

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
Curso de Graduação em Engenharia Civil

TAMILE ANTUNES KELM

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA E MICROESTRUTURA EM
CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR
MICROSSÍLICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Ijuí/RS

2011

TAMILE ANTUNES KELM

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA E MICROESTRUTURA EM
CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR
MICROSSÍLICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil
apresentado como requisito parcial para obtenção de título
de Engenheiro Civil

Orientador: Gustavo Martins Cantarelli
Co-orientador: Bóris Casanova Sokolovicz

Ijuí/RS

2011

TAMILE ANTUNES KELM

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA E MICROESTRUTURA EM
CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR
MICROSSÍLICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora

Banca examinadora

Prof. Gustavo Martins Cantarelli, Msc - Orientador

Prof. Valdi Henrique Spohr, Msc

Ijuí, 02 de dezembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida e por sempre me manter firme e forte, guiando meus passos para a realização dos meus sonhos.

Ao meu pai Neri e minha mãe Nair que sempre foram a base de tudo pra mim, me apoiando nos momentos difíceis com força, confiança, amor, ensinando-me a persistir nos meus objetivos e ajudando a alcançá-los.

Ao meu maninho Fabrício, agradeço a companhia, carinho e momentos de descontração vividos a cada dia.

Ao namorado Diego Arthur por toda sua paciência, amor e carinho comigo. Te amooo!

Aos professores Gustavo Martins Cantarelli e Bóris Casanova Sokolovicz, pela orientação e auxílio na realização desta pesquisa.

Aos meus colegas e amigos de pesquisa Cândida, Carlos (Cayto), Thiana e Tiago pelo apoio e ajuda nos ensaios, pela grande amizade e companheirismo. Aos laboratoristas e amigos Luís e Tiago, pelo auxílio prestado durante a pesquisa, estando sempre dispostos a me ajudar.

A SUPERTEX pela doação de cimento e a Pedreira Tabbille pela doação dos agregados.

Agradeço a todos os demais colegas, professores e funcionários do curso de Engenharia Civil pelo convívio ao longo do curso. Levarei todos para sempre em meu coração!

Tamile Antunes Helm

RESUMO

Nos últimos anos, a adição de resíduos agroindustriais como materiais pozolânicos em concretos vem sendo bastante estudada, pois além de vantagens no campo ambiental e econômico, resulta também em vantagens no campo técnico. No Brasil, a adição da cinza de casca de arroz ao concreto seria extremamente significativa já que o país encontra-se entre os 10 maiores produtores de arroz do mundo (FAO, 2005 apud PEDROZO, 2008). A crescente demanda pelo uso desses resíduos e subprodutos torna o estudo de suas aplicações uma necessidade, que contribui não só para o surgimento de um benefício ecológico, mas também econômico. A adição, além de diminuir o custo da produção de concretos, reduz os impactos ambientais, e também melhora algumas de suas propriedades físicas mecânicas. Através da dosagem experimental foi analisado a influência da substituição de cimento por microsílica da cinza de casca de arroz (MCCA) em teores de 10%, 15% e 20% para relações a/ag de 0,45 e 0,55, avaliando suas propriedades de resistência e ainda investigando sua estrutura interna, ou seja, a microestrutura de cada traço. Com os resultados obtidos, verificou-se que na idade de 7 dias todos os traços com MCCA apresentaram menor resistência que o concreto referência moldado somente com cimento. Porém, com um tempo de cura maior, aos 28 dias de idade, destacou-se o avanço das reações de hidratação dos componentes do cimento e também do processo das reações pozolânicas dos traços com MCCA, resultando valores superiores aos apresentados nos 7 dias. Além disso, os traços com MCCA apresentaram maiores ganhos de resistência dos 7 aos 28 dias, do que o traço moldado somente com cimento. Dessa forma, verifica-se que a MCCA como adição ao concreto, contribui para o aumento de resistência deste, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável, reutilizando este resíduo agroindustrial e diminuindo o consumo de cimento, cuja produção cria sérios problemas ambientais.

Palavras-chave: microsílica da cinza de casca de arroz, resistência, microscopia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curvas granulométricas.....	16
Figura 2: Porosidade das pastas com adição de pozolanas em função do tempo de cura.....	17
Figura 3: Depósito de casca de arroz a céu aberto.....	20
Figura 4: Micrografia eletrônica de varredura de cinza de casca de arroz.....	21
Figura 5: Seção polida de um corpo de prova em concreto.....	23
Figura 6: Representação diagramática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto	24
Figura 7: Concreto sem adições minerais (esquerda) e concreto com adições minerais (direita)	25
Figura 8: Micrografia do concreto de referência.....	27
Figura 9: Micrografia do concreto com 10% de CCA.....	27
Figura 10: Resistência de concreto com CCA.....	29
Figura 11: Granulometria do agregado miúdo.....	34
Figura 12: Granulometria do agregado graúdo.....	35
Figura 13: <i>Slump flow test</i> sendo executado.....	37
Figura 14: Ensaio de resistência a compressão.....	39
Figura 15: Amostras em recipiente a vácuo sendo pulverizadas com ouro.....	40
Figura 16: Microscópio eletrônico de varredura (MEV), laboratório da UFSM.....	40

Figura 17: Resistência a compressão aos 7 dias.....	41
Figura 18: Resistência a compressão aos 28 dias.....	42
Figura 19: Avanço da resistência ao longo do tempo para a relação a/ag 0,45.....	44
Figura 20: Avanço da resistência ao longo do tempo para a relação a/ag 0,55.....	45
Figura 21: Micrografia dos traços aos 7 dias de idade, ampliação 300X.....	48
Figura 22: Micrografia dos traços aos 28 dias de idade, ampliação 300X.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais produtores de arroz no mundo.....	19
Tabela 2: Características químicas do cimento CP V- ARI.....	32
Tabela 3: Características físicas do cimento CP V- ARI.....	33
Tabela 4: Características da microssílica da cinza de casca de arroz (MCCA).....	33
Tabela 5: Características do agregado miúdo.....	34
Tabela 6: Características do agregado graúdo.....	35
Tabela 7: Características do aditivo GLENIUM 51 superplastificante.....	36
Tabela 8: Quantidade de materiais utilizados nas moldagens.....	38
Tabela 9: Resultado da resistência à compressão.....	43
Tabela 10: Taxa de variação de resistência à compressão em comparação ao traço referencial.....	46

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

°C: Graus centígrados

#: Abertura da malha da peneira

a/ag: Relação água aglomerante em massa

a/c: Relação água cimento em massa

Ca(OH)₂: Hidróxido de cálcio

Cm: Centímetros

CCA: Cinza de casca de arroz

C-S-H: Silicato de cálcio hidratado

Cm: Centímetros

C₃S: Silicato tricálcio

CH: Hidróxido de Cálcio

CO₂: Gás carbônico

CV: Cinza Volante

E: Escória de Alto Forno

g/cm³ Grama por centímetro cúbico

g: Grama

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Kg/dm³: Quilograma por decímetro cúbico

Kg/m³: Quilograma por metro cúbico

Kg: Quilograma

LEC: Laboratório de Engenharia Civil

MCCA: Microssílica da cinza de casca de arroz

mm : Milímetro

MPa: Megapascal

NBR: Norma Brasileira

SA: Sílica Ativa

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1. REVISÃO DA LITERATURA	15
1.1 ADIÇÕES MINERAIS	15
1.1.1 Cinza de casca de arroz (CCA)	18
1.1.1.1 Características da CCA	20
1.2 MICROESTRUTURA DO CONCRETO	23
1.2.1 Influência da CCA na microestrutura do concreto	23
1.3 RESISTÊNCIA DO CONCRETO	28
1.3.1 Influência da CCA na resistência do concreto	29
2. METODOLOGIA	31
2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	31
2.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	31
2.3 MATERIAIS UTILIZADOS.....	32
2.3.1 Aglomerantes	32
2.3.1.1 Cimento	32
2.3.1.2 Microssílica da cinza de casca de arroz (MCCA)	33
2.3.2 Agregados	34
2.3.2.1 Agregado miúdo	34
2.3.2.2 Agregado graúdo	35
2.3.3 Aditivo	36
2.3.4 Água	36

2.4	PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS	36
2.4.1	Dosagem dos traços	36
2.4.2	Ensaio de resistência a compressão	39
2.4.3	Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)	39
3.	RESULTADOS	41
3.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	41
3.1.1	Evolução das resistências	43
3.1.2	Varição da resistência a compressão axial	46
3.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	47
3.2.1	Interface entre resistência a compressão e microscopia aos 7 dias.....	47
3.2.2	Interface entre resistência a compressão e microscopia aos 28 dias	49
	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais largamente utilizado pelo homem, perdendo apenas para a água. Segundo Mehta (1994) apud Sokolovicz (2009) estima-se que o consumo mundial de concreto seja da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano, sendo a indústria do concreto a maior consumidora de reservas naturais, devendo a mesma incorporar tecnologias para reduzir os problemas ambientais gerados por ela.

Para diminuir o impacto ambiental da fabricação do cimento, a partir da segunda metade do século XX, parte do cimento tem sido substituído por uma ou mais adições minerais. Geralmente subprodutos industriais ou resíduos agroindustriais, cujo conhecimento, domínio da tecnologia e utilização se aprimoraram ao longo deste período, sendo hoje bastante utilizadas nos mais diversos tipos de estruturas de concreto. As vantagens desta substituição são muito significativas, não só em nível técnico, econômico e, principalmente, ambiental, pois a redução de emissão de CO₂, de consumo de energia e, muitas vezes, de custo, são proporcionais à quantidade de adição mineral utilizada na mistura em substituição ao cimento (SOKOLOVICZ, 2009).

A cinza de casca de arroz é um resíduo agro-industrial decorrente do processo da queima da casca de arroz para geração de energia no processo de beneficiamento do grão. Devido ao elevado teor de sílica (superior a 92%) presente em sua composição química, ela se encontra em várias aplicações na construção civil como pozolana agregada em cimentos, concretos e argamassas, melhorando as propriedades mecânicas, de durabilidade, e sobretudo no que diz respeito ao meio ambiente e na economia de energia (POUEY, 2006).

No contexto de hoje, onde o cuidado com o meio ambiente deve ser cada vez mais intenso, é inadmissível descartar de forma insustentável um resíduo que, comprovadamente, aumenta o desempenho do concreto e que poderia auxiliar no conceito de sustentabilidade, sendo de grande importância seu estudo.

Pensando nisso, o presente trabalho buscou através do tema de novos materiais e novas tecnologias aplicadas na construção civil, avaliar as propriedades de concretos binários, utilizando além do aglomerante cimento, a microssílica da cinza de casca de arroz.

