostras foram transferidas para um recipiente cheio de água, o banho maria, onde foram progressivamente levadas a ebulição dentro de 30 minutos (Figura 19). Essa condição foi mantida por 5 horas, atentando-se para que o volume permanecesse constante. Ao término do período de ebulição, deixou-se a água esfriar até a temperatura ambiente. Assim, a seguir, retirou-se os corpos de prova da água, enxugando-os levemente com uma flanela úmida. Na sequência, registrou-se, na balança hidrostática, a massa das amostras e, em seguida, determinou-se sua massa na balança convencional. (Figura 17).

Figura 18 - Corpos de prova na estufa



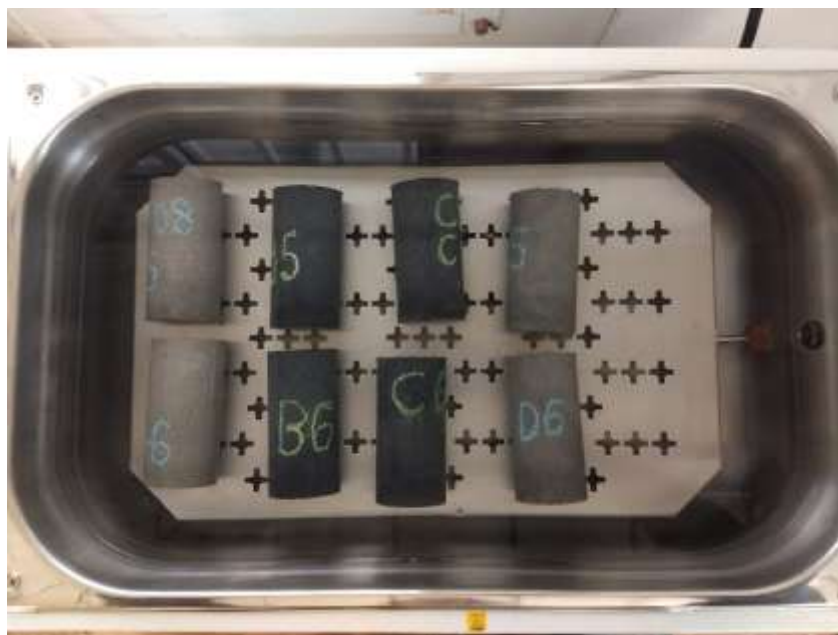
Fonte: Autora, 2018.

Figura 17 - Corpo de prova na balança hidrostática



Fonte: Autora, 2018.

Figura 19 - Corpos de prova no banho maria



Fonte: Autora, 2018.

5.7 Aplicação em Pavimentos Rígidos

Para verificar a possibilidade de aplicação da CCA como adição mineral ao concreto de pavimento rígido serão utilizados os parâmetros do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005b) descritos na seção 4.4.2 da Revisão bibliográfica. No manual, exige-se um índice de desempenho da adição mineral aos 28 dias de pelo menos 75% e também uma resistência à tração na flexão de cerca de 4,5 Mpa. Segundo o DNIT (2005b), os parâmetros necessários para que o cimento seja utilizado na pavimentação rígida estão na Norma DNIT 050/2004-EM. Na referida norma constam exigências químicas, físicas, mecânicas e relativas ao percentual de cada componente do cimento. Porém, serão avaliados apenas os critérios mecânicos.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Finura do cimento

Após a conclusão do ensaio descrito em 5.2.4.1, determinou-se o índice de finura do cimento utilizado, adotando 1,0 como fator de correção. (Tabela 5) Com base no resultado, verificou-se que o módulo de finura do cimento de 0,48% se encontra dentro dos padrões estabelecidos pela NBR 16697, que exige uma finura menor que 10% para o cimento CP II F 40.

A finura do cimento está relacionada com o tamanho dos grãos e pode ser definida como a superfície específica disponível para a hidratação. É uma propriedade vital e que exerce influência na qualidade de pastas, argamassas e concretos, na medida em que altera o comportamento reológico e o desempenho mecânico desses compósitos. (BAUER, 2015; NEVILLE, 2016; BATTAGIN, 2011)

Tabela 5 - Resultados finura do cimento

Finura			
Massa Inicial (g)	Resíduo (g)	Fator de Correção	Finura (%)
50,00	0,24	1,00	0,48

Fonte: Autora, 2018.

6.2 Tempos de pega

O fenômeno da pega descreve a perda de fluidez da pasta de cimento devido ao início de solidificação da mistura em decorrência do processo químico de hidratação, sendo caracterizado por dois tempos distintos: o início e o fim da pega. O conhecimento desses tempos, definidos arbitrariamente, oferece uma noção do período disponível à aplicação de concretos e argamassas, sem que haja prejuízo de suas propriedades. (BAUER, 2015; AMBROZEWICZ, 2012)

Inicialmente, procedeu-se ao ensaio da NBR 16606, conforme o item 5.2.4.2, para obter a quantidade de água necessária à produção da pasta de consistência normal. Obteve-se como resultado 162,2g de água. A NBR 16697 não estabelece

nenhum valor que limite esse resultado, sendo seu conhecimento um pré-requisito para a realização do ensaio de determinação dos tempos de pega. Os resultados estão expostos na Tabela 6 e atendem aos requisitos da norma.

Tabela 6 - Resultado tempos de pega

Tempo de Pega	Tempo Obtido	Tempo Exigido NBR 16697
Início (h)	03:00	≥ 01:00
Fim (h)	03:45	≤ 10:00

Fonte: Autora, 2018.

6.3 Resistência à compressão do cimento

Segundo Battagin e Battagin (2010, p.782):

“A resistência mecânica do cimento depende de uma série de características, tais como reatividade do clínquer, relação água/cimento (*a/c*), condições de cura, distribuição granulométrica das partículas, teor de adições minerais, entre outras, e é medida em laboratório através do método NBR 7215 [...] que estabelece uma relação *a/c* fixa de 0,48 e condições de cura padronizadas, de modo que a distribuição granulométrica do cimento e o teor de adição vão influir mais decisivamente no desenvolvimento da resistência dos corpos-de-prova.”

Com o resultado do ensaio, percebe-se que apenas a resistência obtida aos 3 e 7 dias de idade obedecem a tensão mínima exigida pela norma, conforme Tabela 7. Apesar disso, como utilizou-se para todos os corpos de prova produzidos o mesmo saco de cimento, não haverá possibilidade de variação nos resultados devido a isso. Dessa forma, não haverá prejuízo quanto à comparação das propriedades obtidas para cada um dos tipos de argamassa fabricados.

Tabela 7 - Resultados resistência à compressão do cimento

Idade	Tensão obtida (Mpa)	Tensão exigida NBR 16697 (Mpa)
3 dias	23	15
7 dias	31	25
28 dias	38	40

Fonte: Autora, 2018.

6.4 Densidade

A partir dos dados coletados no ensaio descrito em 5.3.1, calculou-se a densidade da argamassa de referência (REF) conforme estabelecido pela NBR 13278, obtendo como resultado um valor igual a 2,29 g/cm³. Diante disso, a argamassa classifica-se como normal, sendo destinada, portanto, a aplicações convencionais como exposto no Quadro 11.

Quadro 11 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco

Argamassa	Densidade de massa A (g/cm ³)	Principais agregados empregados	Usos/observações
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	2,30 ≤ A ≤ 1,40	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicação convencionais
Pesada	> 2,30	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

Fonte: Carasek, 2010.

Dessa forma, a partir desse resultado e de outros dados coletados durante o ensaio, determinou-se a quantidade, em massa, de fibras de polipropileno correspondente ao volume de 0,5% de fibras em relação a argamassa de referência.

6.5 Consistência

Em concordância com o exposto no item 5.3.2, realizou-se a coleta de dados. Portanto, a partir da média dos diâmetros de espalhamento, o índice de consistência da argamassa de referência foi definido como sendo igual a 155 mm.

Nesse sentido, conforme recomendado pela NBR 5752/2014, procedeu-se à realização do índice de consistência dos demais traços, repetindo-se o ensaio até que o teor de aditivo superplastificante (SP) fosse suficiente para que a mistura se mantivesse dentro do limite de 155 ± 10 mm.

Os resultados experimentalmente determinados estão na Tabela 8, a partir dos quais percebe-se que a introdução tanto de fibras de polipropileno quanto de CCA são

capazes de provocar a diminuição de consistência da pasta. Dessa forma, foi necessário adicionar aditivo em todos os traços, exceto o de referência, para garantir que os compósitos tivessem aproximadamente a mesma consistência.

Tabela 8 - Resultados índice de consistência

Argamassa	Índice de consistência sem SP	Índice de consistência com SP	Quant. (g)	Quant (%)*
REF	155	-	-	-
CCA	141	149	3,74	0,6
FP	136	152	6,24	1,0

* Porcentagem de SP em relação a massa de aglomerante

Fonte: Autora, 2018.

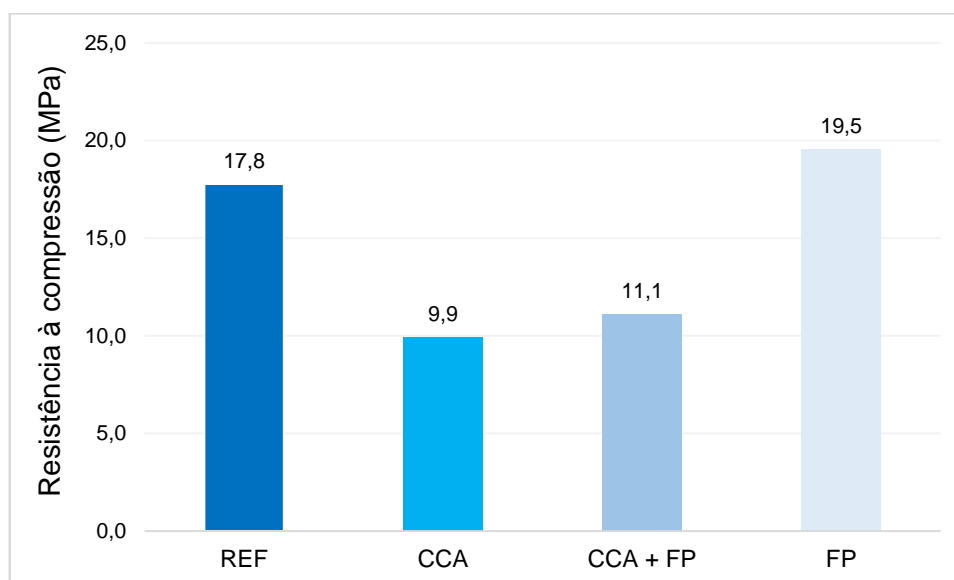
A diminuição do índice de consistência gerado pela presença de fibras de polipropileno, caracterizado por um menor diâmetro de espalhamento, é um comportamento típico da adição de fibras, independentemente do tipo, que se deve a maior estabilidade que elas oferecem à matriz na qual estão mergulhadas, fato comentado por Mehta e Monteiro (2014). Figueiredo, Tanesi e Nince (2002) relatam que parte da água da mistura pode ficar aderida à superfície das fibras o que reduziria a relação a/c efetivamente presente na matriz. Tal comportamento pode ser apontado também como uma das causas para esse aumento de consistência observado, além da atuação da fibra como um obstáculo a movimentação da mistura.

