

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GEAN OLDRA

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS FABRICADOS COM
BAIXOS TEORES DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ IMERSOS EM SOLUÇÃO
DE SULFATO DE MAGNÉSIO**

Alegrete

2015

GEAN OLDRA

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS FABRICADOS COM
BAIXOS TEORES DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ IMERSOS EM SOLUÇÃO
DE SULFATO DE MAGNÉSIO**

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

Alegrete

2015

GEAN OLDRA

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS FABRICADOS COM
BAIXOS TEORES DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ IMERSOS EM SOLUÇÃO
DE SULFATO DE MAGNÉSIO**

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: dia, mês e ano.

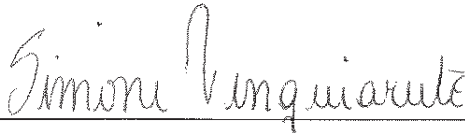
Banca examinadora:



Prof. Dr. Ederli Marangon

Orientador

UNIPAMPA



Prof. Msc. Simone Dornelles Venquiaruto

UNIPAMPA



Eng. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira

UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha esposa Vanilda e família.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Dr. Ederli Marangon pela orientação e incentivo.

À minha esposa pelo apoio e dedicação.

Ao Eng. Marcelo Dias por aceitar fazer parte deste trabalho e por sempre estar disposto a sanar minhas dúvidas.

Aos técnicos de laboratório da UNIPAMPA pelo auxílio no programa experimental e na operação dos equipamentos.

Aos colegas de laboratório; Deividi, Everton, Raphael pelo auxílio na realização deste trabalho.

À GEEA e a Pilecco Nobre Alimentos Ltda, pelo apoio financeiro para a realização deste estudo.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo
mundo.”

Mahatma Ghandi

RESUMO

Os íons sulfatos são uma das principais causas da degradação do concreto. Isso deve-se às reações químicas com os produtos de hidratação do concreto, das quais resultam em compostos com volumes maiores, gerando tensões internas e com isso, diminuição da sua resistência, deslocamentos e fissuras. O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos da adição de sílica da casca de arroz, obtida por meio de combustão em leito fluidizado na durabilidade de concretos a base de cimento Portland do tipo CPII-Z frente à ação dos íons sulfatos. Para isso foram moldadas vigas de concreto com as dimensões de 75 x 15 x 15 cm, e de cada uma delas foram retirados, por carotagem, amostras de 50 x 100 mm. Após a extração, uma parte das amostras foi mergulhada em uma solução de sulfato de magnésio 7,5 g/100 mL e outra parte em água desmineralizada, registrando-se previamente suas massas. Nas idades de ensaio de 56, 90, 180 e 360 dias realizaram-se novas pesagens para verificação da massa e foram feitos ensaios de resistência à compressão axial. No concreto utilizado, as dosagens tiveram substituição de cimento por sílica da casca de arroz em volume de 0%, 3%, 5% e 10%. Os resultados mostram que as misturas tiveram perda de massa por deslocamentos e lixiviação de compostos solúveis. Também houve diminuição da resistência à compressão axial, obtendo-se melhores resultados na mistura em que houve substituição do cimento por sílica em 10%.

Palavra-Chave: *Concreto, Sílica de casca de arroz, Sulfatos, Durabilidade.*

ABSTRACT

The sulfate ions are the main cause of concrete's degradation. This is due to chemical reactions with concrete's hydration products. Those chemical reactions result in compounds with greater volumes, generating internal tensions and decreasing concrete's resistance which can generate spalling and cracking. The main goal of this article is to study the effects of adding rice husk ash, which is obtained by burning it in fluid bed, in concrete, as well as, durability of concrete made with Portland cement type IV – Low heat of hydration (designated by ASTM) exposed to action of sulphate ions. To approach that goal, 75 x 15 x 15 cm concrete beams were casted and from each of those samples, 50 x 100 mm concrete specimens were removed by drilling the samples. After that drilling and extraction process, a part of the samples was dipped in a 7.5% magnesium sulfate solution and the other part was dipped in water. The weight of each sample was previously measured. A new weighing and compressive strength test were made on samples on 56th, 90th, 180th and 360th days. In concretes that were mixed, cement was replaced by silica in weight values of 0%, 3%, 5% and 10%. Results show that samples lost weight by spalling and leaching of soluble compounds. Moreover, there was also a decrease in compressive strength and the best results were obtained with the sample in which 10% of cement were replaced by 10% of silica.

Keywords: *Concrete, rice husk ash, sulfates, durability.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sílica ativa	20
Figura 2 - Microestrutura do concreto: 1) C-S-H; 2) Ca(OH) ₂ e 3) vazio capilar	24
Figura 3 - Agregados utilizados no ensaio: a-areia fina, b-areia grossa e c-brita.....	30
Figura 4 - Determinação das massas específicas dos agregados miúdos - etapas de ensaio: a- materiais e frascos de Chapman; b-massa de 500g de areia; c-fracos com o material + água; d- medida da água deslocada.	31
Figura 5 - Etapas do ensaio da massa específica	32
Figura 6 - Estabilização do querosene em temperatura controlada de 20 °C.	37
Figura 7 - Ilustração do ensaio de abatimento	39
Figura 8 - Etapas do processo de imersão dos corpos de prova	42
Figura 9 - a. balança hidrostática; b. banho Maria	42
Figura 10 - extração de corpos de prova das vigas por carotagem.....	43
Figura 11 - vigas das quais já foram extraídos as amostras.....	44
Figura 12 - Recipientes com amostras de concreto	45
Figura 13 - Ilustração do ensaio de compressão axial	46
Figura 14 - Gráfico da absorção de água por imersão	48
Figura 15 - Índice de vazios pelo processo de imersão	50
Figura 16 – Aspecto das misturas após a exposição por 360 dias: (a) mistura M0 com cura de 28 dias em água potável e exposição em água desmineralizada; (b) mistura M0 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução; (c) mistura M5 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução; (d) mistura M10 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massas específicas das areias.....	32
Tabela 2 - Caracterização dos agregados	33
Tabela 3 - Características químicas do cimento CP II-Z.....	35
Tabela 4 - Consumo de materiais em kg/m ³	38
Tabela 5 - Divisão das amostras no ensaio de ataque por sulfatos.....	44
Tabela 6 - Valores obtidos nos ensaios de abatimento e de ar aprisionado.....	47
Tabela 7 - Determinação da absorção de água por imersão após 72 h (%).....	48
Tabela 8 - Determinação da absorção de água por imersão e fervura (%).....	49
Tabela 9 - Determinação do índice de vazios após imersão (%).....	49
Tabela 10 - Determinação de índice de vazios após imersão e fervura (%).....	50
Tabela 11 - Determinação da massa específica real	51
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial da mistura M0.....	52
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial da mistura M3.....	52
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial da mistura M5.....	53
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial da mistura M10.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
CP II-Z – Cimento Portland pozolânico
C-S-H – Silicato de cálcio hidratado
NaOH – Hidróxido de sódio
pH – Potencial de hidrogênio
SCA – Sílica da casca de arroz

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contextualização do tema de pesquisa	14
1.2 Definição do problema e da questão da pesquisa	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo geral	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4 Justificativa	16
1.5 Estrutura do trabalho	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Concretos com adições minerais	17
2.1.1 Efeitos das adições	18
2.1.2 Adição da sílica da casca de arroz ao concreto	18
2.2 Durabilidade em estruturas de concreto	20
2.2.1 Efeito do sulfato de magnésio no concreto	21
2.2.2 Influência da porosidade e da capilaridade	23
2.2.3 Absorção de água	25
2.2.4 Teor de ar aprisionado no concreto fresco	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Materiais	30
3.1.1 Agregados	30
3.1.2 Cimento	34
3.1.3 Sílica da casca de arroz	35
3.1.4 Aditivo	37
3.1.5 Solução de sulfato de magnésio	37
3.1.6 Água potável e água desmineralizada	38
3.2 Métodos experimentais	38
3.2.1 Método de dosagem	38
3.2.2 Trabalhabilidade do concreto	39
3.2.3 Teor de ar aprisionado no concreto fresco	40
3.2.4 Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica – NBR 9778-87	41

3.2.5 Extração de amostras das vigas.....	43
3.2.6 Ensaio de ataque de sulfato ao concreto	45
3.2.7 Ensaio de compressão axial	45
4 RESULTADOS	47
4.1 Concreto no estado fresco.....	47
4.1.1 Ensaio de abatimento e ar aprisionado.....	47
4.2 Concreto no estado endurecido.....	47
4.2.1 Índice de vazios e massa específica	47
4.2.2 Resistência à compressão axial	51
4.2.3 Variação de massa.....	57
5 CONCLUSÃO.....	65
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	66
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema de pesquisa

Atualmente, a preparação do país para grandes eventos esportivos, investimentos federais em habitação (minha casa minha vida), a industrialização, os avanços tecnológicos e o poder aquisitivo da população que vêm aumentando, trás como consequência o aumento do consumo de produtos industrializados. Para atender essa demanda crescente, é necessária a exploração de matérias-primas da natureza. Como esses recursos naturais estão cada vez mais escassos, o uso de novas tecnologias para reduzir sua exploração é excencial. De acordo com o SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2014), o cimento é o segundo produto mais consumido no mundo, depois da água. Segundo Helene e Andrade (2007) o concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade, podendo ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida. Os impactos ambientais ocasionados pela extração de argila e calcário, suas principais matérias-primas, o alto consumo energético e a elevada taxa de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera são os efeitos considerados mais danosos dessa indústria (ALVES, 2002; METHA; MONTEIRO, 1994), por isso estudos vêm sendo realizados a fim de substituir (em parte) o cimento Portland por adições minerais, como diversos tipos de rejeitos industriais e agroindustriais com o intuito de manter, ou até mesmo melhorar as propriedades do concreto no estado endurecido. Dentre estas adições, pode-se citar a utilização de cinza volante, escória de alto forno e cinza e/ou sílica da casca de arroz. Os benefícios que podem ser gerados pelas adições minerais, ao concreto, destacam-se: a melhora da resistência à fissuração térmica devido à redução do calor de hidratação, o aumento da resistência mecânica e a alta durabilidade frente à ação de agentes agressivos devido ao refinamento dos poros (METHA; MONTEIRO, 2006).

1.2 Definição do problema e da questão da pesquisa

A casca de arroz é aproveitada como forma alternativa de combustível para geração de energia em algumas indústrias e termelétricas. O que sobra dessa queima é a cinza, que conforme Dal Molin (2011), se a combustão for feita de maneira controlada, com temperaturas entre 500 a 700 °C, pode-se obter cinzas de alta pozolanicidade, as quais contém alto teor de sílica amorfa. A sílica amorfa gerada nesse processo se torna uma alternativa muito interessante na redução do consumo do cimento Portland e ao mesmo tempo um destino adequado e ambientalmente correto para este material, pois seria descartado na natureza. Trabalhos vêm sendo realizados, como o de Linhares (2010), entre outros, que visam o estudo da influência das adições de sílica amorfa, proveniente da queima da casca de arroz, ao concreto. No entanto, não foi encontrada, na bibliografia pesquisada, a existência de trabalhos, que tratem da adição de sílica da casca de arroz proveniente de combustão em leito fluidizado e moagem controlada em substituição parcial ao cimento Portland no que se refere à resistência ao ataque de sulfatos na durabilidade.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho visa o estudo da influência da adição de baixos teores de sílica de casca de arroz ao concreto, quanto a sua durabilidade, frente a agentes agressivos como o Sulfato de magnésio.

1.3.2 Objetivos específicos

Analisar o efeito de baixos teores de sílica da casca do arroz (3%, 5% e 10%) na resistência à compressão;

Analisar a perda de massa de concretos à ação de solução de sulfato de magnésio nas idades de 56, 90, 180 e 360 dias;

Comparar resultados de ensaios de resistência à compressão axial com adição de diferentes teores de sílica de casca de arroz após a exposição ao sulfato de magnésio nas idades de 56, 90, 180 e 360 dias.

1.4 Justificativa

Cada vez mais o mercado da construção civil exige materiais alternativos que agridem menos ao meio ambiente. Existe uma preocupação contínua sobre os efeitos desses novos materiais e a durabilidade e/ou vida útil destas construções. Um dos parâmetros de referência para o dimensionamento de uma estrutura é a sua resistência à compressão, no entanto, um quesito fundamental para uma estrutura durável é a sua capacidade de manter a sua resistência à compressão após ser submetido a agentes agressivos, como os íons sulfatos. Com isso, torna-se necessário o estudo da resistência de concretos com adições de sílica da casca de arroz ao cimento Portland frente ao efeito dos íons sulfatos.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho será dividido em cinco capítulos. No primeiro contém a introdução, os objetivos, definição do problema e a justificativa desta pesquisa. No segundo consta a fundamentação teórica, sendo abordados tópicos com relação ao concreto, adições minerais, durabilidade de concretos e ação dos íons sulfato, também será apresentado alguns resultados encontrados em outros trabalhos. No terceiro, serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para realização do programa experimental proposto neste trabalho. No quarto capítulo, será apresentada a discussão dos resultados obtidos no programa experimental. O quinto capítulo apresenta as conclusões e o sexto e último capítulo traz as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concretos com adições minerais

Devido a fatores econômicos e ambientais, muitos subprodutos industriais e agroindustriais se tornaram fontes de adições minerais em concretos, de acordo com Mehta e Monteiro (2006). Desde que a produção tenha controle de qualidade adequada, esses materiais podem ser incorporados ao concreto, quer sob a forma de mistura ao cimento Portland quer sob a forma de adições minerais. Algumas usinas beneficiadoras de alimentos e geradoras de energia utilizam casca de arroz como combustível, gerando a sílica da casca de arroz como subproduto. Fornos da indústria metalúrgica são as principais fontes de subprodutos utilizados como adições minerais ao concreto, como a escória de alto forno, sendo produzidos em vários países milhões de toneladas por ano.

As adições minerais podem ser definidas, de acordo com Cordeiro (2006), como materiais adicionados conjuntamente com o cimento Portland, com o objetivo de conferir desempenho diferenciado ao produto final, como maior durabilidade e resistência. Ainda de acordo com Cordeiro (2006), as adições minerais podem ser altamente reativas, como sílica ativa, argilas calcinadas e cinza da casca de arroz ou materiais de menor reatividade como: cinza volante e escória de alto-forno.

As classificações das adições minerais, segundo Dal Molin (2011), se dá de acordo com sua ação físico-química e divide-se em 3 grupos: **Grupo 1- Pozolanas**: é uma material silicoso, que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas se finamente moída e em presença de água, reage com o Ca(OH)_2 , formando materiais com propriedades cimentantes (MEHTA e MONTEIRO, 2006); **Grupo 2 – Material cimentante**: não é necessário a presença do cálcio para formar produtos cimentantes. **Grupo 3 – Fíler**: não tem atividade química. Serve para preencher vazios e empacotamento dos grãos.

2.1.1 Efeitos das adições

As adições minerais podem, de acordo com Cordeiro (2006), proporcionar mudanças nas propriedades de produtos cimentícios. Os dois principais efeitos físicos causados pelas adições minerais são: nucleação dos poros e efeito filer. Devido à pequena dimensão das partículas das adições, elas podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação do cimento Portland. O crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas também nos poros ocupados pela adição mineral e água, acelerando as reações de hidratação (DAL MOLIN, 2011). O efeito filer reduz o número de vazios, pois tem dimensão menor que as partículas de cimentos, ocasionando o preenchimento dos poros (CORDEIRO, 2006). Com a redução da porosidade e dos vazios, aumenta a durabilidade dos concretos, pois dificulta a entrada de agentes agressivos em meio à estrutura de concreto (DUART, 2008).