A questão de estudo a ser respondida durante a realização desta pesquisa foi: “Qual seria a influência da substituição de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz (MCCA) na resistência mecânica e microestrutura comparado ao concreto referência?”

O trabalho tem como objetivo analisar através de dosagem experimental a influência da substituição de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz em teores de 10%, 15% e 20% para duas relações a/ag 0,45 e 0,55, nas propriedades mecânicas e de microestrutura em relação a um concreto referência moldado somente com cimento, nas idades de 7 e 28 dias.

Foram realizados ensaios de resistência a compressão axial e ensaios de microscopia eletrônica de varredura para todos os traços estudados, com a finalidade de observar os desempenhos das variáveis relacionadas com a resistência mecânica e de microestrutura do concreto.

1. REVISÃO DA LITERATURA

1.1 ADIÇÕES MINERIAIS

As adições minerais são materiais inorgânicos finamente divididos, com finura menor ou igual ao cimento, que vêm sendo há muito tempo incorporadas ao concreto estrutural ou utilizados na fabricação do cimento composto com o intuito de melhorar as propriedades de resistência mecânica e de durabilidade, associado também à economia de custos de produção e à redução de impactos ambientais provocados pela indústria cimenteira (HOPPE, 2008).

Segundo Mehta & Monteiro (1994), as adições minerais se classificam em dois grupos: pozolanas e cimentantes. As pozolanas mais utilizadas são a sílica ativa (SA), cinza volante (CV), e a cinza de casca de arroz (CCA), que necessitam do hidróxido de cálcio (CH) para formar compostos resistentes. Já as adições cimentantes como a escória de alto forno (E) e a cinza volante com altos teores de cálcio (CV/A), não necessitam do CH presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Porém, a sua auto-hidratação é bastante lenta, e a quantidade de produtos cimentados formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais (HOPPE, 2008).

Como grande parte destes resíduos possuem atividade pozolânica, isto é, são de origem silicosa e mineralogicamente amorfos, apresentando reatividade com a cal, a indústria da construção civil enquadra-se como sendo a mais indicada para consumi-los em produtos derivados do cimento Portland.

Pesquisas demonstram a possibilidade de associações de diferentes adições minerais, em diversas combinações e teores variados, criando misturas de cimento com um ou mais dois tipos de adição, as quais são denominadas binárias e ternárias, respectivamente. Essas adições minerais podem ser incorporadas no concreto, segundo Frizzo (2001) por substituição parcial do cimento, por adição, aumentando a quantidade de material aglomerante, ou como agregado miúdo. Sendo que, para serem introduzidas no concreto, estas necessitam ter finura e granulometria adequadas e ainda devem ser bem conhecidas suas características físicas e químicas.

Segundo Isaia (1995) apud Frizzo (2001) a pozolanicidade e a finura são as principais propriedades que influem no desempenho da cinza volante, da sílica ativa e da cinza de casca de arroz. A quantidade de pozolana e a sua composição granulométrica também influem, porém em menor grau. A Figura 1 apresenta uma comparação entre as granulometrias do cimento e pozolanas.

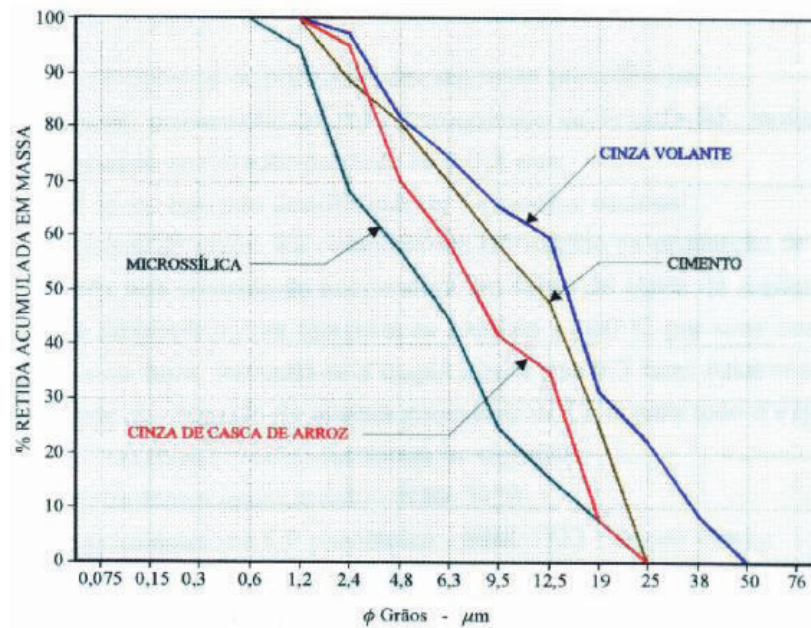


Figura 1: Curvas granulométricas

Fonte: Isaia 1995, apud Frizzo, 2001

As adições minerais em particular as pozolânicas apresentam a reação pozolânica, que ocorre entre o CH liberado da hidratação do cimento Portland e a pozolana, conforme mostrado na equação abaixo.



A reação pozolânica consome os cristais de CH, formando uma estrutura chamada C-S-H secundário, de estrutura bastante similar ao C-S-H produzido pela hidratação do cimento, com baixa densidade e menor relação C/S, contribuindo para o refinamento do tamanho dos poros, transformando vazios capilares grandes em vazios de pequenos tamanhos, diminuindo a porosidade.

É fundamental que a pozolana esteja finamente subdividida, pois somente assim a sílica pode combinar com o CH (liberado pela hidratação do cimento Portland) na presença de água para formar silicatos estáveis que têm propriedades cimentícias. Deve ser notado que a sílica deve estar no estado amorfo, isto é vítreo, pois quando cristalina sua reatividade com a cal diminui consideravelmente (HOPPE, 2008).

Segundo Fernandes (2004) apud Duarte (2008), as pastas de cimento adicionadas de pozolanas, apresentam maior porosidade, nas primeiras idades, do que as pastas sem adição, porém esta situação muda com o processo de hidratação do cimento, aproximadamente após

60 dias ocorre uma inversão e as pastas com adição de pozolanas apresentam porosidade menor e tanto menor quanto maior o teor de adição de pozolana, conforme ilustrado na Figura 2.

Este fenômeno ocorre devido à reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio produzido na hidratação dos silicatos do cimento e a sílica presente na pozolana, que se intensifica ao longo do tempo e causa refinamento do diâmetro dos poros, diminuindo a porosidade total.

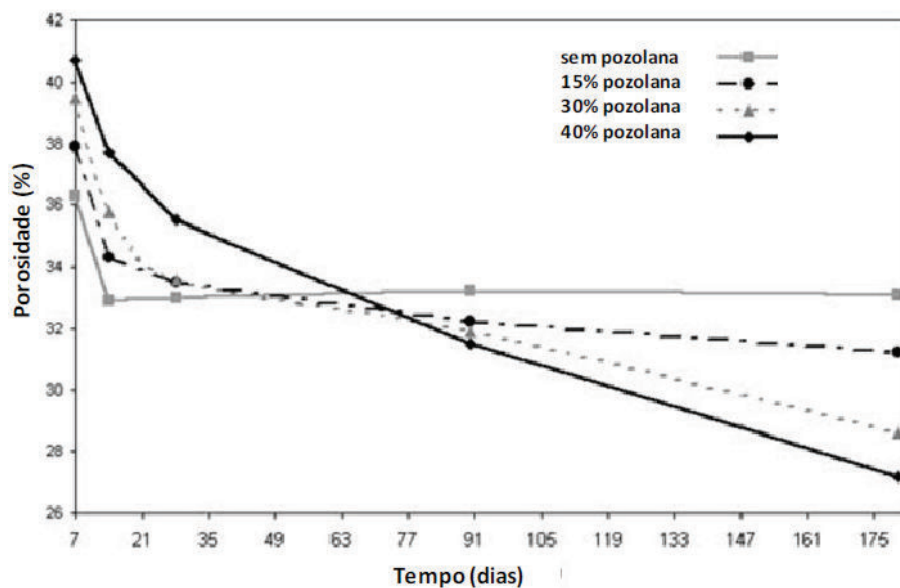


Figura 2: Porosidade das pastas com adição de pozolanas em função do tempo de cura

Fonte: Fernandes, 2004 apud Duarte, 2008

A redução da porosidade resulta conseqüentemente em uma menor permeabilidade do concreto a fluidos, proporcionada pela alteração da microestrutura da pasta. Essa diminuição da permeabilidade do concreto é decorrente de ações físicas (*microfiller*) ocorridas no processo de hidratação dos aglomerantes, que bloqueiam ou obstruem os poros e vazios pela ação dos grãos mais finos oriundos das adições minerais, e químicas (pozolânicas), as quais promovem o refinamento do tamanho dos grãos, que ocorrem do processo de hidratação dos cimentos, através do consumo de cristais de CH, conforme Isaia *et al.* (2000) apud Hoppe (2008).

A utilização de adições minerais no concreto apresenta diversas vantagens conforme mostrado por Duarte (2008), uma delas é de que pode-se reduzir custos a medida que se substitui parcialmente material caro, como o cimento, por materiais de baixo custo como CCA e cinza volante. Além disso, possibilita um aumento da durabilidade devido à redução da

porosidade e refinamento dos poros, resultando em concretos mais compactos e resistentes a agentes agressivos como cloretos e sulfatos.

Também segundo o mesmo autor, há um aumento na resistência a compressão, pois algumas adições como a sílica ativa e a CCA, proporcionam já nas primeiras idades concretos com resistências mais altas que aqueles sem adição, devido a sua alta reatividade e também pela superfície específica, já a cinza volante proporciona ganhos de resistência em idades mais avançadas à medida que as reações pozolânicas tornam-se mais intensas.

As adições são empregadas no concreto com o objetivo de melhorar algumas de suas propriedades. Contudo, diferenças nas características físicas e químicas desses materiais, dificultam a escolha da melhor adição mineral e do teor adequado a ser empregado no concreto. Dessa forma torna-se necessário um melhor conhecimento das características do material, bem como a compreensão das reações e alterações promovidas pelas adições no material (CASTRO, 2003 apud FURQUIM, 2006).

O uso de resíduos, gerados pela queima de carvão de uma termoelétrica ou pela queima da casca de arroz, apresentam-se como ótimas alternativas para o uso na construção civil. A utilização destes materiais, além de substituir minerais não renováveis, surge como solução para o consumo destes rejeitos, agrícolas ou industriais, que se acumulam cada vez mais, sendo lançados de forma desordenada em aterros, ou mesmo abandonados em estradas e rodovias, ocasionando vários problemas de ordem ambiental.