Já quanto à influência da CCA é possível observar que a presença da pozolana também diminui o índice de consistência. Tal comportamento, segundo Silva (2010), é verificado em outras adições minerais além da cinza da casca de arroz, que ao serem introduzidas na mistura provocam mudanças nas propriedades reológicas, gerando um aumento de coesão e viscosidade. Esse efeito se deve, conforme Dal Molin (2011), ao maior volume de sólidos presente na pasta, uma vez que a massa específica da cinza é menor do que a do cimento. Portanto, mesmo que presentes na mesma quantidade, esse maior volume em relação a mistura de referência acarreta em uma diminuição do índice de consistência.

6.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das principais características dos concretos e argamassas, sendo utilizado, portanto, como parâmetro de qualidade desses materiais. Para analisar esse parâmetro, foram produzidos 15 corpos de prova de cada tipo de argamassa, rompendo-se 3 deles em cada uma das 5 idades especificadas. Portanto, a resistência à compressão para cada idade é resultado da média aritmética de 3 resultados individuais. Dessa forma, os resultados obtidos com o ensaio serviram como base para a produção dos gráficos expostos a seguir, maiores detalhes estão contidos no Apêndice A.

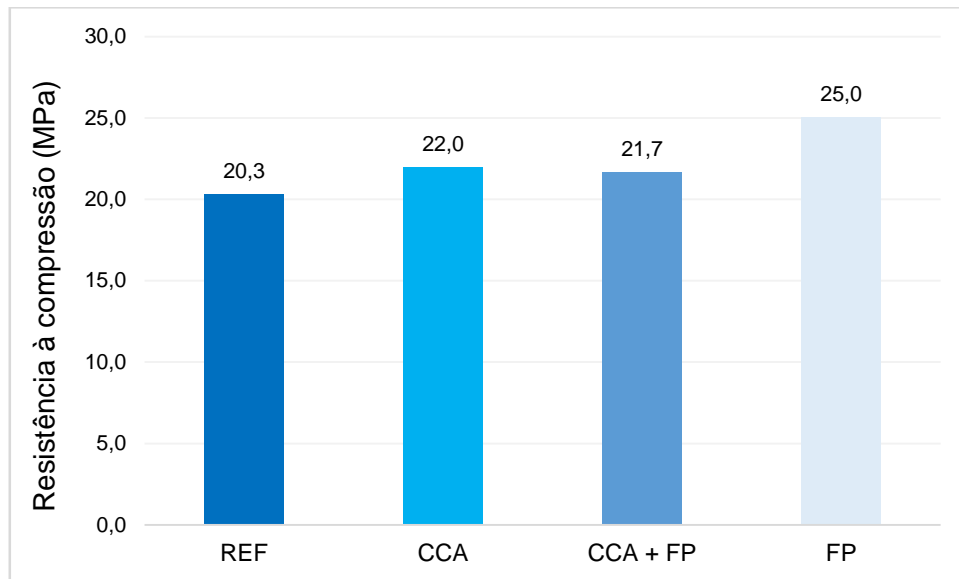
Gráfico 5 - Resistência à compressão às 24 horas



Fonte: Autora, 2018.

A partir do Gráfico 5, após 24 horas da moldagem dos corpos de prova, observa-se que as misturas que contém cinza em sua composição apresentam uma menor resistência comparadas as demais. A redução na resistência, quando comparadas a REF, chega a quase 8,0 Mpa na argamassa CCA e a 6,7 Mpa na argamassa CCA + FP. Nesse mesmo gráfico, verifica-se uma melhora no desempenho de FP em relação à REF, o que é caracterizado por um aumento na resistência de 9,55% com a introdução de fibras de polipropileno.

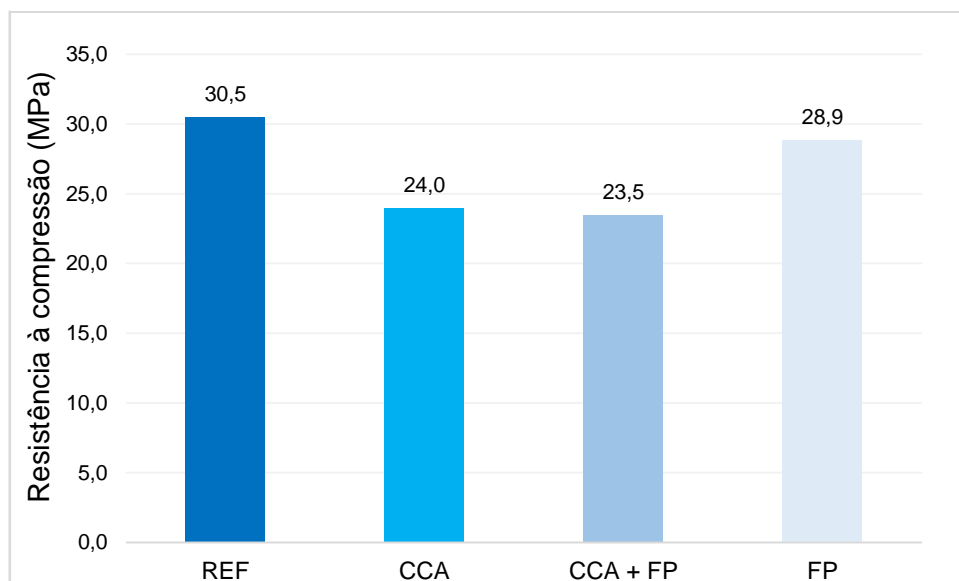
Gráfico 6 - Resistência à compressão aos 3 dias



Fonte: Autora, 2018.

Comparando-se os Gráficos 5 e 6, percebe-se um significativo desenvolvimento de resistência em CCA e CCA + FP no intervalo de tempo compreendido entre 24 horas e 3 dias, garantindo que as misturas apresentassem o dobro de resistência ao final desse período e até ultrapassassem REF. Possivelmente, tal comportamento pode ser justificado pela presença de mais hidróxido de cálcio em solução uma vez que parte das reações de hidratação dos aluminatos e silicatos já tenham se processado. Já FP apresenta um aumento de quase 5 Mpa em relação a REF.

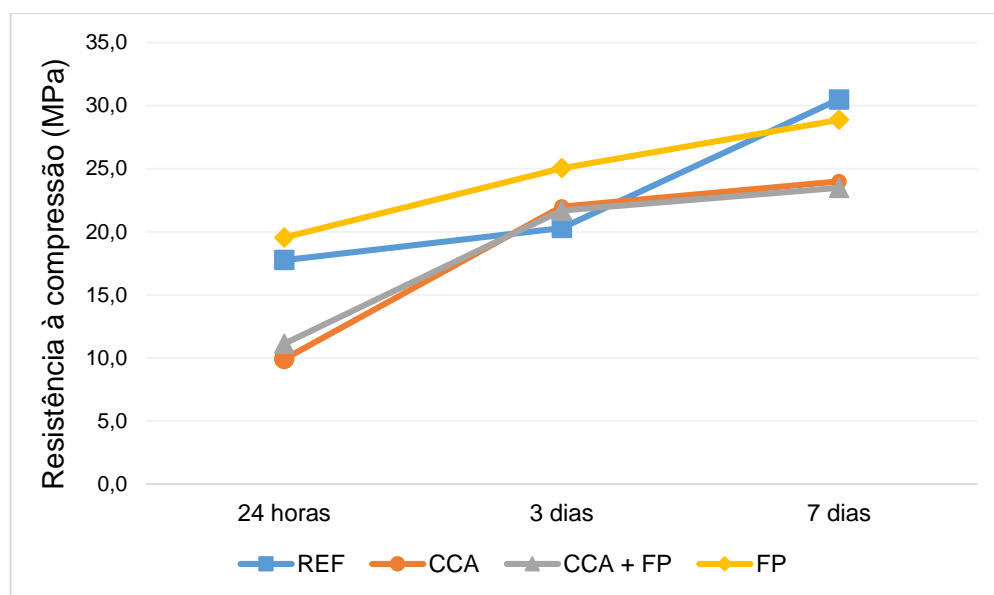
Gráfico 7 - Resistência à compressão aos 7 dias



Fonte: Autora, 2018.

Aos 7 dias (Gráfico 7), CCA e CCA + FP exibem, novamente, assim como no primeiro dia, uma menor resistência do que a mistura REF. Já FP, ao contrário, do primeiro e terceiro dia, no qual apresentou uma melhora de até 23%, mostra-se com uma menor resistência do que a referência aos 7 dias. (Gráficos 5, 6 e 7)

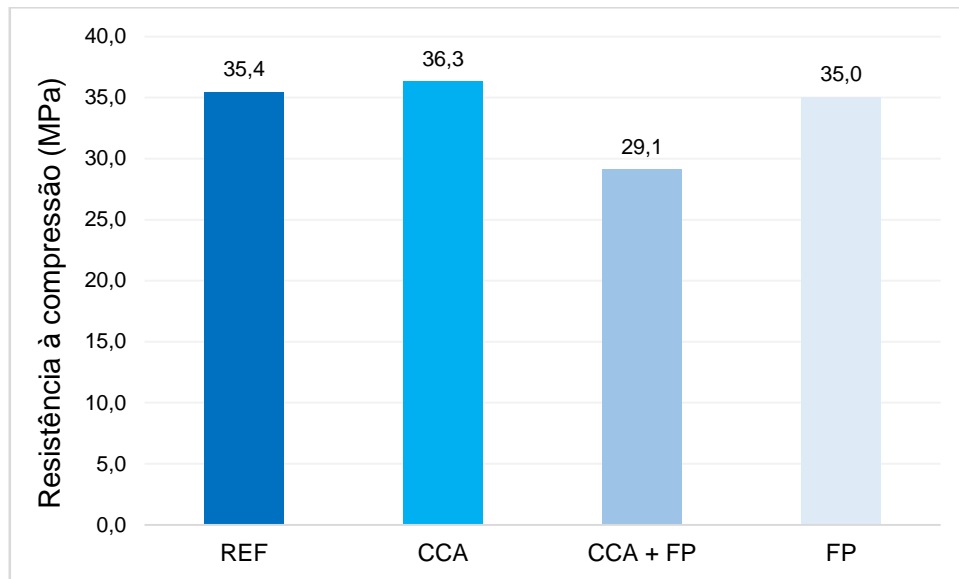
Gráfico 8 - Evolução da resistência à compressão nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias)



Fonte: Autora, 2018.

