

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ISMAEL TONELLO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO À COMPRESSÃO E FLEXÃO EM
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE
CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA DA CASCA DE ARROZ, CINZA VOLANTE E
METACAULIM**

**Alegrete, RS
2017**

ISMAEL TONELLO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO À COMPRESSÃO E FLEXÃO EM
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE
CIMENTO PORTLAND POR SÍLICA DA CASCA DE ARROZ, CINZA VOLANTE E
METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Ederli Marangon

Co-orientador: Marcelo de Jesus Dias de
Oliveira

**Alegrete, RS
2017**

ISMAEL TONELLO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO À COMPRESSÃO E FLEXÃO EM
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE
CIMENTO PORTLAND POR SILICA DE CASCA DE ARROZ, CINZA VOLANTE E
METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29, novembro de 2017.

Banca examinadora:



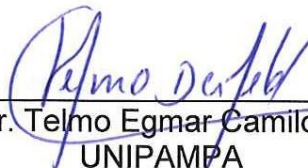
Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Ms. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
Co-orientador
UNIPAMPA



Prof. Msc. Marilia Ferreira Tamiosso
UNIPAMPA



Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha família e as pessoas que sempre confiaram na minha capacidade de chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Reservo meus agradecimentos a meus pais, Neuri Paulinho Tonello e Resinha Luisa Gehrker Tonello, irmãos, Raquel Tonello, Augusto Tonello e cunhada Daiane Aline Kummer, por todo apoio e por acreditarem em meu potencial, acima de tudo.

Ao Professor Dr. Ederli Marangon e ao Ms. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira, pelos ensinamentos no laboratório, apoio desde a escolha do tema deste TCC até o auxílio na conclusão.

A meus amigos, Anderson Lixinski Dalenogare, Fernando Hendges Lopes, Alan Junior Vergutz, Marcos Paulo Lançanova Moreira, Lucas Dellaglio Lopes e Felipe Augusto Klimaczewski pelas horas de estudo e pelas horas de “zoeira”.

A minha namorada Thaiara Acosta Furtado pelo apoio, principalmente nas horas difíceis.

Aos meus amigos e colegas em geral, que, de alguma forma, me auxiliaram a superar as dificuldades e me forneceram apoio.

Aos professores da Engenharia Civil da UNIPAMPA, por todo conhecimento ensinado.

A Pilecco Nobre, Construtora Sotrin, a FIDA e a Termo Elétrica Candiota pelos materiais doados.

“A conquista é um acaso que talvez dependa mais das falhas dos vencidos do que do gênio do vencedor”.

Madame de Staël (1766 – 1817)

RESUMO

Para este estudo, foi realizada a caracterização do comportamento reológico (no estado fresco) e mecânico de argamassas com substituição parcial de cimento Portland por adições minerais de sílica da casca de arroz, metacaulim e cinza volante, e combinações dessas adições minerais, chamadas de blendas. No estudo, foi avaliado o comportamento no estado fresco através do ensaio de espalhamento com o uso da mesa de Consistência (*Flow Table*). Com relação à avaliação das propriedades mecânicas, foram realizados os ensaios de compressão axial e flexão na tração em três pontos. Por fim, foi realizada a simulação numérica das compacidades das misturas para análise dos resultados dessas com as propriedades mecânicas de compressão axial. Para a realização deste trabalho, utilizou-se como referência um traço de argamassa de revestimento de 8 MPa de resistência à compressão axial e fixou-se a relação água/material cimentante. No que se refere ao ensaio reológico no estado fresco através da mesa *Flow Table*, o espalhamento não foi alterado significativamente com o uso das adições minerais, sendo que, para algumas misturas, o espalhamento aumentou, e, para outras, diminuiu. Os melhores resultados em termos de resistência à compressão axial das argamassas foram obtidos para as substituições de 5% de sílica da casca de arroz, e para as blendas contendo 5% de sílica da casca de arroz com 5% de cinza volante ou com 10% de metacaulim. Os dados referentes a compacidade mostram que com o incremento de sílica da casca de arroz, a mesma tende a diminuir e, com o uso de metacaulim, tende a aumentar.

Palavras Chave: Propriedades mecânicas, compacidade, sílica da casca de arroz, cinza volante, metacaulim.

ABSTRACT

For this study, the characterization of rheological (in the fresh state) and mechanical behavior of mortar with partial replacement of Portland cement by mineral additions of rice husk silica, metakaolin and fly ash, and combinations of these mineral additions, called blends, were performed. In the study, the behavior in the fresh state was evaluated through the spreading test using the flow table. With respect to the evaluation of the mechanical properties, the tests of axial compression and flexion in the traction were carried out in three points. Finally, the numerical simulation of the composites of the mixtures was performed to analyze the results of these with the mechanical properties of axial compression. For the accomplishment of this work, a trace of mortar of coating of 8 MPa of resistance to the axial compression was used as reference and the relation water/cementing material was fixed. As for the rheological test in the fresh state through the flow table, the scattering was not significantly altered with the use of the mineral additions, and for some blends the scattering increased and, for others, it decreased. The best results in terms of axial compressive strength of the mortars were obtained for the substitutions of 5% rice husk silica and for the blends containing 5% of rice husk silica with 5% fly ash or with 10% of metakaolin. The data on compactness show that with the increment of rice husk silica, the rice husk silica tends to decrease, and, with the use of metakaolin, it tends to increase.

Keywords: mechanical properties, compactness, husk rice silica, ash flow, metakaolin.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

AG – Areia Grossa

AM – Areia Média

AF – Areia Fina

Fi – Fíler Calcário

Cim – Cimento Portland CP II-F

Cal – Cal Hidráulica

CV – Cinza Volante

SCA – Sílica da Casca de Arroz

MC - Metacaulim

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Concreto sem grande controle granulométrico, e com controle granulométrico.....	21
Figura 2 – Resistência à compressão de argamassas contendo metacaulim e sílica ativa.....	23
Figura 3 – Etapas dos ensaios de granulometria: a) quarteamento dos materiais; b) conjunto de peneiras utilizados; c) material sobre a peneira de maior abertura; d) frações retidas em algumas peneiras.....	25
Figura 4 – Determinação da massa específica dos agregados miúdos (a) pesagem do material; (b) frasco com 200ml de água; (c) secagem das paredes internas do frasco; (d) imagem do frasco com a água deslocada	28
Figura 5 – Etapas de ensaio de massa específica dos materiais finos	29
Figura 6 – Mistura da argamassa (a) misturador mecânico, (b) água com os aglomerantes e (c) adição das areias.....	32
Figura 7 – Etapas do ensaio de espalhamento	33
Figura 8 – Etapas do ensaio: a) vibrador mecânico e moldes; b) detalhe da argamassa dentro do molde; c) argamassa já moldada.....	34
Figura 9 – Etapas do ensaio: a) Ensaio de compressão simples; b) Ensaio de tração na flexão em três pontos	35
Figura 10 – Estado de compactação dos agregados: a) cilindro metálico e pistão; b) posição no início do ensaio; c) posição no final do ensaio	36
Figura 11 – Aferição da altura deslocada pelo pistão.....	36
Figura 12 – Estado de demanda de água	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Composição granulométrica dos agregados miúdos	26
Gráfico 2 – Composição granulométrica dos materiais finos.....	27
Gráfico 3 – Evolução das resistências à Compressão axial dos traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por sílica da casca de arroz (SCA)..	40
Gráfico 4 – Evolução da resistência à compressão axial dos traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes percentagens de CV... ..	41
Gráfico 5 – Evolução da resistência à compressão axial dos traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes percentagens de MC	42
Gráfico 6 – Evolução da resistência à compressão axial dos traços com melhores resultados obtidos entre a SCA e SCA com substituição de CV e MC.....	43
Gráfico 7 – Evolução da resistência à tração na flexão em 3 pontos dos traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por sílica da casca de arroz (SCA)..	45
Gráfico 8 – Evolução da resistência à tração na flexão em 3 pontos para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes percentagens de CV.....	46
Gráfico 9 – Evolução da resistência à tração na flexão em 3 pontos para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes percentagens de MC	47
Gráfico 10 – Evolução da resistência à tração na flexão em 3 pontos para os traços com melhores resultados obtidos entre a SCA e SCA com substituição de CV e MC.. ..	48
Gráfico 11 – Relação das compacidades e das resistências à compressão axial para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por sílica da casca de arroz (SCA)	51
Gráfico 12 – Relação das compacidades e das resistências a compressão axial para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes percentagens de CV	52
Gráfico 13 – Relação das compacidades e das resistências à compressão axial para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes percentagens de MC	53

Gráfico 14 – Compacidades dos traços com as quantidades de SCA54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência à compressão axial e tração na flexão em 3 pontos de argamassas contendo SCA.....	24
Tabela 2 – Massas específicas dos agregados.....	28
Tabela 3 – Massas específicas obtidas e calculadas para os materiais em pó.....	29
Tabela 4 – Proporção de cada pozolana para cada traço.....	31
Tabela 5 – Quantidade dos materiais para cada traço em gramas.....	31
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de consistência (<i>Flow Table</i>).....	39
Tabela 7 – Resultados no ensaio de compressão axial para todos os traços.....	44
Tabela 8 – Resultados no ensaio de tração na flexão em 3 pontos para todos os traços.....	49
Tabela 9 – Resultados dos ensaios experimentais de compacidade dos agregados miúdos.....	50
Tabela 10 – Resultados dos ensaios experimentais de compacidade dos aglomerantes.....	50

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos específicos	17
2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1. Adições Minerais	18
2.1.1. Sílica da Casca de Arroz	19
2.1.2. Cinza Volante	19
2.1.3. Metacaulim	20
2.2. Influência das Adições Minerais no Comportamento Reológico	21
2.3. Mesa de Consistência	21
2.4. Comportamento Mecânico	22
2.5. Comportamento das Argamassas de Revestimento	23
3. METODOLOGIA	25
3.1. Ensaio de caracterização dos materiais	25
3.1.1. Ensaio de composição Granulométrica dos Agregados Miúdos	25
3.1.2. Ensaio de composição Granulométrica dos materiais finos	26
3.1.3. Determinação das massas específicas dos agregados miúdos.....	27
3.1.4. Determinação das massas específicas dos materiais finos	28
3.2. Procedimento de Mistura e de Ensaio na Argamassa	30
3.2.1. Mistura das argamassas	32
3.2.2. Ensaio na Mesa de Consistência	33
3.2.3. Determinação da Resistência à Tração na Flexão e à Compressão	33
3.2.4. Determinação da Compacidade Experimental	35
3.2.4.1. Agregados Maiores que 100 µm.....	35
3.2.4.2. Partículas Finas com Dimensões Inferiores a 100 µm	37
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	39
4.1. Ensaio de Consistência (Flow Table)	39
4.2. Resistência à Compressão Axial	40
4.3. Resistência à Tração na Flexão em 3 Pontos	45
4.4. Relação da Compacidade dos Materiais/Misturas com a Resistência Mecânica à Compressão Axial aos 28 Dias	50
5. CONCLUSÕES	55
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	56
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

O processo de produção do cimento Portland, além de ser um grande consumidor dos recursos naturais do planeta, é responsável por consumir enorme quantidade de energia e emitir para a atmosfera cerca de 5% a 8% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂) (SCRIVENER, 2007). Com isso, a busca por recursos que diminuam essa emissão de carbono tornou-se significativa em muitos países, com o intuito de garantir que os recursos naturais não sejam afetados para as gerações futuras. Assim, como alternativa que minimize o consumo elevado de cimento e conseqüente diminuição das emissões de CO₂, envolve a substituição parcial do cimento Portland por adições minerais, as quais aparentam apresentar viabilidades técnicas e econômicas.

Nesse contexto, há necessidade de obter maior produtividade nos canteiros de obras, aliada as exigências do mercado e diminuição no custo final. Assim, torna-se cada vez mais importante a busca por formas eficientes e sustentáveis de melhorar as propriedades das argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Ainda que os requisitos essenciais para a produção de argamassas sejam as propriedades no estado endurecido, principalmente as mecânicas, o estudo da argamassa no estado fresco é essencial, já que este é o seu estado de aplicação, que pode apresentar melhoras significativas no estado endurecido.

Estudos demonstram que as propriedades mecânicas das argamassas apresentam melhoras com o uso da substituição parcial do cimento Portland por sílica da casca de arroz, cinza volante e de metacaulim, entre outras adições minerais.

No que tange as propriedades mecânicas, relacionadas à flexão e à compressão das argamassas com adições minerais de sílica da casca de arroz, cinza volante, e metacaulim, as mesmas são alteradas de acordo com a porcentagem de substituição. Adicionalmente, a temperatura de queima e a granulometria das adições minerais também proporcionam comportamentos variados, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Sendo assim, este estudo permitirá avaliar as possíveis melhorias dessas propriedades e o comportamento das deformações no estado endurecido, influenciadas por essas diferentes adições.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência das adições minerais de sílica da casca de arroz, cinza volante e metacaulim em substituição parcial do cimento Portland no comportamento mecânico de argamassas de revestimento no estado endurecido.

1.1.2. Objetivos específicos

1 – Avaliar a influência das adições minerais no estado fresco, através do ensaio de espalhamento (*Flow Table*).

2 – Verificar a influência das adições minerais nas argamassas por meio de ensaios de compressão axial.

3 – Analisar a influência das adições minerais nas argamassas através de ensaios de tração na flexão em 3 pontos.

4 – Comparar a compactação das misturas com os resultados dos ensaios mecânicos de compressão axial aos 28 dias de idade.

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Adições Minerais

Adições minerais são materiais com propriedades cimentantes (ou pozolânicas), que são adicionadas antes ou durante a mistura, em concretos em quantidades variáveis em relação à massa de cimento. Podem ser utilizadas de duas formas distintas: como substituição parcial do cimento ou como adição em teores variáveis em relação à massa ou volume do cimento (SILVEIRA, 1996).

As adições podem ser classificadas em tipo I e tipo II, de acordo com sua reatividade. As adições do tipo I são inertes e promovem uma ação física, aumentando a compacidade da mistura. São representadas pelos fílers calcários e quartzos moídos, entre outros. A classificação do tipo II, são para adições reativas e tem como representante a cinza de casca de arroz, cinza volante, metacaulim escória de alto forno e o fumo de sílica (microsílica). As adições do tipo II contribuem para a formação de hidratos sendo empregadas em substituição ao cimento (MARANGON, 2006).