1.1.1 Cinza de casca de arroz (CCA)

Segundo dados do IBGE (2011), a produção de arroz esperada para 2011 no Brasil é de cerca de 12,2 milhões de toneladas, sendo que o estado do Rio Grande do Sul é o principal produtor com cerca de 64,1 % da produção nacional, ou seja, em torno de 7,8 milhões de toneladas de arroz. Esses dados demonstram uma elevada produção deste cereal no país, destacando-se mundialmente como um dos principais produtores, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Principais produtores de arroz no mundo

Ranking	País	Produção (t)
1 ^o	China	182.055.140
2 ^o	Índia	137.620.000
3 ^o	Indonésia	53.984.590
4 ^o	Bangladesh	39.795.620
5 ^o	Vietnã	35.790.800
6 ^o	Tailândia	29.427.540
7 ^o	União de Mianmar	25.364.000
8 ^o	Filipinas	14.603.010
9 ^o	Brasil	13.192.860
10 ^o	Japão	11.342.000

Fonte: FAO, 2005 apud Pedrozo, 2008

É prática comum nas indústrias de arroz a utilização da casca de arroz como combustível no processo de beneficiamento de arroz, o que gera uma quantidade considerável de cinza residual que geralmente não tem uma destinação específica sendo simplesmente dispensada no meio ambiente, ocasionando sérios problemas de ordem ambiental (DUART, 2008).

Segundo Mehta & Monteiro (1994), cada tonelada de arroz em casca produz cerca de 200 kg de casca, que por combustão formam 40 kg de cinza. Considerando os dados anteriores, pode-se constatar que o Rio Grande do Sul irá gerar cerca de 1,56 milhões de toneladas de casca no ano de 2011.

A CCA, queimada e moída adequadamente é uma pozolana já bastante estudada por vários pesquisadores no Brasil, onde sua viabilidade da substituição parcial do cimento por CCA já foi comprovada através de resultados positivos como: economia de cimento, aumento da resistência mecânica e durabilidade do concreto.

Sua utilização configura em uma das soluções para o problema ambiental gerado pela deposição deste material, reduzindo as áreas necessárias para descarte deste resíduo agroindustrial e minimizando os riscos potenciais de poluição ao meio ambiente. A Figura 3 mostra o descarte inadequado deste resíduo.



Figura 3: Depósito de casca de arroz a céu aberto

Fonte: Missau, 2004

Desta forma, a utilização de CCA é justificada por contribuir para a despoluição dos ambientes, por acarretar em uma sensível economia de energia relacionada à produção do clínquer e, por proporcionar a possibilidade de conservação das reservas naturais de calcário e argila. Além disso, por apresentar uma possibilidade de redução no custo final do concreto, quando a ele incorporado.

1.1.1.1 Características da CCA

A casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, de baixa densidade e elevado volume, que possui alto teor de sílica, composta de 50 % de celulose, 30 % de lignina e 20 % de resíduos inorgânicos (HOUSTON, 1972 apud POUEY, 2006).

A cinza de casca de arroz é o resultado do processo de combustão, que apresentam formas estruturais variáveis (amorfa e/ ou cristalina), dependendo do tipo de queima (grelha, leito fluidizado) tempo e temperatura de oxidação. Sendo que, diversos autores já estudaram a questão da influência das condições de temperatura e de tempo de exposição no processo de combustão da CCA (POUEY, 2006).

De acordo com Isaia (1995) apud Frizzo (2001), a cinza originada de queima controlada de 400°C a 600 °C gera sílica amorfa abundante e, portanto, altamente reativa com os compostos hidratados do cimento; já a cinza queimada por temperaturas mais altas de 800°C a 1.000°C apresenta compostos cristalinos, como cristobalita e quartzo, sem reatividade com os hidratos de cimento. Segundo Swamy (1986) apud Frizzo (2001), a reatividade da cinza de casca de arroz está ligada à sua superfície específica e a quantidade de sílica amorfa.

A CCA apresenta elevada área específica, de 50 a 60 m²/g, por adsorção de nitrogênio, segundo Mehta & Monteiro (1994), o que lhe confere elevada reatividade, sendo por isso também conhecida como superpozolana.

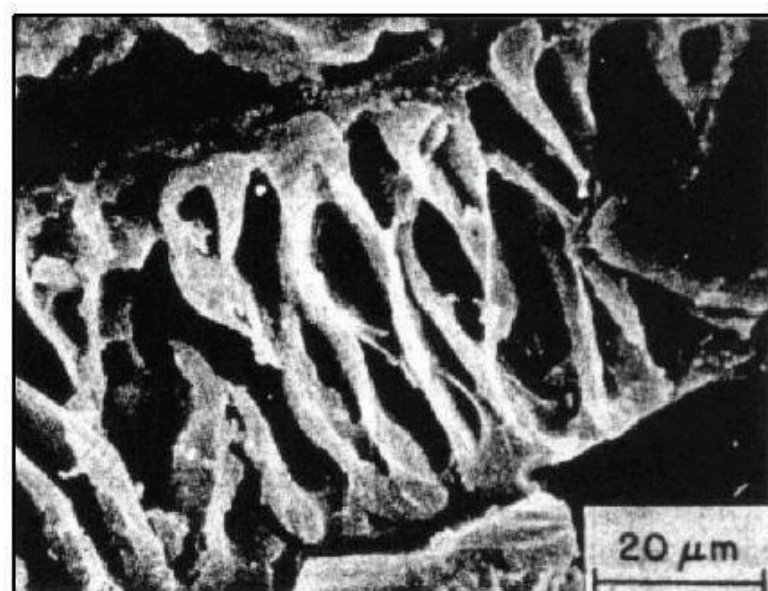


Figura 4: Micrografia eletrônica de varredura de cinza de casca de arroz

Fonte: Mehta & Monteiro, 1994

Uma característica importante que a cinza deve ter é o índice de atividade pozolânica, que depende da finura da cinza e do teor de sílica amorfa, e este último é determinado pelo processo de queima da casca de arroz, principalmente nos parâmetros de temperatura e tempo de queima (DUART, 2008).

Segundo Mehta (1992) apud Missau (2004), a cinza de casca de arroz é essencialmente constituída de sílica na forma não cristalina e é classificada como uma pozolana altamente reativa. O termo pozolana, segundo a NBR 12653 (1992), é definido como um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando finamente dividido e na presença de água, reage com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, para formar compostos de propriedades aglomerantes.

Mehta & Monteiro (1994) definem a CCA em duas formas distintas:

- Pozolana altamente reativa – quando o material é obtido por um processo de queima controlado e constituída essencialmente de sílica pura, na forma não cristalina e em estrutura celular.

- Pozolana pouco reativa – quando queimada em campo e constituída essencialmente por silicatos cristalinos, com uma pequena quantidade de matéria não cristalina, indicando que este material deve ser moído e reduzido a um pó muito fino, para desenvolver certa atividade pozolânica.

A cinza de casca de arroz apresenta coloração que varia do cinza ao preto, devido a impurezas inorgânicas junto ao carbono não queimado, ou ainda branco-rosado, na qual a cor também é dependente das condições de queima. Temperaturas mais elevadas e longo tempo de exposição geram cinzas branco-rosadas, o que indica a presença de sílica na forma cristalina (POUEY, 2006).

Segundo Pouey (2006), as características da cinza de casca de arroz também dependem da origem do arroz. Mehta (1994) apud Pouey (2006) evidencia que as cinzas obtidas de casca de arroz de diferentes origens, embora com mesmo controle de combustão e por mesmo método apresentam características diferentes, devido às propriedades do solo que varia para cada região produtora.

1.2 MICROESTRUTURA DO CONCRETO

1.2.1 Influência da CCA na microestrutura do concreto

O tipo, a quantidade, o tamanho, a forma e a distribuição das fases presentes em um sólido constituem a sua estrutura, sendo que os elementos graúdos da estrutura de um material podem ser vistos facilmente, enquanto que os mais finos são visualizados com o auxílio de um microscópio. Segundo Mehta & Monteiro (1994), o termo macroestrutura é geralmente empregado para a estrutura grosseira, visível à vista humana e o termo microestrutura é empregado para uma porção aumentada microscopicamente de uma macroestrutura.

No concreto, sua estrutura é extremamente complexa e heterogênea, caracterizando-se como um material bifásico em nível macroestrutural, ou seja, formado pela pasta como meio aglutinante e o agregado, com diferentes formas e tamanhos (Figura 5). Porém, quando analisado em nível microestrutural (Figura 6), há o surgimento de uma nova fase chamada de zona de transição, uma região interfacial entre a pasta e o agregado, sendo definida por Mehta & Monteiro (1994), como sendo uma película delgada com espessura de 10 a 50 μm ao redor do agregado, sendo geralmente mais fraca do que os outros dois componentes principais do concreto, e conseqüentemente exerce uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico que pode ser esperado pela sua espessura.

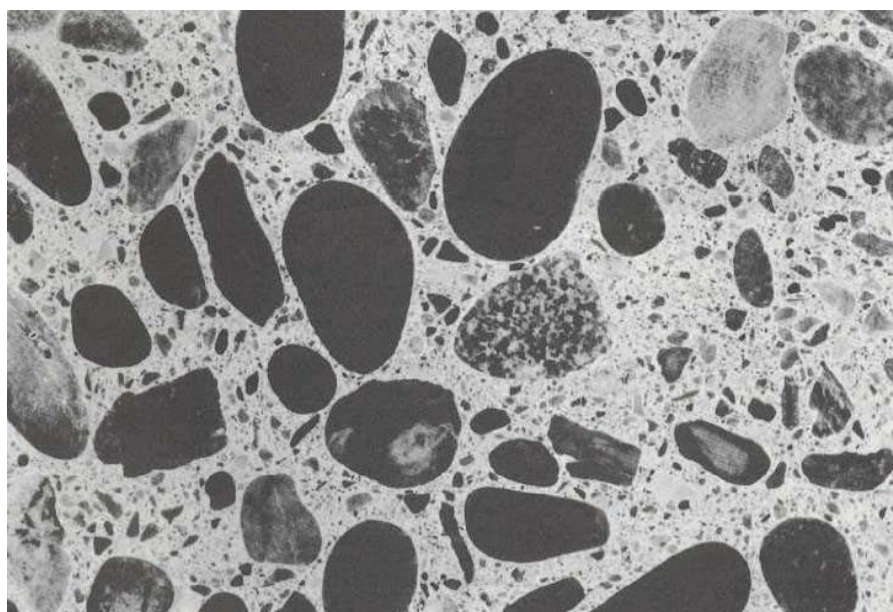


Figura 5: Seção polida de um corpo de prova em concreto

Fonte: Mehta & Monteiro, 1994

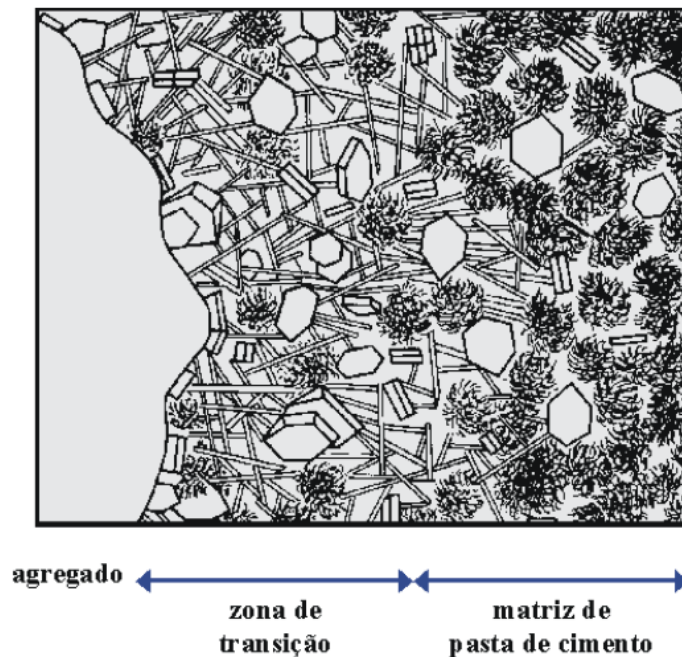


Figura 6: Representação diagramática da zona de transição e da matriz de pasta de cimento no concreto

Fonte: Mehta & Monteiro, 1994

A zona de transição apresenta maior teor de vazios e microfissuras que a pasta propriamente dita, pois as falhas superficiais não permitem adequada transferência de tensão da pasta ao agregado e vice-versa, transformando-se em fator limitante para a resistência mecânica e durabilidade.