Nas primeiras idades, conforme o Gráfico 8, verifica-se um grande ganho de resistência nas misturas CCA e CCA + FP no período entre 1 e 3 dias, ao passo que entre 3 e 7 dias é perceptível a diminuição na velocidade da hidratação. Observa-se também que essas misturas apresentam um desenvolvimento de resistência similar, de modo que a adição de fibra não garante aumento de resistência a não ser no primeiro dia. Tal fato, pode estar relacionado a uma menor compatibilidade da fibra com a matriz constituída por cinza ou a uma dificuldade de homogeneização, uma vez que a adição de fibras na matriz convencional produz um aumento de resistência de FP nas duas primeiras idades.

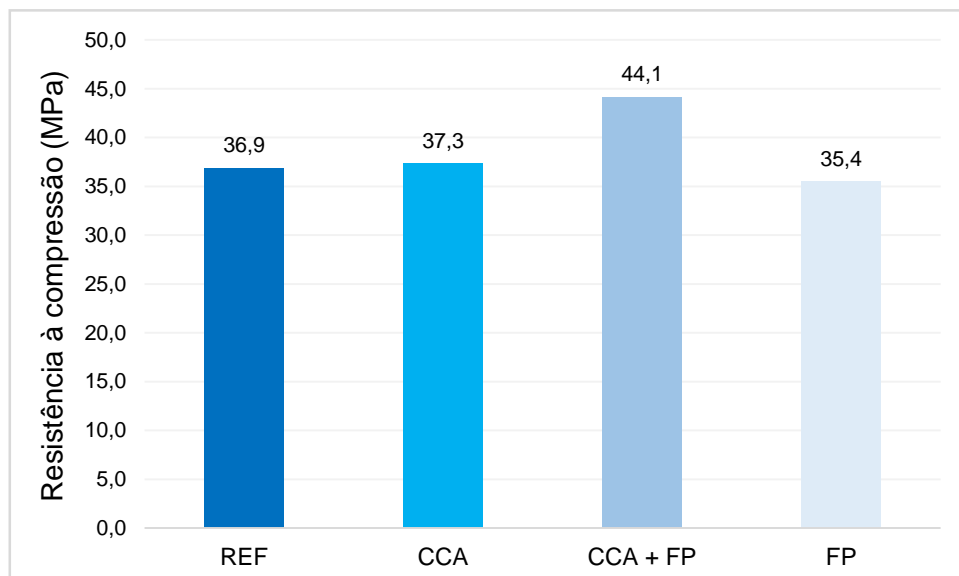
Gráfico 9 - Resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Autora, 2018.

Aos 28 dias, como mostra o Gráfico 9, CCA apresenta um aumento de 2,5% em relação a REF, enquanto que FP apresenta um resultado bem semelhante a referência. Já CCA + FP revelam uma resistência bem menor a REF devido, provavelmente, a uma dificuldade de dispersão de fibras nessa matriz na qual está presente a cinza. Conforme explicado no item 6.5, o maior volume de sólidos da mistura CCA em relação a REF para mesma quantidade de água pode acarretar essa maior dificuldade de homogeneização da matriz, assim como as fibras podem atuar como obstáculo a mistura do aglomerante composto por cinza e cimento.

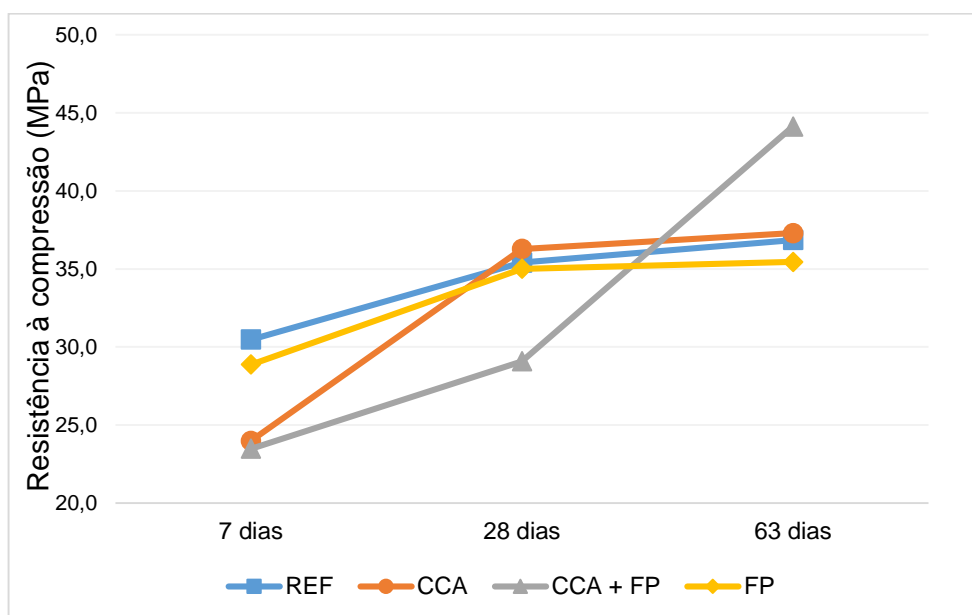
Gráfico 10 - Resistência à compressão aos 63 dias



Fonte: Autora, 2018.

Verifica-se no Gráfico 10 que aos 63 dias, assim como aos 28 dias, CCA exibe um leve aumento em relação a REF e FP uma leve queda em relação a REF. CCA + FP, ao contrário, apresenta um aumento bem considerável, diferente do observado nas idades anteriores. Tal resultado demonstra a capacidade de resistência da cinza, no entanto, essa média é resultado de resistências individuais muito discrepantes, de acordo com os limites de variação adotados.

Gráfico 11 - Evolução da resistência à compressão em idades mais avançadas (7, 28 e 63 dias)



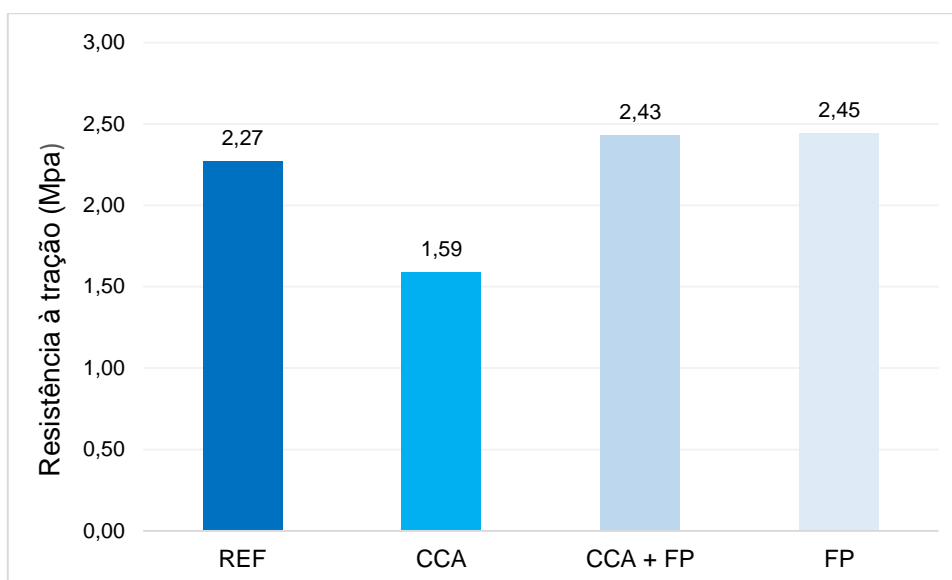
Fonte: Autora, 2018.

Por fim, comparando-se as misturas CCA, FP e REF aos 28 e 63 dias observa-se, que em idades mais avançadas, a partir dos 28 dias, a curva que representa a resistência à compressão tende a se estabilizar. (Gráfico 11) De modo geral, o ganho de resistência entre 28 e 63 dias não é muito expressivo.

6.7 Resistência à tração

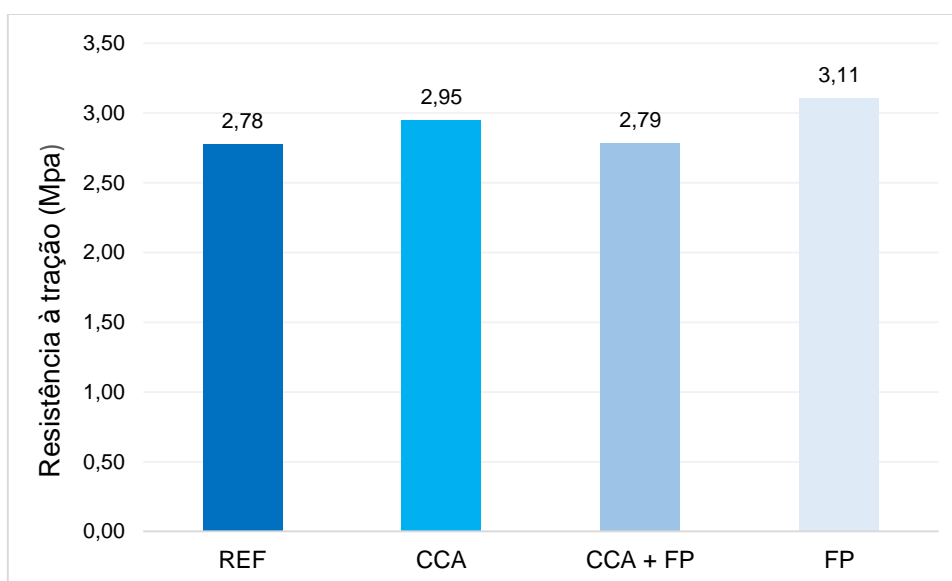
Assim como para a resistência à compressão foram feitos 15 corpos de prova de cada tipo de argamassa, rompendo-se 3 deles em cada uma das 5 idades especificadas. Portanto, os resultados obtidos com o ensaio serviram como base para a produção dos gráficos expostos a seguir, maiores detalhes estão apresentados no Apêndice A.

Gráfico 12 - Resistência à tração às 24 horas



Fonte: Autora, 2018.