De acordo com Dal Molin (2011, p. 261-309), o efeito químico das adições minerais está aliado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , formado durante a hidratação do cimento Portland, para os silicatos de cálcio hidratado adicionais (C-S-H), serem formados. Estes silicatos formados tendem a preencher os vazios capilares, aumentando a resistência da argamassa.

Segundo Guedert (1989), a adição de pozolanas ao cimento interfere em algumas características fundamentais como:

- Maior resistência mecânica em idades mais avançadas (resistências iniciais ligadas a fatores físicos e mais avançadas, a fatores químicos);
- Menor calor de hidratação;
- Maior trabalhabilidade (melhor arranjo e volume do aglomerante);
- Maior resistência ao ataque de ácidos, acarretando em uma maior durabilidade em ambientes agressivos (compostos de menor relação CaO/SiO_2);
- Inibição da expansão devida à reação álcali-agregado;
- Maior impermeabilidade (preenchimentos dos poros da pasta);
- Maior módulo de elasticidade;

- Melhor comportamento na cura térmica;
- Basicidade mais baixa (maior risco de corrosão, porém compensado pela maior impermeabilidade).

2.1.1. Sílica da Casca de Arroz

A casca de arroz quando queimada em temperatura controlada, deixa de ser um resíduo e passa a ser um material amorfo, denominado sílica da casca de arroz (SCA), com características pozolânicas. A combustão em leito fluidizado tem como resultado, uma sílica da casca de arroz de alta qualidade e homogeneidade, o que possibilita a sua utilização como adição ou substituição parcial do cimento Portland em dosagens de concretos e argamassas (MARANGON, 2013).

Gomes (2013) cita que a microporosidade e a elevada área superficial das partículas da sílica da casca de arroz contribuem para a sua alta atividade pozolânica. A utilização como adição mineral tem como grande vantagem técnica a redução da permeabilidade do concreto e da argamassa.

2.1.2. Cinza Volante

As cinzas volantes, inicialmente, foram utilizadas como uma substituição parcial de cimento, um componente dispendioso do concreto. Com o passar do tempo, sua utilização foi se generalizando e também foram se evidenciando as vantagens do emprego deste componente, tendo sido verificada a melhoria de certas propriedades do concreto (AZEVEDO, 2002).

A cinza volante é um material inorgânico, com boas propriedades pozolânicas, características físicas como: distribuição granulométrica, forma, finura, densidade e composição química, que pode ser acrescentado na argamassa para melhorar suas propriedades tanto no estado fresco quanto no endurecido. Sua forma quase esférica proporciona a rolagem dos agregados, diminuindo o atrito interno entre eles e destes com as partículas de cimento, resultando em maior fluidez e viscosidade (MARANGON, 2006).

Mehta (1987) afirma que na maioria das aplicações, o objetivo do uso de cinzas volantes no concreto está relacionado a um ou mais dos seguintes benefícios:

- Redução da quantidade de cimento, visando reduzir custos;

- Reduzir o calor de hidratação;
- Melhorar a trabalhabilidade;
- Atender a níveis de resistência, requeridos pelo concreto, em idades acima de 90 dias.

Partículas com dimensões superiores a 125 μ m são muito porosas e a ocorrência destas partículas está associada a grandes quantidades de carbono. Este material não queimado é responsável pelo elevado valor da superfície específica verificado na maioria das cinzas volantes. Como consequência, elevados teores de carbono implicam maior exigência de água em concretos contendo cinzas volantes, influenciando diretamente na resistência do concreto (ALONSO; WESCHE, 1991 *apud* AZEVEDO, 2002).

2.1.3. Metacaulim

O metacaulim é, em geral, utilizado como adição ao cimento Portland em concretos e argamassas. Com isso, é importante que o metacaulim seja produzido em ampla escala, para proporcionar seu uso como adição nas obras em geral, mantendo o nível de qualidade e homogeneidade, e dentro dos parâmetros estipulados por norma ou especificação técnica do usuário (NETTO, 2006).

No processo de moagem, quando este reduz o tamanho das partículas a valores inferiores a 5 μ m, é constatado como uma excelente atividade pozolânica, sendo denominado por alguns autores como metacaulim de alta reatividade (SOUZA e DAL MOLIN, 2002). Entretanto, segundo Palomo *et al.* (1999) *apud* Cordeiro (2001), o uso deste material não é tão comum devido ao alto custo relativo de processamento deste aditivo.

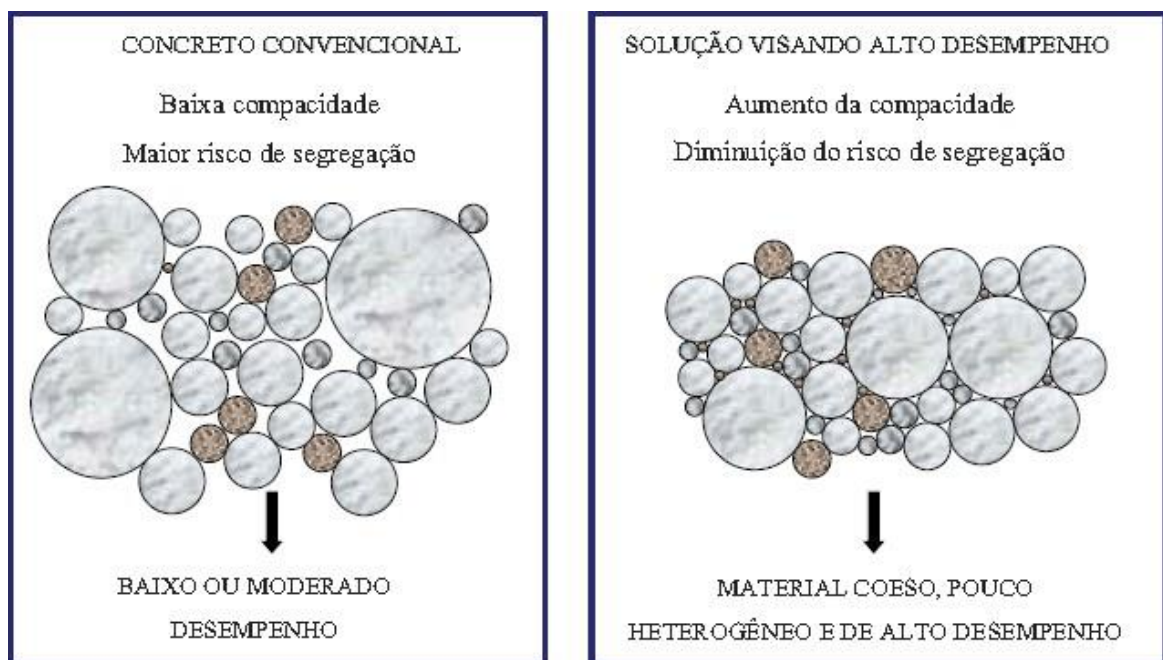
Dessa forma, esse material pozolânico é predominantemente amorfo e com a presença do cimento Portland, mais especificamente do clínquer, leva à formação de outros compostos mais estáveis e mais resistentes mecânica e quimicamente. O efeito pozolânico é maior, quanto melhor for sua qualidade e finura, entretanto as características dos outros componentes da mistura, em especial do cimento Portland, também têm grande influência na eficácia do metacaulim (ROCHA, 2005).

2.2. Influência das Adições Minerais no Comportamento Reológico

O comportamento reológico pode ser afetado de várias maneiras em misturas cimentícias, pode-se citar: distribuição granulométrica dos materiais, empacotamento das partículas, volume de sólidos, densidade das partículas e porosidade.

Na dosagem de argamassas, a distribuição granulométrica possui grande influência sobre o empacotamento de partículas, já que dois materiais de diâmetros diferentes tendem a diminuir os vazios deixados pelo outro. Destaca-se ainda, que em misturas de alta compactidade, há um ganho na resistência e uma menor porosidade, as quais são características preponderantes em argamassas de revestimento. Observa-se na Figura 1 a diferença de dois concretos, sendo um dosado de forma convencional e o outro sendo uma solução visando alto desempenho de compactação dos constituintes.

Figura 1 – Concreto sem grande controle granulométrico, e com controle granulométrico



Fonte: Formagini (2005, p. 8)

2.3. Propriedades Reológicas no Estado Fresco

A consistência está associada a capacidade de deformação da argamassa sob a ação de cargas. É influenciada pela quantidade de água na mistura. Argamassas de

consistência mais fluidas apresentam menor tensão de escoamento (CARASEK, 2010).

De acordo com Rago e Cincotto (1999), a consistência é uma propriedade que efetivamente caracteriza a trabalhabilidade e é influenciada pelo teor de água, teor de ar incorporado e pelo processo da mistura.

Um estudo realizado por Gomes (2016) mostrou que os resultados obtidos com o ensaio de espalhamento não foram significativos, quando se adicionou e substituiu 5, 8 e 10% de sílica da casca de arroz por cimento Portland, mostrando que sua adição pode ser realizada sem que a argamassa sofra perdas consideráveis de trabalhabilidade e consistência.

2.4. Comportamento Mecânico

O uso de adições minerais, principalmente a adição de pozolanas mais ativas ao concreto (sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz), resultam numa melhora notável na sua resistência à compressão. A resistência mecânica dos concretos com adições minerais aumenta, pois está diretamente aliado com o aumento da resistência da matriz na zona de transição, devido ao processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento (GOMES, 2013).

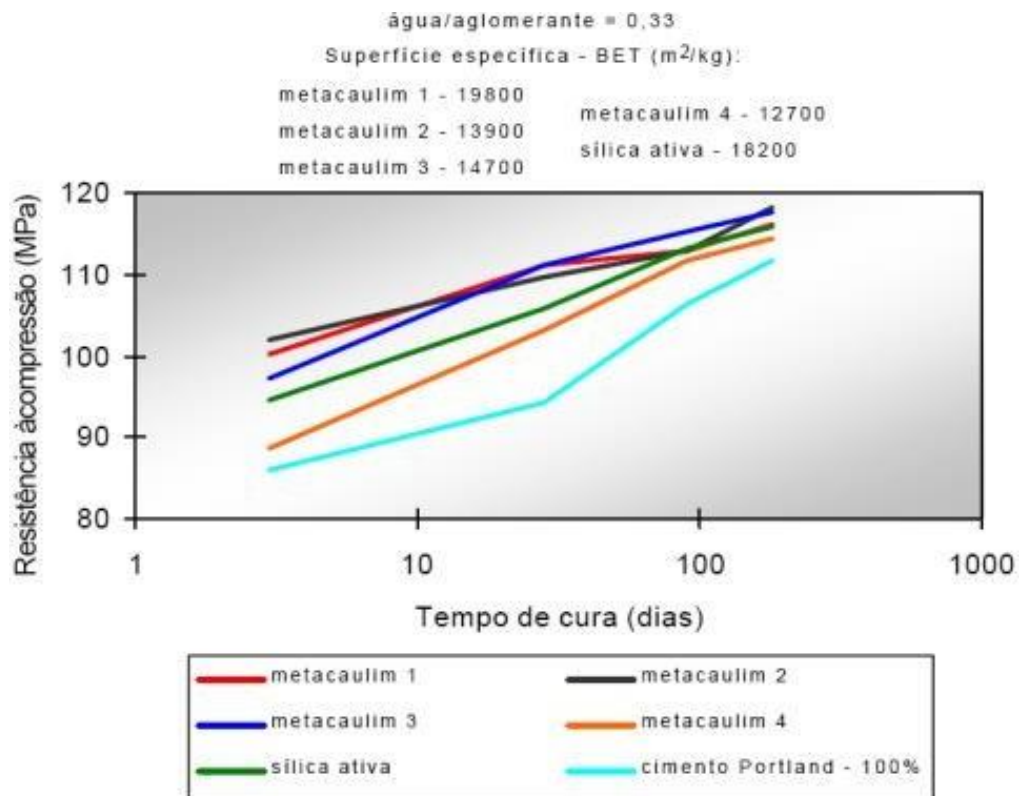
Segundo Gomes (2013), aos 7 dias, a resistência à compressão nos concretos com adição de pozolanas é inferior ao sem adição, justificado pelo fato da reação de hidratação das pozolanas ainda não ser suficiente para afetar a resistência. Entretanto, aos 28 dias, misturas contendo 10% de pozolanas já apresentam resistências superiores.

De um modo geral, as cinzas volantes apresentam características mecânicas muito baixas nas primeiras idades. No entanto, quando se trata de idades mais avançadas, os concretos com cinzas volantes podem apresentar resistências mecânicas semelhantes ou superiores às determinadas em concretos sem adição de cinzas. Pelo fato da reação pozolânica ser lenta, mas prolongada, constata-se uma recuperação dos níveis de resistência nos concretos com cinzas ao longo do tempo. A incorporação de cinzas permite reduzir a relação água/aglomerante e, conseqüentemente, potencializar a capacidade resistente (AZEVEDO, 2002).

Estudos realizados por Curcio *et al.* (1998) *apud* Cordeiro (2001) em argamassas de alto desempenho, com quatro diferentes tipos de metacaulim, além

de sílica ativa, em substituição parcial de 15% da massa de cimento, mostram a influência da finura dos grãos do aditivo na resistência à compressão. O estudo mostra (Figura 2) que para idades iniciais, as argamassas com maior superfície de contato (1, 2 e 3) de metacaulim, influenciaram na resistência mecânica, comparando com as argamassas de referência e com sílica ativa. Entretanto, tal fato não pode ser observado em idades superiores, onde as resistências das argamassas apresentam valores similares.

Figura 2 – Resistência à compressão de argamassas contendo metacaulim e sílica ativa



Fonte: Curcio et al. (1998) apud Cordeiro (2001)

2.5. Comportamento das Argamassas de Revestimento

Argamassas de revestimento, segundo Sabbatini (2000), encontram-se submetidas as seguintes solicitações, no que se refere ao estado endurecido: (a) movimentação volumétrica da base, por umedecimento e secagem, provocados por agentes externos; (b) deformação da base, devida a deformação lenta do concreto da estrutura e recalques das fundações; (c) movimentação do revestimento por variação

de temperatura, que provocam sua dilatação e contração; (d) retração do revestimento devida a diminuição de volume por perda de água para a base, por evaporação e pelas reações de hidratação do cimento.