Segundo Dal Molin (2011) o efeito químico das adições minerais está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$, formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar novos silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). De acordo com Rêgo (2015), as adições de sílica com baixos teores de sílica amorfa reduz teor de hidróxido de cálcio, além de fazer a nucleação dos poros da pasta. Estes silicatos formados tendem a preencher os vazios capilares, aumentando a resistência da pasta de cimento, na zona de transição, que é a principal fonte de microfissuras nos concretos.

2.1.2 Adição da sílica da casca de arroz ao concreto

De acordo com o MAPA (2014), o Brasil é o nono maior produtor de arroz do mundo, com a colheita de 11,26 milhões de toneladas na safra 2009/2010. A produção está distribuída nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Mato Grosso. A casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão a qual, representa 20% do seu peso, possui baixa densidade, contém alto teor de sílica, sendo composta por: 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de resíduos inorgânicos (HOUSTON, 1972 apud POUHEY, 2006).

A sílica da casca do arroz é o material resultante da combustão da casca e arroz, usada pelas indústrias beneficiadoras de arroz, como fonte de geração de calor e vapor necessários nos processos de secagem e parboilização dos grãos e por usinas termelétricas como combustível para geração de energia elétrica. Baseado na safra 2013/2014 o Rio Grande do Sul colheu mais de 8 milhões de toneladas de arroz (IRGA 2014). Segundo Rêgo (2015), cinza de cascas de arroz produzida pelo Brasil tem pequenas variações na sua composição química. Segundo Duart (2008), o uso da cinza da casca de arroz no concreto tem 2 principais benefícios: o reaproveitamento de um rejeito que seria descartado na natureza e a diminuição do custo na produção de concretos, uma vez que a cinza tem baixo custo, algumas vezes apenas o transporte.

A eficiência da pozzolanicidade da cinza da casca de arroz está relacionada ao seu processo de obtenção. Cinzas provenientes de queimas não controladas geram uma maior proporção de minerais não reativos, portanto de menor pozzolanicidade (DAL MOLIN, 2011).

O processo de queima é muito importante para conferir a característica pozzolânica ao produto. Deve ser feita em temperaturas de 500 a 700 °C, por tempo capaz de remover quase que a totalidade da matéria orgânica presente na cinza de casca de arroz (SILVA, 2012). De acordo com Mehta e Monteiro (2006), quanto mais escura for a cinza da casca de arroz, maior o seu teor de carbono, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada. A cor branca, por sua vez, indica a completa oxidação da matéria orgânica, segundo Dafico e Prudêncio Jr. (2002).

Algumas vezes, devido ao baixo índice de atividade pozzolânica de uma adição mineral ou a falta de água para sua hidratação, podem ocorrer situações onde estas adições não atuem como formadores de C-S-H e sim, somente como material de preenchimento dos vazios, o chamado efeito microfíler (DUART, 2008).

Dal Molin (2005) destaca que, ao contrário das pozzolanas naturais, escórias e cinzas volantes, a reação $\text{Ca(OH)}_2\text{-SiO}_2$ envolvendo a sílica ativa é rápida (e pouco variável), não sendo necessários longos períodos de cura para atingir as resistências ou as baixas permeabilidades desejadas.

Para gerar um produto dentro das expectativas, é necessário que haja uma boa mistura. Uma boa mistura depende da trabalhabilidade do concreto fresco. Segundo Bolla (2015), a adição de sílica da casca de arroz melhora a trabalhabilidade do concreto. Em um concreto, o teor de argamassa deve ser o mínimo necessário para preencher os vazios entre o agregado graúdo e a argamassa, para ligá-lo de maneira a formar um material resistente quando no

estado endurecido (YEN et al., 1999). Porém, um concreto trabalhável requer uma quantidade suficiente de argamassa para preencher os vazios entre os agregados e para lubrificar a superfície dos mesmos durante o seu lançamento. Quanto maior o teor de argamassa no concreto, maior será o abatimento (*slump test*) e a extensão de fluxo (*slump flow*) do material.

A trabalhabilidade de um concreto é resultado das propriedades inerentes de seus constituintes, das proporções da mistura e das interferências físicas e químicas entre eles. A maneira mais simples de modelagem deste sistema complexo é considerar o concreto como um material bifásico composto por uma matriz e uma fase sólida ou, ainda, descrito por suas propriedades como um material fluido e um material de fricção (MφRTSELL, MAAGE & SMEPLASS, 1996). Este modelo é considerado satisfatório para a maioria dos concretos usados, inclusive o CAD. A figura 1 mostra o aspecto dos grãos esféricos da sílica ativa.

Figura 1 - Sílica ativa



Fonte: partículas esféricas de sílica ativa
(MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 316)

2.2 Durabilidade em estruturas de concreto

A durabilidade é definida, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) como a capacidade da estrutura de resistir às influências agressivas do ambiente, previstas e definidas no início do projeto. Segundo ISAIA (2005), a durabilidade está ligada à capacidade dos materiais se conservarem em um estado desejado (para o qual foi projetado), mantendo suas características similares ao longo da vida útil do projeto. De acordo com MEHTA (1994), uma longa vida útil é sinônimo de durabilidade. Segundo Bolla (2015), a adição de sílica de casca de arroz

(SCA) melhora a durabilidade e a trabalhabilidade do concreto. O comitê 201 do ACI (1991) define durabilidade do concreto de cimento Portland como sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, ou seja, o concreto durável deve conservar sua forma original, qualidade e capacidade de uso quando exposto ao meio ambiente.

Apesar de o concreto ser o material de construção mais usado no mundo e apresentar inúmeras vantagens como material estrutural, vários problemas vem sendo detectados, sobretudo com relação à durabilidade. Nas últimas décadas, diversos estudos vêm sendo realizados sobre patologias e deterioração prematura das edificações. De acordo com o VIEIRA et al. (1997), a utilização de microssílica como pozolana apresentou muitas vantagens em relação às propriedades do concreto, tanto na sua reologia no estado fresco quanto ao comportamento mecânico e de durabilidade no estado endurecido. A adição deste material diminui a porosidade, tornando a estrutura mais densa e compacta, protegendo contra a entrada de agentes agressivos do meio em que se encontra.

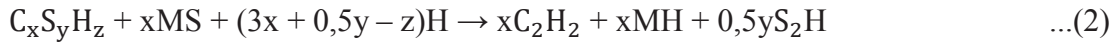
2.2.1 Efeito do sulfato de magnésio no concreto

De acordo com MEHTA (1983), produtos de concreto sofrem desagregação quando expostos por longo período a soluções com mais de 1000 ppm de sulfatos. Geralmente, os sulfatos que atacam as estruturas podem vir de solos argilosos, água do mar, atmosfera de locais industrializados, águas subterrâneas e residuais. A desagregação se deve às reações dos sulfatos com produtos hidratados do cimento, formando produtos expansivos.

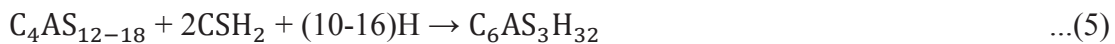
O sulfato de magnésio, além de ser extremamente agressivo e causar reações com aluminatos e hidróxido de cálcio, reage com silicatos de cálcio hidratados. Um fator que faz o sulfato de magnésio ser mais agressivo ao concreto que os de sódio e de cálcio, é o fato dele ser quase duas vezes mais solúvel que o primeiro e trinta e cinco vezes mais que o segundo, gerando soluções mais concentradas e, conseqüentemente, mais prejudiciais.

Inicialmente, o sulfato de magnésio reage com o hidróxido de cálcio formando gesso (CSH_2) e hidróxido de magnésio (brucita, M-H). Esses novos produtos podem gerar tensões internas devido à mudança de volume (CORDEIRO, 2006). Além disso, o hidróxido de magnésio ocasiona a diminuição do pH da fase líquida e proporciona a decomposição da fase C-S-H e formação de silicato de magnésio hidratado ($\text{M}_4\text{SH}_8,5$), que não apresenta

propriedades cimentantes (COHEN e BENTUR, 1988). As reações de 1 a 3 descrevem a formação do $M_4SH_{8,5}$.



Segundo as expressões (1) e (2), há a formação de gesso. Este gesso pode reagir com Aluminato de cálcio hidratado (C_4AH_{13}), monossulfoaluminatos de cálcio hidratado (C_4AS_{12-18}) ou aluminato tricálcico não hidratado (C_3A), podendo formar etringita ($C_6AS_3H_{32}$), gerando produtos com volume de até 200% maior que os originais (NEVILLE, 1997), conforme ilustram as expressões (4), (5) e (6), respectivamente.



De acordo com as reações vistas anteriormente, os produtos mais sensíveis a este ataque são os aluminatos tricálcico não hidratado (C_3A) e o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$. De acordo com Neville (1997), o ideal seria usar cimentos com baixos teores de C_3A , conhecidos como cimento Portland resistentes a sulfatos. A redução no teor de C_3A diminui a susceptibilidade ao ataque dos sulfatos, pois menos compostos alvos serão formados e, como consequência, haverá maior formação de silicato hidratado de cálcio (C-S-H). O baixo teor de C_3A e o relativamente baixo teor de C_4AF dos cimentos resistentes ao sulfato significam um alto teor de silicato, o que confere ao cimento uma elevada resistência, mas como o C_2S representa uma grande parte dos silicatos, as resistências iniciais são baixas. O calor de hidratação desprendido pelos cimentos resistentes aos sulfatos não é muito maior que o desprendido pelos cimentos de baixo calor de hidratação.

Segundo a norma NBR 5737, os cimentos CPI, CPII, CPIII, CPV e CPV-ARI podem ser considerados resistentes a sulfatos, desde que atenda a pelo menos 1 dos seguintes requisitos:

- a) Teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8 e 5% em massa respectivamente;

- b) Cimentos do tipo alto forno que contiverem entre 60 e 70% de escória granulada de alto forno em massa;
- c) Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25 e 40% de material pozolânico em massa;
- d) Cimentos que tiverem antecedentes de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem a resistência a sulfatos.

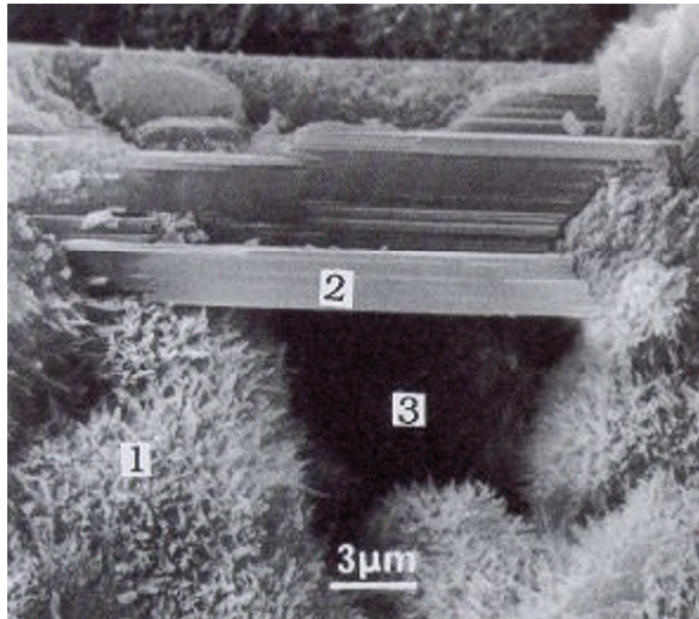
De acordo com Silva Filho (1994), o uso de pozolanas tem a vantagem de, além de reagir com o hidróxido de cálcio, diminuir o teor de C_3A devido à diminuição da quantidade de clínquer. A diminuição da quantidade de cimento, devido às substituições, contribui para diminuir a formação de hidróxido de cálcio e o teor de C_3A no concreto, tornando-o menos susceptível aos íons sulfatos, já que são os elementos mais sensíveis a este ataque.

2.2.2 Influência da porosidade e da capilaridade

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o silicato hidratado de cálcio (C-S-H) representa 50 a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento completamente hidratada. Estes compostos são os principais responsáveis pela resistência da pasta a esforços mecânicos. Geralmente o C-S-H contém pequenas quantidades de Al, Fe, Mg e outros íons.

→ $Ca(OH)_2$: representa 20 a 25% do volume de sólidos da pasta. Sua morfologia é bem definida, formando cristais prismáticos, que aumentam de tamanho à medida que aparecem espaços livres, decorrentes do aumento da relação água/cimento. O hidróxido de cálcio apresenta característica alcalina, sendo portanto responsável pela passivação das armaduras, protegendo-as da corrosão. A figura 2 mostra a microestrutura do concreto com a presença do hidróxido de cálcio em forma de cristais prismáticos.

Figura 2 - Microestrutura do concreto: 1) C-S-H; 2) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 3) vazio capilar.



Fonte: Moranville, 1992

→Sulfoaluminatos de cálcio: ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos da pasta hidratada, sendo os principais compostos a etringita e monossulfato de cálcio.

→Vazios: a estrutura de poros se desenvolve durante a hidratação e é influenciada pela relação água/cimento. A resistência mecânica da pasta está fortemente relacionada com a sua porosidade, pois somente os elementos sólidos resistem a esforços. É aceito que a resistência da argamassa é fundamentalmente uma função da forma e distribuição dos espaços vazios e porosidade. A porosidade da pasta de cimento se distribui da seguinte forma:

→ poros de gel ou entre camadas de C-S-H - vazios pequenos (2 a 25 Å) que não influem na resistência da pasta.

→ vazios capilares - representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da hidratação do cimento, sendo que estes influenciam um pouco na resistência da pasta de cimento. Segundo NEVILLE (1997), a porosidade capilar da pasta depende tanto da relação água/cimento da mistura como do grau de hidratação. Os poros capilares possuem um tamanho médio, estimado a partir de medição de pressão de vapor, de aproximadamente 1,3 µm. Ao decorrer da hidratação acontece um aumento no teor de sólidos da pasta e, nas pastas maduras e densas, os capilares podem ser interrompidos pelo gel, sendo apenas interligados por poros de gel.

→ Poros de ar incorporado - possuem forma esférica, com dimensões superiores aos vazios capilares. Podem ser devido a uma má vibração do concreto. Devido a suas grandes dimensões reduzem bastante a resistência do concreto e aumentam sua permeabilidade.

Segundo MEHTA E MONTEIRO (1994), os poros de gel de C-H-S (poros dentro do gel de cimento) são muito pequenos para iniciar trincas sob baixos esforços e por isso não prejudicam a resistência da argamassa. Já os poros capilares (poros entre os produtos de hidratação do cimento), entretanto, podem ter alguns milímetros de comprimento e são suficientes para iniciar fissuras, reduzindo, portanto a resistência da argamassa. Apesar disso a distinção entre os poros capilares e os poros gel em relação ao diâmetro dos poros não é bem definida, sendo geralmente considerado que os poros de gel possuem diâmetros em torno de 1 a 3 nm e os poros capilares em torno de 10 a 5000 nm. Durante a hidratação do cimento grandes espaços dos poros capilares são preenchidos com os produtos da hidratação do cimento, refinando assim o tamanho destes poros.