Gráfico 13 - Resistência à tração aos 3 dias



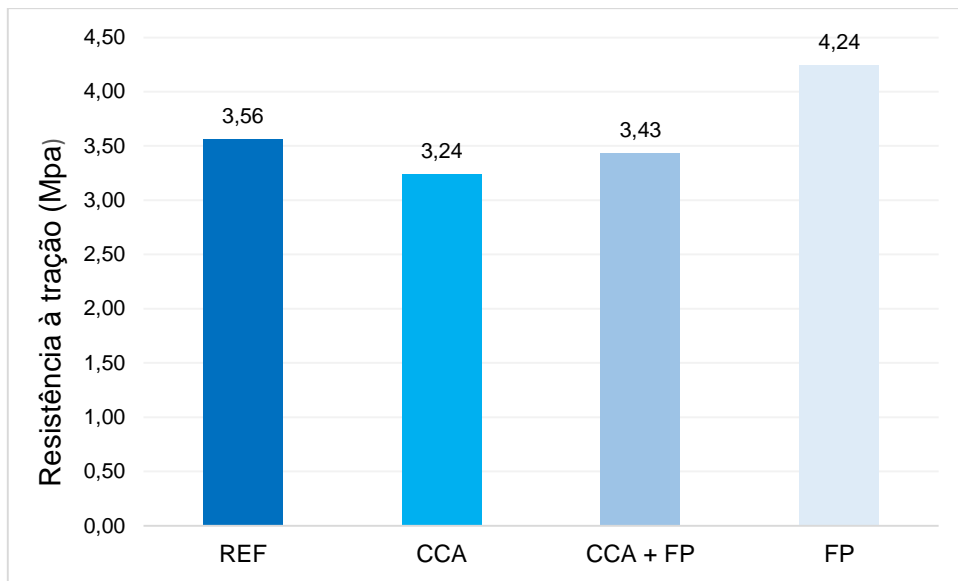
Fonte: Autora, 2018.

Após 24 horas (Gráfico 12), nota-se que assim como na resistência à compressão (Gráfico 5) CCA apresenta uma resistência bem menor do que a argamassa de referência. Quanto a FP e a CCA + FP, exibem um desempenho similar com um aumento de 7% e 8%, respectivamente, em relação à referência.

Verifica-se aos 3 dias, que todas as misturas possuem um desempenho igual ou superior a referência, com destaque para CCA que praticamente dobra sua

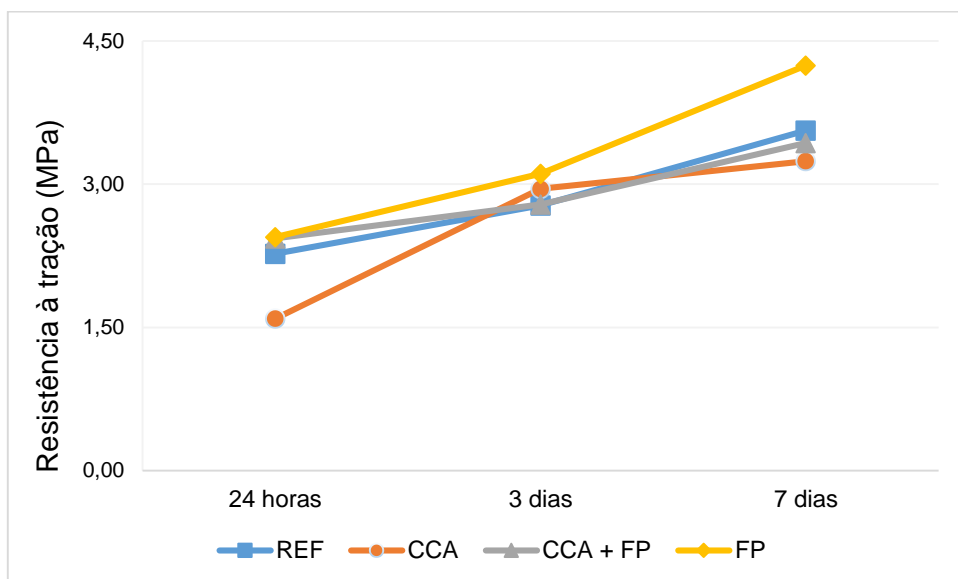
capacidade de resistência nesse intervalo de 2 dias. (Gráficos 12 e 13) Já aos 7 dias, conforme o Gráfico 14, somente FP tem uma resistência superior a REF. Comparando-se CCA e CCA + FP, percebe-se um leve aumento com a adição de fibras.

Gráfico 14 - Resistência à tração aos 7 dias



Fonte: Autora, 2018.

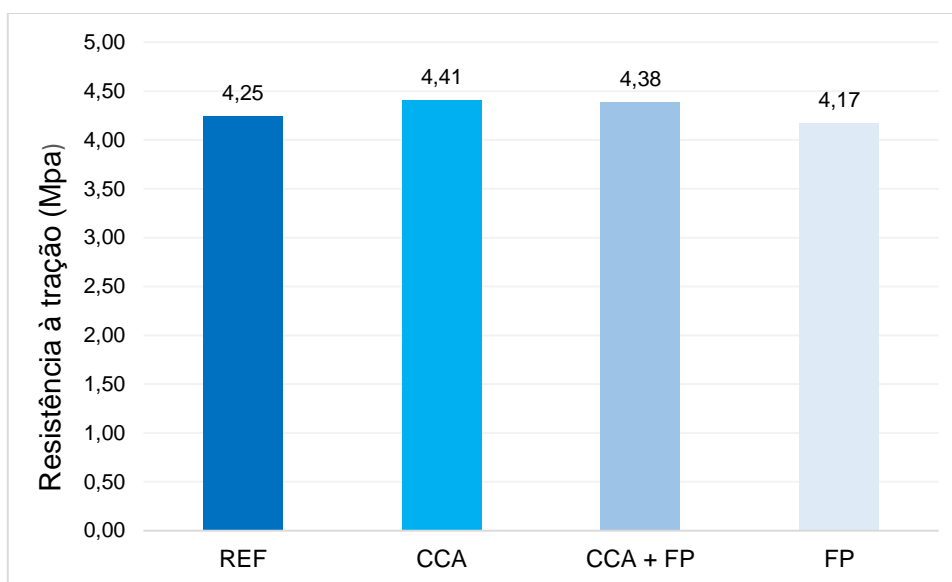
Gráfico 15 - Evolução da resistência à tração nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias)



Fonte: Autora, 2018.

Nesses primeiros dias (Gráfico 15), verifica-se que a adição de fibras garante um aumento de resistência à tração da mistura FP em relação a REF em todas as idades. Já as misturas que contêm cinza como adição mineral apresentam uma resistência bem inferior no primeiro dia. Entretanto, na sequência, a reação pozolânica se acelera e garante a essas misturas um resultado semelhante ou até superior a REF aos 7 dias, diminuindo a taxa de ganho ao atingir 7 dias. Quanto a mistura de fibras e cinza, comparando-se CCA e CCA + FP, verifica-se que as fibras não acrescentam resistência significativa à mistura, exceto no primeiro dia.

Gráfico 16 - Resistência à tração aos 28 dias

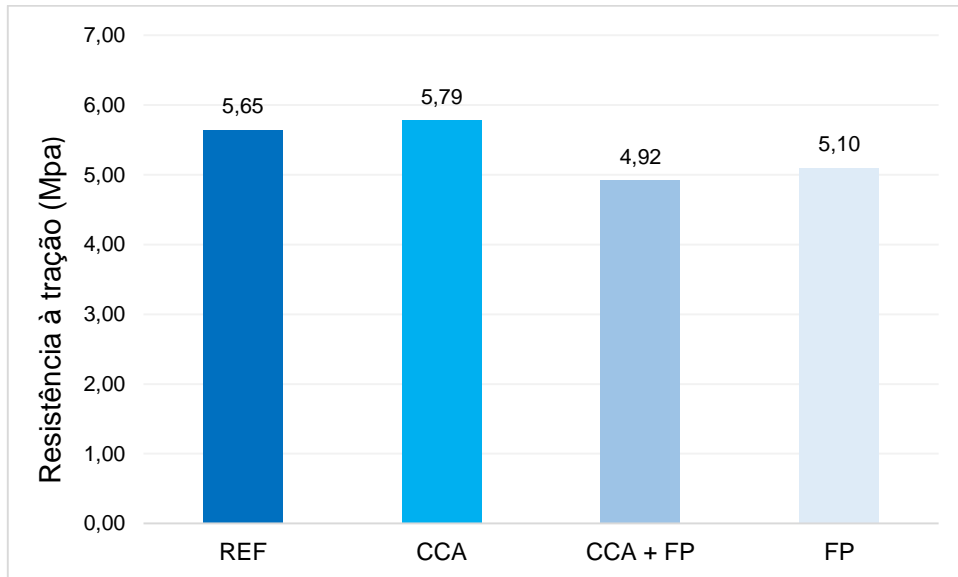


Fonte: Autora, 2018.

Conforme o Gráfico 16, observa-se que, de modo geral, todas as argamassas apresentam um resultado bem semelhante. Desse modo, a adição de cinza de casca de arroz consegue garantir uma resistência levemente superior a referência. Já a presença de fibras de polipropileno não faz muita diferença aos 28 dias já que a argamassa atingiu resistência e módulo de elasticidade superiores ao da fibra.

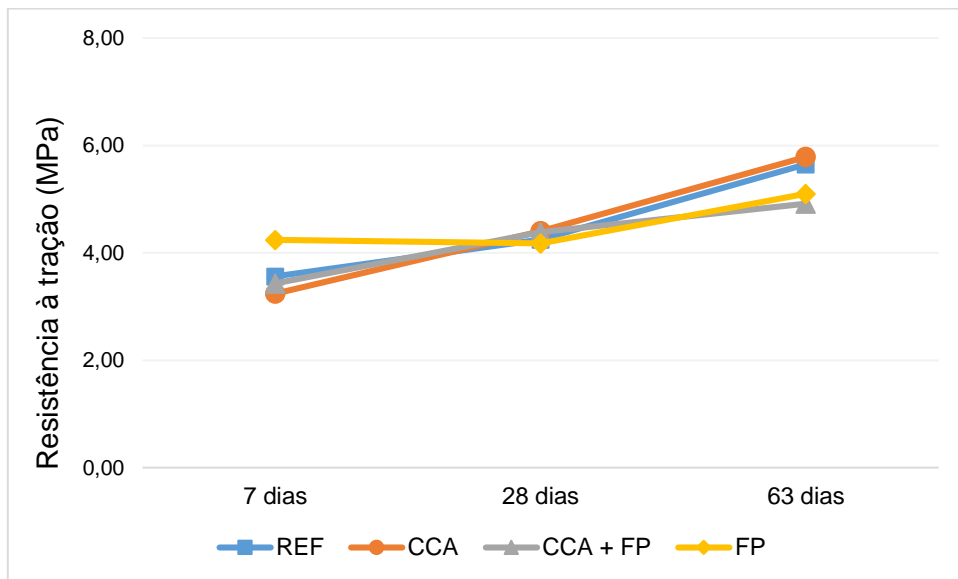
Aos 63 dias, as misturas com fibras de polipropileno apresentam o menor desempenho e CCA exibe a maior resistência com 2,5% de aumento com relação a REF. (Gráfico 17) Os desempenhos inferiores das misturas com fibras podem ser decorrentes de algum problema de dispersão. A mistura CCA + FP possui desvios maiores do que os adotados, o que deve ser decorrente desse argamassada especificamente.