Sabbatini (2000) ainda comenta que as argamassas endurecidas devem manifestar capacidade de acomodar a deformação provocada pelos esforços externos e internos, e de voltar a dimensão original quando mais nenhum esforço estiver agindo, ou quando fissuras microscópicas surgem, mas não comprometem o desempenho do revestimento, a respeito da aderência, durabilidade e estanqueidade.

A capacidade de deformação da argamassa endurecida e a durabilidade da aderência são propriedades intrinsecamente relacionadas (CARASEK, 1996). Movimentos de retração hidráulica e térmica podem gerar tensões internas de tração na argamassa, assim como ações extrínsecas. Sendo essas tensões superiores ao seu limite de resistência à tração, elas produzirão fissuras.

3. METODOLOGIA

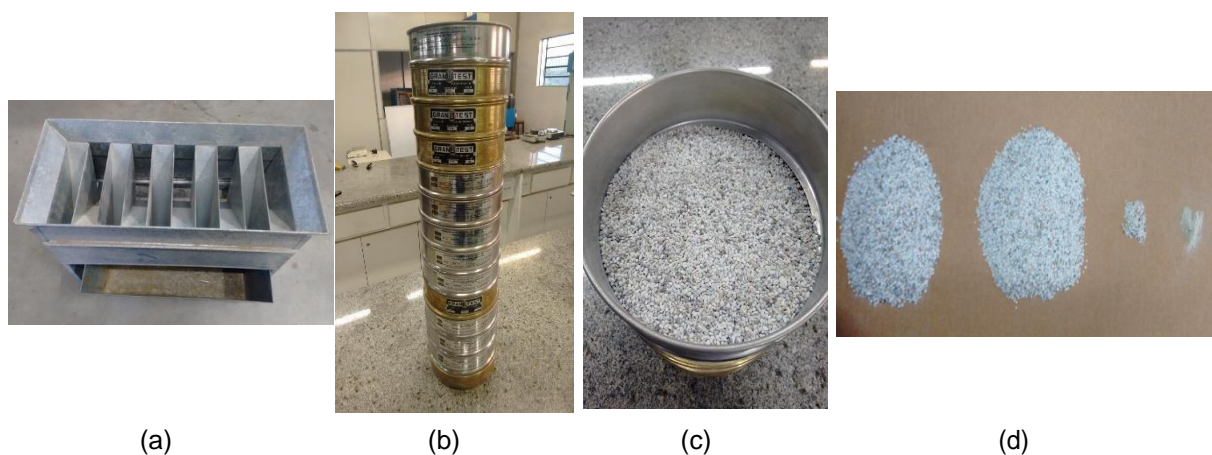
3.1. Ensaios de caracterização dos materiais

3.1.1. Ensaio de composição Granulométrica dos Agregados Miúdos

A composição granulométrica de uma amostra de material é fundamental para estudar o empacotamento das misturas nas quais estes materiais serão empregados, e essa propriedade influencia diretamente nas propriedades das argamassas, tanto no estado fresco como no endurecido. Dessa forma, a composição granulométrica dos agregados miúdos foi obtida conforme a ABNT NBR NM 248/03 com a utilização das peneiras da série normal e da série intermediária, disponíveis no laboratório de Materiais de Construção Civil e podem ser visualizadas no Gráfico 1.

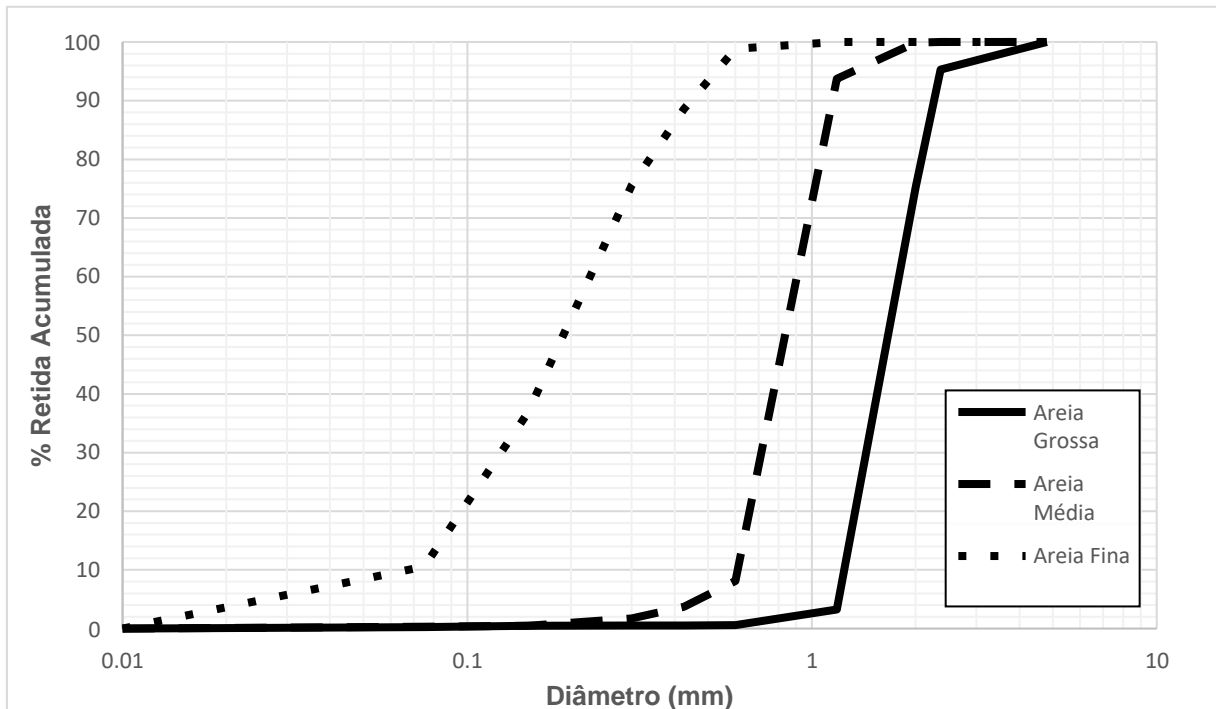
Na Figura 3 constam as imagens das etapas executivas deste ensaio, onde, na Figura 4 (a) mostra-se o equipamento para quartear os materiais para ensaio em laboratório (de acordo ANBT NBR NM 27/01) necessário para a obtenção de uma amostra representativa para a execução do ensaio. Na Figura 3 (b e c) são mostradas, respectivamente, o conjunto de peneiras utilizado. Por fim, na Figura 4 (d) é ilustrada uma imagem de algumas frações típicas retidas nas peneiras.

Figura 3 – Etapas dos ensaios de granulometria: a) quartejamento dos materias; b) conjunto de peneiras utilizados; c) material sobre a peneira de maior abertura; d) frações retidas em algumas peneiras



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 1 – Composição granulométrica dos agregados miúdos

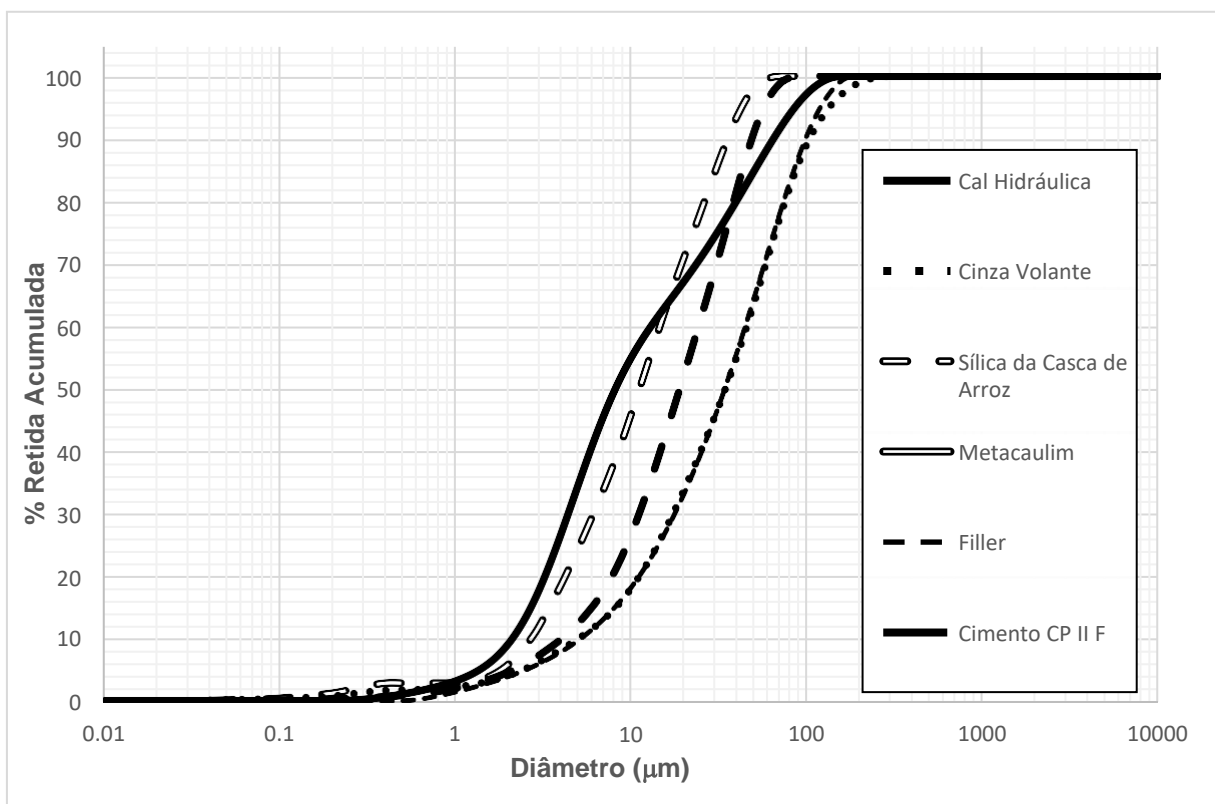


Fonte: Elaboração própria

3.1.2. Ensaio de composição Granulométrica dos materiais finos

As granulometrias dos materiais finos como cimento, cal, fíller, sílica de casca de arroz, cinza volante e metacaulim, foram obtidas através da difração de raios laser, a qual foi realizada no laboratório da UNIPAMPA, campus Uruguiana e pode ser visualizada no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Composição granulométrica dos materiais finos

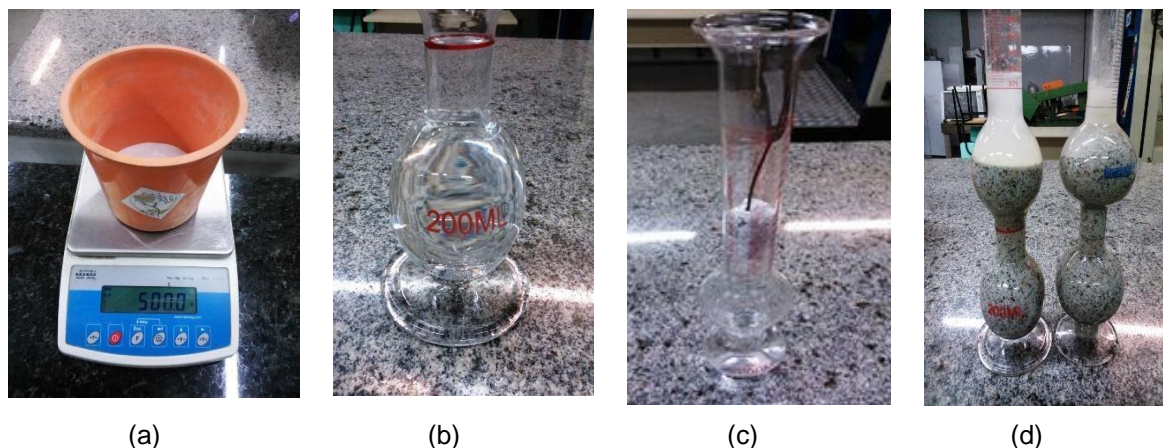


Fonte: Elaboração própria

3.1.3. Determinação das massas específicas dos agregados miúdos

As massas específicas dos agregados miúdos foram determinadas através da ABNT NBR 9776/87 e na Figura 4 estão ilustrados os principais procedimentos realizados. Para a execução do ensaio, (a) pesa-se 500g de material e (b) preenche-se o frasco Chapman até a marca de 200ml com água, logo, (c) utiliza-se um pano para a secagem das paredes internas do frasco de forma que o material que será despejado não contenha grãos aderidos, seguindo as recomendações do item 6 da norma. Coloca-se 500g de agregado miúdo seco no qual foi devidamente agitado para a eliminação das bolhas de ar. A leitura (d) é feita no nível atingido pela água em dm^3 . O ensaio foi realizado com temperatura controlada, mesmo que a norma vigente não exija tal controle.

Figura 4 – Determinação das massas específicas dos agregados miúdos (a) pesagem do material; (b) frasco com 200ml de água; (c) secagem das paredes internas do frasco; (d) imagem do frasco com a água deslocada



Fonte: Elaboração própria

Além disso, o item 7.2 da ABNT NBR 9776/87, norma que regulamenta este ensaio prescreve que dois ensaios sucessivos não devem divergir de $0,05\text{g/cm}^3$. Satisfazendo esta condição, não serão necessários mais ensaios para a determinação das massas específicas. Na Tabela 2 é possível visualizar os resultados obtidos com o respectivo ensaio, com as leituras iniciais todas iguais a 200ml.