A fase pasta apresenta uma estrutura complexa e dinâmica na qual evolui com o tempo a partir da hidratação dos compostos do cimento com a água e em seguida, com a reação do hidróxido de cálcio com a sílica das pozolanas. Os mecanismos iniciais da hidratação do cimento ocorrem pela formação de cristais em forma de agulhas, conhecidos como sulfoaluminatos de cálcio hidratado ou etringita, formados em poucas horas, seguidas de grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que iniciam o preenchimento dos espaços antes ocupados pela água e partículas de cimento dissolvidas (MORAES, 2001).

Segundo Paulon (2005) apud Brizola (2007), dois fatores são muito importantes para o estudo da microestrutura da pasta de concreto, a quantidade de água e a idade. A pasta varia com a relação a/ag utilizada, sendo importante tanto para termos de microestrutura, como para resistência mecânica e durabilidade do concreto. Sendo que, quando o cimento entra em contato com a água, os compostos se hidratam e preenchem os espaços originalmente

ocupados pela água e este preenchimento é tanto maior quanto menor a relação água/aglomerante. Quanto à idade, as particularidades da microestrutura desenvolvem-se desde o contato do cimento com a água, pois já nas primeiras horas as mudanças são bastante rápidas, tornando-se mais lentas após a primeira semana. Sendo que, o processo de hidratação continua durante meses e anos.

Para Mehta (1987) apud Moraes (2001), os efeitos da adição de cinza de casca de arroz ao cimento portland são de natureza física e química, ou seja, a introdução de partículas finas na pasta de cimento, mesmo não totalmente pozzolânicas, ocasiona segmentação dos poros maiores e incrementa os locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação, acelerando as reações e formando cristais de hidróxido de cálcio menores. A ação química via reações pozzolânicas reforça a ação física, segmentando poros e refinando, à medida que a idade aumenta os grãos de hidróxido de cálcio, formando uma pasta mais densa e compacta e resultando em um concreto com microestrutura mais homogênea e uniforme.

A Figura 7 abaixo mostra o efeito filler em concretos com adições minerais, em que as pozzolanas se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam no interstício da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água, atuando como ponto de nucleação dos produtos de hidratação, o que proporciona um refinamento da estrutura dos poros.

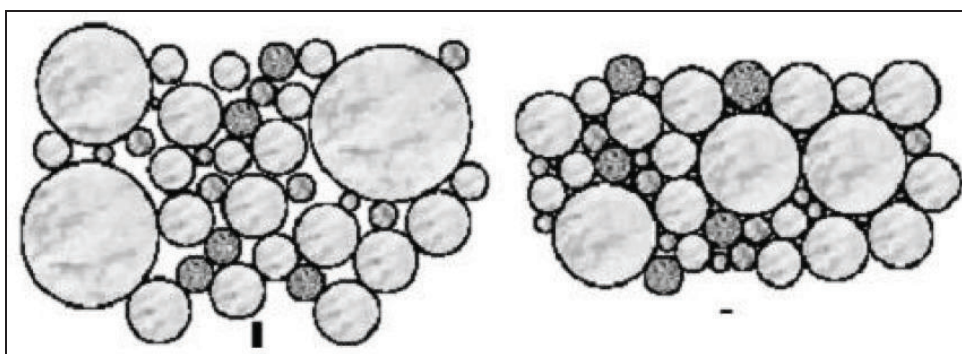


Figura 7: Concreto sem adições minerais (esquerda) e concretos com adições minerais (direita)

Fonte: Formagini, 2005 apud Brizola, 2007

De acordo com Duart (2008), o estudo da microestrutura é importante quando se usa adições minerais no concreto, pois o efeito provocado por tais materiais é resultado de alterações na estrutura interna do concreto, principalmente na interface pasta-agregado que é o ponto fraco deste, devido à maior porosidade causada pelo efeito parede em torno dos agregados.

Segundo Mehta (1992) apud Moraes (2001), os fatores que influenciam na microestrutura da pasta de cimento Portland com adições minerais são:

- Densificação da interface matriz-agregado pelos produtos de hidratação;
- Diminuição do teor de C_3S devido à substituição de parte do cimento por adição;
- Diminuição da permeabilidade devido à melhor distribuição do tamanho dos poros resultando em um decréscimo na taxa de difusão de íons agressivos;
- Efeito físico causado pela presença física da adição.

Pouey (2006) verificou que ao ser incorporada no concreto em substituição ao cimento, a CCA modifica a microestrutura da pasta, pois ao se combinar com o CH, gera uma pasta menos heterogênea, mais resistente, apresentando um menor calor de hidratação.

A pesquisa de Nilsen et. al. (1993) apud Moraes (2001), com pastas de cimento contendo 15% de cinza de casca de arroz demonstra que esta pozolana diminui a concentração de hidróxido de cálcio na zona de transição em maior intensidade que as demais adições minerais testadas. Tal fato é explicado pelos autores pela rápida reação entre o hidróxido de cálcio e a sílica amorfa da cinza de casca de arroz para produzir silicato de cálcio hidratado, diminuindo assim a espessura da interface.

São muito significativas as diferenças existentes nas fotos da microestrutura de um concreto sem qualquer adição (Figura 8) comparadas a um concreto com adição de 10% de cinza de casca de arroz aos 14 dias de idade (Figura 9) no trabalho de Rodrigues de Senzale et al. Observa-se nessas fotos, a redução da porosidade que ocorreu com o uso da cinza de casca de arroz .

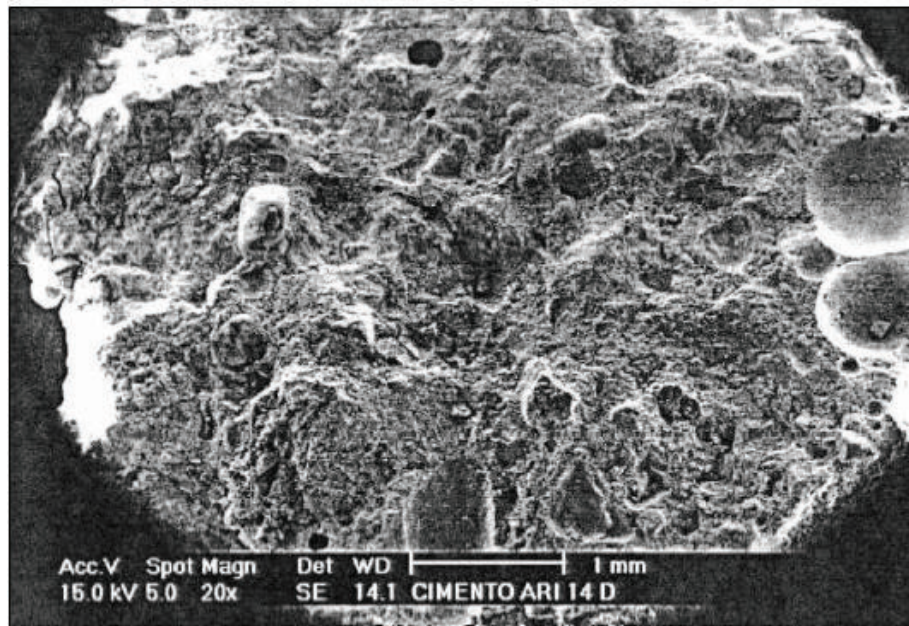


Figura 8: Micrografia do concreto de referência

Fonte: Rodrigues de Sensale & Dalmolin, 1998 apud Frizzo, 2001

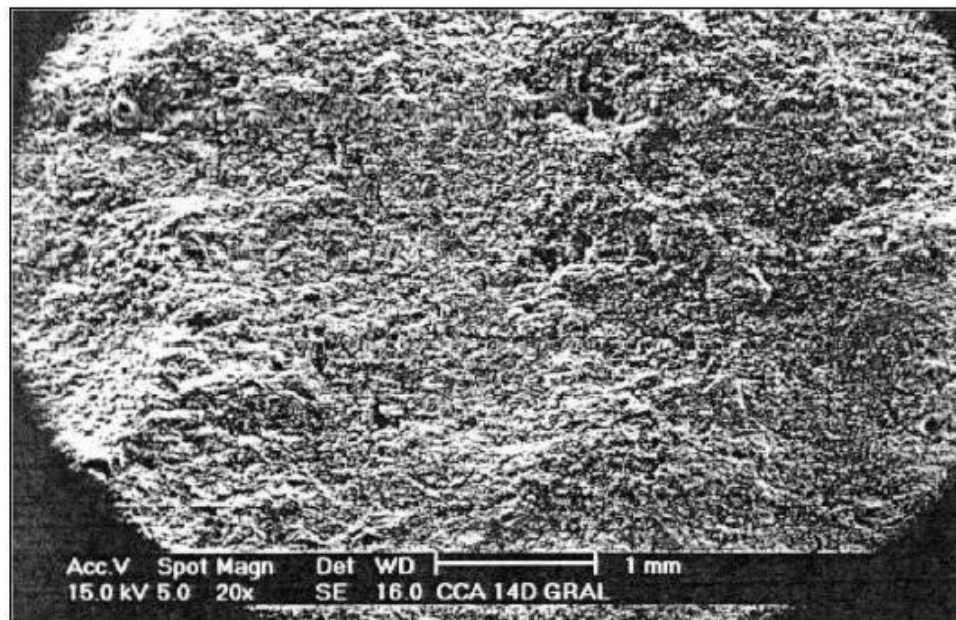


Figura 9: Micrografia do concreto com 10% de CCA

Fonte: Rodrigues de Sensale & Dalmolin, 1998 apud Frizzo, 2001

1.3 RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Segundo Neville (1997), a resistência é considerada como a propriedade mais importante do concreto, embora em muitos casos práticos, outras características como a durabilidade e a permeabilidade sejam, de fato, mais importantes.