Gráfico 17 - Resistência à compressão aos 63 dias



Fonte: Autora, 2018.

Gráfico 18 - Evolução da resistência à tração em idades mais avançadas (7, 28 e 63 dias)



Fonte: Autora, 2018.

O Gráfico 18 mostra que a partir do 7º dia a adição de fibras de polipropileno já não é tão eficaz no aumento de resistência à tração. Como não se tem registro da resistência nesse intervalo de tempo entre 7 e 28 dias não é possível saber com precisão até que momento a fibra apresenta capacidade de aumentar a resistência à tração da matriz. Quando adicionadas a matriz com a adição mineral apresentam um resultado levemente inferior que pode estar ligado a dificuldade de homogeneização de todos os materiais levando-se em consideração o maior volume de aglomerante.

6.9 Absorção de água

Previamente a apresentação e análise de resultados, é importante conceituar a propriedade avaliada. Portanto, a NBR 9778 (2009, p.1) define a absorção de água por imersão como:

“Processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Para os efeitos desta Norma, é também o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido a penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco.”

A partir dos dados coletados no ensaio da NBR 9778/2009, descrito no item 5.6, apresenta-se a Tabela 9 com o resumo dos resultados. No apêndice B os resultados estão expostos de maneira mais detalhada.

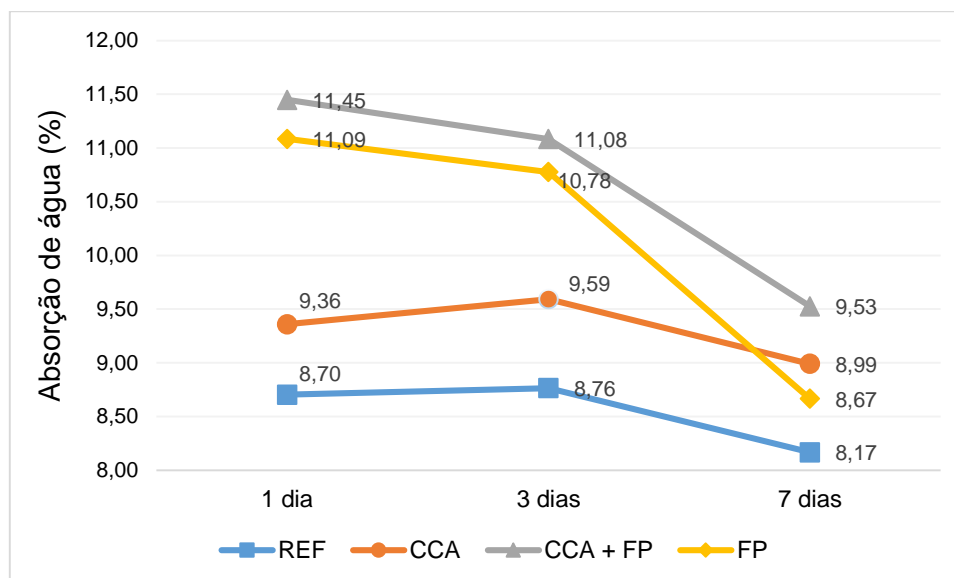
Tabela 9 - Resumo resultados absorção de água

Idade	REF	CCA	CCA + FP	FP
24 h	8,70	9,36	11,45	11,09
3 dias	8,76	9,59	11,08	10,78
7 dias	8,17	8,99	9,53	8,67
28 dias	8,37	9,37	10,55	10,23
63 dias	7,71	8,48	8,57	7,90

Fonte: Autora, 2018.

Verifica-se nas primeiras idades, conforme o Gráfico 19, que todos os traços apresentam um teor de absorção de água maior do que o traço de referência. Observa-se também que a presença de fibras de polipropileno é marcante no que se refere a evolução desse índice ao longo do tempo, uma vez as misturas que contém o material tem uma tendência de evolução mais próxima. Já a mistura que só tem cinza mostra-se mais próxima a referência

Gráfico 19 - Evolução da absorção de água nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias)



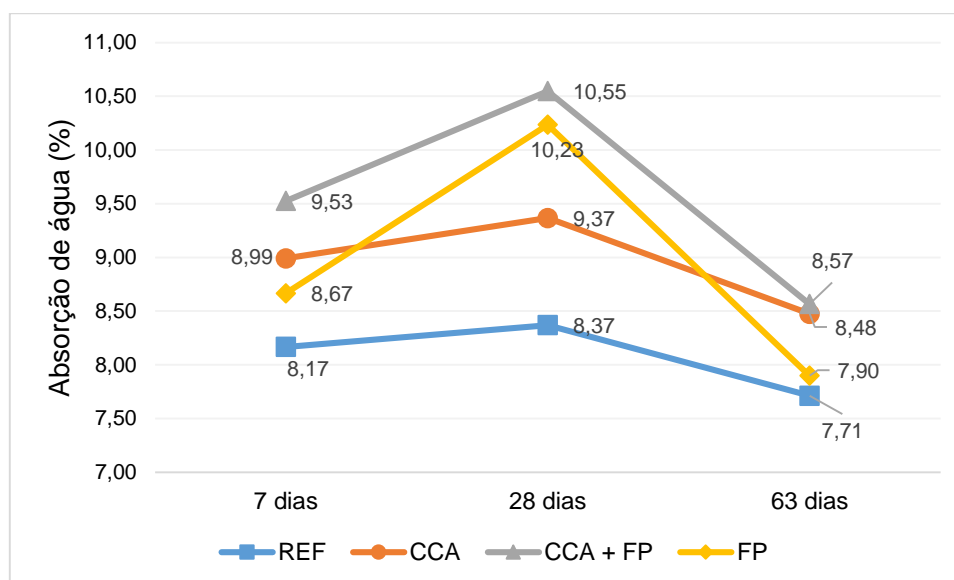
Fonte: Autora, 2018.

O maior teor de absorção de água é da argamassa CCA + FP. A diferença absoluta em relação a referência chega a 2,75 no primeiro dia e diminui para 2,32 e 1,36 no terceiro e no sétimo dia, respectivamente. Porém, ao final desse período ainda é a mistura que possui a maior capacidade de absorção. Isso se deve, possivelmente, ao aumento do volume de finos ocasionado pela introdução da cinza e também a incorporação de vazios na mistura devido à adição de fibras.

Tal comportamento justificaria também o aumento da absorção em relação a mistura de referência, quando estes materiais estão presentes individualmente. Comparando-se CCA e FP com a referência, percebe-se que o aumento produzido no resultado desse índice pelas fibras é preponderante em relação ao observado na mistura com cinza.

Com o passar do tempo, nesses momentos iniciais, os valores de absorção de todas as misturas tendem a decrescer, o que pode estar ligado a desaceleração das reações químicas de hidratação, demandando, portanto, uma menor quantidade de água. Observa-se que a tendência de decrescimento é muito mais acentuada na mistura FP, com uma redução de 2,42 no teor de absorção entre 24 horas e 7 dias.

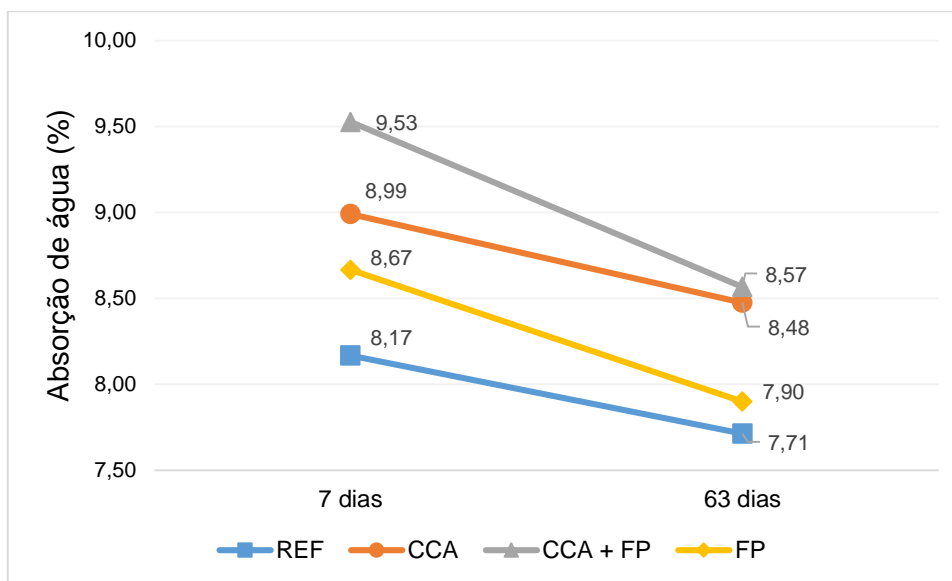
Gráfico 20 - Evolução da absorção de água em idades mais avançadas (7, 28 e 63 dias)



Fonte: Autora, 2018.

A partir do Gráfico 20, observa-se que ocorre um aumento do teor de absorção de água em todas as misturas dos 7 aos 28 dias seguida de uma diminuição dos 28 aos 63 dias. Provavelmente, nesse período há uma retomada do processo de hidratação com a reação do C_2S , responsável pelo ganho de resistência em idades mais avançadas, o que demandaria mais água. Bezerra et al (2011) também observa um comportamento parecido em argamassas com cinza de casca de arroz num traço 1:9 (cimento:areia), porém dos 28 aos 63 dias. Porém, esse comportamento pode ser resultado de erro humano uma vez que os corpos de prova de 28 dias permaneceram em ebulição por 1 hora a mais do que o recomendado pela norma. Por isso, os resultados de 28 dias não estão expostos no Gráfico 21 e nem na seção 6.10 que discute a respeito do índice de vazios, visto que os resultados são provenientes dos mesmos corpos de prova.

Gráfico 21 - Evolução da absorção de água em idades mais avançadas (7 e 63 dias)



Fonte: Autora, 2018.

Observa-se que com o decorrer dos dias FP tende a se aproximar de REF assim como CCA + FP tende a se aproximar de CCA. Ao final dos 63 dias, apesar de uma diminuição de todas as misturas, percebe-se que as misturas CCA e CCA + FP são as misturas que apresentam o maior índice de absorção. (Gráfico 21) Verifica-se que em termos absolutos a diferença entre as misturas com cinza e a referência é de no máximo 0,83, no entanto, em termos percentuais, o aumento chega a 11%.