Tabela 2 – Massas específicas dos agregados

Material	Areia Grossa		Areia Média		Areia Fina	
lf (cm^3)	377,5	378,5	379,5	380	377	377
γ (g/cm^3)	2,80	2,81	2,78	2,78	2,83	2,82
γ média (g/cm^3)	2,80		2,78		2,82	

Fonte: Elaboração própria

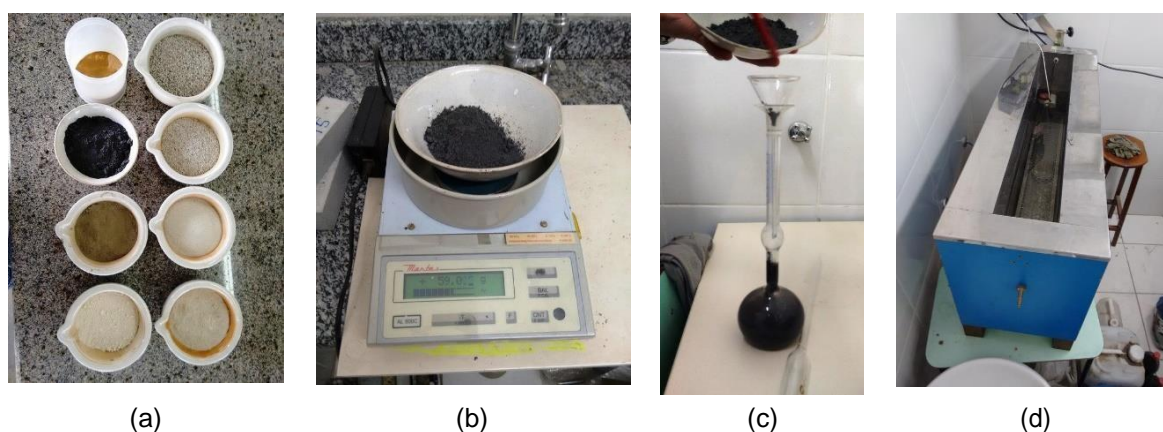
3.1.4. Determinação das massas específicas dos materiais finos

Os ensaios para determinação da massa específica do cimento Portland CII-F, cal hidráulica, filler calcário, sílica da casca de arroz, cinza volante e do metacaulim, foram realizados conforme a ABNT NBR NM 23/01, a qual recomenda a utilização de um material que não reaja com os mesmos. Nesta pesquisa, utilizou-se o querosene como fluido inerte, no qual serviu para o preenchimento dos vazios dos materiais.

Cabe ressaltar que os frascos de *Le Chatelier* com querosene foram imersos em água, a qual estava com temperatura controlada de 20°C, por um período de aproximadamente 30 minutos antes da realização do ensaio, procedimento que proporciona estabilizar a temperatura do querosene.

Na Figura 5 consta as etapas do ensaio, consistindo (a) na separação dos materiais, (b) na pesagem dos materiais, (c) na colocação dos pós no frasco, (d) inserir o conjunto no tanque com temperatura controlada, para realizar a leitura do volume de fluido deslocado.

Figura 5 – Etapas de ensaio de massa específica dos materiais finos



Fonte: Elaboração própria

Ademais, consta no item 8.1 da ABNT NBR NM 23/01 que dois ensaios da mesma matéria, executados pelo mesmo operador, não devem apresentar divergência superior a 0,01 g/cm³. Em virtude dessa informação, aqueles materiais cujas divergências não forem compatíveis, novos ensaios foram realizados até que se obtivesse o atendimento desta prescrição normativa. Na Tabela 3 constam os resultados obtidos com a realização do respectivo ensaio.

Tabela 3 – Massas específicas obtidas e calculadas para os materiais em pó

Material	Média das Massas Específicas (g/cm ³)
Cimento	2,97
Sílica	2,09
Cal Hidráulica	2,53
Fíller Calcário	2,87
Cinza Volante	1,98
Metacaulim	2,60

Fonte: Elaboração própria

3.2. Procedimento de Mistura e de Ensaios na Argamassa

Para a execução desse trabalho, foi utilizado um traço de referência com aproximadamente 8 MPa, sem a utilização de pozolanas, para após serem realizadas as substituições de cimento Portland por sílica da casca do arroz, cinza volante e metacaulim, e uma posterior análise dos dados.

Para isso, foram utilizados os seguintes materiais:

- Areia Fina Calcária (AF);
- Areia Média (AM);
- Areia Grossa (AG);
- Fíller Calcário (Fi);
- Cal Hidráulica (Cal);
- Cimento CP II – F 32 (Cim);
- Sílica de Casca de Arroz (SCA);
- Cinza volante (CV);
- Metacaulim (MC);

As porcentagens de substituição parcial em massa, para os três tipos de pozolanas que foram utilizadas, juntamente com a nomenclatura dos traços, encontram-se na Tabela 4 e na Tabela 5 as proporções de cada tipo de material.

Tabela 4 – Proporção de cada pozolana para cada traço

Traço	Cim (%)	SCA (%)	CV (%)	MC (%)
Ref	100	-	-	-
SCA5	95	5	-	-
SCA10	90	10	-	-
SCA15	85	15	-	-
SCA20	80	20	-	-
SCA30	70	30	-	-
SCA5CV5	90	5	5	-
SCA5CV10	85	5	10	-
SCA5CV15	80	5	15	-
SCA5MC5	90	5	-	5
SCA5MC10	85	5	-	10
SCA5MC15	80	5	-	15

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 5 – Quantidade dos materiais para cada traço em gramas

Traço	AG	AM	AF	Fi	Cal	Cim	SCA	CV	MC
Ref	120	190	340	110	120	120	-	-	-
SCA5	120	190	340	110	120	114	6	-	-
SCA10	120	190	340	110	120	108	12	-	-
SCA15	120	190	340	110	120	102	18	-	-
SCA20	120	190	340	110	120	96	24	-	-
SCA30	120	190	340	110	120	84	36	-	-
SCA5CV5	120	190	340	110	120	108	6	6	-
SCA5CV10	120	190	340	110	120	102	6	12	-
SCA5CV15	120	190	340	110	120	96	6	18	-
SCA5MC5	120	190	340	110	120	108	6	-	6
SCA5MC10	120	190	340	110	120	102	6	-	12
SCA5MC15	120	190	340	110	120	96	6	-	18

Fonte: Elaboração própria

Cabe ressaltar que para a execução desse trabalho, foi mantida a relação de água/material cimentante (0,71), já que se a quantidade de água não for a mesma para as diferentes misturas, os dados seriam de difícil análise com relação aos comportamentos de flexão e compressão.

3.2.1. Mistura das argamassas

A mistura dos componentes da argamassa seguiu o método descrito pela NBR 7215/1996, utilizando um misturador mecânico de seis velocidades (Figura 6), cuba de aço inoxidável com capacidade aproximadamente de 10 litros, com pá de metal que gira em torno de si mesma e, em movimento planetário, em torno do eixo da cuba, movimentos estes em sentidos opostos. A balança que foi utilizada, tem resolução de 0,1g.

Após a pesagem dos materiais, os mesmos foram inseridos na cuba. Primeiramente coloca-se toda a quantidade de água e em seguida os materiais finos, aciona-se o misturador mecânico na velocidade 1 (um) e o cronômetro, simultaneamente. Depois de transcorrido 30 segundos as areias serão inseridas, sem parar o misturador, em seguida, quando o cronômetro marcar 1 (um) minuto, a velocidade é alterada para a 3 (três). Com 1 (um) minuto e trinta (30) segundos o misturador é desligado e durante 15 (quinze) segundos é feita a raspagem do material aderido à borda interna da cuba e em seguida, a cuba é coberta por um pano úmido até completar 3 (três) minutos, quando o misturador será acionado novamente, na velocidade 3 (três), até fechar os 4 (quatro) minutos de mistura.

Figura 6 – Mistura da argamassa (a) misturador mecânico, (b) água com os aglomerantes e (c) adição das areias



(a)

(b)

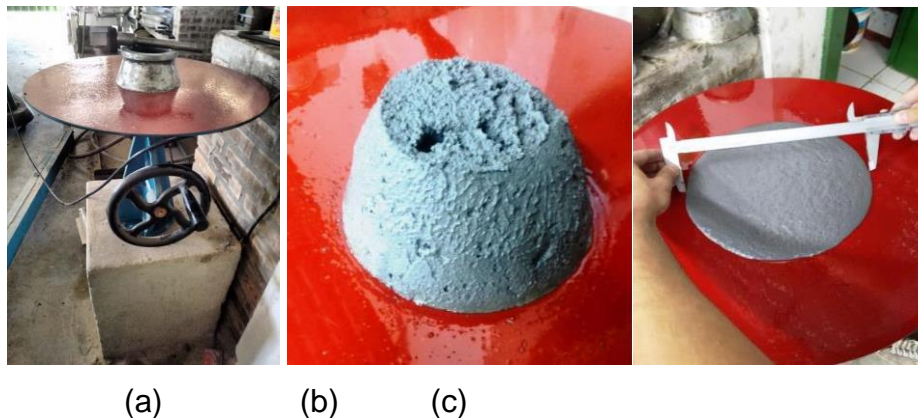
(c)

Fonte: Elaboração própria

3.2.2. Ensaio na Mesa de Consistência

A Mesa de Consistência (*Flow Table*), Figura 7 (a) é constituída por uma chapa de metal não corrosivo, horizontal, lisa e plana com uma haste fixada á seu centro na qual recebe, por meio de uma guia, um movimento vertical ascendente. Para a execução do ensaio, molda-se os corpos de prova segundo o item 3.5.1.1 da norma NBR 7215/1996. O procedimento (Figura 7), segundo a NBR 13276 2016, consiste em centralizar um aparelho de metal com sua base maior apoiada na mesa. Enche-se o tronco de cone com argamassa em três camadas de mesma altura aplicando uma sequência de 15, 10 e 5 golpes uniformemente distribuídos na primeira, segunda e terceira camadas, respectivamente. Ao completar esta operação, Figura 7 (b) deve-se rasar a parte superior do molde e depois tirá-lo, levantando-o verticalmente para cima tomando cuidado para não causar desmoronamento nas laterais do cone e em seguida, gira-se a manivela da mesa e provoca-se 30 golpes em 30 segundos. Para a medida do espalhamento, Figura 7 (c), utiliza-se um paquímetro. Segundo a norma, o índice de consistência da argamassa é a média entre dois diâmetros ortogonais obedecendo a variação de 250 ± 5 mm.

Figura 7 – Etapas do ensaio de espalhamento



Fonte: Elaboração própria

3.2.3. Determinação da Resistência à Compressão e à Tração na Flexão

Após a preparação das amostras, a argamassa foi inserida nos moldes prismáticos metálicos em duas partes iguais levando-os a mesa de vibração por tempo padrão de 30 segundos, segundo a ABNT NBR 13279/2005, onde foram moldados 3

(três) corpos de prova de (40 x 40 x 160) mm, para cada idade de cura, por traço. As etapas das moldagens são visualizadas na Figura 8.

Figura 8 – Etapas do ensaio: a) vibrador mecânico e moldes; b) detalhe da argamassa dentro do molde; c) argamassa já moldada



(a)



(b)

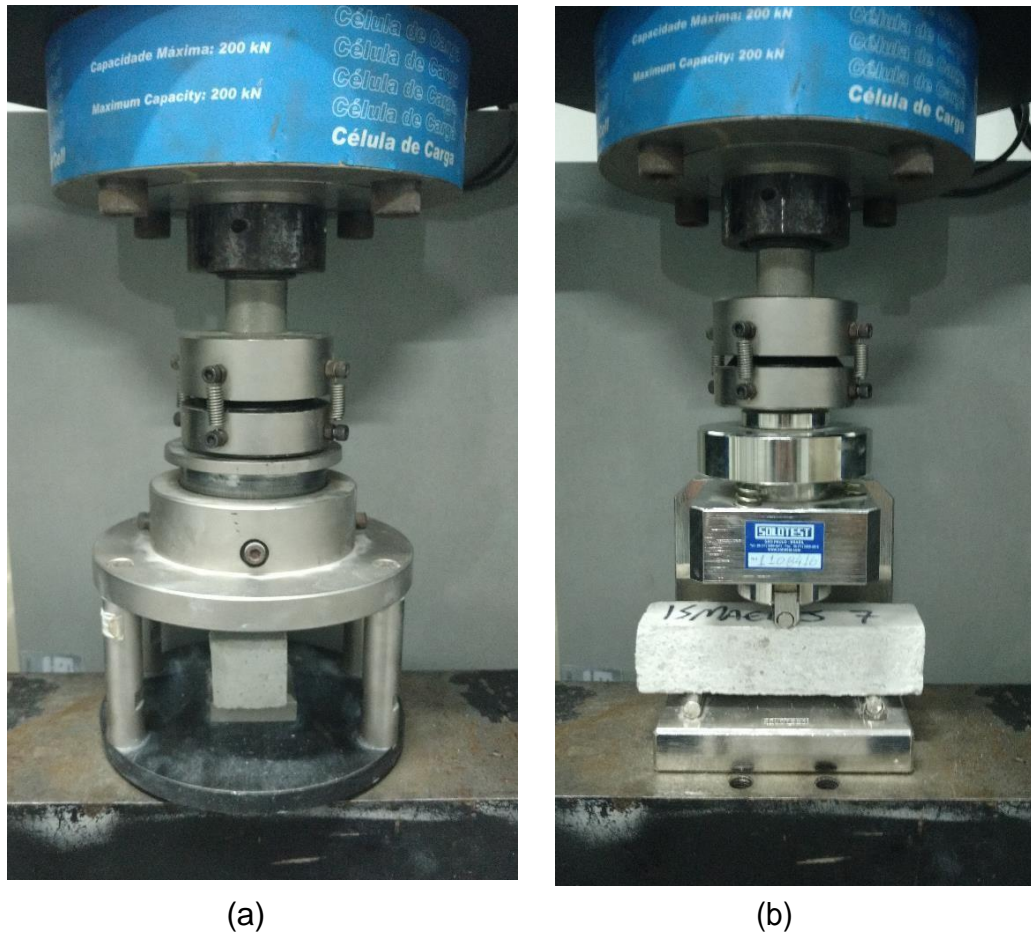


(c)

Fonte: Elaboração própria

Com o processo de moldagem pronto, os corpos de prova aguardaram as idades de 3, 7 e 28 dias até serem ensaiados na prensa EMIC DL 20000 com velocidade de 1mm/min e as etapas dos ensaios podem ser visualizadas na Figura 9.