Segundo Monteiro (1985), a microssílica, por possuir tamanho de partículas em tamanho médio de cem vezes menor que o cimento, afeta o arranjo físico do sistema, principalmente próximo ao agregado, onde existe maior porosidade. O autor afirma ainda que a reação pozolânica da sílica ativa com o hidróxido de cálcio parece “introduzir pontos de solda” na interface pasta/agregado, provocando uma densificação da matriz e conseqüentemente uma redução da porosidade e da capilaridade nos concretos. A sílica da casca de arroz, quando reagir com o hidróxido de cálcio, introduzirá estes “pontos de solda” na interface pasta/agregado. Dependendo do tamanho dos seus grãos, poderá rearranjar o sistema próximo ao agregado, onde é a zona mais porosa e ainda aumentar a densidade do concreto, devido à ocupação dos poros, se seus grãos forem menores que os do cimento, contribuindo para a diminuição da porosidade e da capilaridade e, com isso, diminuindo a susceptibilidade de ataque de agentes agressivos.

2.2.3 Absorção de água

A capacidade do concreto de resistir à ação de intempéries, ataques químicos e físicos, mantendo assim suas características originais e desempenhando sua função, é considerado mais um parâmetro para a confecção de estruturas de concreto. Efeitos físicos que influenciam negativamente a durabilidade do concreto incluem o desgaste da superfície,

fissuras causadas pela pressão da cristalização de sais nos poros e exposição a temperaturas extremas. Alguns efeitos químicos deletérios como a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas e reações expansivas envolvendo ataque por sulfato, reações álcali-agregado e corrosão das armaduras influenciam a durabilidade do concreto. A água é considerada o agente primário para a maioria dos problemas de durabilidade, servindo de veículo para o transporte de íons agressivos através da estrutura porosa do concreto.

De acordo com Diamond (2004), a interconexão desses vazios de água ou ar torna o concreto permeável à água. A permeabilidade é a propriedade que identifica a possibilidade de passagem da água através do material, sendo que os concretos expostos ao ar sofrem os ataques de águas agressivas ou a ação destruidora dos agentes atmosféricos. A absorção é o processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares. A porosidade se refere à quantidade total de vazios e a absorção está em função dos poros que tem comunicação com o exterior.

Segundo Hou e Chung (2000), o emprego de sílicas em substituição ao cimento aumenta a resistência à corrosão principalmente pelo fato de diminuir a absorção de água e aumentar a resistividade do concreto. A diminuição da porosidade e da capilaridade diminui também a absorção de água, tornando o concreto menos susceptível à entrada de agentes agressivos e, com isso, torna-o mais resistente a agentes deletérios.

2.2.4 Teor de ar aprisionado no concreto fresco

De acordo com Meththa e Monteiro (1994) pode-se encontrar vazios preenchidos por ar dentro do concreto de duas formas: através de bolhas de ar incorporado ou através de vazios de ar aprisionado. As bolhas de ar incorporado possuem dimensões entre 100 μm e 1 mm de diâmetro, enquanto os vazios de ar aprisionado são maiores, ficando entre 1 mm e 10 mm. Os vazios de ar aprisionado, que na maioria das vezes são causados por deficiência nas dosagens e escolha dos materiais, são nefastos à qualidade final do concreto, podendo comprometer as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade, além de ficar mais susceptível a entrada de agentes agressivos, como os íons de sulfato. Outro aspecto negativo em relação à presença de vazios de ar aprisionado é a aparência final, com a formação de macrobolhas superficiais. No caso de concreto aparente a presença de macrobolhas superficiais é totalmente indesejável.

Quanto as bolhas de ar incorporado, podem ter 2 origens. A primeira, com a natural incorporação de pequenas quantidades de ar, disseminadas através de microbolhas na massa do concreto. A segunda, através de aditivos incorporadores de ar ao concreto. A incorporação denominada natural, bem como a presença de vazios de ar incorporado advém de fatores como tipo e finura dos aglomerantes e agregados miúdos, dosagens dos materiais, tipo e grau de adensamento aplicado, temperatura e tempo de mistura do concreto. É calculado de acordo com a NBR 9833–2008.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O comportamento dos concretos com adição da sílica da casca de arroz frente à ação da solução de sulfatos foi analisado de acordo com as seguintes variáveis:

Misturas:

- Teor de substituição: Referência (0%), 3%; 5% e 10% de substituição parcial de cimento Portland (CP) por sílica da casca de arroz. As misturas 0%, 3%, 5% e 10% serão referidas como M0, M3, M5 e M10 respectivamente.

Ensaio físicos de compressão axial e perda de massa para todas as misturas, a serem feitas conforme atingem as idades indicadas para cada tipo de exposição:

- 28 dias de cura em água potável e depois completa as seguintes idades em água desmineralizada: 56, 90, 180 e 360 dias;

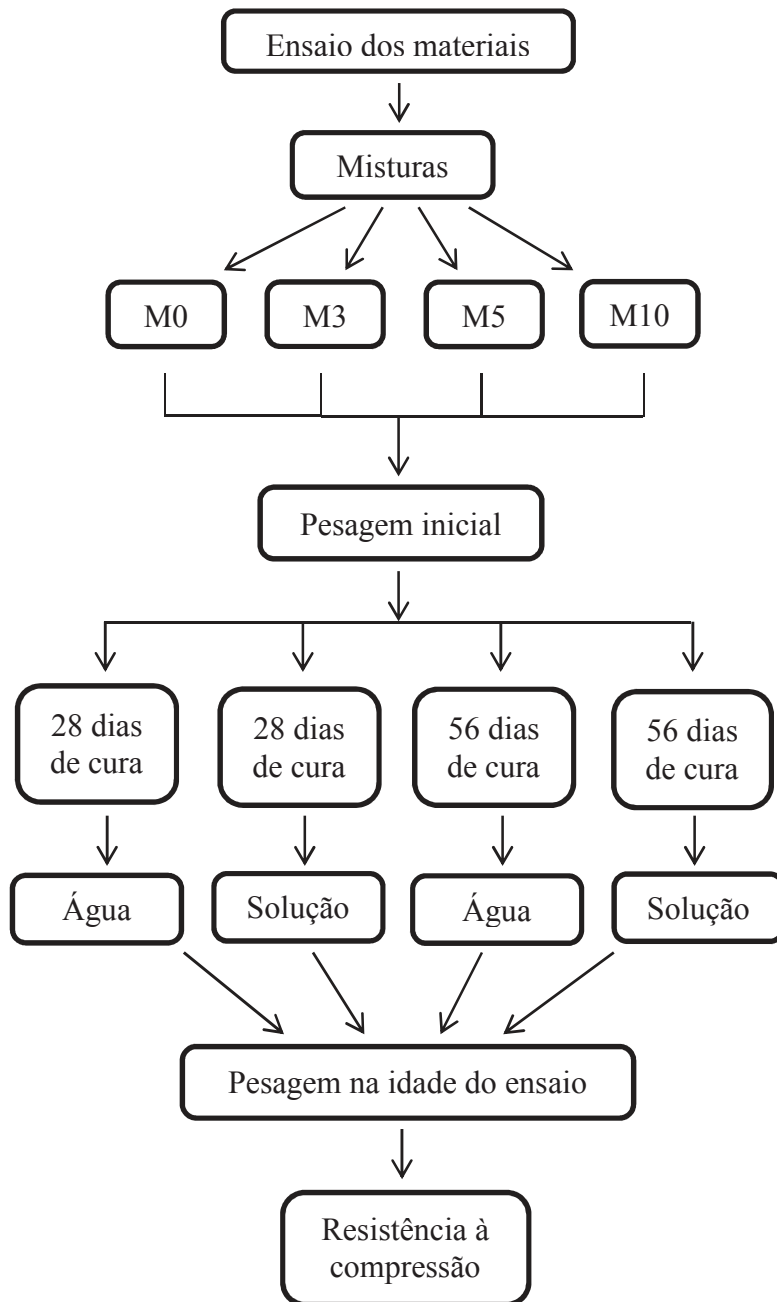
- 28 dias de cura em água potável e depois completa as seguintes idades em solução de sulfato de magnésio: 56, 90, 180 e 360 dias;

- 56 dias de cura em água potável e depois completa as seguintes idades em água desmineralizada: 90, 180 e 360 dias;

- 56 dias de cura em água potável e depois completa as seguintes idades em solução de sulfato de magnésio: 90, 180 e 360 dias;

As misturas serão curadas em água potável por 28 e 56 dias antes de serem encaminhadas para a água desmineralizada e para a solução de sulfato de magnésio. Isto serve para sabermos se uma cura mais prolongada ajuda a pozolana (SCA) a reagir com o hidróxido de cálcio e, com isso, diminuir os efeitos do sulfato de magnésio nas misturas.

As ordens dos ensaios obedeceram ao seguinte organograma:



3.1 Materiais

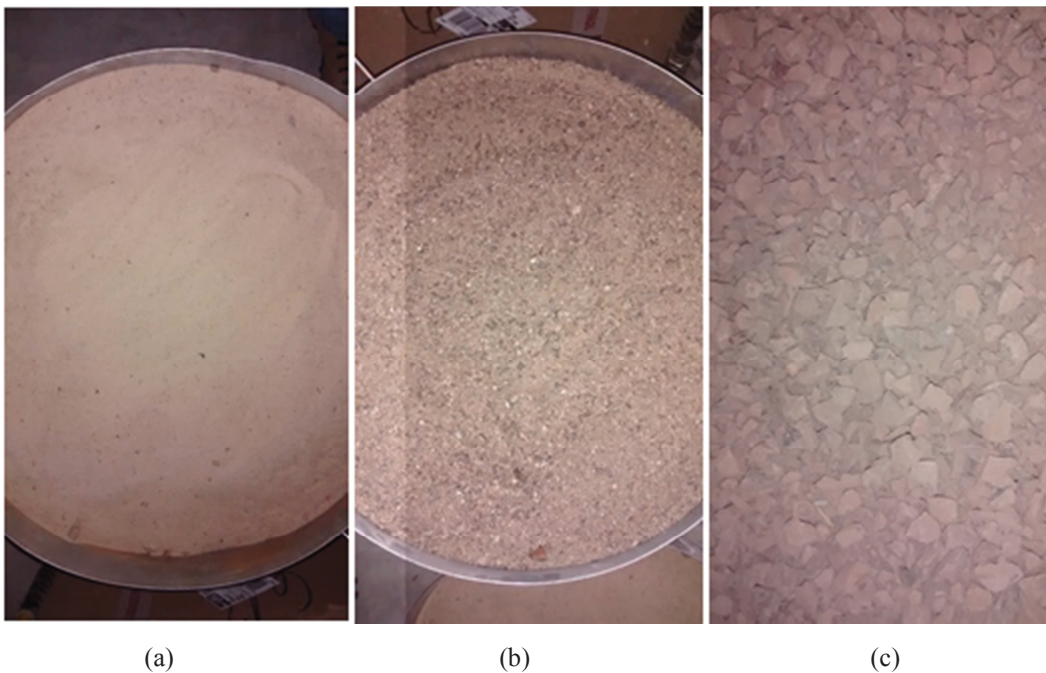
3.1.1 Agregados

O agregado graúdo (brita) que foi utilizado nos concretos desta pesquisa é de origem basáltica e é comercializado no município de Alegrete-RS. Os agregados miúdos (areia fina e areia grossa) são provenientes do leito do rio Ibicuí, no município de Manoel Viana-RS. Foram realizados os seguintes ensaios para a caracterização dos agregados.

- Determinação de massa específica do agregado miúdo por meio de frasco Chapman, conforme NBR 9776-1988;
- Determinação de massa específica, do agregado graúdo, conforme a NBR NM 53-2009;
- Determinação da composição granulométrica, conforme a NBR NM 248-2003;

Na Figura 3 são mostrados os agregados utilizados nesta pesquisa.

Figura 3 - Agregados utilizados no ensaio: a-areia fina, b-areia grossa e c-brita

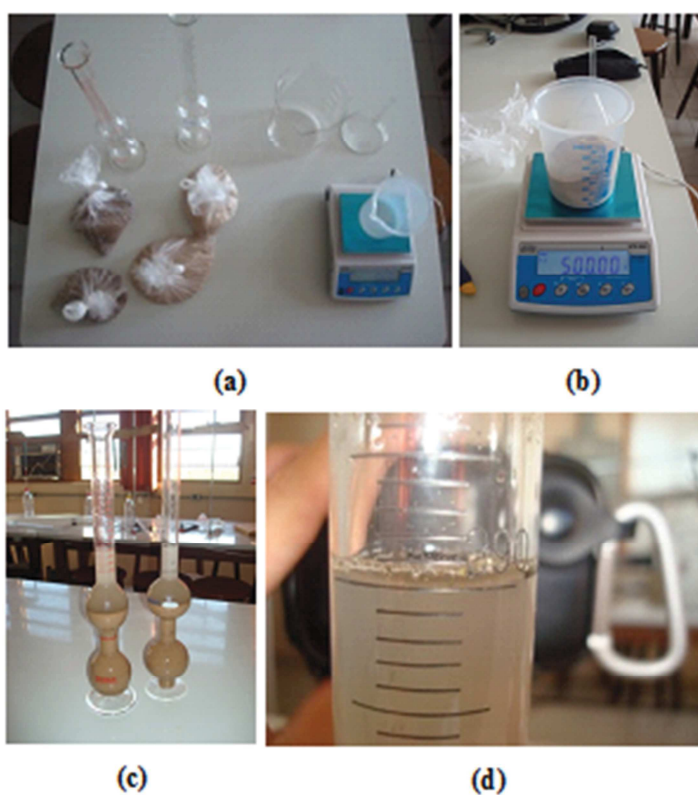


Fonte: elaboração própria.

Massa específica dos Agregados Miúdos pelo frasco de Chapman

As areias em estudo foram ensaiadas conforme a NBR 9776-1987 para obtenção de suas massas específicas. As amostras foram quarteadas e ensaiadas. A Figura 4 apresenta algumas etapas de ensaio.

Figura 4 - Determinação das massas específicas dos agregados miúdos - etapas de ensaio: a- materiais e frascos de Chapman; b-massa de 500g de areia; c-frascos com o material + água; d- medida da água deslocada.



Fonte: elaboração própria.

Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura controlada, apesar da norma não exigir este procedimento. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Massas específicas das areias.

Parâmetros iniciais	Areia fina		Areia grossa	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
γ (g/cm ³)	2,63	2,63	2,58	2,59
γ média (g/cm ³)	2,63		2,58	

Fonte: elaboração própria.

Massa específica do agregado graúdo

A massa específica do agregado graúdo foi determinada de acordo com a NBR NM 53-2003 e a Figura 5 (a e b) mostra os principais procedimentos. Em (a) mostra a obtenção da massa da amostra na balança na condição hidrostática e na (b) a massa do agregado graúdo saturado com superfície seca. A massa específica obtida da brita foi de 2,57 g/cm³.

Figura 5 - Etapas do ensaio da massa específica



Fonte: elaboração própria.

Granulometria e módulo de finura dos agregados

Granulometria é a distribuição, com sua quantificação em peso, por tamanhos das partículas de uma amostra que compõe um agregado. A separação é realizada por meio de peneiras com diferentes granulometrias e pesa-se as partículas retidas em cada uma delas.

O módulo de finura de um agregado se determina pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras de série normal, dividida por 100. O módulo de finura é uma grandeza adimensional e deverá ser apresentado com aproximação de 0,01. O módulo de finura de um agregado é maior quanto maior forem as partículas deste.