Os vazios incorporados pela fibras de polipropileno tendem a ser preenchidos pelos produtos de hidratação conforme a reação se processa e, por isso, ao fim de vários dias, a capacidade de absorção se aproxima da matriz de origem, seja ela convencional ou composta por cinza. Quanto às misturas que contêm cinza em sua composição, o teor de absorção delas ainda é maior devido a, provavelmente, todas as reações pozolânicas ainda não terem sido concluídas.

6.10 Índice de Vazios

A NBR 9778 (2005, p.1) define o índice de vazios como a “relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.”

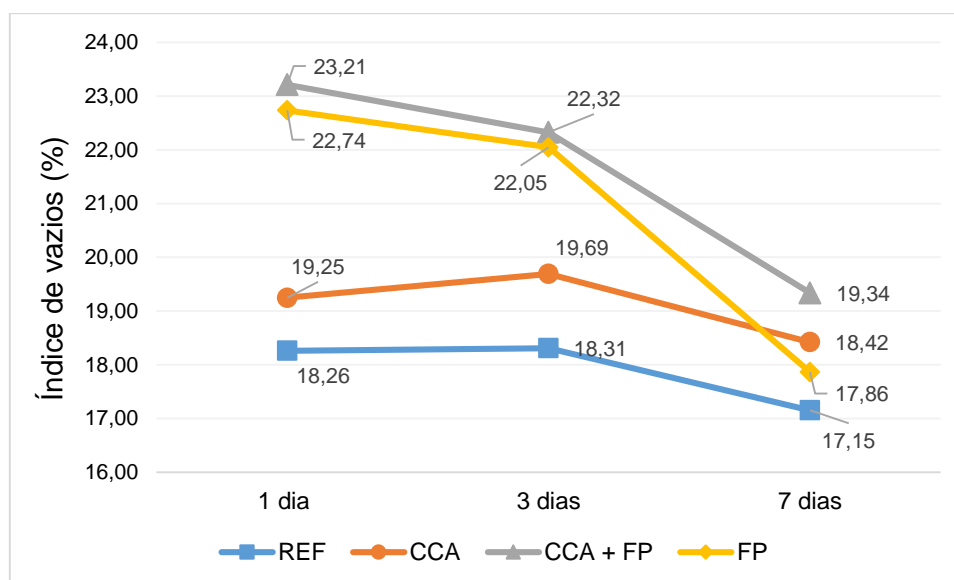
A partir dos dados coletados no ensaio da NBR 9778/2009, descrito no item 5.6, apresenta-se a Tabela 10 com o resumo dos resultados. No apêndice B os resultados estão expostos de maneira mais detalhada.

Tabela 10 - Resumo resultados índice de vazios

Idade	REF	CCA	CCA + FP	FP
1 dia	18,26	19,25	23,21	22,74
3 dias	18,31	19,69	22,32	22,05
7 dias	17,15	18,42	19,34	17,86
28 dias	17,51	19,29	21,35	20,77
63 dias	16,27	17,59	17,61	16,59

Fonte: Autora, 2018.

Gráfico 22 - Evolução do índice de vazios nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias)



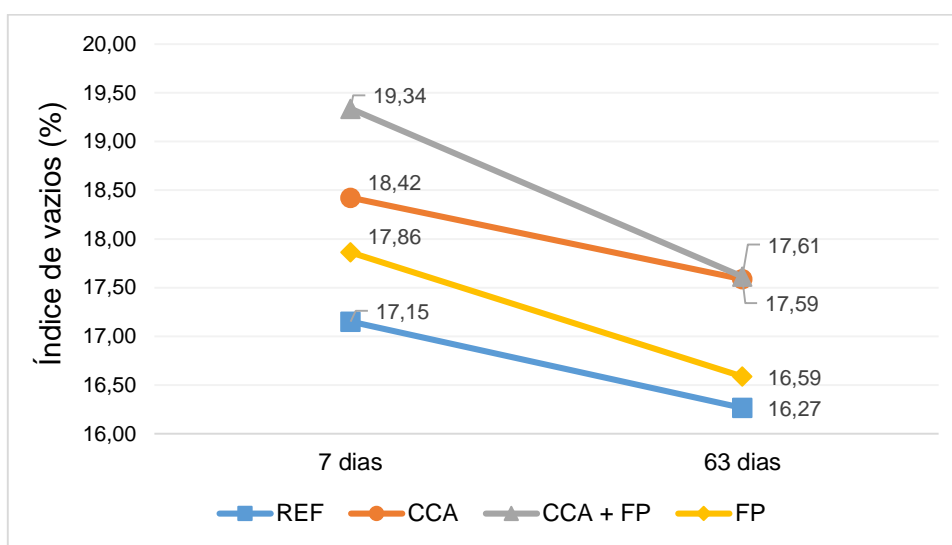
Fonte: Autora, 2018.

Nessas primeiras idades, conforme o Gráfico 22, observa-se que todas as argamassas produzidas apresentam um índice de vazios maior do que a mistura de referência. Nota-se que CCA + FP e FP são as que incorporam a maior quantidade de vazios devido a presença de fibras em sua composição.

Comparando-se as argamassas é perceptível a evolução desse índice a partir da diferença absoluta entre o sétimo e o primeiro dia, sendo esses valores de: 0,83; 1,11; 3,87 e 4,88 para CCA, REF, CCA + FP e FP. Dessa forma, percebe-se que apesar das misturas com fibras obterem os maiores índices de vazios são também as

que evoluem mais rapidamente no sentido de diminuir esse índice. Quanto à CCA, o maior índice de vazios está ligado ao fato de que as reações pozolânicas não se processaram completamente uma vez que apresentam um desenvolvimento lento. Portanto, não houve tempo suficiente para que os efeitos químicos relativos a produção de silicatos e sílico-aluminatos de cálcio hidratado se processassem e atuassem no preenchimento de vazios. Nesse sentido, é possível perceber porque a junção dos dois materiais em CCA + FP ocasionaram o maior índice de vazios.

Gráfico 23 - Evolução do índice de vazios em idades mais avançadas (7 e 63 dias)



Fonte: Autora, 2018.

A partir do Gráfico 23, nota-se que todas apresentam uma diminuição de vazios comparando-se 7 e 63 dias. Percebe-se também que CCA + FP tende a se aproximar de CCA e FP tende a se aproximar de REF. Ao final dos 63 dias, as misturas com cinza apresentam praticamente o mesmo índice de vazios, porém ainda não apresentam uma porosidade menor do que a mistura de referência. Portanto, não exibem uma redução de porosidade esperada devido aos efeitos físicos e químicos decorrentes, respectivamente, da reação pozolânica e do empacotamento granulométrico. Talvez as reações ainda não tenham se processado completamente ou o teor de sílica presente na cinza tenha sido mais elevado do que a quantidade de hidróxido de sódio produzida pela hidratação do cimento.

6.11 Estudo da viabilidade técnica de aplicação em pavimento rígido

Para avaliar a viabilidade de aplicação da cinza da casca de arroz como adição mineral em concretos de pavimentos rígidos são utilizados os critérios adotados pelo Manual de Pavimento Rígido do DNIT (2005b).

O primeiro requisito desse manual está relacionado ao índice de desempenho com Cimento Portland aos 28 dias, determinado a partir da NBR 5752. Como todo o processo de mistura, moldagem, cura e ruptura das argamassas CCA foram feitos em concordância com essa norma assim como a porcentagem de substituição de 25%, desse modo, os resultados obtidos serão utilizados para avaliar o índice de desempenho. Ressalta-se que existem algumas diferenças relativas ao que foi executado e a norma, sendo elas, a utilização de apenas 3 corpos de prova e a adição mais 1 minuto em velocidade alta ao tempo de mistura da norma. Portanto, os resultados estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultado índice de desempenho

Argamassa	Resistência Individual (Mpa)	Resistência Média (Mpa)	Índice de desempenho (%)
REF	36,1	35,4	102,54
	36,4		
	33,7		
CCA	37,5	36,3	
	37,4		
	34,0		

Fonte: Autora, 2018.

Como o índice de desempenho é maior que 75% e 90% assim como exigido pelo manual e pela NBR 12653/2015, respectivamente, a cinza utilizada obedece a esse primeiro critério.

Já quanto aos requisitos mecânicos, o cimento utilizado (CPII-F 40) deve apresentar resistências mínimas aos 3, 7 e 28 dias. Portanto, esses parâmetros serão adotados para verificar se a argamassa com 25% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz apresenta o desempenho mínimo exigido nessas idades.

Tabela 12 - Resistências das argamassas CCA e REF aos 3, 7 e 28 dias

Idade	Resistência (Mpa)		
	REF	CCA	DNIT
3 dias	20,3	22,0	15
7 dias	30,5	24,0	25
28 dias	35,4	36,3	40

Fonte: Autora, 2018.

A partir da Tabela 12, percebe-se que a mistura de referência só atende a resistência exigida aos 3 e 7 dias. Como nem a mistura REF alcança a resistência exigida pelo DNIT já que o cimento utilizado também não atende as especificações da NBR 16697, as resistências das argamassas foram corrigidas considerando-se que aos 28 dias REF atinja 40 Mpa. Os resultados estão expostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Resistências das argamassas CCA e REF aos 3, 7 e 28 dias (corrigidas)

Idade	Resistência (Mpa)		
	REF	CCA	DNIT
3 dias	22,9	24,9	15
7 dias	34,5	27,1	25
28 dias	40,0	41,0	40

Fonte: Autora, 2018.

Por fim, aos 28 dias a argamassa com CCA apresenta uma resistência à tração indireta de 4,4 Mpa. Utilizando-se as relações da NBR 6118, chega-se que a resistência a tração na flexão é de 5,65 Mpa, estando, portanto, dentro do intervalo usualmente utilizado para pavimento rígido, que é de 4,5Mpa.

Após a correção, mantendo-se as proporções de resistência entre si, presumindo-se que o cimento utilizado atendesse a todos os requisitos de resistência, observa-se que a matriz cimentícia composta por CCA atende aos requisitos de resistência exigidos. Portanto, de maneira geral, num primeiro momento, percebe-se que por apresentar um resultado bem semelhante a matriz convencional tal porcentagem de cinza poderia ser utilizada na pavimentação rígida como adição mineral.

Quanto à coloração escura da argamassa obtida (Figura 20), assume-se que isso não seria um problema, nessa aplicação visto que o pavimento flexível, amplamente empregado, também apresenta esse aspecto visual. O que deve ser levado em consideração é o percentual de carbono presente na cinza, já que segundo Rêgo (2004) quanto mais escura a cinza maior o teor de carbono, o que em quantidades acima de 15% pode provocar problemas de reatividade. Além disso, conforme Tiboni (2007), quando o carbono está presente em elevadas quantidades pode conduzir a reações expansivas. Como o ensaio de perda ao fogo da cinza não foi realizado não há como analisar esse parâmetro. Assim, seriam necessários estudos maiores e que avaliassem se as propriedades conferidas pela CCA estão de acordo com o desempenho necessário a essa aplicação.