Figura 9 – Etapas do ensaio: a) Ensaio de compressão simples; b) Ensaio de tração na flexão em três pontos



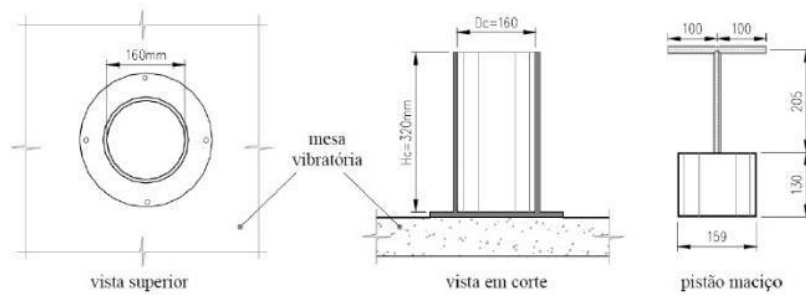
Fonte: Elaboração própria

3.2.4. Determinação da Compacidade Experimental

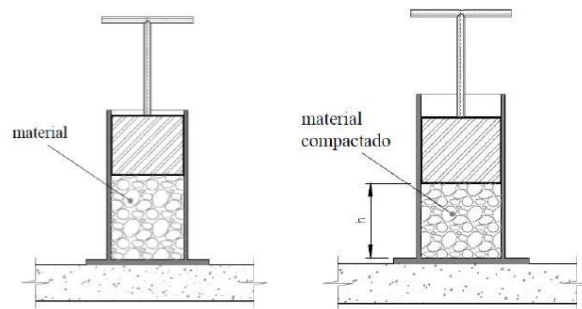
3.2.4.1. Agregados Maiores que 100 μm

O ensaio consiste em adicionar um volume padrão de material dentro de um cilindro e aplicar sobre este uma pressão constante somada ao efeito de vibração com frequência e tempo pré-definidos. Os componentes (cilindro e pistão) e a configuração do ensaio são esquematizados na Figura 10. A leitura da altura da camada do material sem compactação e da altura após a compactação foi feita utilizando-se um paquímetro.

Figura 10 – Estado de compactidade dos agregados: a) cilindro metálico e pistão; b) posição no início do ensaio; c) posição no final do ensaio



(a)



(b)

(c)

Fonte: Formagini (2005, p. 139)

O ensaio de compactação mecânica com efeito de vibração tem seu início quando a massa do material seco é adicionada ao cilindro já posicionado sobre a mesa vibratória. Em seguida, é introduzido ao cilindro um pistão maciço com peso aproximado de 200 N, cuja finalidade é provocar uma pressão constante de 10kPa sobre o material. A mesa vibratória é ligada durante 3 minutos a uma frequência de 68 Hz. Após a vibração, é aferida a medida da altura (h) do pistão, Figura 11.

Maiores detalhes podem ser encontrados em Formagini (2005).

Figura 11 – Aferição da altura deslocada pelo pistão



Fonte: Elaboração própria

3.2.4.2. Partículas Finas com Dimensões Inferiores a 100 μm

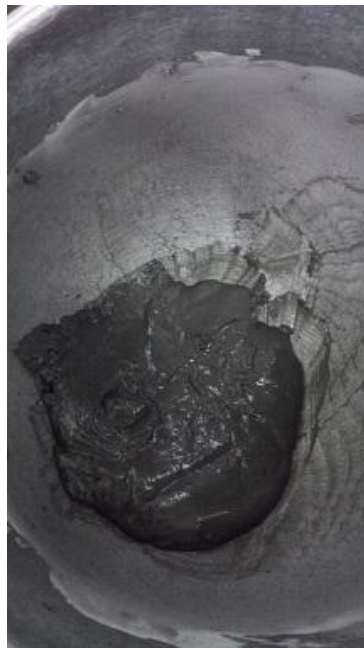
Para a determinação da compacidade dos materiais compostos por partículas finas que apresentam dimensões inferiores a $100\mu\text{m}$, foi executado o método da demanda d'água, o qual consiste em adicionar água ao material de modo que forme uma pasta homogênea. A quantidade de água utilizada para completar os espaços vazios entre as partículas será equivalente à quantidade necessária para preencher os vazios da mistura granular. Para a execução do ensaio, foi utilizado cal hidráulica, filler calcário, cimento Portland, sílica da casca de arroz, cinza volante e metacaulim.

Para a realização do experimento, utilizou-se: uma balança de precisão, um misturador mecânico provido de uma cuba de aço inoxidável com capacidade de aproximadamente 5 litros e de uma pá com movimento planetário, em torno do eixo da cuba, movimentos estes que devem ser de sentidos contrários.

Após pesar 350 gramas de material e uma massa conhecida de água em seu devido recipiente, deve-se ligar o misturador em velocidade baixa, de modo que não ocorram perdas, e acrescentar água ao material presente na cuba tomando o cuidado que toda a água retirada do recipiente entre em contato com o material. Conforme a água é adicionada, é possível observar as mudanças de fases da mistura, onde a primeira fase corresponde ao material no estado seco, a segunda corresponde ao estado pendular, a terceira ao estado funicular, e a quarta ao estado de demanda de água (maiores detalhes em Formagini (2005)).

O estado pendular ocorre quando a água se condensa entre os contatos dos grãos formando pequenas pontes líquidas. Essa fase persiste até o instante em que as superfícies de todos os grãos são molhadas por completo pela água, que é marcada pela presença de bolhas de ar no interior da mistura. Esta fase é denominada funicular. O incremento na quantidade de água é utilizado para gerar o afastamento desejado entre as partículas. Acredita-se que o ponto caracterizado como demanda de água do material encontra-se no início do estado capilar, mostrada na Figura 12.

Figura 12 – Estado de demanda de água



Fonte: Elaboração própria

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise dos resultados foram organizados os dados na forma de gráficos e tabelas. Os gráficos foram gerados a partir dos dados obtidos nos ensaios de compressão axial, de tração na flexão em 3 pontos e de compacidade das misturas, os quais foram separados por tipo de substituição. Ainda foram produzidos gráficos para os traços que apresentaram os melhores comportamentos mecânicos. As tabelas apresentam os valores médios, desvio padrão e o coeficiente de variação, para todas as misturas.

4.1. Ensaio de Consistência (*Flow Table*)

Na Tabela 6 são apresentados os dados dos ensaios de consistência (*Flow Table*). Cabe lembrar que a relação água cimento foi mantida em 0,71.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de consistência (*Flow Table*)

Traço	Flow Table (mm)
Ref	252.5
SCA5	267.0
SCA10	263.5
SCA15	250.5
SCA20	252.0
SCA30	238.5
SCA5CV5	269.5
SCA5CV10	260.0
SCA5CV15	260.0
SCA5MC5	263.0
SCA5MC10	254.0
SCA5MC15	255.5

Fonte: Elaboração própria

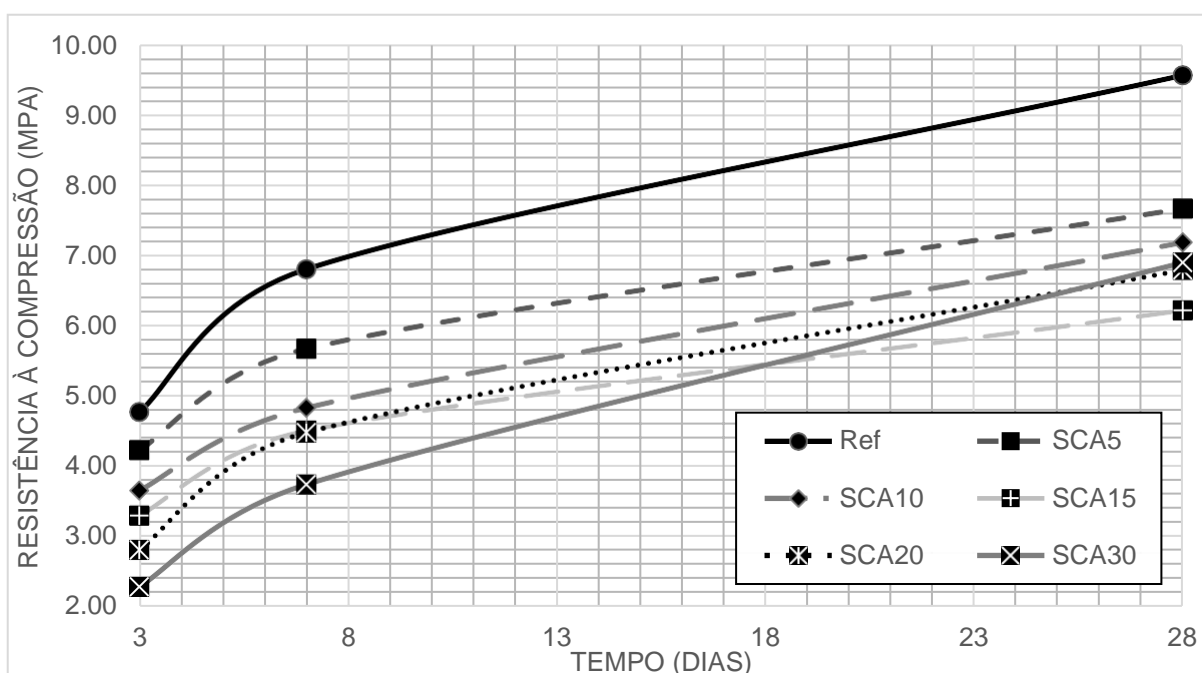
Pode-se observar que para a substituição de SCA5 e SCA10 houve um acréscimo na consistência em relação à mistura de referência, entretanto, com a substituição de SCA em proporções maiores que 5% apresentaram decréscimos de consistência até a porcentagem de 30%. Analisando as misturas de referência e SCA5, observa-se que o ensaio de mesa *Flow Table* obteve um acréscimo de 5,7%.

Todas as misturas contendo 5% de SCA e cinza volante ou metacaulim apresentaram valores de espalhamento superiores aos encontrados para o traço referência, demonstrando que essas adições tendem a melhorar a sua trabalhabilidade. Além disso, a cinza volante mostrou um melhor comportamento, pois os valores encontram-se maiores em relação ao traço de referência. Dessa forma, para os traços com SCA5CV5 e SCA5MC5, apresentaram os maiores valores de consistência.

4.2. Resistência à Compressão Axial

A avaliação das argamassas no estado endurecido foi feita através do ensaio de compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias. Então, observa-se os resultados obtidos para os traços contendo substituição de SCA no Gráfico 3 e na Tabela 7.

Gráfico 3 – Evolução das resistências à Compressão axial dos traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por sílica da casca de arroz (SCA)



Fonte: Elaboração própria

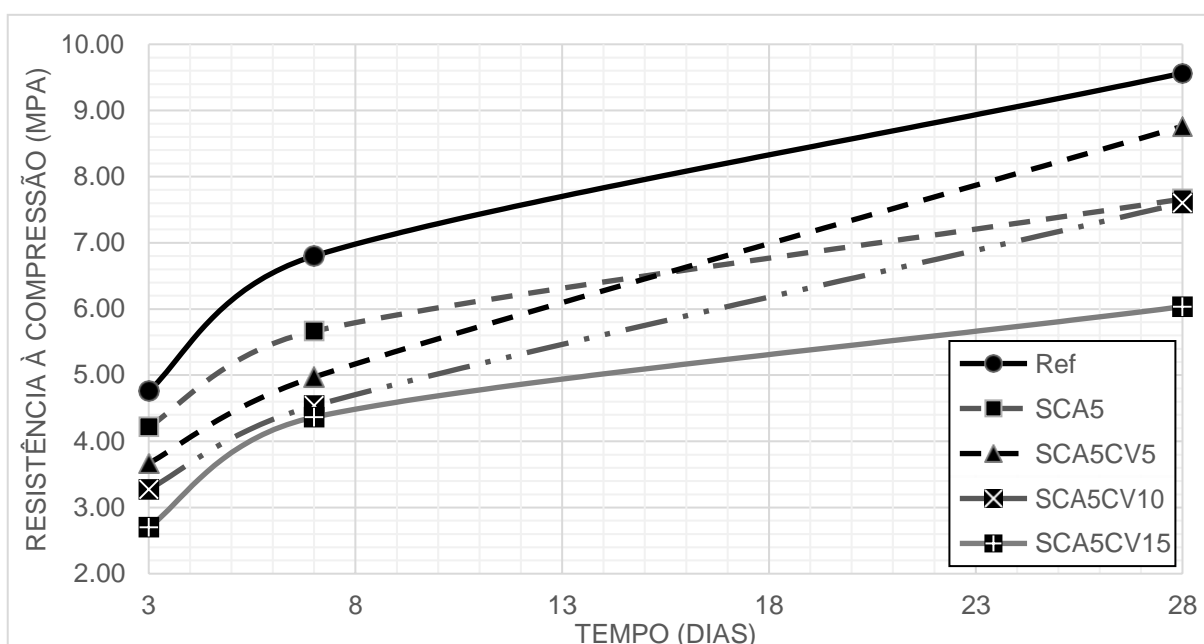
O Gráfico 3 mostra que nenhum traço com substituição de cimento Portland por adição mineral de SCA atingiu a resistência do traço Ref, em todas as idades, e o traço SCA5 foi o que apresentou o resultado mais próximo, porém o traço SCA30 foi

o que apresentou uma maior evolução no ganho de resistência a compressão axial, atingindo 202,9% entre 3 e 28 dias.

Como a mistura de 5% de SCA apresentou a queda de resistência à compressão axial mais próxima do traço Ref, esta porcentagem foi usada como referência para as demais substituições de adições minerais.

Nos Gráficos 4 e 5 são mostrados os resultados obtidos no ensaio de compressão axial para as misturas contendo 5% de SCA e combinadas com as outras duas adições minerais, cinza volante e metacaulim, respectivamente.