Os resultados da caracterização dos agregados estão descritos na tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos agregados

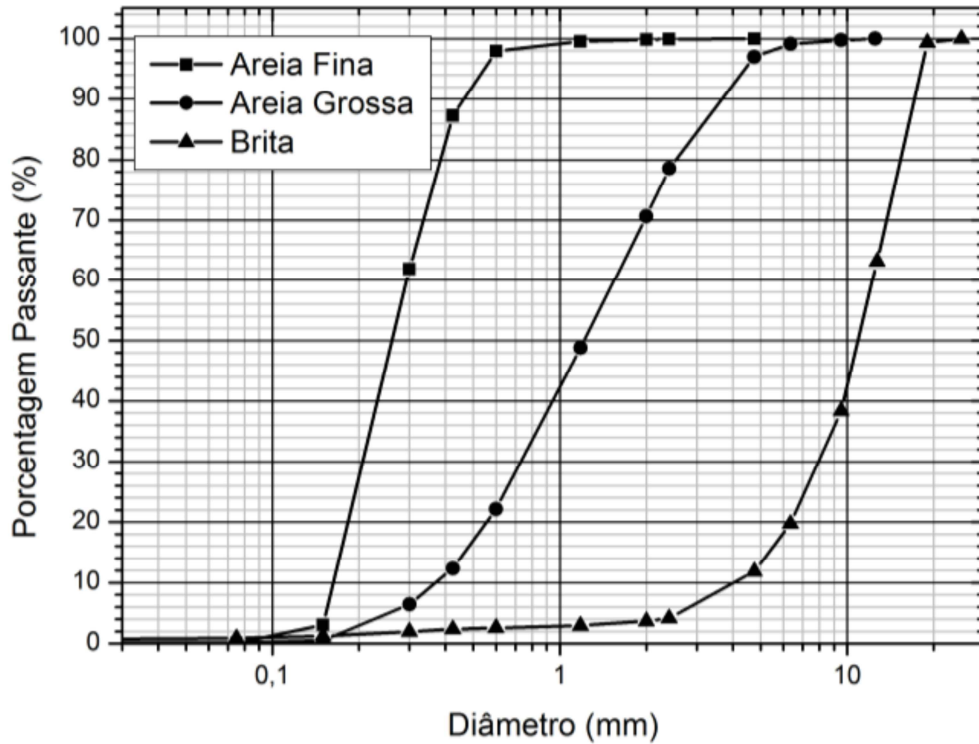
Ensaio	Areia Fina	Areia Grossa	Brita
Módulo de finura	1,37	3,47	6,38
Dimensão máxima Característica (mm)	0,6	4,75	19

Fonte: elaboração própria

De acordo com a NBR 7211-2005, os agregados miúdos são classificados dentro da zona ótima quando o seu módulo de finura estiver entre 2,20 e 2,90. Pode-se observar, conforme a Tabela 2, que os agregados miúdos utilizados neste trabalho se encontram fora desta faixa. A areia fina encontra-se abaixo da zona utilizável, enquanto que a areia grossa ficou classificada acima da zona aceitável, já que sua faixa vai de 2,90 a 3,50. Para obter-se uma amostra de areia dentro da faixa, realizou-se a mistura dos dois agregados miúdos, na proporção de 45 e 55% (areia grossa e areia fina, respectivamente) resultando em uma areia dentro da zona utilizável (módulo de finura da mistura igual a 2,3). A norma NBR 7211-2005 classifica os agregados como leves quando sua massa específica absoluta é inferior à 2000 Kg/m³ e pesados quando a sua massa específica for superior à 3000 Kg/m³. Neste trabalho todos agregados utilizados estão entre esses limites e são classificados como normais.

As curvas granulométricas dos agregados são mostradas no Gráfico 1. Pode-se observar que apenas a areia grossa possui distribuição granulométrica contínua e bem graduada, contendo porção granulares em diferentes faixas granulométricas. A areia fina e a brita possuem característica granulométrica uniforme, como pode ser observado pela inclinação da curva.

Gráfico 1 - Composição granulométrica dos agregados



Fonte: elaboração própria

3.1.2 Cimento

O Cimento Portland utilizado é do tipo CPII Z-32 de fabricação da Supremo Cimentos. Esse tipo de cimento foi utilizado, uma vez que é o tipo de cimento Portland brasileiro comercializado na região do pampa e da campanha. O cimento apresenta as características químicas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características químicas do cimento CP II-Z

Sílica de Casca de Arroz		Cimento Portland CP II-Z	
Perda ao fogo	3,50%	Perda ao fogo	5,34%
Dióxido de Silício - SiO ₂	91,48%	Óxido de Magnésio - MgO	5,87%
Óxido de Cálcio - CaO	0,36%	Anidrido Sulfúrico – SO ₃	2,70%
Óxido de Magnésio - MgO	0,32%	Anidrido Carbônico – SO ₃	4,37%
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	0,05%	Resíduo Insolúvel - RI	12,80%
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	0,00%	Equivalente Alcalino em Na ₂ O	0,74%
Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,04%	Finura – Peneira 0,075 mm	3,10%
Óxido de Potássio - K ₂ O	1,40%	Água da Pasta de Consistência Normal	26,80%
Óxido de Manganês - MnO	0,32%	Início de Pega (min)	246
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	0,15%	Fim de Pega (min)	330
Pentóxido de Difósforo - P ₂ O ₅	0,45%	Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)	0,55
Área Específica	21142 m ² /kg	Área Específica	374 m ² /kg

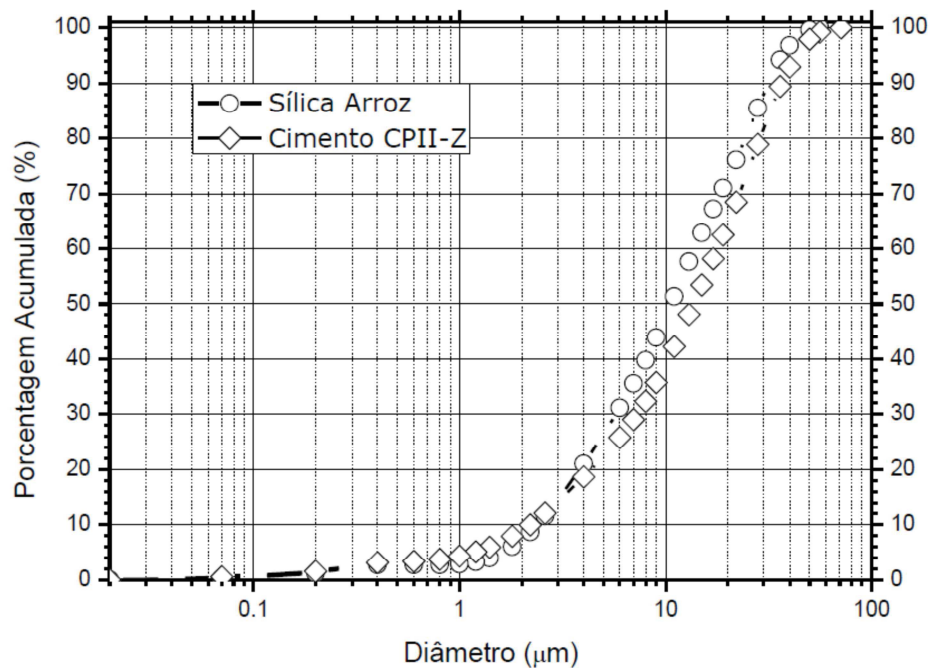
Fonte: Marangon et. al. (2013)

3.1.3 Sílica da casca de arroz

A sílica de casca de arroz usada neste trabalho é comercializada com o nome de SILCCA NOBRE SC-I, produzida no município de Alegrete RS pela empresa Sílica Verde do Arroz LTDA. O processo de fabricação se dá através do controle de combustão por meio de leito fluidizado. Este processo melhora a eficiência da queima, resultando em uma sílica de alta qualidade e bastante amorfa. No trabalho de Marangon et al (2013) foi avaliado o índice de atividade pozolânica da sílica da casca de arroz, a mesma utilizada neste trabalho. Os autores concluíram que a sílica da casca do arroz possui índice de atividade pozolânica igual a 101,7%, superior aos 75%, índice mínimo previsto na NBR 12653-2012 para ser considerado como material pozolânico.

No Gráfico 2, é apresentado a análise granulométrica a laser da sílica da casca de arroz e do cimento CP II Z-32, utilizando o aparelho CILAS 1190, disponível no campus Bagé da UNIPAMPA.

Gráfico 2- Composição Granulométrica da sílica da casca de arroz e do cimento Portland



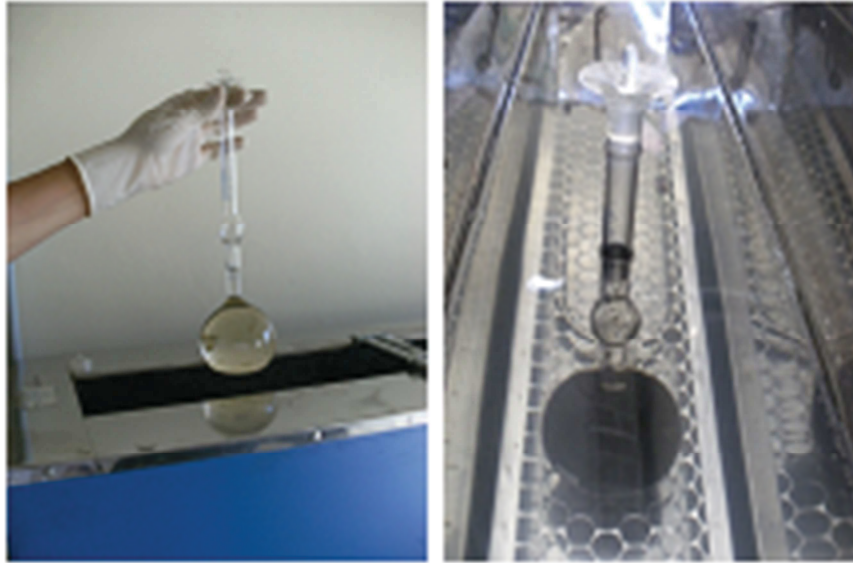
Fonte: elaboração própria

Analisando o gráfico 2, pode-se observar que o cimento e a sílica da casca de arroz possuem granulometrias muito similares, com tamanho médio de grão de aproximadamente 15 μm .

Massa específica dos materiais em pó

Os ensaios para determinação da massa específica do cimento Portland CP II-Z-32, da sílica da casca de arroz e das misturas dos dois, foram realizadas conforme a NBR NM 23-2000. A Figura 6 ilustra os frascos com querosene imersos em água com temperatura controlada de 20 °C. A permanência dos frascos deu-se até a constância de volume obtida através do volume inicial de leitura (cerca de 30 minutos).

Figura 6 - Estabilização do querosene em temperatura controlada de 20 °C.



Fonte: elaboração própria

A massa específica obtida da sílica da casca de arroz foi de 2,03 g/cm³, enquanto que a de cimento Portland CP II-Z-32 foi de 2,93 g/cm³.

3.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado neste trabalho é do tipo redutor de água – Polifuncional, que possui massa específica igual à 1,18 g/cm³, teor de sólidos de 40% e pH igual à 8,0. Pode reduzir o consumo de água em até 15%. É fabricado pela empresa GRACE com o nome comercial de MIRA 34.

3.1.5 Solução de sulfato de magnésio

A solução de sulfato de magnésio (marca Nova Química do Sul LTDA.) foi preparada dissolvendo-se 750 gramas a cada litro de água desmineralizada, obtendo-se uma concentração de 7,5%. Essa concentração é a mesma usada no ensaio de Cordeiro (2006). A

solução foi trocada a cada mês para manter sempre o nível de concentração da solução e evitar fungos e bactérias.

3.1.6 Água potável e água desmineralizada

A água potável usada na cura inicial de 28 e 56 dias foi originada da rede pública de abastecimento local (CORSAN).

A água desmineralizada usada nos ensaios e na fabricação da solução de sulfato de magnésio foi obtida através de resinas de troca catiônica. Ela possui caráter ácido, pois a regeneração da resina é feita por solução ácida. No momento dos ensaios o pH medido foi de 5.

3.2 Métodos experimentais

3.2.1 Método de dosagem

Para o cálculo da dosagem dos concretos foi utilizado o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1993). O cimento foi substituído, parcialmente, em volume por sílica de casca de arroz. Em todas as misturas foram usadas 1% de aditivo em relação ao material cimentício.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de consumo de material para as dosagens estudadas neste trabalho. Percebe-se que a única alteração é nas quantidades de cimento Portland e sílica da casca de arroz.

Tabela 4 - Consumo de materiais em kg/m³

Misturas	Cimento	Areia fina	Areia grossa	Brita	Sílica da casca de arroz	Água
M0	359,28	493,85	404,60	1070,95	-	179,64
M3	348,50	493,85	404,60	1070,95	7,47	179,64
M5	341,32	493,85	404,60	1070,95	12,44	179,64
M10	323,35	493,85	404,60	1070,95	24,89	179,64

Fonte: elaboração própria

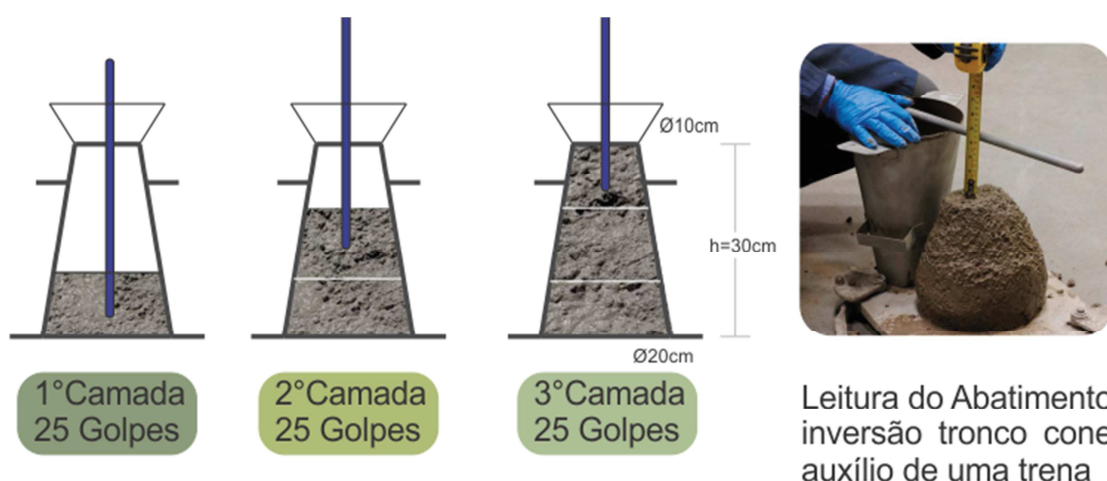
O processo de mistura na betoneira obedeceu a seguinte ordem: adicionou-se metade da água calculada na dosagem, agregado graúdo, cimento e sílica da casca de arroz (quando fazia parte da mistura), agregados miúdos, a outra metade da água calculada na mistura e o aditivo.

3.2.2 Trabalhabilidade do concreto

A consistência é um dos principais fatores que influenciam na trabalhabilidade do concreto. Conforme modificamos o grau de umidade que determina a consistência, alteramos também suas características de plasticidade e permitimos a maior ou menor deformação do concreto perante aos esforços. Um dos métodos mais utilizados para determinar a consistência é o ensaio de abatimento do concreto, também conhecido como slump test. Neste ensaio, colocamos uma massa de concreto dentro de uma forma tronco-cônica, em três camadas igualmente adensadas, cada uma com 25 golpes. Retiramos o molde lentamente, levantando-o verticalmente e medimos a diferença entre a altura do molde e a altura da massa de concreto depois de assentada. Este ensaio segue a norma NBR-NM-67-1998.