Figura 20 - Coloração REF e CCA



Fonte: Autora. 2018.

A partir dos resultados, percebe-se que o uso de cinza de casca de arroz como adição mineral em concretos para pavimentos rígidos seria vantajoso uma vez que permitiria que esse tipo de pavimento fosse muito mais competitivo se comparado ao pavimento asfáltico. Dessa forma, em situações nas quais seu uso fosse mais indicado haveria mais uma possibilidade disponível no mercado. No entanto, este trabalho limita-se somente a avaliação das questões técnicas uma vez que segundo Santos (1997) a falta de homogeneidade das cinzas residuais produzidas devido a adoção de condições de queima diferentes representa um empecilho a ampla aplicação dessa pozolana. Mas ainda assim, novos estudos podem contribuir para aumentar o interesse do mercado no material, atuando no sentido de solucionar essas dificuldades e garantir sua aplicabilidade. O enorme volume de cinzas residuais

produzidas poderiam ser absorvidas por grandes obras de pavimentação, principalmente, nas regiões produtoras de arroz. Além disso, conforme Silva (2010) como, normalmente, o cimento composto por adições tem um menor calor de hidratação por unidade de tempo a aplicação em pavimentos rígidos, que demandam grandes volumes de concreto, seria beneficiada.

7 CONCLUSÃO

A incorporação da cinza da casca de arroz à indústria cimenteira mostra-se como uma alternativa ao problema do gerenciamento de lixo industrial na medida em que contribui para uma utilização mais racional dos recursos naturais e vai ao encontro das atuais necessidades da sociedade relativas a um desenvolvimento mais sustentável. Por outro lado, para atender as exigências de mercado e garantir um melhor desempenho de resistência nas primeiras idades, especialmente, devido ao percentual utilizado, foram adicionadas fibras de polipropileno para avaliar sua capacidade de reforço.

Dessa forma, para avaliar, do ponto de vista técnico, quais os efeitos que a substituição parcial de 25% de cimento por CCA e a adição de 0,5% de fibras de polipropileno ocasionam em argamassas, tanto individualmente quanto em conjunto, foram realizados diversos ensaios. Tendo em vista, uma aplicação mais específica a CCA, foi verificado a possibilidade de aplicação dessa adição mineral em concretos de pavimentos rígidos. Com base nos resultados, chegou-se as seguintes conclusões:

Quanto às propriedades mecânicas e as propriedades no estado fresco:

- As misturas que contêm CCA em sua constituição apresentam no primeiro dia um desenvolvimento de resistência bem inferior a mistura padrão, porém aos 7 dias já apresentam resultado superior;
- A reação pozolânica entre 24 horas e 3 dias é bem intensa, apresentando a capacidade de dobrar a resistência nesse período;
- A argamassa CCA apresenta, de maneira geral, tanto à tração quanto à compressão, um resultado similar a referência aos 28 dias, apresentando um aumento de 2,5% na resistência à compressão;
- A presença de fibras na matriz convencional agrega resistência à compressão até o terceiro dia e resistência à tração até aos 7 dias;
- As fibras de polipropileno apresentam maior dificuldade de dispersão na matriz composta por CCA;
- Tanto a presença de cinza da casca de arroz quanto a de fibras de polipropileno provocam uma diminuição do índice de consistência da argamassa.

Quanto à absorção de água e ao índice de vazios:

- Tanto a presença de fibras de polipropileno como a de CCA influenciam no aumento da absorção de água e do índice de vazios da argamassa nos primeiros dias;
- O efeito provocado pelas fibras é preponderante, nos primeiros dias, se comparado ao efeito ocasionado pela presença de cinza;
- Ao final dos 63 dias, a mistura que contém somente fibra apresenta desempenho mais próximo a REF do as que contêm CCA.
- As misturas com fibras tendem a apresentar com o passar do tempo uma absorção de água e um índice de vazios mais próximo a matriz original, seja ela composta por cinza ou não.
- Ao final dos 63 dias, as misturas com CCA não apresentam redução nesses índices se comparadas a argamassa de referência.

Percebe-se que, de modo geral, a presença da cinza da casca de arroz utilizada no teor de 25% é capaz de produzir resultados semelhantes a argamassa convencional no que se diz respeito às propriedades mecânicas. Essa quantidade empregada pode ser uma opção vantajosa em aplicações nas quais não haja necessidade de uma grande resistência no primeiro dia. Quanto à absorção de água e ao índice de vazios apesar de não apresentar a redução da porosidade capilar pretendida, espera-se que em idades mais avançadas do que as estudadas os efeitos pozolânicos sejam observados assim como no trabalho de Sokolovicz (2013).

Quando as fibras estão presentes na matriz convencional, verifica-se que as argamassas apresentam ganho de resistência à tração até o sétimo dia. Quanto ao uso de fibras de polipropileno como reforço para as matrizes com CCA, percebe-se que houve problemas quanto a reologia dos materiais em conjunto, o que pode ser decorrente da menor compatibilidade das fibras com a matriz ou de um tempo de mistura insuficiente. Portanto, talvez em quantidades maiores, já que se trata de uma fibra de baixo módulo, e com fibras com um fator de forma maior, tomando-se os cuidados necessários, o resultado seja positivo. Mas ainda assim, com base nos

resultados das fibras nas matrizes convencionais, o aumento talvez não seja tão significativo, considerando-se a diferença de resistência entre as matrizes com CCA e a argamassa de referência no primeiro dia.

Considerando-se a CCA como adição mineral a pavimentos rígidos, apesar do percentual empregado não apresentar um desempenho superior, o resultado similar pode representar um custo benefício interessante. Assim, para uma maior clareza quanto a utilização da cinza da casca de arroz nessa aplicação são necessários mais ensaios que reproduzam melhor as condições ambientais e de carregamento a que um pavimento rígido é submetido.

REFERÊNCIAS

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção**: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. São Paulo: Pini, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de utilização do cimento Portland**. 7ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9778**: Concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland: Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos: Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 16606**: Cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland: determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2017.

ANDRADE, Jairo José de oliveira. Propriedades dos polímeros. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. vol. 2. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 1323-1350.

BALBO, José Tadeu. Concretos asfálticos. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. vol. 2. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 1447-1479.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) **Concreto**: Ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 185-232.

BATTAGIN, Arnaldo Forti; BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva. O cimento Portland no Brasil. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 761-790.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sydney. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2 ed. New York: Taylor & Francis, 2007.

BERNUCCI et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 3 ed. Rio de Janeiro: Petrobrás :ABEDA, 2010.

BEZERRA, Izabelle M. T. et al. Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.6, p.639-645, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662011000600015#?>. Acesso em: 10 dez. 2018.

BIANCHI, Flávia Regina; BRITO, Isis Raquel Tacla; CASTRO, Veronica Amanda Brombley. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 50, 2008, Salvador. Anais 50º Congresso Brasileiro do concreto. Salvador: IBRACON, 2008. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pavimentos_cobertura.asp> Acesso 24 jan.2019

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Manual de conservação rodoviária**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. IPR-710. 2.ed. Rio de Janeiro, 2005a. 564p.

_____. **Manual de implantação básica de rodovia.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. IPR-742. 3.ed. Rio de Janeiro, 2010. 617p.

_____. **Manual de pavimentos rígidos.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. IPR-714. 2.ed. Rio de Janeiro, 2005b. 234p.

_____. **Norma DNIT 050/2004 EM: Pavimento Rígido - Cimento Portland: Especificação de material.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2004.

CALMON, João Luiz. Resíduos industriais e agrícolas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** vol. 2. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 1651-1674.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** São Paulo: IBRACON, 2010. p. 893-944.

CARNIO, Marco Antonio. **Propagação de trinca por fadiga do concreto reforçado com baixos teores de fibras.** 2009. 167f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264892>>. Acesso em: 15 de dez. 2018

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica.** 2009. 98f. Dissertação (mestrado)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/17032>>. Acesso em: 17 out. 2018.

CENTURIONE, Sérgio Luiz. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland.** 1993. 155f. Dissertação (mestrado)-Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-28082015150715/en.php>>. Acesso em: 30 set. 2018.

DAFICO, D.A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz.** 2001. 208f. Tese (doutorado)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/81935>>. Acesso em: 17 out. 2018.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. p.261-309.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues. Concreto com Fibras. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) **Concreto: Ciência e tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1326-1365.

FIGUEIREDO, Enio Pazini; RÊGO, João Henrique da Silva. Materiais e produtos poliméricos. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. vol. 2. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 1387-1412.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues; TANESI, Jussara; NINCE, Andréia Azeredo. Concreto com fibras de polipropileno (CPF). **Téchne**, São Paulo, v.10, n.66, 2002. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/66/artigo287241-1.aspx>> Acesso: 05 jan. 2019.

Food and agriculture organization of the United Nations. **Commodities by country**. Disponível em:<http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country>. Acesso em: 19 out. de 2018.

FOLETTTO, Edson Luiz et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, Santa Maria, v. 28, n. 6, p. 1055-1060, nov./dez. 2005. Disponível em: <<http://quimicanova.sbq.org.br/default.asp?ed=117>>. Acesso 20 out. 2018.

GONÇALVES, Gislayne Elisana et al. Síntese e caracterização de mulita utilizando sílica obtida da casca de arroz. **Revista Escola de Minas**, v.62, n.3, p. 367-372, jul./set. 2009. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/1112>>. Acesso 25 out. 2018.

GORNINSKI, Jane Proszek; KAZMIERCZAK, Claudio de Souza. Microestrutura dos polímeros. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. vol 2. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 1387-1412.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agro 2017**. Disponível em <<https://censos.ibge.gov.br/agro/2017>> Acesso em: 18 out. de 2018.

ISAIA, Geraldo Cechella. A evolução do concreto estrutural. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1-55.

JOHN, Vanderley M. Materiais de construção e o meio ambiente. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 97-121.

LUCENA, Júlio César Tavares. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. 2017.83f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-30032017-104705/pt-br.php>> Acesso em: 3 jan. 2019.

MACCAFERRI. **Fibromac 6 - fibras para reforço de concreto**: características técnicas.2008.Disponível em: < <https://www.maccaferri.com/br/produtos/fibras/fibras-fibromac/> >

MARTINS, Gabriel Lima Oliveira. **Influência do teor de sílica amorfa na atividade pozolânica de adições minerais altamente reativas**. 2018. 131f. Dissertação (mestrado) - Programa de pós graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/32451>>. Acesso 22 de out. de 2018.

MINDESS, Sydney; YOUNG, J. Francis; DARWIN, David. **Concrete**. 2ed. New Jersey: Pearson, 2003.