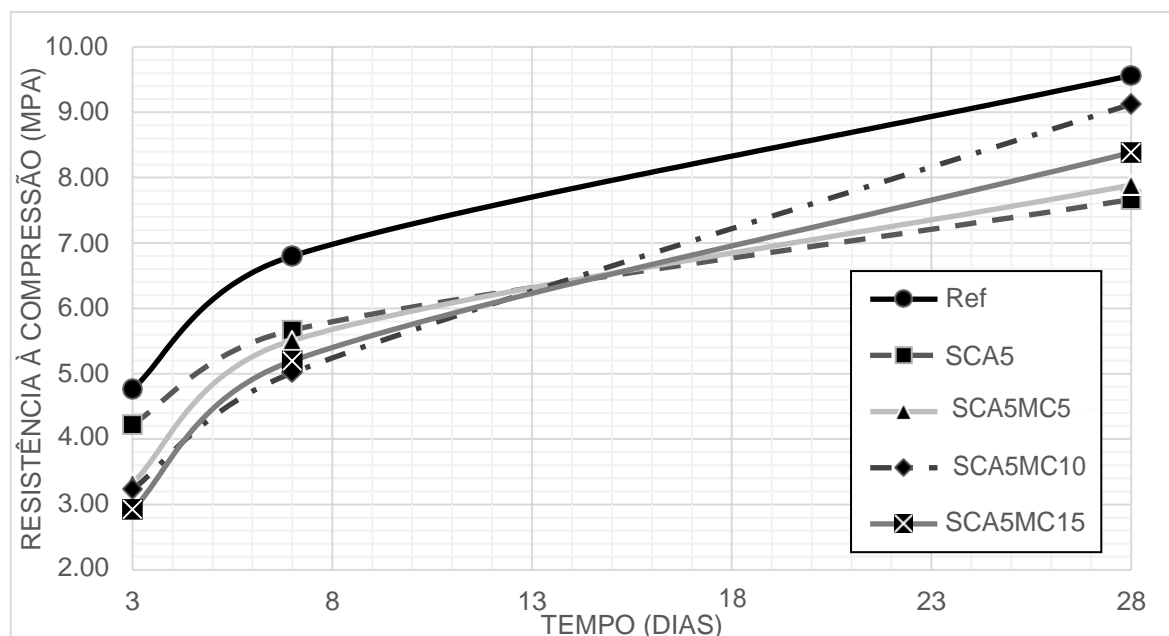
Gráfico 4 – Evolução da resistência à compressão axial dos traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes porcentagens de CV



Fonte: Elaboração própria

Identifica-se no Gráfico 4 que o traço SCA5CV5 apresentou valor de resistência mais próximo do traço Ref, aos 28 dias e que obteve maior evolução, entre 3 e 28 dias, na resistência, com acréscimo de 138,9%. Além disso, observa-se que quanto maior a porcentagem de CV na mistura, pior é a resistência à compressão, e tal fato pode ser influenciado pelo menor empacotamento da mistura. O incremento de 5% de CV apresentou a melhor resistência à compressão a partir de aproximadamente o 16º dia de cura, comparado ao traço SCA5.

Gráfico 5 – Evolução da resistência à compressão axial dos traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes porcentagens de MC

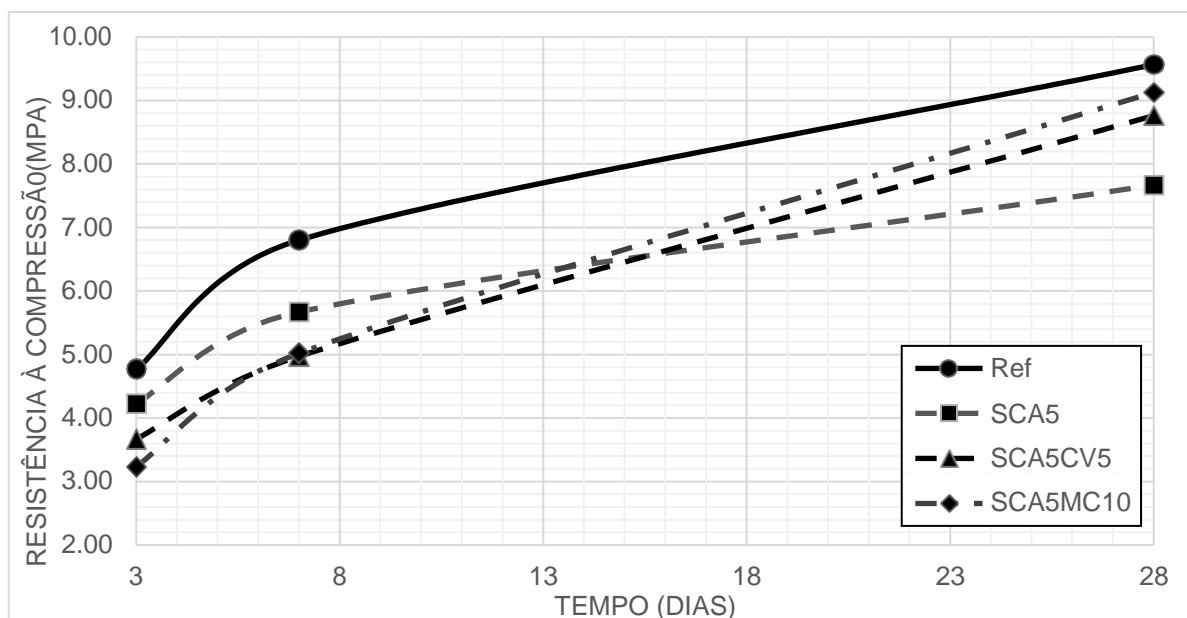


Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 5 mostra que o SCA5MC10 obteve maior resistência aos 28 dias dentre os traços com substituição parcial de cimento Portland, porém não atingiu a resistência do traço Ref. Na avaliação do ganho de resistência à compressão, o traço que obteve maior evolução foi o SCA5MC15 (incremento de 186,8%), entre as idades de 3 e 28 dias. Além disso, destaca-se que com a adição de metacaulim ao traço, todas as resistências foram maiores (em relação ao traço SCA5) a partir de aproximadamente a idade de 14 dias. É possível observar ainda, que a substituição de maiores porcentagens (de metacaulim), proporcionaram um incremento na resistência à compressão em relação ao traço com 5% de MC. Tal fato pode estar associado ao efeito pozolânico da adição mineral, que necessita de hidróxido de cálcio (formado na hidratação do cimento Portland) e umidade para reação química.

As misturas que apresentaram melhores resistências à compressão axial são mostradas no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Evolução da resistência à compressão axial dos traços com melhores resultados obtidos entre a SCA e SCA com substituição de CV e MC



Fonte: Elaboração própria

Dentre os traços que apresentaram melhores resultados de resistência à compressão, o traço SCA5MC10 apresentou um valor médio mais próximo ao traço Ref. Ressalta-se também, que os traços que possuem mais de uma adição mineral, atingiram resistências mais altas que o com somente sílica da casca de arroz, e este resultado pode estar associado ao efeito químico ou ao melhor empacotamento da mistura.

Na Tabela 7, observa-se que os coeficientes de variação foram relativamente pequenos, o que demonstra uma boa consistência dos dados obtidos.

Tabela 7 – Resultados no ensaio de compressão axial para todos os traços

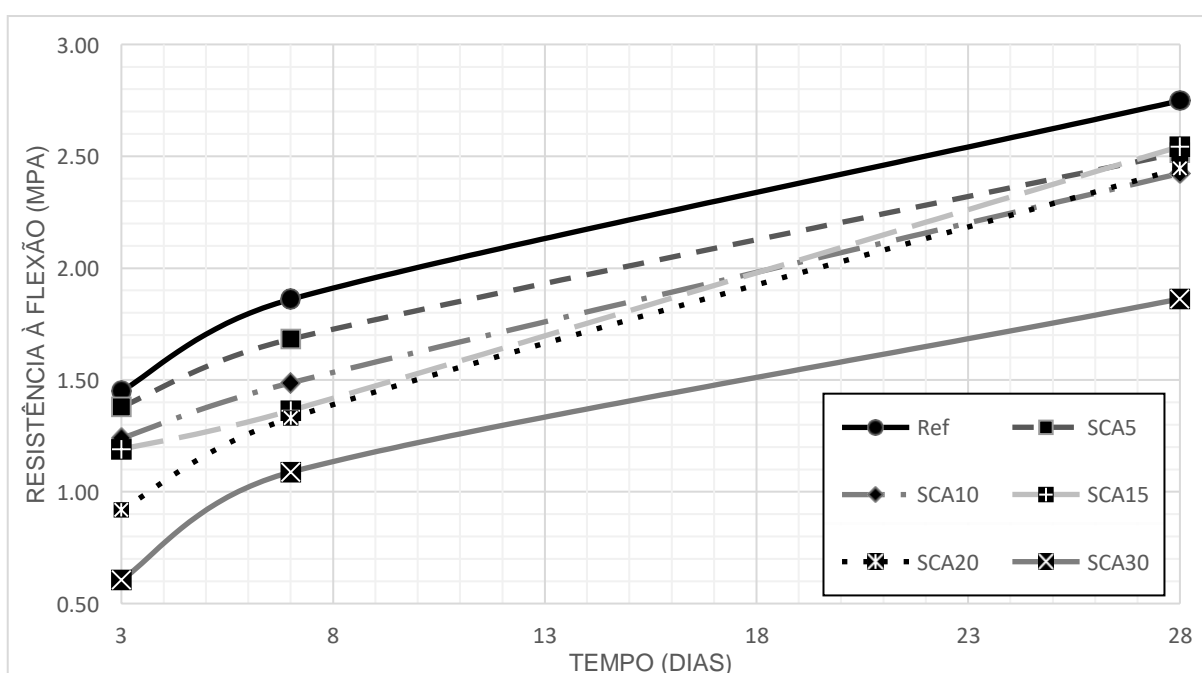
Traço	3 Dias			7 Dias			28 Dias		
	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
Ref.	4.76	0.13	2.77%	6.80	0.39	5.71%	9.56	0.47	4.96%
SCA5	4.22	0.25	5.90%	5.67	0.22	3.80%	7.66	0.69	8.95%
SCA10	3.65	0.08	2.32%	4.83	0.21	4.30%	7.18	0.55	7.68%
SCA15	3.29	0.14	4.11%	4.50	0.08	1.79%	6.21	0.53	8.50%
SCA20	2.80	0.08	2.86%	4.47	0.26	5.92%	6.79	0.69	10.12%
SCA30	2.28	0.08	3.36%	3.73	0.18	4.69%	6.90	0.47	6.76%
SCA5CV5	3.67	0.14	3.90%	4.97	0.32	6.49%	8.76	0.30	3.38%
SCA5CV10	3.28	0.08	2.52%	4.54	0.13	2.82%	7.60	0.39	5.18%
SCA5CV15	2.71	0.09	3.44%	4.37	0.18	4.19%	6.04	0.19	3.13%
SCA5MC5	3.33	0.08	2.49%	5.51	0.42	7.68%	7.89	0.47	6.00%
SCA5MC10	3.23	0.07	2.31%	5.02	0.13	2.59%	9.13	0.39	4.29%
SCA5MC15	2.92	0.06	2.11%	5.20	0.15	2.98%	8.39	0.76	9.11%

Fonte: Elaboração próprio

4.3. Resistência à Tração na Flexão em 3 Pontos

A avaliação das argamassas no estado endurecido através do ensaio de tração na flexão em 3 pontos foi realizada nas idades de 3, 7 e 28 dias. Então, observa-se os resultados obtidos para os traços contendo substituição de SCA no Gráfico 7 e na Tabela 8.

Gráfico 7 – Evolução da resistência à tração na flexão em 3 pontos dos traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por sílica da casca de arroz (SCA)

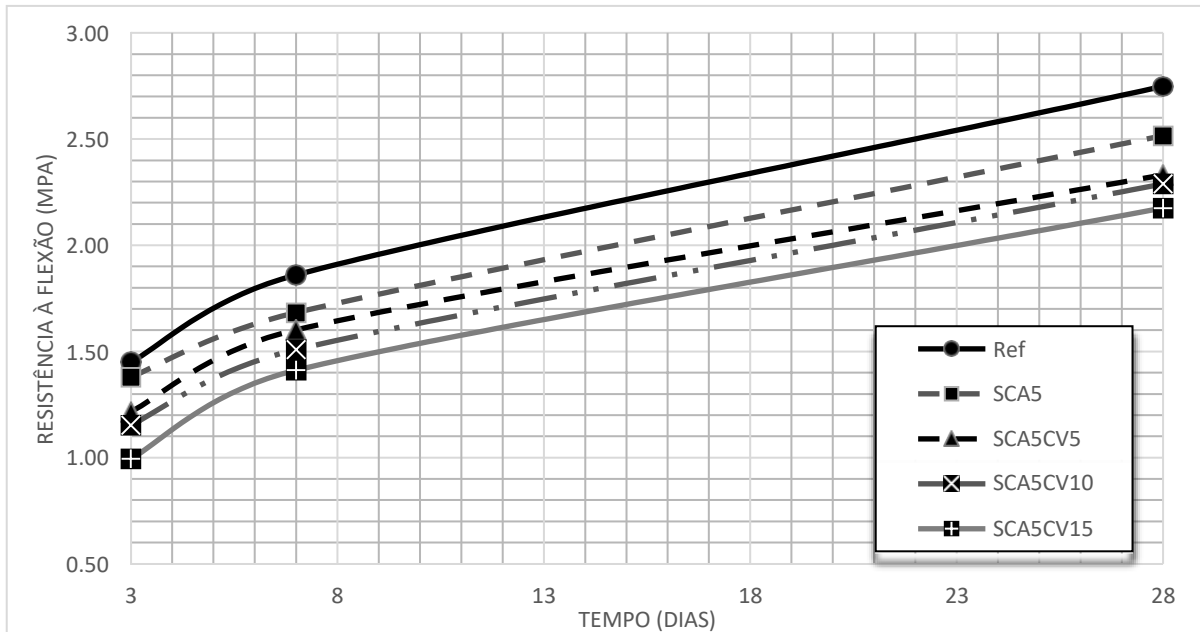


Fonte: Elaboração própria

Observa-se que para os traços que possuem substituição de SCA, nenhum apresentou resistência superior ao Ref para todas as idades. Além disso, no quesito de evolução de resistência, o traço SCA30 apresentou um acréscimo de 207,5%, entre as idades de 3 e 28 dias. Em contrapartida, os demais traços contidos nesse gráfico demonstram que o aumento da adição mineral de SCA não acompanhou o aumento de resistência da matriz.

Nos Gráficos 8 e 9 são mostrados os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão em 3 pontos para as misturas contendo 5% de SCA e combinadas com as outras duas adições minerais, cinza volante e metacaulim, respectivamente.