A Figura 7 ilustra o ensaio de abatimento.

Figura 7 - Ilustração do ensaio de abatimento



Fonte: Pedreirão macetes de construção.

3.2.3 Teor de ar aprisionado no concreto fresco

Caso o adensamento seja manual, aplicar os golpes uniformemente em 3 camadas de 30 golpes por camada, tal que a haste penetre na camada anteriormente adensada. No adensamento mecânico o concreto deve ser adensado em 2 camadas, sendo que o vibrador deve ser inserido até que o mesmo penetre 25 mm, sem deixá-lo encostar no fundo e nas laterais do molde, devendo ser retirado lentamente assim que o concreto estiver com a superfície lisa e brilhante.

Após o adensamento, manual ou mecânico, bater levemente na face externa do recipiente até o fechamento de eventuais vazios. Efetuar o rasamento com o auxílio da régua acrílica, fazendo movimentos de vai e vem até a retirada do excesso do concreto, sem deixar vazios entre o recipiente e a superfície do concreto. Após realizado o rasamento, limpar as superfícies externas e pesar, registrando a massa.

Os resultados obtidos para o ar aprisionado são da seguinte maneira:

$$p = \frac{M}{V} * 1000$$

Onde: M = massa do concreto medido em um recipiente de volume conhecido

V = volume do recipiente

P = massa específica aparente do concreto

$$R = (mc + mf + mg + ma)/p$$

Onde: mc = massa de cimento betonada

Mf = massa de agregado miúdo

Mg = massa de agregado graúdo

Ma = massa de água

P = massa específica aparente do concreto

R = rendimento

$$C = mc/R$$

Onde: C = consumo de cimento

Mc = massa de cimento betonada

R = rendimento

$$V_t = \frac{mc}{pc} + \frac{mf}{pf} + \frac{mg}{pg} + \frac{ma}{pa}$$

Onde: V_t = volume total dos componentes da betonada

mc , mf , mg e ma são as massas dos componentes da betonada

pc , pf , pg e pa são as massas específicas do cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente.

3.2.4 Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica – NBR 9778-87

A água, quando ausente de substâncias deletérias dissolvidas, como sais e outros agentes agressivos, por si só possui a capacidade de dissolver a matriz de cimento, corroendo-a. Por conseguinte, a importância do controle de absorção em termos de controle de qualidade e durabilidade do concreto é fundamental.

Logo, para avaliar o comportamento do concreto com adição de sílica de casca de arroz, quanto a esta problemática efetuou-se o ensaio referente NBR 9778-1987, onde determinou-se os percentuais de absorção de água por imersão, os índices de vazios e as massas específicas de corpos de prova de concreto contendo substituição parcial de 3%, 5% e 10% de sílica de casca de arroz Silca Nobre SCI por cimento Portland, conforme descrito nos objetivos específicos.

Nesse ensaio, após a cura de 28, 56 e 90 dias, os corpos de prova foram colocados em estufa a uma temperatura de 105 °C, para eliminar a presença de água no interior de sua estrutura, resultante do processo de cura, de forma que posteriormente possibilitasse a quantificação do seu índice de vazios. Como especificado em norma foram determinadas as massas nos períodos de permanência em estufa durante 24 h, 48 h e 72 h.

Passadas às 72 h de permanência em estufa, os corpos de prova foram imersos em água. Esse procedimento consiste na exposição de forma gradual em três fases, como mostrado na Figura 8. A primeira fase consistiu-se na imersão de um terço da altura dos corpos de prova (CP's) durante um período de 4 h (a). A segunda fase, por sua vez, incidiu na imersão de dois terços dos CP's por mais 4 h (b). Por fim, os corpos de prova são totalmente

imersos em água até completarem 64 h (c). Após passadas 72 h foi realizada a leitura da massa dos CP's.

Figura 8 - Etapas do processo de imersão dos corpos de prova



(a)

(b)

(c)

Fonte: elaboração própria.

Neste ensaio, também foi realizado o controle da massa hidrostática dos corpos de prova, conforme mostrado na 9a. Outro diferencial desse ensaio é o processo de fervura escrito na norma, visto na 9b, onde simulou-se a penetração de água em diferentes tensões superficiais, determinadas pela temperatura do líquido.

Figura 9 - a. balança hidrostática; b. banho Maria



a.

b.

Fonte: elaboração própria.

Para a determinação da absorção de água por imersão, foram moldados 36 corpos de prova com dimensões de 100 x 200 mm. Os corpos de prova foram divididos em 3 amostras para 4 misturas, referentes às três idades estudadas, 28, 56 e 90 dias de cura úmida.

3.2.5 Extração de amostras das vigas

Para o estudo do comportamento mecânico dos concretos foram moldados e curados em conformidade com a NBR 5738-2003, 4 vigas de concreto com as dimensões de 75 x 15 x 15 cm para cada porcentagem de sílica estudada, sendo no total 16 vigas. De cada viga, foi extraído 22 corpos de prova, por carotagem, de dimensões de 50 x 100 mm, conforme mostram as Figuras 10 e 11. Decidiu-se por este tipo de amostragem para evitar o efeito parede que os moldes causam e também para diminuir a interferência dos agregados maiores.

Figura 10 - extração de corpos de prova das vigas por carotagem



Fonte: elaboração própria

Figura 11 - vigas das quais já foram extraídos as amostras



Fonte: elaboração própria

Após a extração por carotagem, as amostras foram identificadas, pesadas e divididas em 2 partes: 28 e 56 dias de cura em água potável. Depois disso, foram distribuídas em 16 recipientes, 8 com solução de sulfato de magnésio e 8 com água desmineralizada, sendo 22 amostras por recipiente conforme mostra a tabela 5.

Tabela 5 - Divisão das amostras no ensaio de ataque por sulfatos

Mistura	28 dias de cura em água potável		56 dias de cura em água potável	
	Sol. MgSO ₄	Água desmineralizada	Sol. MgSO ₄	Água desmineralizada
M0	22 amostras	22 amostras	22 amostras	22 amostras
M3	22 amostras	22 amostras	22 amostras	22 amostras
M5	22 amostras	22 amostras	22 amostras	22 amostras
M10	22 amostras	22 amostras	22 amostras	22 amostras

Fonte: elaboração própria

3.2.6 Ensaio de ataque de sulfato ao concreto

Os ensaios foram realizados nas idades de 56, 90, 180 e 360 dias. À medida que as misturas atingiam a idade desejada, quatro amostras eram retiradas de cada recipiente para os ensaios. Os parâmetros analisados foram: resistência à compressão axial e perda de massa. A figura 12 ilustra os recipientes com amostras de concreto conforme explicado na Tabela 5.

Figura 12 - Recipientes com amostras de concreto



Fonte: elaboração própria

3.2.7 Ensaio de compressão axial

Depois de atingidas as idades de ensaio, as amostras a serem estudadas foram pesadas e capeadas com enxofre para regularização da superfície dos corpos-de-prova. A figura 13 mostra o ensaio de resistência á compressão axial na prensa EMIC, com capacidade de 200 KN.

Figura 13 - Ilustração do ensaio de compressão axial



Fonte: elaboração própria

Os resultados de compressão axial foram calculados da seguinte maneira:

$$\sigma = F/A$$

Onde: σ = resistência à compressão axial, em MPa (megapascal);

F = força aplicada pela prensa, em N (newton);

A = área da seção transversal das amostras, em mm² (milímetros quadrados).

4 RESULTADOS

4.1 Concreto no estado fresco

4.1.1 Ensaio de abatimento e ar aprisionado

A tabela 6 mostra os resultados do ensaio de abatimento e de ar aprisionado para as misturas estudadas.

Tabela 6 - Valores obtidos nos ensaios de abatimento e de ar aprisionado

Mistura	M0	M3	M5	M10
Abatimento (mm)	120	120	110	120
Ar aprisionado (%)	1,3	1,5	1,4	1,3

Fonte: elaboração própria

Percebe-se que, aparentemente, não houve alterações significativas nos resultados de ensaio de abatimento com o incremento da adição de sílica da casca de arroz. Do mesmo modo, os valores obtidos do ar aprisionado das misturas aparentemente não apresentaram variações significativas.

4.2 Concreto no estado endurecido

4.2.1 Índice de vazios e massa específica

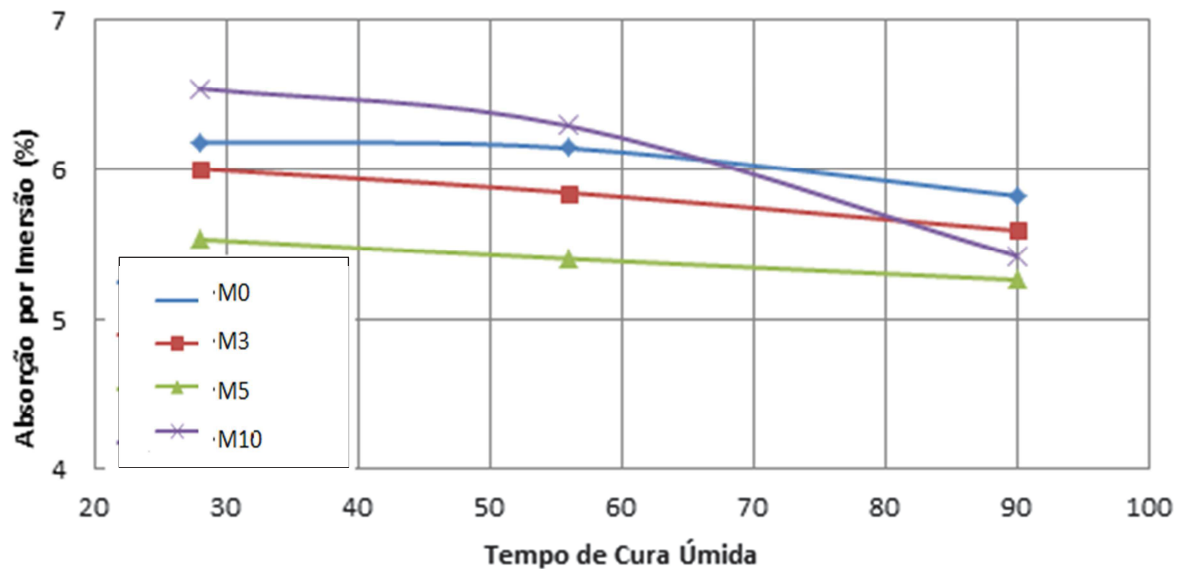
Os resultados de absorção obtidos no processo de imersão (após 72 h) são apresentados na Tabela 7 e na Figura 14.

Tabela 7 - Determinação da absorção de água por imersão após 72 h (%)

	M0			M3			M5			M10		
	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias
Média	6,19	6,15	5,83	6,01	5,85	5,60	5,54	5,41	5,27	6,55	6,30	5,43
Desvio Padrão	0,34	0,11	0,41	0,16	0,39	0,11	0,31	0,32	0,17	0,55	0,06	0,33
C.V. (%)	5,44	1,85	7,02	2,58	6,68	1,91	5,58	5,82	3,29	8,38	1,01	6,07
Desvio Relativo Máximo (%)	0,25	0,08	0,30	0,12	0,29	0,08	0,22	0,21	0,13	0,40	0,05	0,22

Fonte: elaboração própria.

Figura 14 - Gráfico da absorção de água por imersão



Fonte: elaboração própria.

Conforme pode ser observado na Figura 14 e na tabela 7, com exceção da mistura M10 nas idades de 28 e 56 dias, todas as outras medidas e misturas apresentam valores inferiores de absorção por imersão, comparados à mistura de referência. Nota-se, que a mistura M5 foi a que apresentou uma menor absorção.

Os resultados de absorção de água obtidos pelo processo de fervera são apresentados na Tabela 8. De acordo com os dados, pode ser observado que os valores de absorção pelo processo de fervera aumentaram comparados com a Tabela 7. Isso demonstra que a realização da medida em banho maria proporcionou um maior preenchimento dos vazios do concreto,

uma vez que a água muda sua viscosidade. No entanto, cabe ressaltar que o comportamento observado na Tabela 7 é o mesmo da Tabela 8.

Tabela 8 - Determinação da absorção de água por imersão e fervura (%)

	M0			M3			M5			M10		
	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias
Média	6,66	6,43	6,10	6,34	6,12	5,42	5,81	5,60	5,23	7,00	6,63	5,80
Desvio Padrão	0,05	0,11	0,42	0,28	0,33	0,28	0,34	0,31	0,10	0,53	0,08	0,44
C.V. (%)	0,78	1,71	6,91	4,44	5,46	5,17	5,92	5,46	1,86	7,51	1,14	7,58
Desvio Relativo Máximo (%)	0,04	0,08	0,32	0,21	0,25	0,19	0,25	0,24	0,07	0,36	0,05	0,34

Fonte: elaboração própria.

Observa-se que, para todas as misturas, quanto maior a idade, menor a absorção de água. Na Tabela 9 e na Figura 15 encontram-se os resultados dos índices de vazios obtidos para as misturas estudadas.

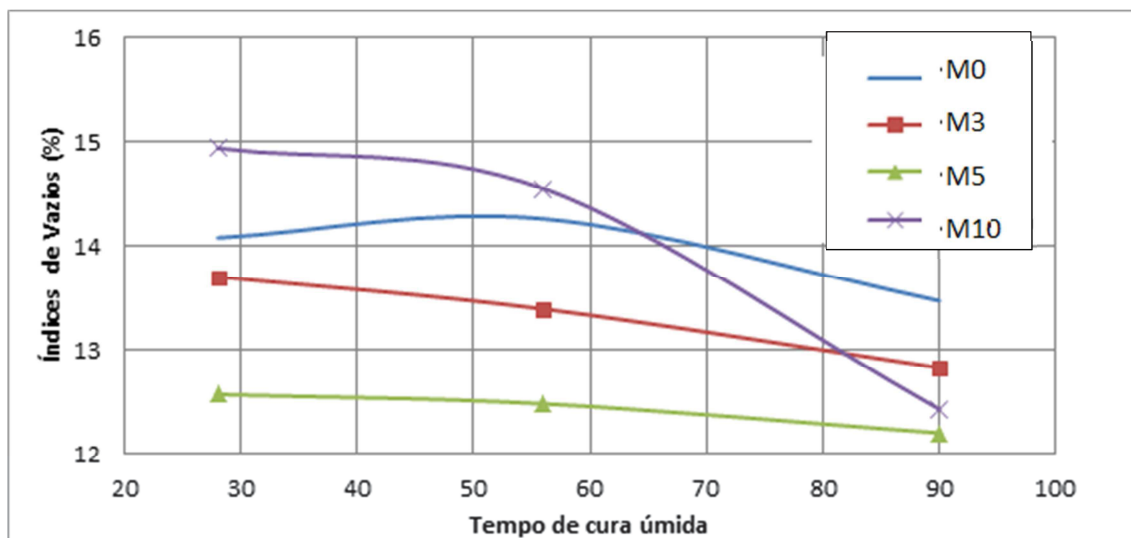
Tabela 9 - Determinação do índice de vazios após imersão (%)

	M0			M3			M5			M10		
	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias
Média	14,1	14,3	13,5	13,7	13,4	12,8	12,6	12,5	12,2	14,9	14,5	12,4
Desvio Padrão	0,70	0,27	0,94	0,34	0,78	0,24	0,61	0,69	0,45	0,76	0,26	0,69
C.V. (%)	4,98	1,86	7,02	2,47	5,82	1,91	4,83	5,53	3,67	5,09	1,81	5,55
Desvio Relativo Máximo (%)	0,53	0,20	0,70	0,24	0,58	0,18	0,42	0,46	0,32	0,57	0,20	0,46

Fonte: elaboração própria.