Mehta & Monteiro (1994) definem a resistência de um material como a capacidade deste resistir à tensão sem ruptura. No concreto, portanto, a resistência é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura e é sinônimo do grau de ruptura no qual a tensão aplicada alcança seu valor máximo.

A resistência a compressão axial é uma das propriedades mais analisadas do concreto, sendo este o parâmetro utilizado para controlar a sua qualidade. Segundo Helene & Terzian (1992), a propriedade do concreto que melhor o qualifica é a resistência a compressão, desde que sua dosagem e preparação tenham sido levados em conta também os aspectos de trabalhabilidade e durabilidade, optando-se por determinada curva granulométrica, tipo e classe de cimento e relação água/cimento e, conseqüentemente resultando uma certa resistência a compressão. Qualquer modificação na uniformidade, natureza e proporcionamento dos materiais poderá ser indicada por uma variação na resistência.

A resistência do concreto é função do processo de hidratação do cimento, o qual é relativamente lento, tradicionalmente as especificações e ensaios de resistência do concreto são baseados em corpos de prova curados em condições específicas de temperatura e umidade por um período de 28 dias.

Segundo Mehta & Monteiro (1994), a resistência varia de acordo com os parâmetros do corpo de prova (dimensões, geometrias e estado de umidade), parâmetros de carregamento (tipo de tensão e velocidade de aplicação da tensão), e resistência das fases componentes, que depende da porosidade da matriz (relação água/cimento, aditivos minerais, grau de hidratação e teor de ar aprisionado e incorporado), porosidade do agregado, e porosidade da zona de transição (em função da relação água/cimento, aditivos minerais, características de exsudação, grau de compactação, grau de hidratação e a interação química entre agregado e pasta de cimento).

1.3.1 Influência da CCA na resistência do concreto

Muitas propriedades apresentadas pelos concretos decorrentes da incorporação da CCA ao concreto têm sido estudadas por diversos pesquisadores na área tecnológica. Com relação à resistência a compressão, o emprego da CCA ao concreto traz ganhos significativos nas primeiras idades, devido ao efeito *microfiller*. Segundo Mehta & Folliard (1995) apud Hoppe (2008), nenhum outro material pozolânico, incluindo-se a sílica ativa, tem a habilidade de contribuir para o aumento na resistência mecânica do concreto em baixas idades, como 1 e 3 dias.

Tashima et al (2004) apud Duart (2008) verificaram aumento da resistência à compressão axial de concretos adicionados de CCA moída por 30 min e sem controle de queima em percentuais de 5% e 10%, se comparado ao concreto referência. Estes autores observaram ainda que os concretos com CCA tinham suas resistências aumentadas comparado com o concreto sem adição (Figura 10).

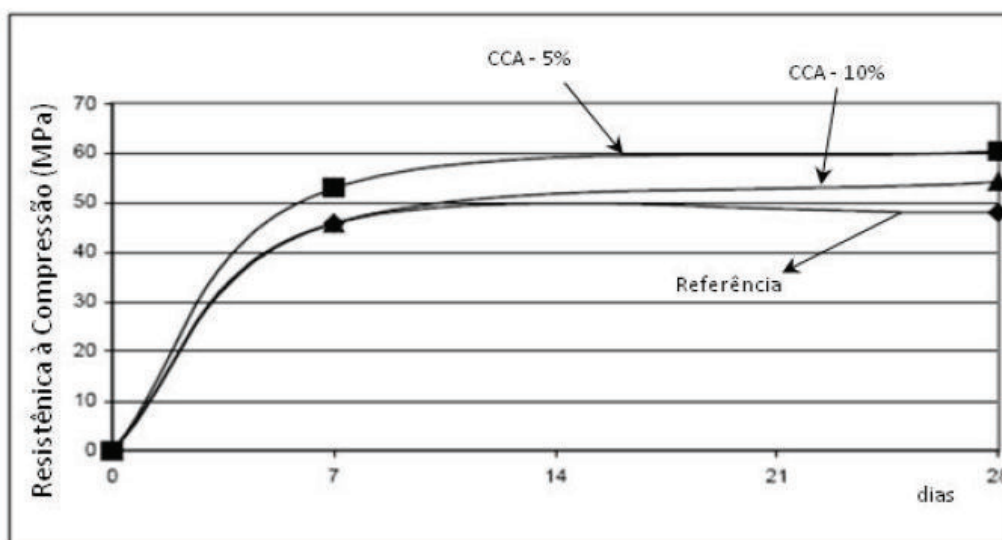


Figura 10: Resistência de concreto com CCA

Fonte: Tashima et al, 2004 apud Duart, 2008

Missau (2004) verificou a melhora da resistência de concretos adicionados com CCA moída com teores de adição de 10, 20 e 30 %, destacando a possibilidade de redução de poluição ambiental pelo uso deste rejeito industrial além da possibilidade de menor utilização de cimento, fato este que ajudaria a redução das emissões de CO₂ na atmosfera.

Silva (2003) apud Missau (2004) estudou a influência da utilização da CCA, em níveis de substituição ao cimento no concreto de 5%, 10% e 20%, e adotou em sua pesquisa a

relação a/ag 0,35. A CCA pesquisada foi obtida da indústria de beneficiamento de arroz, sem controle de temperatura, moída por 3 a 5 horas em um moinho de bolas. O autor avaliou a resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 63 dias. Constatou aumentos nas resistências aos 7 dias, em relação à mistura de referência das misturas compostas com 5% e 10% de CCA, de 6,3% e 1,4%, respectivamente. Para a mistura composta com 20% de CCA, foi observada redução na resistência, em relação à mistura de referência de 6,2%. Aos 28 dias, todos os níveis de substituição mostraram acréscimos nas resistências. Observou aumentos nas resistências para as misturas com 5%, 10%, 20% de CCA, em relação aos 7 dias, de 15,4%, 18,43% e 25,69%, respectivamente. Aos 63 dias, igualmente ocorreram aumentos de 5,67%, 8,90% e 2,37% para as misturas com 5%, 10% e 20% de CCA. Concluiu que os resultados dos ensaios de resistência à compressão indicaram que os concretos produzidos com a CCA sem controle de temperatura possuem um potencial favorável para sua utilização na produção de concretos de alto desempenho.

Feng et al. (2003) apud Missau (2004) investigaram a eficiência da utilização da CCA sobre a resistência a compressão do concreto. Em seus estudos, foi utilizada CCA produzida através da queima controlada em forno comercial. Foram adotadas em sua pesquisa relações a/ag 0,30, 0,45 e 0,55 e níveis de substituição de cimento por CCA de 10%, 20% e 30%, com ensaios realizados aos 3, 7, 28 e 91 dias. Seus resultados indicaram acréscimos nas resistências com o aumento dos teores de substituição de cimento por CCA. Os concretos moldados com relação a/ag 0,35 contendo 0%, 10%, 20% e 30%, aos 28 dias apresentaram resistências de 51,2 MPa, 66,2 MPa, 75,2 MPa e 82,2 MPa, respectivamente, sendo estes resultados 29% a 61% maiores que os resultados da amostra de controle (0%) de adição. Foram constatados também acréscimos da resistência à compressão com o aumento do tempo de cura. Amostras compostas com os mesmos teores relatados anteriormente, porém com relações a/ag 0,30 e 0,45, seguiram as mesmas tendências anteriores.

Pode-se dizer que a inclusão de adições minerais no concreto, seja por substituição ou acréscimo ao cimento Portland, promovem ações de elevação da resistência da pasta, além de fortalecer a zona de transição. Por conseqüência, a resistência mecânica do concreto cresce proporcionalmente, conforme foi visto nas constatações dos pesquisadores aqui citados.

2. METODOLOGIA

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa é de ordem quantitativa, desenvolvendo estudo baseado em ensaios laboratoriais.

2.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica para suporte de informações necessárias para o entendimento da pesquisa.

Após foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, importante para o processo de dosagem do concreto, tais como: ensaio de granulometria, massa específica, massa unitária, módulo de finura etc.

O estudo de dosagem foi executado através do método de Helene e Terzian (1992), na qual foram desenvolvidos os seguintes traços:

- Traço referência R, moldado somente com cimento;
- Traço M10, moldado com 10% de substituição de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz;
- Traço M15, moldado com 15% de substituição de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz;
- Traço M20, moldado com 20% de substituição de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz.

Para cada traço foram adotadas duas relações a/ag: 0,45 e 0,55, totalizando 8 diferentes traços.

Foram realizados ensaios de resistência a compressão axial e ensaio de microscopia eletrônica de varredura, nas idades de 7 e 28 dias.

2.3 MATERIAIS UTILIZADOS

2.3.1 Aglomerantes

Os aglomerantes utilizados no estudo foram cimento Portland e a microssílica da cinza de casca de arroz.

2.3.1.1 Cimento

O cimento é um material com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água.

O cimento utilizado é o CPV-ARI, atingindo altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquire elevadas resistências, com maior velocidade. O clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um tempo mais prolongado e seu alto teor de C_3S gera maior disponibilidade de hidróxido de cálcio para as reações pozolânicas. A Tabela 2 apresenta as características químicas deste cimento.

Tabela 2: Características químicas do cimento CP-V ARI

Componente Químico	Resultados
CaO(%)	64,14
SiO ₂ (%)	19,45
Al ₂ O ₃ (%)	4,75
Fe ₂ O ₃ (%)	3,12
SO ₃ (%)	2,85
MgO (%)	0,8
K ₂ O (%)	0,66
Na ₂ O (%)	0,70
Finura Blaine (cm ² /g)	4729

Fonte: Panzera, 2011

Para a caracterização física do cimento (Tabela 3), foram realizados ensaios no LEC da Unijuí, na qual foram utilizados as seguintes normas:

- Finura #0,075m – NBR 11579
- Massa específica – NBR NM 23

Tabela 3: Características físicas do Cimento CPV-ARI

Propriedade	Resultado
Massa específica	3,29 g/cm ³
Finura # 0,075	2,32%

2.3.1.2 Microsílica da Cinza de Casca de Arroz (MCCA)

A cinza de casca de arroz é proveniente da Indústria Cereais Passo da cidade de Itaqui-RS, identificada como “ Micro sílica MS – 325”, sendo um produto obtido a partir da industrialização controlada da Cinza de Casca de Arroz (CCA). É uma microsílica cuja base é uma sílica finamente moída de coloração cinza preto. Foram realizados estudos da caracterização desta, pela CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia, na qual estão apresentados na Tabela 4 algumas propriedades.