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

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

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NETTO, R.M. **Materiais Pozolânicos**. 149f. Monografia – Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: < http://pos.demc.ufmg.br/novocecc/?page_id=334>. Acesso 20 de out. 2018.

OLIVEIRA, Maria Luiza Lopes de. **Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas**.171f. Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/82155>> Acesso em: 18 dez. 2018.

PRUDÊNCIO JR, Luiz Roberto; SANTOS, Sílvia; DAFICO, Dário de Araújo. **Cinza da casca de arroz**. Coleção Habitare, vol. 4 - Utilização de resíduos na construção civil. Porto Alegre, 2003. Disponível em: <http://www.habitare.org.br/publicacao_coletanea4.aspx>. Acesso em: 26 jun. 2018.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – Aspectos da microestrutura da pasta**. 2004. 274f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

RODRIGUES, Públio Penna Firme; MONTARDO, Julio P. **A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44, 2002, Belo Horizonte. Anais 44º Congresso Brasileiro do concreto. São Paulo: IBRACON, 2002.

SANTOS, Sílvia. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 1997. 129f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. Disponível em < <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/111909> > Acesso 21 out de 2018.

SANTOS, Sílvia. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza da casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. 267f. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**: volume 1. 2 ed. São Paulo: PINI, 2007.

SILVA, M. Gomes. Cimento Portland com adições minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de de materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 791-823.

SILVEIRA, Adriana Augustin. **A utilização da cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos**: estudo do ataque por sulfatos. 1996. 155f. Dissertação (mestrado)-Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 1996. Disponível em: < <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3468> >. Acesso em: 14 out. 2018.

SNIC. **Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em:< <http://snic.org.br/index.php>>. Acesso em: 18 out. 2018.

SOKOLOVICZ, Bóris Casanova. **Microestrutura e durabilidade a cloretos de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz com e sem moagem prévia**. 2013. 164f. Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Disponível em:< <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7811>>. Acesso em: 15 out. 2018.

SOSBAI. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Pelotas-RS, 2016.

TANESI, Jussara; FIGUEIREDO, Antonio Domingues. **A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração**. São Paulo: EPUSP, 1999. Disponível em: < <http://bdpi.usp.br/item/001031224>> Acesso 03 jan. 2019.

TIBONI, Rafaelle. **A utilização da cinza da casca do arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. 2007. 196f. Dissertação (mestrado) – Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ZAMPIERE, Valdir Aparecido. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. 1989. 212f. Dissertação (mestrado) – Programa

de pós-graduação em Mineralogia e Petrologia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-15092015-145928/en.php>>. Acesso em: 16 out. 2018.

APÊNDICE A – Propriedades mecânicas

Os desvios relativos adotados para a resistência à compressão foram calculados conforme a NBR 7215, porém o desvio máximo utilizado foi de 8%, para evitar que fossem utilizados somente dois corpos de prova na média. Os resultados desconsiderados estão identificados com um asterisco.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (Mpa)							
24 HORAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
18,1	17,8	9,2	9,9	10,8	11,1	20,3	19,5
17,7		10,1		11,6		18,9	
17,5		10,4		11,0		19,5	
3 DIAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
20,1	20,3	20,5	22,0	20,7	21,7	26,2	25,0
21,4		22,2		17,9*		25,4	
19,4		23,2		22,7		23,5	
7 DIAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
29,6	30,5	22,1	24,0	20,6*	23,5	22,6*	28,9
30,2		21,6*		22,9		28,6	
31,7		25,9		24,0		29,2	

28 DIAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
36,1	35,4	37,5	36,3	30,3	29,1	34,7	35,0
36,4		37,4		27,8		33,8	
33,7		34,0		29,2		36,5	
63 DIAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
36,0	36,9	36,2	37,3	34,9*	44,1*	35,7	35,4
37,7		38,3		46,0*		35,2	
33,3*		32,2*		51,5*		33,1*	

Já para os resultados de resistência à compressão a NBR 7222 não determina nenhum parâmetro. Porém, adotou-se um desvio de 0,3 Mpa, conforme a NBR 13279 estabelece para argamassas no ensaio de resistência à tração na flexão. Os resultados desconsiderados estão identificados com um asterisco.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa)							
24 HORAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
1,96	2,27	1,63	1,59	1,83*	2,43	2,43	2,45
2,35		1,53		2,14		2,47	
2,50		1,61		2,73		2,43	

3 DIAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
2,69	2,78	2,82	2,95	2,47	2,79	3,19	3,11
2,66		2,85		2,95		3,02	
2,98		3,19		2,62		3,12	
7 DIAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
3,47	3,56	3,01	3,24	-	3,43	4,45	4,24
3,68		3,47		3,22		5,04*	
3,54		2,57*		3,64		4,03	
28 DIAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
4,25	4,25	3,45	4,41	4,72	4,38	4,24	4,17
4,24		4,18		5,49		4,09	
3,48		4,63		4,04		4,19	
63 DIAS							
REF		CCA		CCA + FP		FP	
5,65	5,65	5,96	5,79	4,16*	4,92*	5,24	5,09
5,65		5,62		5,67*		4,86	
4,97		5,31		3,91*		5,18	



APÊNDICE B – Absorção de água, índice de vazios e massa específica

ARGAMASSA REF

CP'S	Idade	Ms (g)	Msat (g)	Mi (g)	Absorção (%)	Média	Índice de Vazios (%)	Média	Massa específica da massa seca (ps)	Média	Massa específica da amostra saturada (psat)	Média	Massa específica real (pr)	Média
1	1 dia	410,70	445,48	250,16	8,47	8,70	17,81	18,26	2,10	2,10	2,28	2,28	2,56	2,57
2		404,04	440,16	247,19	8,94		18,72		2,09		2,28		2,58	
3	3 dias	406,84	442,51	247,72	8,77	8,76	18,31	18,31	2,09	2,09	2,27	2,27	2,56	2,56
4		408,89	444,71	249,06	8,76		18,31		2,09		2,27		2,56	
5	7 dias	413,10	446,44	250,3	8,07	8,17	17,00	17,15	2,11	2,10	2,28	2,27	2,54	2,53
6		411,56	445,57	249,04	8,26		17,31		2,09		2,27		2,53	
7	28 dias	408,72	442,81	247,37	8,34	8,37	17,44	17,51	2,09	2,09	2,27	2,27	2,53	2,54
8		403,52	437,41	244,52	8,40		17,57		2,09		2,27		2,54	
9	63 dias	407,81	439,92	246,64	7,87	7,71	16,61	16,27	2,11	2,11	2,28	2,27	2,53	2,52
10		411,29	442,35	247,22	7,55		15,92		2,11		2,27		2,51	

ARGAMASSA CCA

CP'S	Idade	Ms (g)	Msat (g)	Mi (g)	Absorção (%)	Média	Índice de Vazios (%)	Média	Massa específica da massa seca (ps)	Média	Massa específica da amostra saturada (psat)	Média	Massa específica real (pr)	Média
1	1 dia	403,81	441,18	245,49	9,25	9,36	19,10	19,25	2,06	2,06	2,25	2,25	2,55	2,55

2		398,24	435,93	241,66	9,46		19,40		2,05				2,54	
3	3 dias	405,42	443,72	246,76	9,45	9,59	19,45	19,69	2,06	2,05	2,25	2,25	2,56	2,56
4		401,38	440,46	244,47	9,74		19,94		2,05				2,56	
5	7 dias	398,57	434,67	240,22	9,06	8,99	18,57	18,42	2,05	2,05	2,24	2,23	2,52	2,51
6		402,39	438,3	241,86	8,92		18,28		2,05				2,51	
7	28 dias	408,16	445,78	248,15	9,22	9,37	19,04	19,29	2,07	2,06	2,26	2,25	2,55	2,55
8		405,10	443,65	246,37	9,52		19,54		2,05				2,55	
9	63 dias	404,82	438,75	243,67	8,38	8,48	17,39	17,59	2,08	2,08	2,25	2,25	2,51	2,52
10		409,36	444,44	247,17	8,57		17,78		2,08				2,52	

ARGAMASSA CCA + FP

CP'S	Idade	Ms (g)	Msat (g)	Mi (g)	Absorção (%)	Média	Índice de Vazios (%)	Média	Massa específica da massa seca (ps)	Média	Massa específica da amostra saturada (psat)	Média	Massa específica real (pr)	Média
1	1 dia	401,72	446,88	249,51	11,24	11,45	22,88	23,21	2,04	2,03	2,26	2,26	2,64	2,64
2		393,09	438,9	244,33	11,65		23,54		2,02		2,64			
3	3 dias	392,06	437,52	242,25	11,60	11,08	23,28	22,32	2,01	2,01	2,24	2,24	2,62	2,59
4		396,95	438,91	242,55	10,57		21,37		2,02		2,57			
5	7 dias	392,89	430,46	236,78	9,56	9,53	19,40	19,34	2,03	2,03	2,22	2,22	2,52	2,52
6		400,2	438,18	241,16	9,49		19,28		2,03		2,52			
7	28 dias	398,19	442,77	245,62	11,20	10,55	22,61	21,35	2,02	2,02	2,25	2,24	2,61	2,57
8		392,26	431,1	237,7	9,90		20,08		2,03		2,54			
9	63 dias	406,84	441,77	245,03	8,59	8,57	17,75	17,61	2,07	2,06	2,25	2,23	2,51	2,50
10		397,54	431,52	237,04	8,55		17,47		2,04		2,48			

ARGAMASSA FP

CP'S	Idade	Ms (g)	Msat (g)	Mi (g)	Absorção (%)	Média	Índice de Vazios (%)	Média	Massa específica da massa seca (ps)	Média	Massa específica da amostra saturada (psat)	Média	Massa específica real (pr)	Média
1	1 dia	403,37	448,38	251,09	11,16	11,09	22,81	22,74	2,04	2,05	2,27	2,28	2,65	2,65
2		409,02	454,06	255,29	11,01		22,66		2,06		2,28		2,66	
3	3 dias	400,4	444,39	248,58	10,99	10,78	22,47	22,05	2,04	2,05	2,27	2,27	2,64	2,62
4		403,05	445,64	248,75	10,57		21,63		2,05		2,26		2,61	
5	7 dias	400,99	435,64	241,66	8,64	8,67	17,86	17,86	2,07	2,06	2,25	2,24	2,52	2,51
6		397,67	432,23	238,78	8,69		17,87		2,06		2,23		2,50	
7	28 dias	400,52	441,62	248	10,26	10,23	21,23	20,77	2,07	2,03	2,28	2,24	2,63	2,56
8		409,19	450,96	245,23	10,21		20,30		1,99		2,19		2,50	
9	63 dias	414,63	446,49	249,77	7,68	7,90	16,20	16,59	2,11	2,10	2,27	2,27	2,52	2,52
10		413,09	446,61	249,21	8,11		16,98		2,09		2,26		2,52	