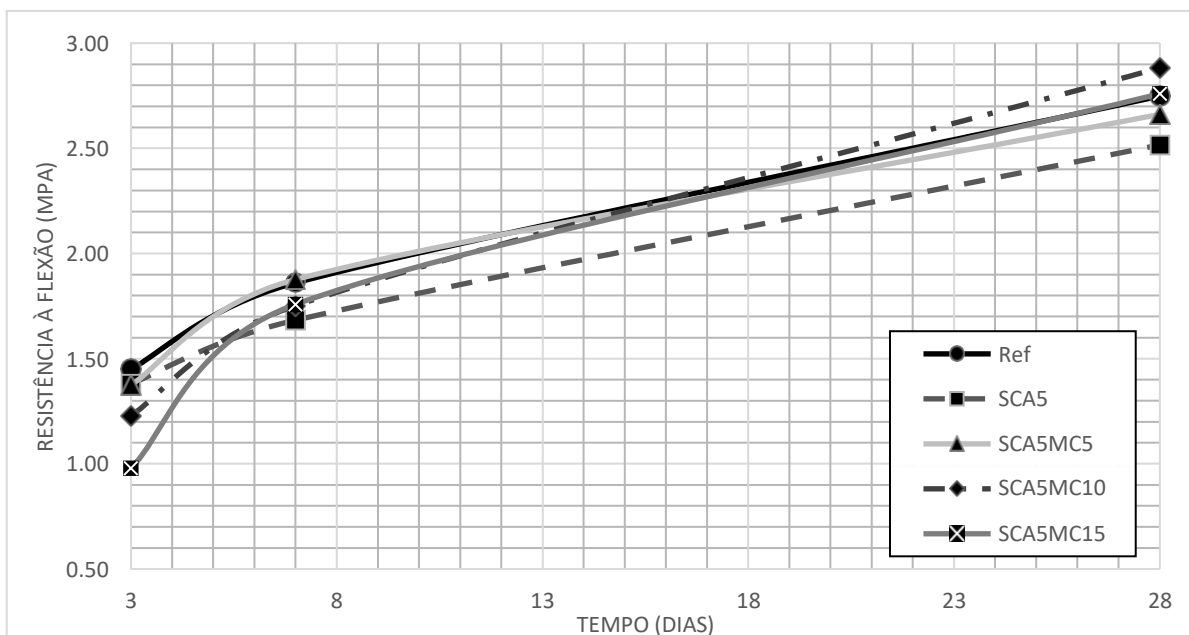
Gráfico 8 – Evolução da resistência à tração na flexão em 3 pontos para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes porcentagens de CV



Fonte: Elaboração própria

Pode ser visto no Gráfico 8 que o traço SCA5CV5 apresentou uma resistência média à flexão em 3 pontos mais próxima do traço Ref, porém não atingiu o resultado obtido pelo mesmo, em nenhuma das idades estudadas. Comparada as resistências entre 3 e 28 dias o traço SCA5CV15, apresentou o maior ganho (118,5%).

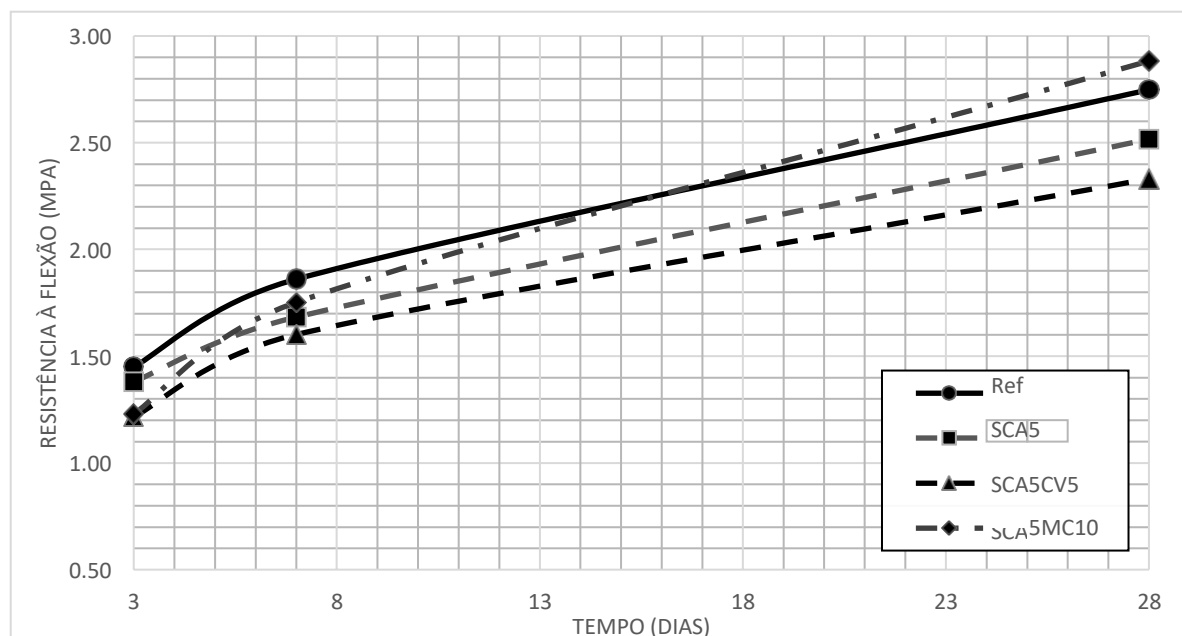
Gráfico 9 – Evolução da resistência à tração na flexão em 3 pontos para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes porcentagens de MC



Fonte: Elaboração própria

É possível observar no Gráfico 9 que todas as misturas apresentaram resistência à flexão em 3 pontos maiores que o traço SCA5, aos 28 dias. Percebe-se ainda que o traço SCA5MC10 apresentou resultados de resistência superiores para idades com aproximadamente 15 dias, quando comparados com idade inferiores. Além disso, nota-se que o traço SCA5MC15 teve uma maior evolução, no ganho de resistência entre 3 e 28 dias (181,9%) e também ultrapassa a resistência aos 28 dias do traço Ref, uma vez que as reações químicas das adições minerais tendem a retardar o aumento da resistência da matriz. Além disso, nota-se que os traços Ref e SCA5MC5 apresentaram comportamentos muito semelhantes em todas as idades analisadas. As misturas que apresentaram melhores resistências no ensaio de tração na flexão em 3 pontos são mostradas no Gráfico 10.

Gráfico 10 – Evolução da resistência à tração na flexão em 3 pontos para os traços com melhores resultados obtidos entre a SCA e SCA com substituição de CV e MC



Fonte: Elaboração própria

Analisando os traços que apresentaram melhores resultados entre todas as substituições, observa-se que o traço SCA5MC10 apresentou maior resistência aos 28 dias e evolução foi de 134,7% entre 3 e 28 dias. Além disso, percebe-se que para o traço Ref a resistência à flexão nas primeiras idades foi superior ao SCA5MC10. Tal fato pode ser descrito devido o segundo apresentar uma proporção inferior de cimento, porém, a partir do 15º dia, a reação química entre as adições minerais e os produtos formados pela hidratação do cimento Portland fez com que a resistência ultrapassasse o traço Ref.

Na Tabela 8 observa-se que os coeficientes de variação foram relativamente pequenos o que demonstra uma boa consistência dos dados obtidos.

Tabela 8 – Resultados no ensaio de tração na flexão em 3 pontos para todos os traços

Traço	3 Dias			7 Dias			28 Dias		
	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
Ref.	1.45	0.10	6.84%	1.86	0.08	4.28%	2.75	0.18	6.69%
SCA5	1.38	0.06	4.02%	1.68	0.34	20.26%	2.52	0.18	7.31%
SCA10	1.24	0.09	7.64%	1.49	0.24	15.94%	2.42	0.38	15.68%
SCA15	1.19	0.04	3.54%	1.36	0.06	4.27%	2.54	0.32	12.59%
SCA20	0.92	0.07	8.09%	1.33	0.16	11.79%	2.45	0.25	10.30%
SCA30	0.61	0.06	9.52%	1.09	0.03	3.02%	1.86	0.08	4.09%
SCA5CV5	1.22	0.19	15.36%	1.60	0.16	10.19%	2.33	0.19	8.12%
SCA5CV10	1.15	0.02	1.52%	1.51	0.14	9.51%	2.29	0.44	19.07%
SCA5CV15	1.00	0.05	4.91%	1.41	0.11	8.04%	2.18	0.18	8.19%
SCA5MC5	1.37	0.09	6.48%	1.88	0.03	1.82%	2.66	0.33	12.21%
SCA5MC10	1.23	0.08	6.24%	1.75	0.18	10.40%	2.88	0.30	10.42%
SCA5MC15	0.98	0.12	11.99%	1.76	0.24	13.84%	2.76	0.16	5.81%

Fonte: Elaboração própria

4.4. Relação da Compacidade dos Materiais/Misturas com a Resistência Mecânica à Compressão Axial aos 28 Dias

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados de compacidade dos materiais usados na pesquisa. Para a areia grossa e fina, as mesmas foram separadas em duas e três classes, conforme pode ser observado na Tabela 9, respectivamente.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios experimentais de compacidade dos agregados miúdos

Material	Diâmetro (mm)	Compacidade
Areia Grossa	0.0001 - 1.18	0.660
	1.18 - 4.8	0.580
Areia Média	0.0001 - 4.8	0.630
	0.0001 - 0.016	0.590
Areia Fina	0.016 - 0.256	0.600
	0.246 - 2.4	0.610

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 10 são apresentados os dados referentes aos aglomerantes e as adições minerais.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios experimentais de compacidade dos aglomerantes

Material	Compacidade
Filler	0.577
Cal Hidráulica	0.545
Cimento	0.575
Sílica	0.460
Cinza Volante	0.596
Metacaulim	0.439

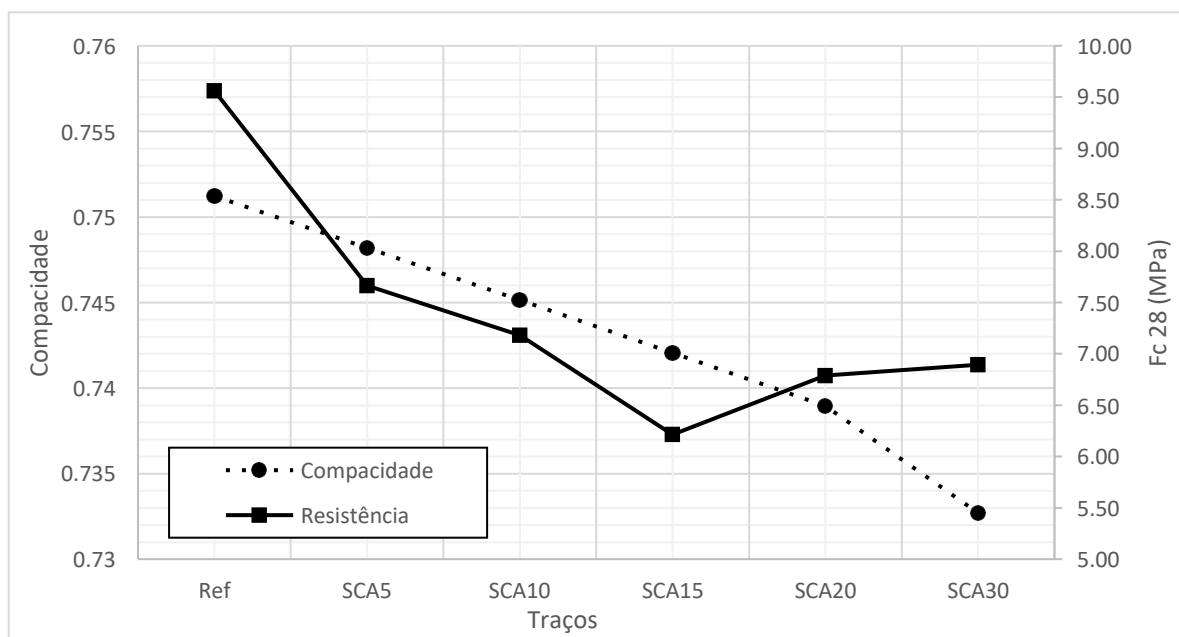
Fonte: Elaboração própria

Para a análise da compacidade das misturas, foi utilizado o programa MEC_COPPE_1.0 (Silvoso, 2008). No programa é feito o cadastro dos dados de:

granulometria, massa específica e compactidade para cada material, e com isso, é possível calcular a compactidade da mistura.

No Gráfico 11 são exibidas as compactidades e as resistências médias à compressão axial, aos 28 dias, para as diferentes porcentagens de substituição de cimento Portland por SCA.

Gráfico 11 – Relação das compactidades e das resistências à compressão axial para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por sílica da casca de arroz (SCA)

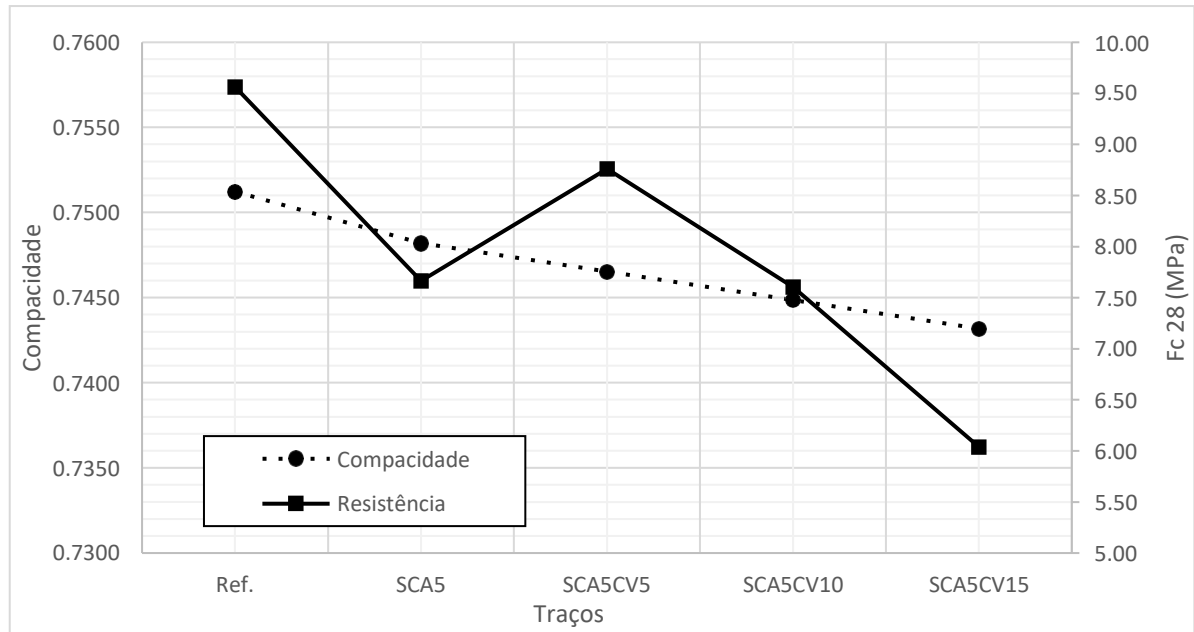


Fonte: Elaboração própria

Percebe-se que com o aumento da porcentagem de SCA, a compactidade diminui e conseqüentemente a resistência também. Porém, para os traços SCA20 e SCA30, apesar da compactidade continuar diminuindo, a resistência à compressão apresentou um leve ganho. Isso possivelmente está associado a uma reação pozolânica com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) uma vez conclui-se que não foi devido ao efeito físico (a compactidade diminui).