Conforme a tabela 9, para todas as misturas, o índice de vazios diminui conforme aumenta a idade.

Figura 15 - Índice de vazios pelo processo de imersão



Fonte: elaboração própria.

Nota-se na Tabela 9 e na Figura 15 que o comportamento do índice de vazios foi o mesmo observado no ensaio de absorção por imersão. Todos os valores obtidos, com exceção da mistura M10 nas idades de 28 e 56 dias foram menores que a mistura de referência. A mistura que apresentou menor índice de vazios foi a mistura M5. Cabe salientar que a mistura M10 aos 90 dias foi aproximadamente igual a mistura M5.

Na Tabela 10 encontram-se os resultados do índice de vazios pelo processo imersão e fervura. De acordo a tabela, pode ser visto que o comportamento, mais uma vez foi igual aos dados apresentados na Tabela 9.

Tabela 10 - Determinação de índice de vazios após imersão e fervura (%)

	M0			M3			M5			M10		
	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias
Média	15,07	14,90	14,13	14,43	13,98	12,29	13,19	12,92	12,56	15,44	15,31	13,22
Desvio Padrão	0,44	0,25	0,81	0,53	0,68	0,92	0,69	0,65	0,48	0,46	0,17	0,86
C.V. (%)	2,93	1,65	5,74	3,70	4,86	7,52	5,26	5,06	3,82	2,96	1,08	6,50
Desvio Relativo Máximo (%)	0,32	0,17	0,60	0,38	0,50	0,71	0,49	0,50	0,33	0,32	0,12	0,66

Fonte: elaboração própria.

Na Tabela 11 encontram-se os valores das massas específicas reais, obtidos das misturas de concretos estudados.

Tabela 11 - Determinação da massa específica real

	M0			M3			M5			M10		
	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias	28 dias	56 dias	90 dias
Média	2,65	2,70	2,68	2,42	2,43	2,39	2,40	2,43	2,45	2,37	2,46	2,41
Desvio Padrão	0,09	0,01	0,03	0,01	0,01	0,21	0,01	0,01	0,01	0,14	0,01	0,02
C.V. (%)	3,29	0,37	1,20	0,41	0,48	8,57	0,48	0,47	0,24	5,74	0,23	0,72
Desvio Relativo Máximo (%)	0,07	0,01	0,02	0,01	0,01	0,14	0,01	0,01	0,00	0,10	0,00	0,01

Fonte: elaboração própria.

Analisando as tabelas 7, 8, 9, 10 e 11 e as figuras 14 e 15, podemos afirmar que o tempo de cura do concreto influencia no índice de vazios do concreto e na absorção de água. Quanto maior o tempo de cura, menor o índice de vazios e menor a absorção de água. A mistura que apresentou menor índice de vazios e menor absorção de água foi a M5.

4.2.2 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas misturas M0, M3, M5 e M5, tendo cada mistura tempo de cura em água potável por 28 e 56 dias, sendo as misturas levadas após a cura para a água desmineralizada e para a solução de sulfato de magnésio. Foram realizados testes de resistência à compressão axial nas idades de 56, 90, 180 e 360 dias e os resultados estão expressos nas tabelas 12, 13, 14 e 15.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial da mistura M0.

28 dias de cura em água potável							
Mistura	Idade (dias)	Água desmineralizada			Solução		
		Fcj (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação	Fcj (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
M0	56	33,87	2,08	6,15	34,23	4,2	12,27
	90	38,30	0,70	1,82	38,46	1,00	2,61
	180	42,00	6,15	14,64	-	-	-
	360	35,93	1,75	4,87	20,64	4,27	20,67
56 dias de cura em água potável							
M0	90	37,32	3,97	10,63	35,54	3,88	10,92
	180	52,52	3,90	7,42	45,92	0,83	1,80
	360	40,62	3,14	7,74	30,09	8,14	27,06

Fonte: elaboração própria

Nota: - dados perdidos.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial da mistura M3

28 dias de cura em água potável							
Mistura	Idade (dias)	Água desmineralizada			Solução		
		Fcj (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação	Fcj (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
M3	56	31,56	1,23	3,90	33,79	1,34	3,96
	90	38,79	2,46	6,34	40,60	3,76	9,25
	180	36,82	0,49	1,33	33,66	28,23	83,88
	360	38,87	2,55	6,57	27,18	4,26	15,68
56 dias de cura em água potável							
M3	90	37,73	0,79	2,09	40,09	2,20	5,49
	180	48,19	1,03	2,13	32,90	-	-
	360	36,63	7,37	20,11	22,42	2,80	12,51

Fonte: elaboração própria

Nota: - dados perdidos.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial da mistura M5

28 dias de cura em água potável							
Mistura	Idade (dias)	Água desmineralizada			Solução		
		F_{cj} (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação	F_{cj} (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
M5	56	41,08	1,46	3,55	44,39	3,21	7,24
	90	50,09	21,12	42,16	-	-	-
	180	49,35	3,31	6,71	37,71	2,00	5,29
	360	32,70	3,96	12,12	29,66	6,25	21,07
56 dias de cura em água potável							
M5	90	50,99	2,68	5,26	-	-	-
	180	48,57	2,09	4,30	48,55	1,50	3,08
	360	38,09	6,43	16,88	29,83	5,34	17,89

Fonte: elaboração própria

Nota: - dados perdidos.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial da mistura M10

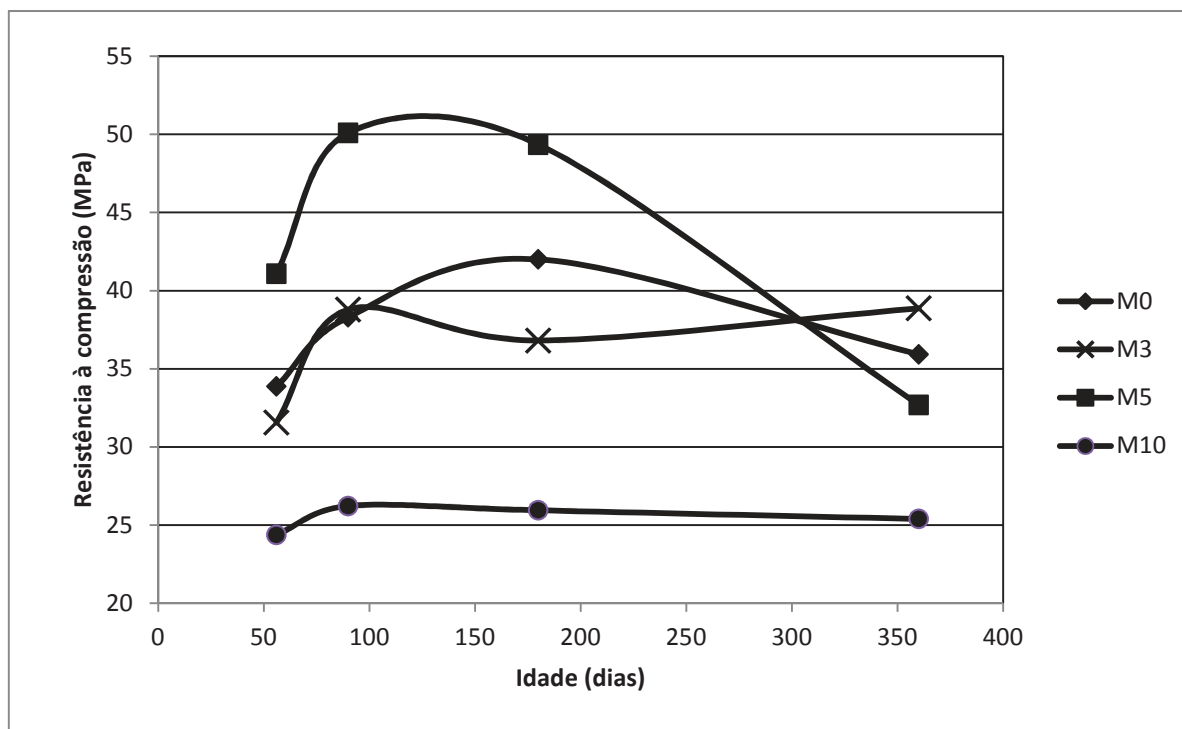
28 dias de cura em água potável							
Mistura	Idade (dias)	Água desmineralizada			Solução		
		F_{cj} (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação	F_{cj} (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
M10	56	24,38	3,62	14,84	23,40	4,32	18,48
	90	26,22	4,81	18,36	31,04	1,27	4,10
	180	25,95	3,05	11,76	32,92	4,27	12,96
	360	25,39	5,17	20,35	21,42	6,81	31,81
56 dias de cura em água potável							
M10	90	26,22	4,81	18,36	34,12	3,82	11,21
	180	25,95	3,05	11,76	35,02	2,57	7,35
	360	25,39	5,17	20,35	30,75	6,78	22,06

Fonte: elaboração própria

Nota: - dados perdidos.

Para melhor visualização e comparação dos dados, os mesmos foram plotados nos gráficos 3, 4, 5 e 6. As misturas com o mesmo tipo de exposição serão mostradas no mesmo gráfico para melhor comparação das misturas entre si.

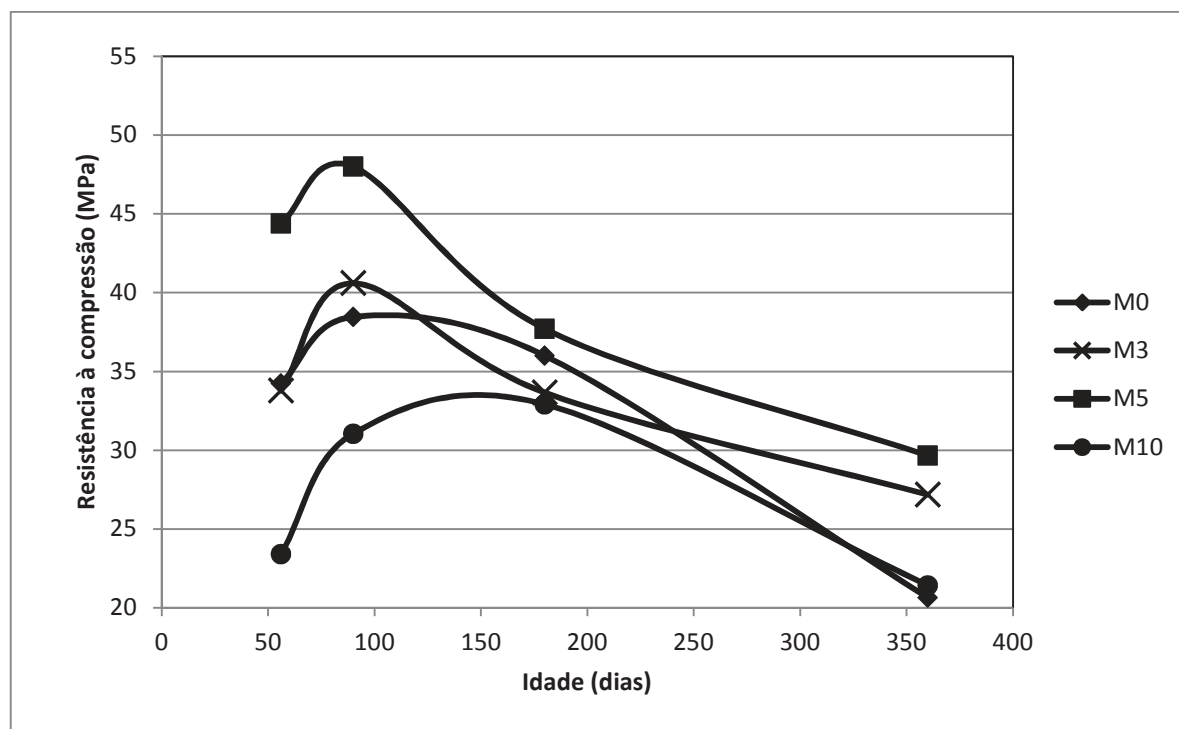
Gráfico 3 - Misturas com 28 dias de cura em água potável e exposição em água desmineralizada



Fonte: elaboração própria.

O gráfico 3 mostra que a mistura M0 e a mistura M5 estão diminuindo os seus valores de resistência à compressão a partir de 180 dias, enquanto a M3 e a M10 se mantiveram praticamente estáveis. Após 28 dias de cura em água potável e as misturas expostas em água desmineralizada, a resistência à compressão da mistura M5 atingiu o maior valor entre as misturas estudadas aos 56 dias de idade. Isso ocorreu também para as idades de 90 e 180 dias. A mistura M10 foi a que apresentou o menor valor de resistência à compressão em todas as idades. Na idade de 360 dias a mistura que apresentou o maior valor de resistência à compressão foi a mistura M3. Percebe-se também que as misturas apresentaram acréscimo de resistência à compressão até a idade de aproximadamente 90 dias e após todas apresentaram perda de resistência. Possivelmente a perda de resistência à compressão foi ocasionada devido ao uso de água desmineralizada, pois a mesma possui pH 5, o que é considerado ácido.

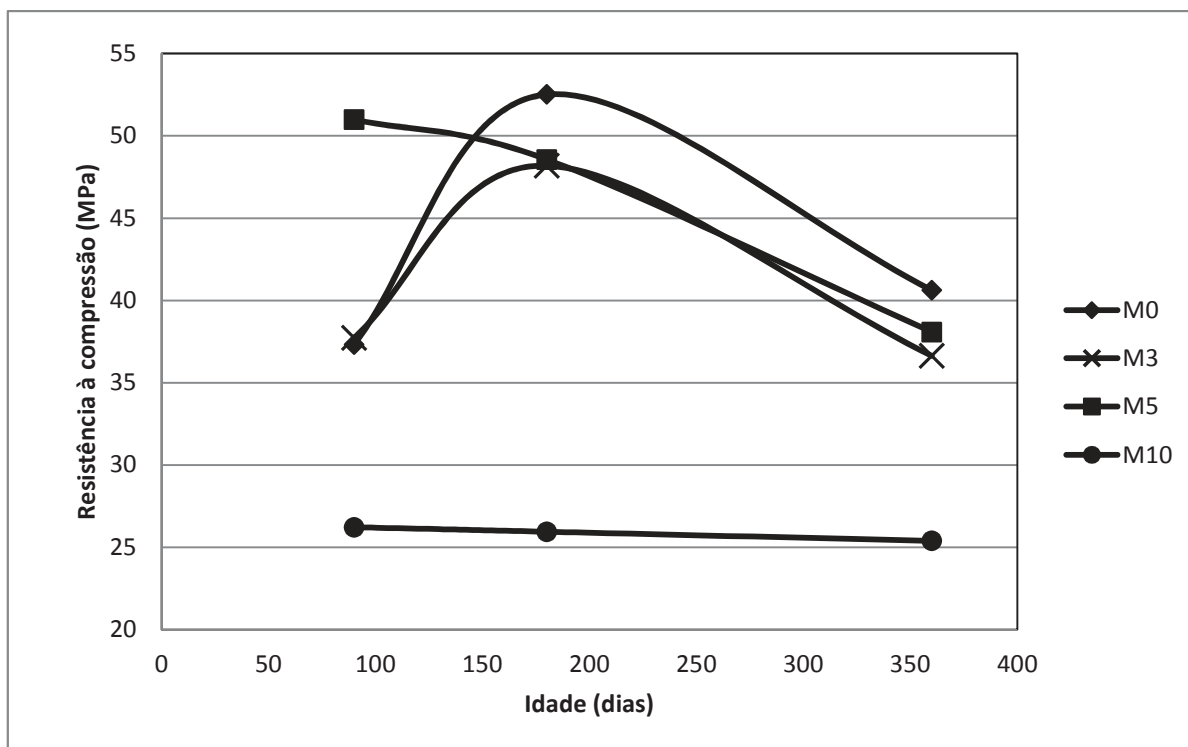
Gráfico 4 - Misturas com 28 dias de cura em água potável e exposição em solução



Fonte: elaboração própria.