Tabela 4: Características da microsílica da cinza de casca de arroz (MCCA)

Propriedade	Resultados
Massa específica	2,14 kg/cm ³
Sílica (SiO ₂) in natura	87,7%
Sílica (SiO ₂) nas cinzas	95,7%
Umidade de higroscopia	1,71%
Teor de não queimados	8,65%
Diâmetro médio	22,72 µm

Fonte: Cientec, 2010

2.3.2 Agregados

2.3.2.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado neste estudo é areia média proveniente da região de Santa Maria – RS. Os ensaios de caracterização do material foram feitos no Laboratório de Engenharia Civil - LEC, utilizando os ensaios abaixo relacionados. Os resultados estão apresentados na Tabela 5 e na Figura 11.

- Composição Granulométrica – NBR 7217
- Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776
- Massa unitária solta – NBR 7251

Tabela 5: Características do agregado miúdo

Propriedade	Resultado
Massa específica	2,59 g/cm ³
Massa Unitária Solta	1,58 kg/dm ³
Dmáx. característico	1,2mm
Módulo de Finura	1,62

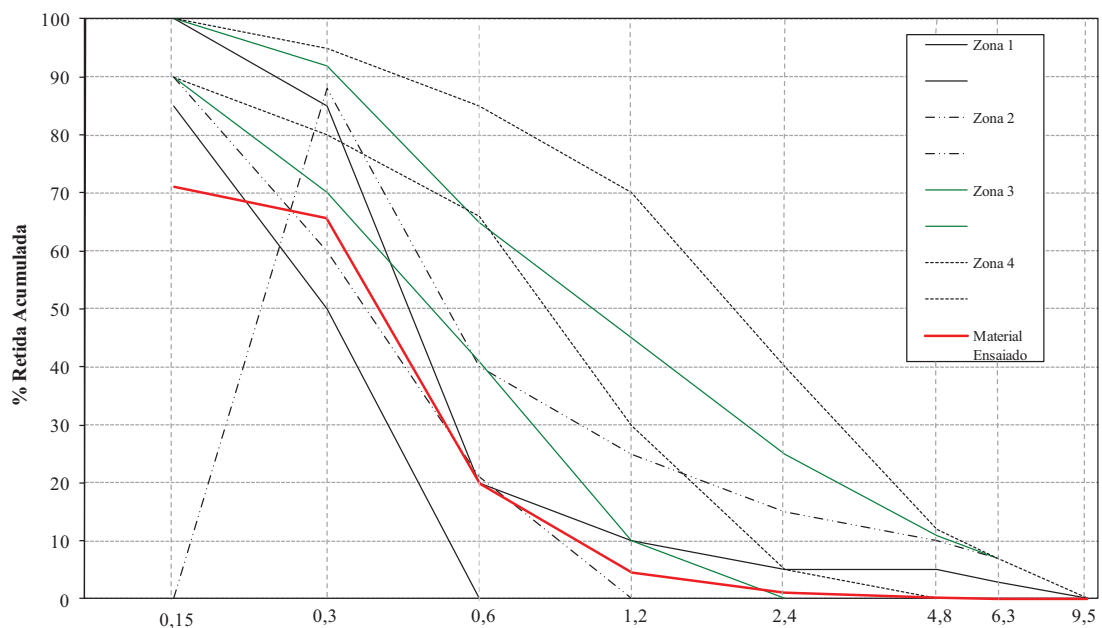


Figura 11: Granulometria do agregado miúdo

2.3.2.2 Agregado Graúdo

A pedra brita consumida na pesquisa é Brita 1, de origem basáltica, proveniente da região de Ijuí, RS. Os ensaios de caracterização do material foram feitos no Laboratório de Engenharia Civil – LEC utilizando os ensaios abaixo relacionados. Os resultados estão apresentados na Tabela 6 e na Figura 12.

- Composição Granulométrica – NBR 7217
- Massa específica e absorção do agregado graúdo – NBR 9937
- Massa unitária solta – NBR 7251

Tabela 6: Características do agregado graúdo

Propriedade	Resultado
Massa específica	2,94 g/cm ³
Massa Unitária Solta	1,63kg/dm ³
Absorção	0,95%
Dmáx. Característico	19 mm
Módulo de Finura	6,72

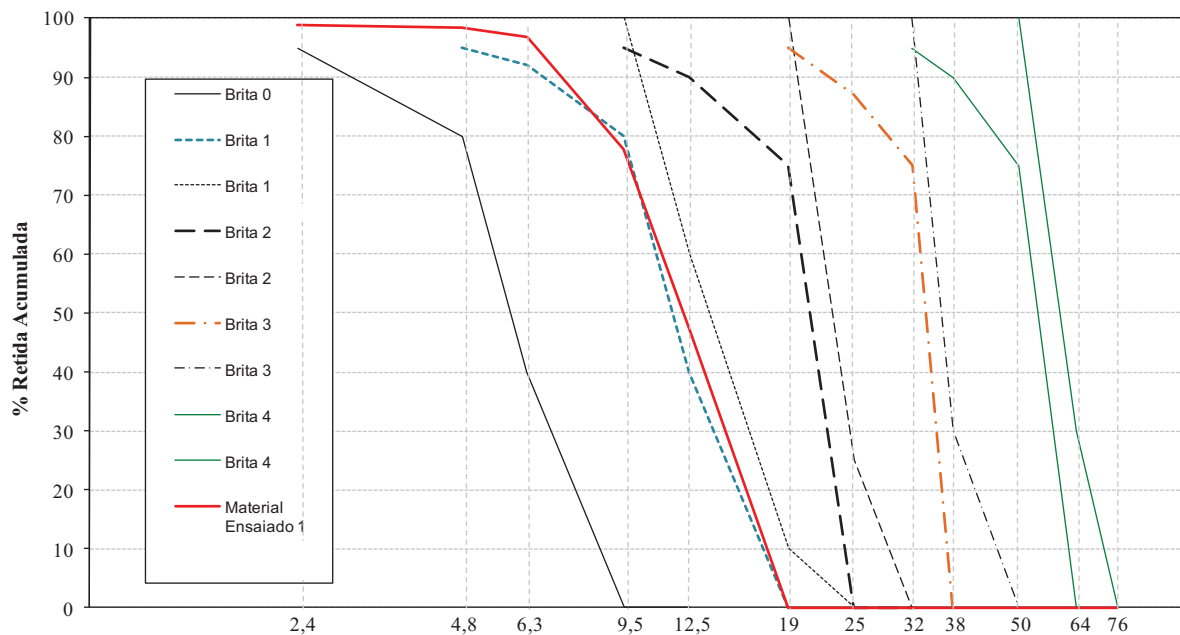


Figura 12: Granulometria do agregado graúdo

2.3.3 Aditivo

Nas misturas com substituição de cimento por cinza de casca de arroz, foi necessária a utilização do aditivo GLENIUM 51 superplastificante para se alcançar as consistências desejadas. Estas consistências foram fixadas nos valores de 80 ± 10 mm, determinados a partir do abatimento do tronco de cone. Na Tabela 7, estão expostas as propriedades do aditivo utilizado.

Tabela 7: Características do aditivo GLENIUM 51 superplastificante

Propriedade	Resultado
Base química	Policarboxilatos
Aspecto	Bege
Densidade	1,067 a 1,107g/cm ³
pH	5 a 7
Sólidos	28,5 a 31,5%
Viscosidade	95 a 160 cps

2.3.4 Água

Para a produção dos traços foi utilizada água proveniente de poço artesiano que abastece o LEC – Laboratório de Engenharia Civil da Unijuí.

2.4 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

2.4.1 Dosagem dos traços

O método de dosagem experimental utilizado na pesquisa foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (IPT/EPUSP), que consiste em buscar curvas que expressam o comportamento de materiais, e não de um traço isolado para uma determinada resistência característica.

Para o princípio foram necessários três pontos para poder montar o diagrama de dosagem, que correlaciona a resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo

de cimento. Foram estabelecidos, os traços 1:6, 1:5 e 1:4 (pobre, médio e rico respectivamente). Partiu-se para mistura em betoneira do traço intermediário 1:5 (cimento: agregados secos totais), na qual foi realizado a trabalhabilidade, propriedade do concreto no estado fresco, que define a capacidade do material se moldar nas fôrmas, sendo facilmente transportado, lançado e adensado sem perder sua homogeneidade. O teor de argamassa ideal foi determinado através da NBR NM 67: concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone método de ensaio, na qual se estabeleceu o abatimento do tronco de cone de 80 ± 10 mm (Figura 13). Ao atingir-se a trabalhabilidade desejada, na qual o teor de argamassa ideal encontrado foi de 56%, moldaram-se os corpos de prova para ensaios do concreto endurecido.

Posteriormente, rodaram-se os demais traços (um mais rico e um mais pobre do que o traço básico de referência), verificando a mesma trabalhabilidade com distintas relações água/cimento, mas mantendo fixo o teor de argamassa. Somente adicionou-se água para atingir o abatimento estabelecido no estudo. Da mesma forma, os corpos de prova de cada traço foram moldados e reservados para os ensaios do concreto endurecido. Nas idades especificadas, romperam-se os corpos de prova de concreto e verificaram-se as resistências de cada traço. Desta forma, pode-se construir o diagrama de dosagem específico correspondente a esta família de concretos.



Figura 13: *Slump flow test* sendo executado

Adotou-se duas relações a/ag de 0,45 e 0,55, obtendo-se a partir daí as proporções de aglomerante/agregado de 1:4,2 e 1:5,5 respectivamente. Calculou-se então, dois traços referência : a/ag 0,45 (1:1,91:2,29); a/ag 0,55 (1:2,64:2,86). Para cada fator a/ag houve quatro moldagens; a primeira sem substituição de cimento por MCCA, a segunda com substituição de 10%, a terceira com substituição de 15%, e a última com substituição de 20%, somando-se assim oito moldagens, sendo que a substituição de cimento pela MCCA foi feito em massa. A Tabela 8 apresenta a quantidade de material utilizado em cada moldagem.