No Gráfico 12 é mostrado os resultados de compactidade e resistência à compressão para os traços contendo cinza volante.

Gráfico 12 – Relação das compacidades e das resistências a compressão axial para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes porcentagens de CV

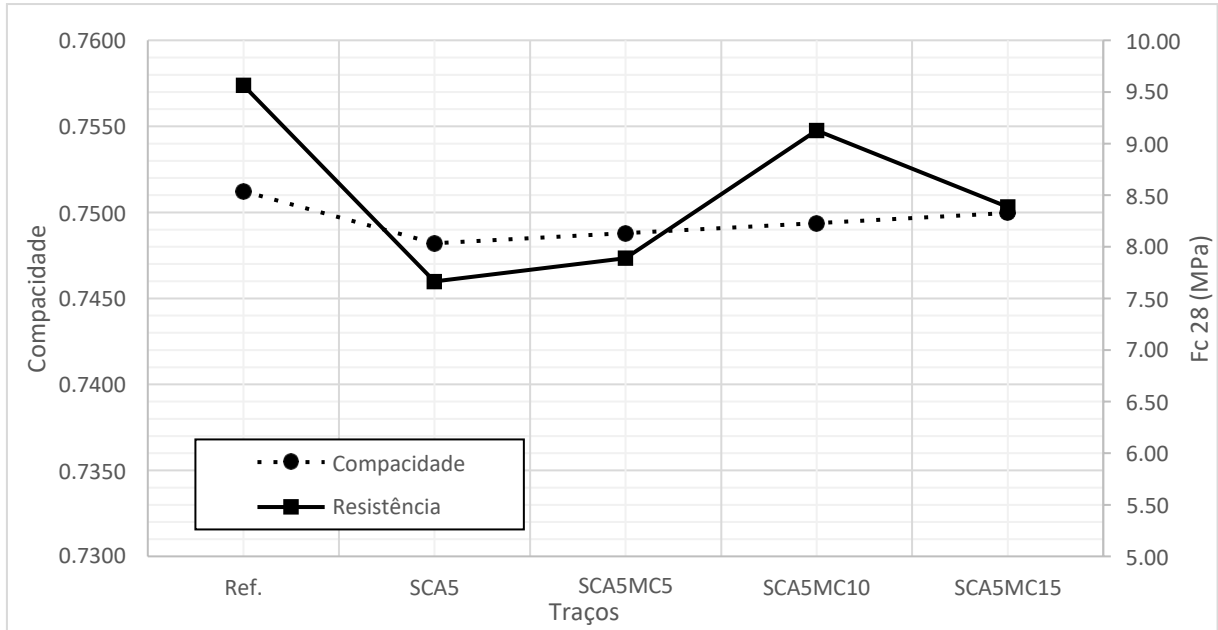


Fonte: Elaboração própria

A análise do gráfico mostra que a resistência diminui de acordo com o menor empacotamento do traço, que ocorre com tendência linear com o aumento da porcentagem de substituição. Entretanto, o traço SCA5CV5 apresentou um ganho de resistência, que provavelmente aconteceu por uma reação química da mistura. Além disso, pode-se observar que nessa porcentagem ocorre uma “saturação” de substituição, pois para as demais substituições as resistências voltam a cair.

Os traços contendo substituições de metacaulim são apresentados no Gráfico 13.

Gráfico 13 – Relação das compacidades e das resistências à compressão axial para os traços com substituição parcial de Cimento Portland (Ref) por 5% de SCA e diferentes porcentagens de MC

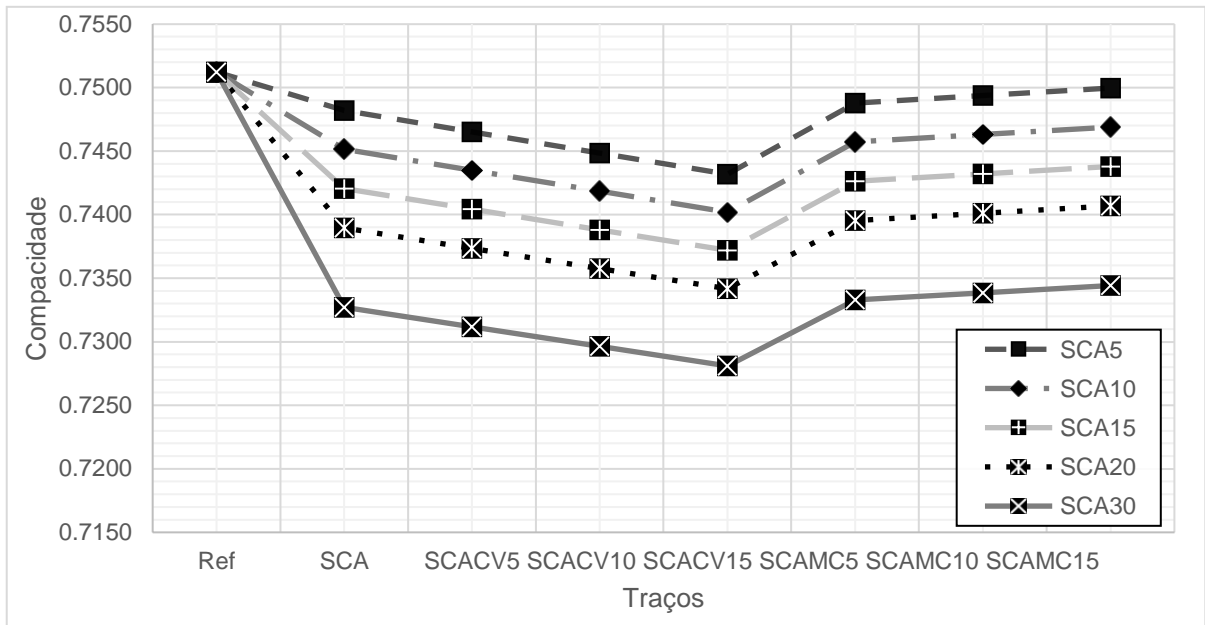


Fonte: Elaboração própria

A utilização de metacaulim no traço proporcionou aumento na compacidade quando comparado com o traço SCA5. Logo, é possível concluir que o metacaulim consegue melhorar fisicamente o empacotamento da mistura. Ainda, mesmo com a melhora da compacidade, pode-se dizer que existe um efeito químico, pois de acordo com o gráfico, o traço SCA5MC10 apresenta a maior resistência à compressão, possivelmente “saturando” a quantidade de substituição da mistura, para o traço subsequente volta a cair.

Adicionalmente, foram analisadas as compacidades com diferentes substituições de SCA (de 5 a 30%) e diferentes porcentagens de adições de pozolânicas dos traços estudados nesse trabalho, como pode ser visualizado no Gráfico

Gráfico 14 – Compacidades dos traços com as quantidades de SCA



Fonte: Elaboração própria

Percebe-se que com o aumento da quantidade de SCA nos traços, menor foi a compactação, o que possivelmente acarretaria na diminuição da resistência à compressão, entretanto, tal fator varia juntamente com a reação química entre a porcentagem ideal de pozolanas e cimento Portland, ocasionando uma relação ideal de reação de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado. Ainda, percebe-se que o uso de metacaulim melhora a compactação, e conseqüentemente a resistência mecânica.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo o objetivo foi de avaliar a influência das adições minerais de sílica da casca de arroz, cinza volante e metacaulim em substituição parcial do cimento Portland no comportamento no estado fresco e endurecido de argamassas de revestimento. Assim, foram possíveis alcançar as seguintes conclusões.

No que se refere ao ensaio reológico no estado fresco através da mesa *Flow Table*, o espalhamento não é alterado significativamente com o uso das adições minerais. Em algumas misturas as adições proporcionaram um leve aumento no espalhamento, enquanto que em outras uma leve diminuição. Ainda, percebeu-se que quanto maior a substituição de cada adição mineral menor o espalhamento.

Em relação a resistência à compressão axial, todas as misturas com substituição de cimento Portland apresentaram resistências menores que o traço de referência, para todas as idades analisadas nesse trabalho. As substituições de cimento Portland por SCA apresentaram a menor redução (em relação ao traço de referência), com 24,8%, para o traço com 5% de SCA. Nos traços com blendas de substituições de adições minerais, 5% de SCA e de 5, 10 e 15% de cinza volante e metacaulim, percebeu-se que nenhum traço apresentou resultados de resistência à compressão axial superiores ao traço de Ref.

No que diz respeito aos ensaios de tração na flexão em 3 pontos, as substituições de cimento Portland por SCA apresentaram a menor redução em relação ao traço de referência, para o traço SCA15, com 8,1%. Entre os traços que possuem adição mineral de cinza volante, o SCA5CV5 apresentou menor redução com relação ao traço Ref (17,9%) e maior compacidade dentre os traços com este tipo de adição. Entretanto, quando se adicionou 10% entre as substituições de 5, 10 e 15% de MC, juntamente com 5% de SCA, o resultado mecânico foi superior ao do traço de referência, mesmo esta não sendo a porcentagem de metacaulim que apresentou maior compacidade. Tal fato é justificado pelo efeito químico, pois a reação do metacaulim ocorre de forma mais lenta para maiores porcentagens de substituições e possivelmente o traço SCA5MC15 ultrapassaria todos os outros traços para idades mais avançadas.

Os resultados dos traços com substituição parcial de cimento Portland não atingiram os dados de resistência à compressão e tração na flexão em 3 pontos do traço de referência, e tal fato pode estar associado ao baixo consumo de cimento, pois

no processo de hidratação do cimento é formado o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , necessário para reagir com o silicato de cálcio hidratado presente na sílica da casca de arroz e também necessário para o melhor efeito pozolânico do metacaulim.

Com relação a compacidade, o uso de adições minerais, no estudo realizado, não apresentou melhoras em relação ao uso de cimento Portland puro. Porém os traços analisados com uso de metacaulim proporcionaram aumentos nos valores de compacidade comparados ao uso de somente SCA.

Por fim, conclui-se que o uso de adições minerais não prejudicaria significativamente os valores de espalhamento, e com relação a resistência à compressão e a flexão em 3 pontos, principalmente nos traços para as idades estudadas, a tendência dos valores parece indicar que em idades mais avançadas poderá ultrapassar o traço de referência, para a resistência a compressão os traços SCA5CV5 e SCA5MC10, e para a resistência a tração na flexão em 3 pontos o traço SC15.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aumentar o tempo de moagem da sílica da casca de arroz.
- Verificar o estado mecânico das argamassas em idades mais avançadas (90, 180 dias).
- Otimizar os traços com o auxílio do programa MEC_COPPE_1.0 (Silvoso, 2008), de maneira que diminua os espaços vazios, aumentando a compacidade.
- Analisar os traços com porcentagens diferentes para cada adição mineral.
- Buscar diferentes adições minerais para avaliar o estado mecânico com os ensaios de compressão axial e tração na flexão em 3 pontos.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

____. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987

____. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

____. **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.

AZEVEDO, Aires. F. F. L. C. de. **Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes**. 2002. 487f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Portugal, 2002.

CARASEK, Helena. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos**: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. 1996. 285f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 893-941.

CORDEIRO, Guilherme. C. **Concreto de Alto Desempenho com Metacaulinita**. 2001. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2001.

DAL MOLIN, Denise. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Editora Ibracon, 2011. V1. Cap. 8, p. 261-309.

FORMAGINI, Sidiclei **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. 2005. 259f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

GOMES, Valtencir L. L. **Efeito da Adição de Diatomita no Comportamento Reológico e Mecânico de Argamassas Colante**. 2013. 138f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

GOMES, Carlos E. M. Influência da Sílica da Casca do Arroz (SCA) nas Propriedades dos Compósitos Cimentícios, **XXIV Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP**, Campinas, 2016.

GUEDERT, Luís O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza da casca de arroz como material pozolânico**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia de produção e sistemas. UFSC. Florianópolis, 1989, 147 p.

MARANGON, Ederli. **Desenvolvimento e Caracterização de Concretos Auto-Adensáveis Reforçados com Fibras de Aço**. 2006. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MARANGON, Ederli et al. **Índice de Atividade Pozolânica da Sílica de Casca de Arroz Silcca Nobre SCI Proveniente da Combustão em Leito Fluidizado** [S.I.] Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil, 2013.

MEHTA, Povindar.K. Natural Pozzolan. In: **Supplementary Cementing Materials**. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987. 427p.

NETTO, Rafafel. M. **Materiais Pozolânicos**. 2006. 148f. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RAGO, Fabiola; CINCOTTO, Maria. A. Influência do tipo da cal hidratada na reologia de pastas. **Boletim Técnico 233**, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

ROCHA, Guilherme. G. N. **Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta Reatividade**. 2005. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SABBATINI, Fernando. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. São Paulo: O nome da Rosa, 2000.

SILVEIRA, Adriana A. **A Utilização de Cinza de Casca de Arroz com Vistas a Durabilidade de Concretos: Estudo do Ataque por Sulfatos**. 1996. 155f. Dissertação (Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SILVOSO, Marcos. M. **Manual de utilização do programa MEC-COPPE 1.0 – Simulador de compacidade de misturas granulares secas através do Método de Empacotamento Compressível (MEC)**, Rio de Janeiro. 2008.

SCRIVENER, k.I. KIRKPATRICK, Innovation in use and research on cementitious material. In: th International Congress of Chemistry of Cement, 12, 2007, Montreal, **Anais...**, Canadá, 2007.

SOUZA, Paulo. S. L., DAL MOLIN, Denise. C.C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). **Engenharia Civil**. Portugal, n. 15, p.45-54, Setembro, 2002.