O gráfico 4 mostra a tendência de queda nos valores de resistência à compressão de todas as misturas, sendo que as misturas M3 e M5 apresentam menores inclinações de curva e, portanto, quedas menos acentuadas. Após 28 dias de cura em água potável e as misturas expostas em solução de sulfato de magnésio, a resistência à compressão da mistura M5 atingiu o maior valor entre as misturas estudadas, idem ao apresentado no gráfico 3. Todas as misturas estudadas apresentaram acréscimo nos valores de resistência à compressão até aproximadamente 90 dias de idade, após, todas as misturas apresentaram diminuição dos valores de resistência à compressão. A mistura M5 apresentou os maiores valores de resistência à compressão em todas as idades estudadas. A perda de resistência à compressão possivelmente foi causada pelo ataque dos íons sulfatos às misturas, somado com o uso da água desmineralizada, a qual possui certa acidez. Os dados mostrados nos gráficos 3 e 4, corroboram com os resultados obtidos dos ensaios de índices físicos (índice de vazios e absorção de água), onde pode ser observado que a mistura M5 apresenta os melhores resultados.

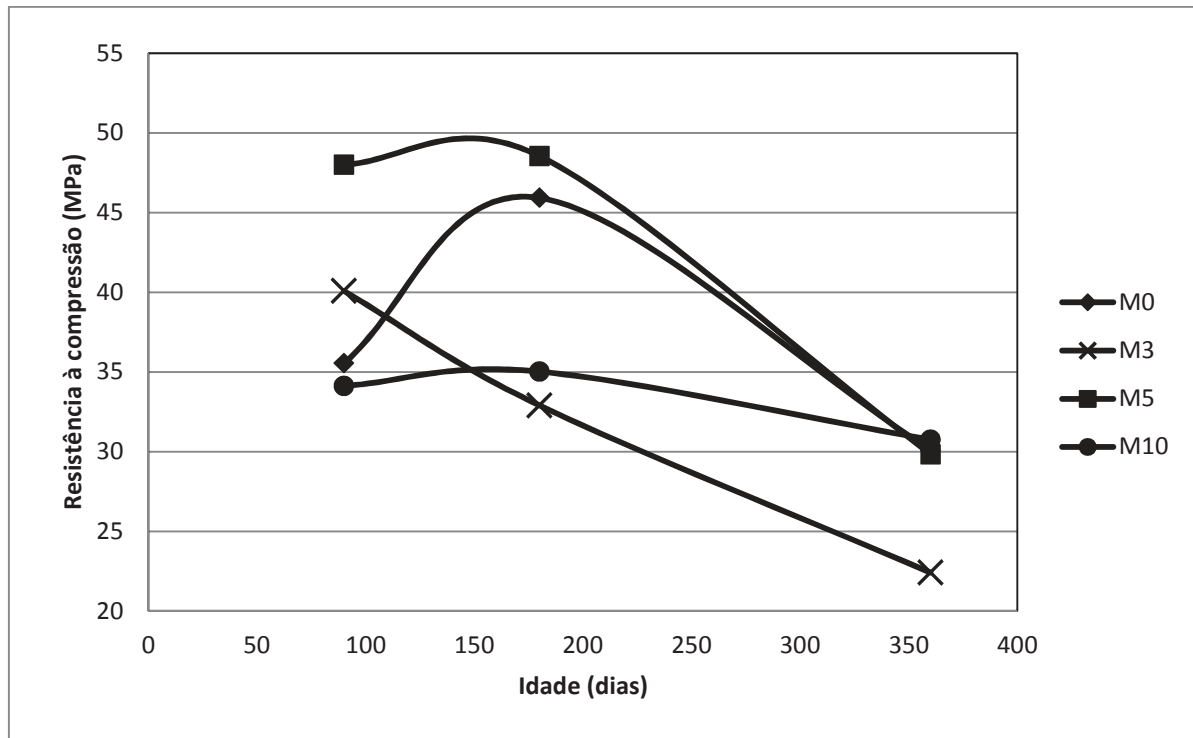
Gráfico 5 - Misturas com 56 dias de cura em água potável e exposição em água desmineralizada



Fonte: elaboração própria.

O gráfico 5 mostra que todas as misturas apresentam queda da resistência à compressão após 180 dias. A resistência à compressão da mistura M10 apresentou-se mais estável nesta exposição e ela é a que apresenta os menores valores de resistência à compressão. Após 56 dias de cura em água potável e os concretos expostos em água desmineralizada, a resistência à compressão das misturas M0 e M3 aumentaram até a idade de 180 dias em torno de 30%. As misturas M5 e M10 apresentaram diminuição nos valores de resistência à compressão em média de 27% e 3% respectivamente, comparando o início com o fim do ensaio. Conforme a análise obtida para os dados em que as misturas foram curadas 28 dias em água potável e depois mantidos imersos em água desmineralizada, possivelmente a perda de resistência à compressão foi ocasionada devido ao uso de água desmineralizada com pH 5 (ácido).

Gráfico 6 - Misturas com 56 dias de cura em água potável e exposição em solução



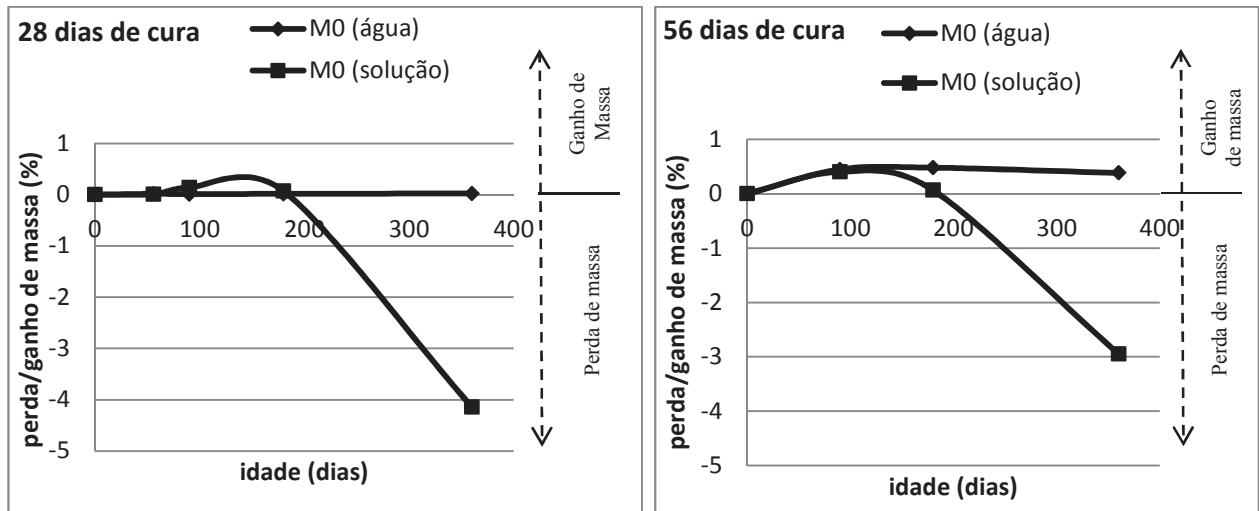
Fonte: elaboração própria.

O gráfico 6 mostra queda em todas as resistências à compressão, a partir da idade de 180 dias (exceto a mistura M3, que houve queda de resistência à compressão desde o início dos ensaios). A mistura M5 foi a que atingiu os maiores valores antes da perda da resistência à compressão. A mistura M3 teve a segunda maior resistência à compressão no início dos ensaios (56 dias de idade) e apresentou a perda mais acentuada de resistência à compressão durante o ensaio nas idades estudadas, sendo esta em média de 45%, comparando a idade de 90 dias com a idade de 360 dias. As misturas M0, M5 e M10 apresentaram menos de 1 MPa de diferença na idade de 360 dias, sendo esta considerada estatisticamente não significativa.

4.2.3 Variação de massa

Os resultados da variação de massa são mostrados nos gráficos 7, 8, 9 e 10.

Gráfico 7 - Variação de massa da mistura M0 (%)

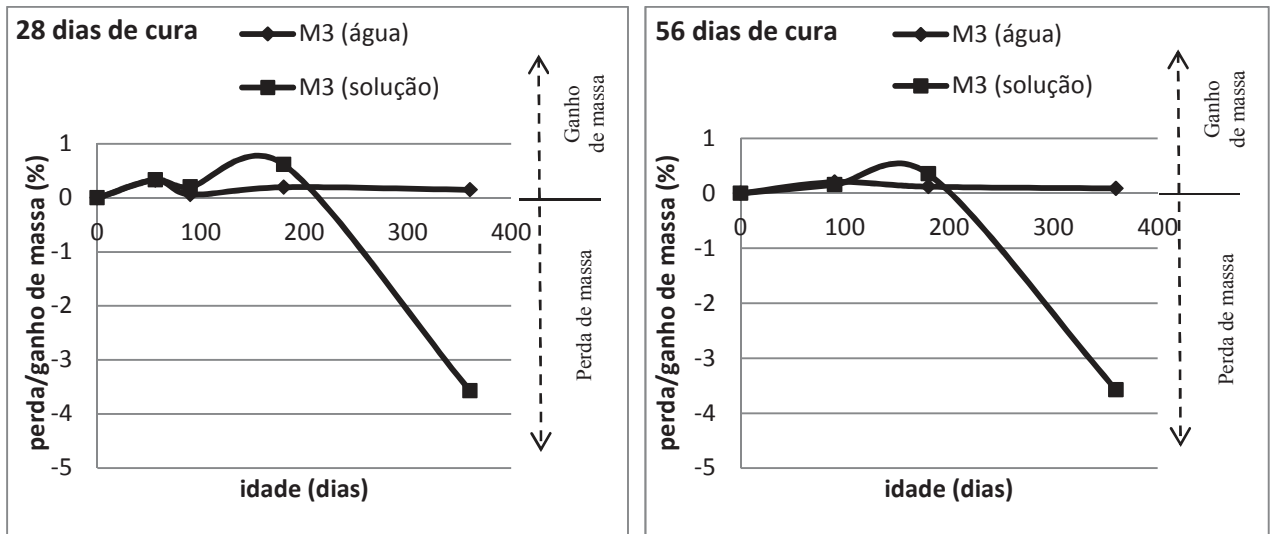


Fonte: elaboração própria.

Conforme gráfico 7, a mistura que teve cura de 28 dias em água potável e exposição em água desmineralizada não apresentou alterações significativas na variação de massa, enquanto que, quando a cura em água potável por 56 dias e exposição em água desmineralizada, apresentou um ganho de massa de aproximadamente 0,5%. A mistura M0 com 28 dias de cura em água potável e exposição em solução de sulfato de magnésio apresentou perda de massa no valor de aproximadamente 4%. Entretanto, quando a mistura ensaiada após 56 dias de cura em água potável e depois imersa em solução de sulfato de magnésio, a perda de massa foi de aproximadamente 3% na idade final de ensaio, 360 dias.

O ganho de massa inicial dos concretos mergulhados na solução de sulfato de magnésio pode ser atribuído à formação do gesso e do hidróxido de magnésio, decorrentes da reação entre o sulfato de magnésio e o hidróxido de cálcio. A perda de massa após a idade de 180 dias pode ser explicada pela reação do gesso formado com aluminato de cálcio hidratado, monossulfoaluminatos de cálcio hidratado ou aluminato tricálcico não hidratado (C₃A) para formar etringita, em reações expansivas que podem levar as amostras à descamação, diminuindo assim a sua massa.

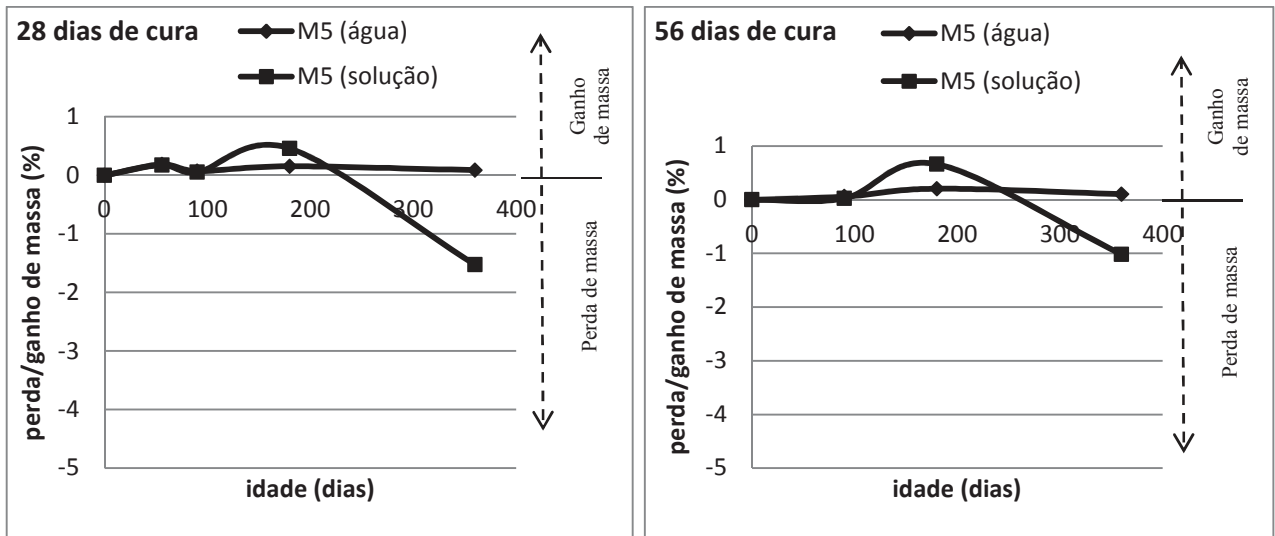
Gráfico 8 - Variação de massa da mistura M3 (%)



Fonte: elaboração própria.

Analisando o gráfico 8, quando a cura foi realizada por 28 dias em água potável e a exposição em água desmineralizada, o valor de massa não apresentou variações significativas, ocorrendo o mesmo sob a cura por 56 dias em água potável e após a exposição em água desmineralizada. No entanto, observa-se que para ambas as condições de exposição a mistura M3, quando mergulhada em solução, apresentou perda de massa de aproximadamente 3,5% na idade de 360 dias. Este comportamento pode ser explicado pela atividade pozolânica da SCA, pois ela tem como principal função consumir o hidróxido de cálcio da mistura, ocasionando a decomposição do gesso em menor tempo. O gesso formado pode ainda reagir com aluminato de cálcio hidratado, monossulfoaluminatos de cálcio hidratado ou aluminato tricálcico não hidratado (C_3A) para formar etringita, em reações expansivas que podem alcançar um volume de 200% maior que o original, contribuindo bastante para uma maior perda de massa.