Tabela 8: Quantidade de materiais utilizados nas moldagens

Traço	a/ag	MCCA (Kg/m ³)	Cimento (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Brita (Kg/m ³)	Aditivo (Kg/m ³)
R	0,45	-	490	935,9	1122,1	-
	0,55	-	390	1029,6	1115,4	-
M10	0,45	49	441	935,9	1122,1	1,36
	0,55	39	351	1029,6	1115,4	0,56
M15	0,45	73,5	416,5	935,9	1122,1	1,44
	0,55	58,5	331,5	1029,6	1115,4	1,41
M20	0,45	98	392	935,9	1122,1	1,81
	0,55	78	312	1029,6	1115,4	1,27

Seguindo a norma NBR 5738 (Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-prova), foram confeccionados 18 corpos-de-prova para cada traço, em moldes cilíndricos com dimensões de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura, sendo que nesta pesquisa se utilizou somente 6 corpos de prova: 3 para a idade de 7 dias e 3 para a idade de 28 dias. Após moldagem, os corpos de prova ficaram expostos à temperatura ambiente nas primeiras 24 horas, sendo posteriormente desmoldados e acondicionados em câmara úmida sob temperatura de 23 ± 2 °C e umidade > 95%, onde permaneceram até as datas dos ensaios.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias, e para estas mesmas idades foram retirados fragmentos dos corpos de prova, na qual foram tratadas com álcool isopropílico de forma a paralisar o processo de hidratação. Após a secagem das amostras, estas foram acondicionadas em embalagens fechadas até a realização dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

2.4.2 Ensaio de resistência a compressão

A resistência a compressão dos concretos foi avaliada por meio de corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro com 20 cm de altura. O ensaio para a determinação da resistência foi feito no LEC da Unijuí, em prensa nas idades de 7 e 28 dias a partir da moldagem, conforme a NBR 5739. A Figura 14 ilustra o ensaio sendo realizado.



Figura 14: Ensaio de resistência a compressão

2.4.3 Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizados no Laboratório de MEV da UFSM em um microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM 6060, com capacidade para magnificações de 5 até 300.000 vezes. As amostras foram analisadas no MEV, com a finalidade de observar a microestrutura de cada traço.

Os cubos foram retirados dos corpos de prova, submetidos ao ensaio de compressão axial com o auxílio de talhadeira e após estes foram imersos em álcool isopropílico durante três dias, com o intuito de paralisar as reações de hidratação da pasta e em seguida secos em

estufa a temperatura de 60°C por 24h, para posteriormente serem armazenados em embalagens fechadas.

Para o ensaio as amostras foram colocadas em um recipiente onde foram revestidas com uma fina camada de ouro, a fim de proporcionar as interações eletrônicas necessárias quando colocadas no microscópio.



Figura 15: Amostras em recipiente à vácuo sendo pulverizadas com ouro



Figura 16: Microscópio eletrônico de varredura, laboratório da UFSM

3. RESULTADOS

3.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Os valores obtidos da resistência a compressão na idade de 7 dias estão ilustrados na Figura 17, para as relações a/ag 0,45 e 0,55. Pode-se observar que para as duas relações, todos os traços com microssílica da cinza de casca de arroz, apresentaram valores inferiores ao traço referência moldado somente com cimento, e que quanto maior o teor de adição menor foi o valor da resistência a compressão axial.

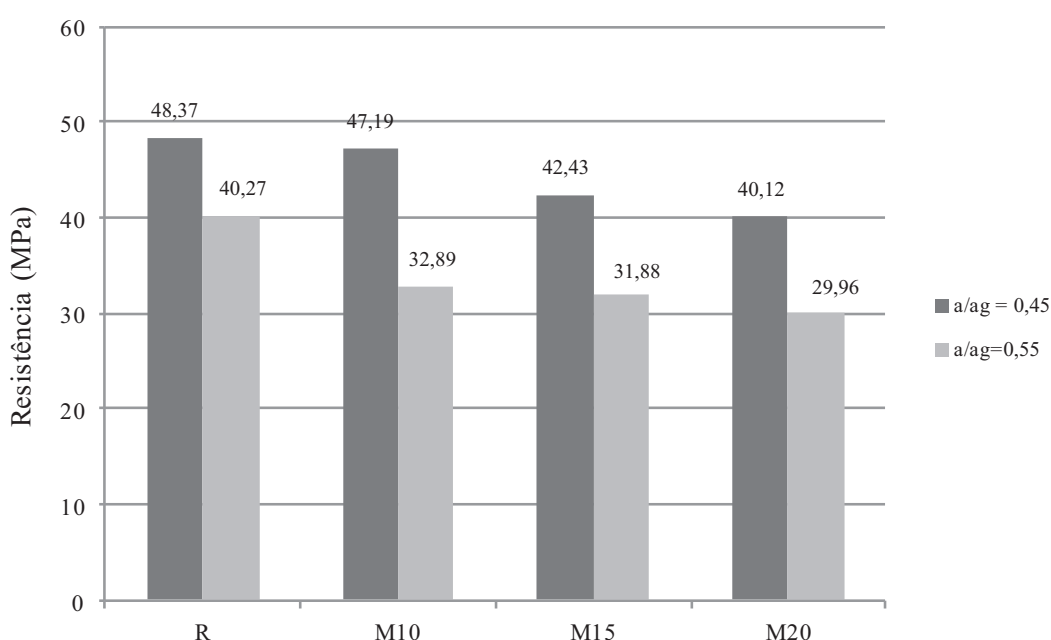


Figura 17: Resistência a compressão aos 7 dias

Analisando a Figura 17, pode-se constatar que na relação a/ag 0,45, o traço R obteve resistência elevada com cerca de 48,37 MPa, sendo que o traço M10 apresentou valor pouco abaixo deste, com resistência de 47,19 MPa. Já os traços M15 e M20 obtiveram valores mais distantes do traço referência, com 42,43 MPa e 40,12 MPa respectivamente.

Na relação a/ag 0,55, todos os traços apresentaram resistência menor que a relação a/ag 0,45, o que era já esperado, pois de acordo com a Lei de Abrams, à medida que a relação a/ag aumenta, o valor da resistência tende a diminuir. Para esta relação a/ag , o traço referência também apresentou maior valor em comparação aos traços com microssílica da cinza de casca de arroz, obtendo uma resistência de 40,27 MPa. Porém neste caso o traço M10 não obteve valor próximo ao traço referência, apresentando resistência de 32,89 MPa, valor

próximo aos traços M15 e M20 que obtiveram resistência de 31,88 MPa e 29,96MPa respectivamente.

Aos 28 dias de idade, com um tempo de cura maior, destacou-se o avanço das reações de hidratação dos componentes do cimento e também do processo das reações pozolânicas dos traços com microssílica da cinza de casca de arroz, resultando valores superiores aos apresentados nos 7 dias de idade. Além disso, observa-se na Figura 18 que os concretos com microssílica da cinza de casca de arroz ultrapassaram os valores de resistência do concreto referência moldado com 100% de cimento.

Na relação a/ag 0,45 o traço M10 foi o que apresentou a maior resistência de todos os traços, com valor de 60,93 MPa. O traço de referência R foi o que obteve a menor resistência, de 56,66 MPa. Já os traços M15 e M20, obtiveram valores praticamente iguais, de 57,83 MPa e 57,28 MPa respectivamente.

Na relação a/ag 0,55 o traço R foi o que obteve melhor resultado em comparação aos demais traços estudados, com resistência de 48,25 MPa. O traço M10 obteve resistência de 44,78 MPa, ficando um pouco mais próximo do traço referência quando comparado na idade de 7 dias. O traço M15 e M20, apresentaram valores menores. O traço M15 apresentou resistência de 43,6 MPa e o traço M20 apresentou resistência de 41,91 MPa.

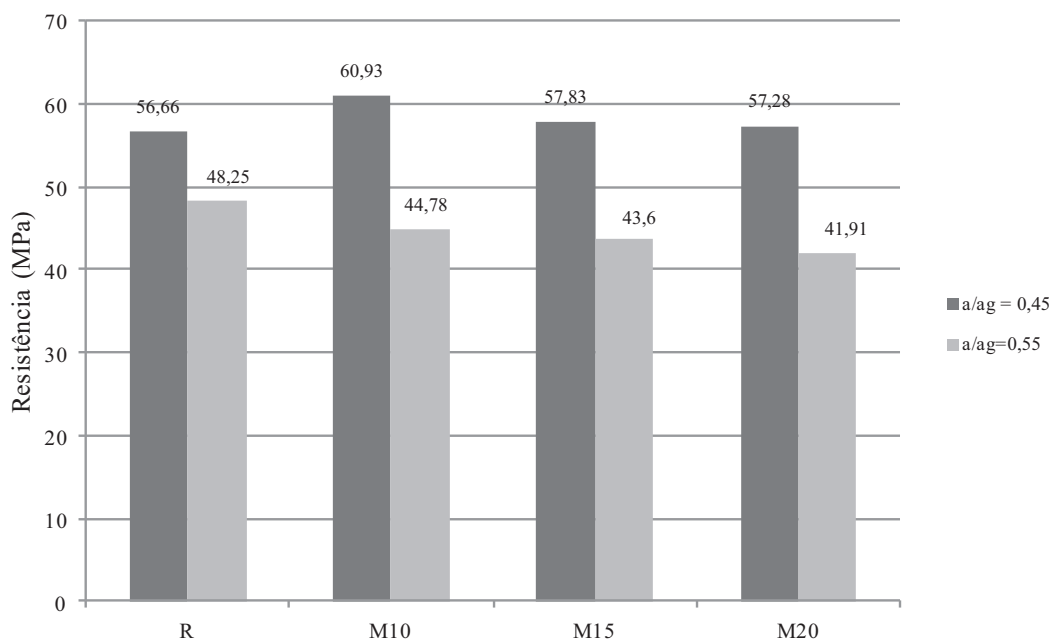


Figura 18: Resistência a compressão aos 28 dias

3.1.1 Evolução das resistências

Na Tabela 9 estão expostos os valores da resistência a compressão para as idades de 7 e 28 dias e o aumento de resistência adquirido neste período para cada traço de concreto.

Tabela 9: Resultados da resistência a compressão

Traço	a/ag	Resistência a compressão (MPa)		Aumento de resistência (%)
		7 dias	28 dias	
R	0,45	48,37	56,66	15
	0,55	40,27	48,25	20
M10	0,45	47,19	60,93	29
	0,55	32,89	44,78	36
M15	0,45	42,43	57,83	36
	0,55	31,88	43,60	37
M20	0,45	40,12	57,28	43
	0,55	29,96	41,91	40

A partir da análise desta tabela, pode-se concluir que os traços com substituição parcial de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz apresentaram aumento de resistência superior ao traço moldado somente com cimento, e que quanto maior o teor de substituição maior foi o ganho de resistência. Isto pode ser explicado pelo fato destes traços terem além da hidratação do cimento, mais uma reação química na presença de água, a reação pozolânica, entre o CH e a sílica presente na MCCA, gerando mais produtos hidratados como C-S-H.