Gráfico 9 - Variação de massa da mistura M5 (%)

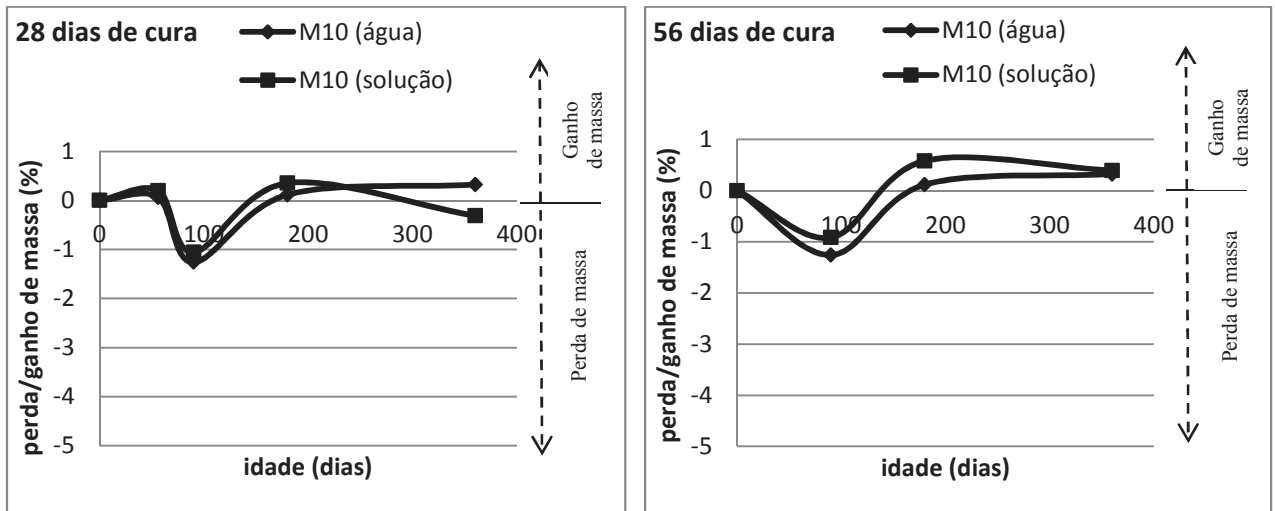


Fonte: elaboração própria.

O gráfico 9 mostra que a mistura M5, para as condições de exposição em água desmineralizada não apresentaram variações significativas nos valores de massa nas idades estudadas. A mistura M5 curada por 28 dias em água potável e exposição em solução apresentou perda de massa em torno de 1,5% para a idade de 360 dias. No que se refere a cura de 56 dias em água potável e exposição em solução, a mistura apresentou uma perda de aproximadamente 1% no seu valor de massa (idade de 360 dias).

O ganho de massa inicial dos concretos mergulhados na solução de sulfato de magnésio pode ser atribuído à formação do gesso e do hidróxido de magnésio decorrentes da reação entre o sulfato de magnésio e o hidróxido de cálcio. A perda de massa menor, se comparada com os gráficos 7 e 8 (das misturas M0 e M3 respectivamente), pode ser explicada pela menor quantidade de cimento usada e com isso menor quantidade de aluminato de cálcio hidratado, monossulfoaluminatos de cálcio hidratado e aluminato tricálcico não hidratado (C_3A), gerando menos compostos susceptíveis a reações expansivas com a solução de sulfato de magnésio.

Gráfico 10 - Variação de massa da mistura M10 (%)



Fonte: elaboração própria.

O gráfico 10 mostra curvas de variação de massa semelhantes durante os ensaios, para todos os tipos de exposição e diferentes idades para a mistura M10. Quando a mistura esteve submetida a cura de 28 dias em água potável e exposição em solução, observou-se uma diminuição de aproximadamente 0,5% do valor da massa, na idade de 360 dias. Já quando a mistura submetida a cura de 28 dias em água potável e exposição em água desmineralizada, percebe-se um aumento de aproximadamente 0,5% da massa. Para a idade de 90 dias, ambas as exposições (água desmineralizada e solução) e 28 dias de cura em água potável apresentaram perda de massa de aproximadamente 1%. Quando a mistura submetida a cura em água potável por 56 dias, percebe-se o aumento de massa de aproximadamente 0,5% para ambas exposições, na idade de 360 dias. Na cura em água potável por 56 dias, aos 90 dias de idade, ambas as exposições (água desmineralizada e solução de sulfato de magnésio), apresentaram perda de massa de aproximadamente 1%. A perda de massa na idade de 90 dias pode estar relacionada com a dissolução de compostos solúveis pela água de pH ácido (pH 5) resultantes das reações de hidratação do concreto. Este comportamento pode ser explicado pela substituição de 10% de cimento por SCA, o que proporciona uma menor quantidade de cimento na mistura, e conseqüentemente conduzirá a uma diminuição da quantidade de aluminato de cálcio hidratado, monossulfoaluminatos de cálcio hidratado e aluminato tricálcico não hidratado (C_3A), que são os agentes que reagem com a solução de sulfato de magnésio, gerando compostos com volumes maiores, que provocam tensões internas de tração que ocasiona a descamação das amostras. O ganho de massa inicial dos concretos

mergulhados na solução de sulfato de magnésio pode ser atribuído à formação do gesso e do hidróxido de magnésio decorrentes da reação entre o sulfato de magnésio e o hidróxido de cálcio. Já a perda de massa aos 90 dias de idade pode ser atribuída à decomposição do gesso, após a diminuição do hidróxido de cálcio.

A figura 16 mostra a aparência de algumas misturas para diferentes exposições após 360 dias de idade.

Figura 16 – Aspecto das misturas após a exposição por 360 dias: (a) mistura M0 com cura de 28 dias em água potável e exposição em água desmineralizada; (b) mistura M0 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução; (c) mistura M5 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução; (d) mistura M10 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução.



a.



b.



c.



d.

Fonte: elaboração própria.

De acordo com a figura 16 pode-se observar que a mistura M0 com cura de 28 dias em água potável e exposição em água desmineralizada (a) não sofreu perdas de massa, comprovando os resultados obtidos no gráfico 7. Já a mistura M0 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução de sulfato de magnésio (b) foi a que teve a maior perda

de massa, podendo ser observada na figura que foi a mais afetada, pois teve mais deslocamentos. Isto pode ser comprovado conforme mostrado no gráfico 7. A mistura M5 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução de sulfato de magnésio (c) sofreu deslocamentos (como pode ser observado na figura), mas em uma escala menor, quando comparada com a mistura M0 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução de sulfato de magnésio (b). Isto pode ser comprovado pelos resultados do gráfico 8. A mistura M10 com cura de 28 dias em água potável e exposição em solução de magnésio (d) foi a que sofreu a menor perda de massa e isso pode ser observado na figura 16 e nos gráficos anteriores. Apesar da mistura M10 apresentar menor perda de massa, foi a que apresentou os piores resultados nos ensaios de resistência à compressão. Analisando somente o quesito durabilidade, podemos afirmar que a mistura M10 foi a mais satisfatória, pois apresentou sempre as menores variações de massa e de resistência à compressão.

5 CONCLUSÃO

As principais conclusões referentes ao presente trabalho são listadas a seguir:

Com relação à resistência à compressão, observa-se que a mistura M10 é a que apresenta os menores valores, enquanto que a mistura M5 apresentara os maiores valores. Nota-se também que quando curadas a 56 dias em água potável, as misturas apresentaram valores maiores de resistência à compressão. Com exceção da mistura M10, as demais tiveram redução em sua resistência à compressão quando expostas a água desmineralizada na idade de 360 dias de idade se comparados com os resultados de 180 dias de idade. Esse fenômeno pode ser explicado pela reação do hidróxido de cálcio, causado pelo pH ácido da água desmineralizada.

Com relação à variação de massa, observa-se que a única mistura que não apresentou perda de massa quando exposta à solução foi a mistura M10 e cura de 56 dias em água potável. A mistura M5 apresentou perda de massa inferior às misturas M0 e M3, sendo que estas últimas perderam valores de massa semelhantes.

Conclui-se que a mistura M5 apresentou um desempenho médio geral superior às outras misturas quando se compara os valores de compressão axial e perda de massa. A mistura M10 apresentou valores satisfatórios na variação da massa, mas valores inferiores no quesito resistência à compressão. A adição de 5% de sílica de casca de arroz ao concreto em substituição ao cimento Portland foi a que se mostrou eficaz, porém, a mistura com a adição de 10% de sílica de casca de arroz se mostrou mais durável pelo fato de apresentar sempre as menores variações, tanto na massa quanto na resistência à compressão.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade deste trabalho, com o objetivo de estudar a durabilidade de concretos com adição de baixos teores sílica de casca de arroz, sugere-se:

- Estudar outros teores de substituição do cimento por sílica da casca de arroz, como um valor intermediário entre 5 e 10%;
- Determinar o consumo de hidróxido de cálcio;
- Analisar por meio de microscópio eletrônico de varredura a microestrutura de concretos produzidos com baixos teores de sílica de casca de arroz;

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C 1012-95a: standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. West Conshohocken, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland: Determinação da massa específica do cimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica, Massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, Massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo Abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos: Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland, Índice de atividade pozolânica com cimento, Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7211**: 2005 Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 7251**: Agregados em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 8522**: Concreto: Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9776**: Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco: Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland: Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 9778**: Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da Absorção de água, Índice de vazios e massa específica. NBR 9778. Rio de Janeiro, 2009

_____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos: Requisitos. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ACI 201.2R-77 – Guide to Durable Concrete, Detroit-USA, ACI Manual of Concrete Practice, 1991.

ALVES, S. M. S. Desenvolvimento de compósitos resistentes através da substituição parcial do cimento por resíduo da indústria cerâmica. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2002. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. 64p.

BOLLA, R. K., RATNAM, M. K. M., RAJU, U. R., Experimental Studies on Concrete with Rice Husk Ash as a Partial Replacement of Cement Using Magnesium Sulphate Solution, IJRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology, Volume 1, 2015.

COHEN, M. D., BENTUR, A., 1988, “Durability of Portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions”, *ACI Materials Journal*, v. 85, n. 3, pp. 148-157.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-De-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto. 2006. 152p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D.T.; EDUARDO M. R. FAIRBAIRN, E.M. R. Avaliação físico-mecânica de concretos com cinzas pozolânicas expostos por longo tempo à solução de $MgSO_4$, Outubro 2009, Anais do 51º congresso brasileiro do concreto.

DAFICO, D. A., PRUDÊNCIO, L. R. J. Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca. Foz de Iguaçu - PR. p.1671-1680. In: IX Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído Artigo Técnico. 2002.

DAL MOLIN, D. C. C. Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado em engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

DAL MOLIN, D. C. C. Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul.1988. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

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

DIAMOND, SIDNEY. The microstructure of cement paste and concrete—a visual primer. Cement & Concrete Composites, 2004.

DUART, Marcelo Adriano. Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento. 2008. 134p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

FORMAGINI, Sidiclei. Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de concretos de Altíssimo Desempenho. 2005. 259p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

HELENE, Paulo R. L. Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto Armado São Paulo tese (Livre Docência) Escola Politécnica.pp.241,1993.

HELENE, Paulo Roberto Lago. TERZIAN, Paulo. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: PINI / SENAI, 1993. 189p.

HELENE, Paulo Roberto Lago. ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: Ibracon, 2007. V2, Cap. 27, p. 905 -944.

HOU, J.;CHUNG, D.D.L. Effect of admixture sin concrete on the corrosion resistance of steel reinforced concrete. Corrosion Science. V.42, p.1489-1507, 2000.

IRGA, Instituto Rio-grandense do arroz. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131018151801produtividade_municipios_safr_12_13_f inal.pdf>. Acessado em 4 de julho de 2014.

ISAIA, Geraldo Cechella. Questões de ensino e pesquisa na durabilidade das estruturas do concreto. Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil Vol. 2, n. 2, p. 92-104, Novembro 2005.

LINHARES, B. T., Avaliação do Desempenho de Cimentos CII E e CII F com Diferentes Teores de Pozolanas Frente ao Ataque de Íons Sulfato. 2010. 70f. Trabalho de diplomação

(Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

MAPA, Ministério da Agricultura Pecuária e abastecimento. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz>. Acessado em 4 de julho de 2014.

MARANGON, E.; et al. Atividade Pozolânica Da Sílica Da Casca De Arroz Por Combustão Em Leito Fluidizado. In: Ibracon, 2013, Gramado RS. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2013. p. 135.

MARANGON, E.; et al. Estudo da durabilidade de concretos contendo sílica da casca de arroz. Alegrete 2014, 73 p. Trabalho não publicado.

MARTON, L.F.M; et al. Avaliação Da Utilização Da Sílica De Casca De Arroz Obtida Através De Leito Fluidizado Em Pisos Intertravados. In: IBRACON, 2013, Gramado RS. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2013. p. 140

MENDES, G. G., Durabilidade de Concretos com Adição de Sílica da Casca de Arroz à Penetração de Íons Cloretos. 2014. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Pampa. Alegrete RS.

MEHTA, P. K., 1983, “Mechanism of sulphate attack on Portland cement concrete – Another look”, *Cement and Concrete Research*, v. 13, pp. 401-406.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P.K. MONTEIRO, P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (with P.K. Mehta), McGraw-Hill, third edition (2006).

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MφRTSELL, E.; MAAGE, M.; SMEPLASS, S. A particle-matrix model for prediction of workability of concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE – PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, 1996, Paisley/Scotland.

Proceedings... London: E & FN Spon, 1996 p. 429-438.

MORANVILLE-REGOURD, M. Microstructure of high performance concrete. In: Malier, Y. High performance concrete – from material to structure. London, E & FN Spon, 1992. P.3-13.

NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

NEVILLE, A. M., 1997, *Propriedades do concreto*, 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 828 p./94p.

NETTO, R. M., 2006, *Materiais Pozolânicos. Ênfase em Tecnologia e Produtividade das Construções*. Monografia (Especialização) – Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte MG.

OLDRA, G.; et al. Avaliação Mecânica de Concretos com Cinzas pozolânicas expostos à solução de $mgso_4$. In: Cricte, 2013, Passo Fundo RS. XXV Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. CRICTE, 2013.

Pedreirão macetes de construção . Disponível em : <<http://pedreirao.com.br/destaque/slump-test-do-concreto-passo-a-passo/>>. Acessado dia 18/06/2015.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico. 2006. 316 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RÊGO, J. H.S.; NEPOMUCENO, A.A.; FIGUEIREDO, E.P.; HASPARYK, N. P., 2015, Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content, *Construction and Building Materials* 80, 56–68 p. (2015).

SKALNY, J, MARCHAND, J., ODLER, I., 2002, *Sulfate attack on concrete*, 1 ed. London: E&FN Spon, 217 p.

SILVA, Monique Pafiadache da. Retração total e penetração de cloretos de concretos compostos com cinzas de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico. 2012. 43p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em:<
http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2013.pdf. Acessado em 4 de julho de 2014.

SOBRAL, Hernani S. Reologia e Trabalhabilidade dos Concretos. Associação Brasileira De Cimento Portland, N° 62, São Paulo, 1990, P. 76.

Supremo Cimentos. Disponível em: <<http://www.supremocimento.com.br/site/Supremo-Cimento/FISPQ-01.asp>. Acessado em 25/04/2015.

VIEIRA, F. P., KULAKOWSKI, M. P., DAL MOLIN, D. C. C., VILELA, A. C. F. Estudos de durabilidade em concretos e argamassas com adição de microssílica. In: Workshop Durabilidade Das Construções, 1997, São Leopoldo. Anais. São Leopoldo : UNISINOS - ANTAC, 1997. v. 1. p. 107-116.

YEN, T. et al. Flow behaviour of high strength high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, n. 5-6, p. 413-424, Dec. 1999.