Analisando-se comparativamente o M10 (0,45) com o M15(0,45), nota-se que aos 28 dias o M15(0,45) obteve maior ganho de resistência comparado com o M10 (0,45), quase atingindo o valor deste. Esse fato se deve a maior reatividade do M15, sendo que substituindo 15% de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz consegue-se um melhor desempenho do concreto, pois as partículas do cimento com diâmetros grandes, que acabam não hidratando, são substituídas pela microssílica, que se hidrata resultando no incremento de resistência.

O traço M20 (0,45) foi o que obteve maior ganho de resistência ao longo do tempo, chegando a ter um aumento de 43% no período dos 7 aos 28 dias, pois é o traço que possui maior teor de microssílica da cinza de casca de arroz, o que contribui para as reações pozolânicas gerando um aumento de resistência mais elevado do que os demais traços.

O R(0,45) foi o traço que obteve o menor ganho de resistência com uma taxa de aumento de 15%, isto se explica pelo fato do traço referência não apresentar reação pozolânica, pois é composto somente por cimento CPV ARI que obtém grande parte de sua resistência em idades menores.

Na relação a/ag 0,55, o traço M20 obteve um crescimento de 40%, o dobro do aumento de resistência do traço R, de 20%. Os demais traços obtiveram valores de aumento de resistência praticamente iguais, sendo que o traço M10 obteve 36% de aumento e o traço M15 obteve 37% de aumento.

A Figura 19 apresenta o avanço das resistências ao longo do tempo para os traços com relação a/ag 0,45.

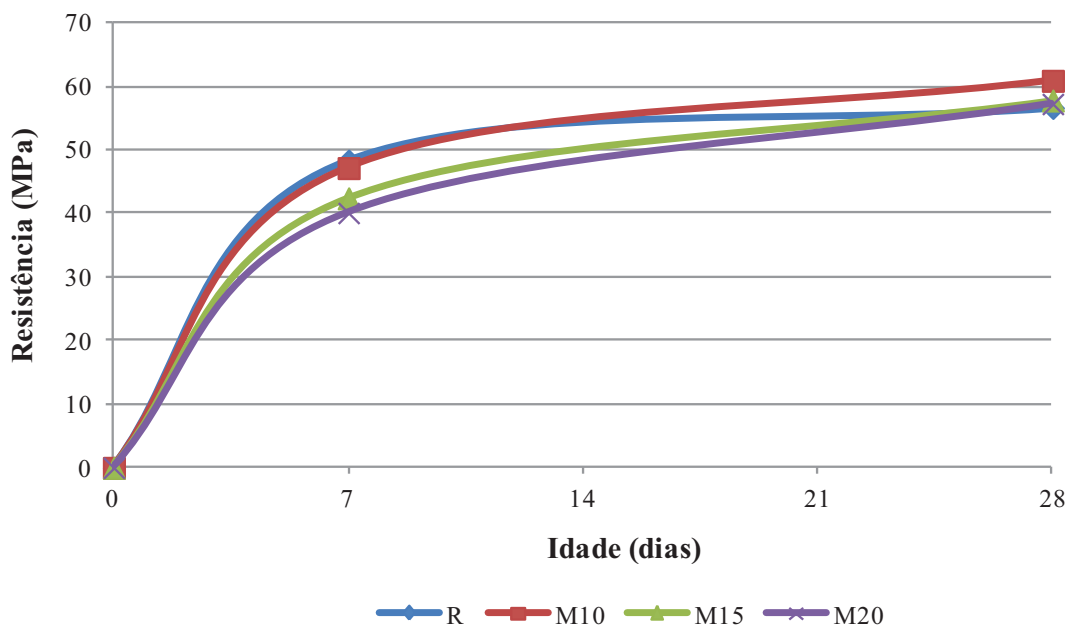


Figura 19: Avanço da resistência ao longo do tempo para relação a/ag 0,45

Através da análise gráfica, observa-se que o traço referência apresenta a maior resistência aos 7 dias de idade mas que, ao longo do tempo acaba se estabilizando, apresentando um baixo avanço de resistência comparado aos traços com MCCA.

O traço M10 (0,45) aos 7 dias de idade obteve resistência muito próxima ao traço referência, na qual continuou crescendo ao longo do tempo ultrapassando a resistência do traço R(0,45) aos 28 dias.

Os traços M15 (0,45) e M20(0,45) apresentaram resistências distante aos 7 dias do traço referência, mas devido aos seus altos ganhos de resistência ao longo do tempo, pelas

reações pozolânicas, obtiveram valores superiores ao traço referência R(0,45) aos 28 dias de idade.

Nota-se que se fosse investigado idades maiores, como 91 dias, os concretos com microssílica de cinza de casca de arroz, apresentariam maiores resistências, pois segundo Frizzo (2001), concretos com adições minerais, como por exemplo, a microssílica da cinza de casca de arroz, beneficiam-se das reações pozolânicas a longo prazo, necessitando em geral tempo acima de 28 dias.

A Figura 20 apresenta o avanço da resistência ao longo do tempo para os traços com relação a/ag 0,55.

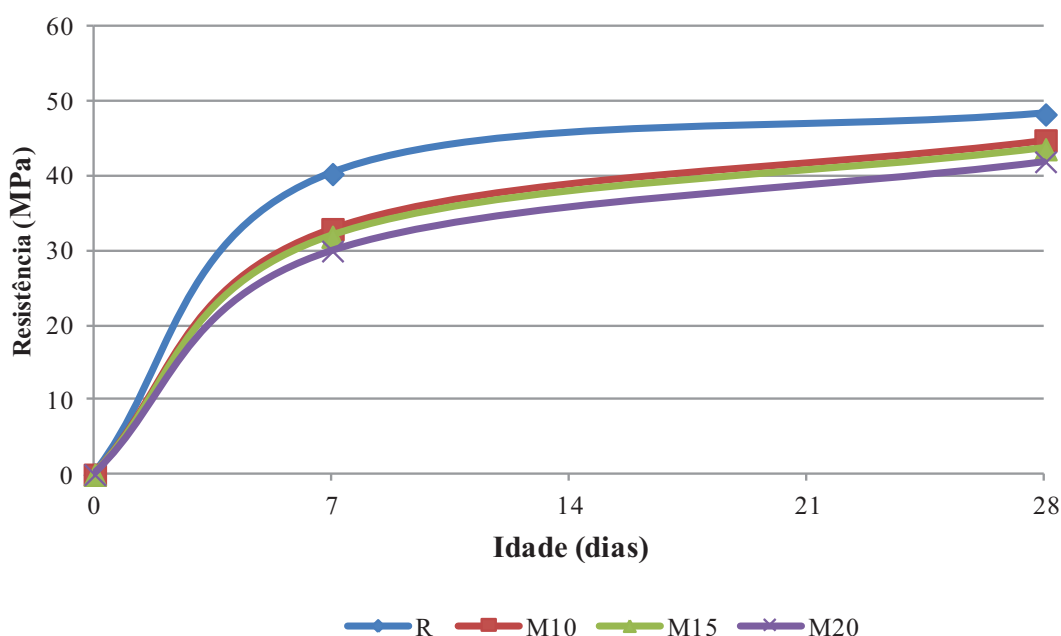


Figura 20: Avanço da resistência ao longo do tempo para relação a/ag 0,55

Observa-se que aos 7 dias de idade na relação a/ag 0,55, todos os traços com MCCA apresentaram valores inferiores de resistência em comparação ao traço referência R. O ganho de resistência para os 28 dias nos traços com MCCA foi mais acentuado que o de referência, porém ainda obtiveram resistência inferior ao referencial.

Analisando graficamente, nota-se que o traço R(0,55), apresenta um aumento significativo até os 7 dias de idade, mas que após tende a ficar constante, ao contrário dos traços com MCCA que aos 7 dias de idade apresentaram baixa taxa de crescimento de resistência mas que após, devido a evolução das reações, apresentaram taxas altas de aumento de resistência ficando mais próximas do concreto referência.

Percebe-se também que se tivessem idades maiores, os traços com MCCA poderiam ultrapassar o traço referência moldado somente com cimento.

3.1.2 Variação da resistência a compressão axial

A variação de resistência que ocorre com a adição mineral, pode ser expressa na forma de porcentagem, como é observada na Tabela 10, na qual foi feita uma comparação dos resultados dos concretos com MCCA em relação aos de referência, em igualdade de relação água/aglomerante.

Tabela 10: Taxa de variação de resistência à compressão em comparação ao traço referência

Traço	a/ag	Variação da resistência (MPa)	
		7 dias	28 dias
M10	0,45	-2%	7%
	0,55	-18%	-7%
M15	0,45	-12%	2%
	0,55	-21%	-10%
M20	0,45	-17%	1%
	0,55	-26%	-13%

Pode-se notar, que aos 7 dias de idade todos os traços com substituição parcial de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz apresentaram percentuais inferiores tanto para a relação a/ag 0,45 quanto para a relação a/ag 0,55. Porém, aos 28 dias de idade, na relação a/ag 0,45 todos apresentaram percentuais superiores ao concreto referência, na qual o M10 obteve 7%, o M15 obteve 2% e o M20 obteve 1%. Já na relação a/ag 0,55 todos apresentaram percentual inferior em relação ao concreto referência.

3.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

3.2.1 Interface entre a resistência a compressão e microscopia aos 7 dias

A Figura 21 apresenta as micrografias obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com ampliação de 300X, das amostras retiradas dos diferentes traços para as relações a/ag 0,45 e 0,55, na idade de 7 dias.

Observa-se que para a relação a/ag 0,55 a porosidade é maior que na relação a/ag 0,45, já que a distribuição do tamanho dos poros é afetada pela relação água/aglomerante e também pelo grau de hidratação do cimento.

Fazendo a interface entre os ensaios de resistência à compressão e MEV, nota-se que a menor relação a/ag apresentou uma maior resistência a compressão e um maior refinamento dos poros, ou seja, de acordo com os resultados esperados.

Aos 7 dias, o R(0,45) possui resistência pouco maior que o M10 (0,45), devido a reatividade mais lenta da microssílica neste período. Analisando a microscopia, observa-se que o R (0,45) apresenta uma estrutura mais compacta, o que evidencia o comportamento da resistência.

Comparando-se o M10 (0,45) com o M15 (0,45), nota-se que o M10 (0,45) apresenta um aspecto mais homogêneo com fechamento dos poros maior que o M15(0,45). Esse comportamento fica evidente após a análise da resistência, sendo que o M10 (0,45) apresentou maior resistência que o M15 (0,45).

O mesmo ocorre para os traços M15 (0,45) e M20 (0,45), na qual o traço M15 (0,45) por adquirir maior resistência, apresentou menor porosidade, que o traço M20 (0,45).

Na relação a/ag 0,55, o traço R foi o que apresentou maior resistência do que os traços M10 , M15 e M20 . Observa-se através da microscopia que o traço R apresenta menor porosidade que os demais traços nesta relação a/ag.

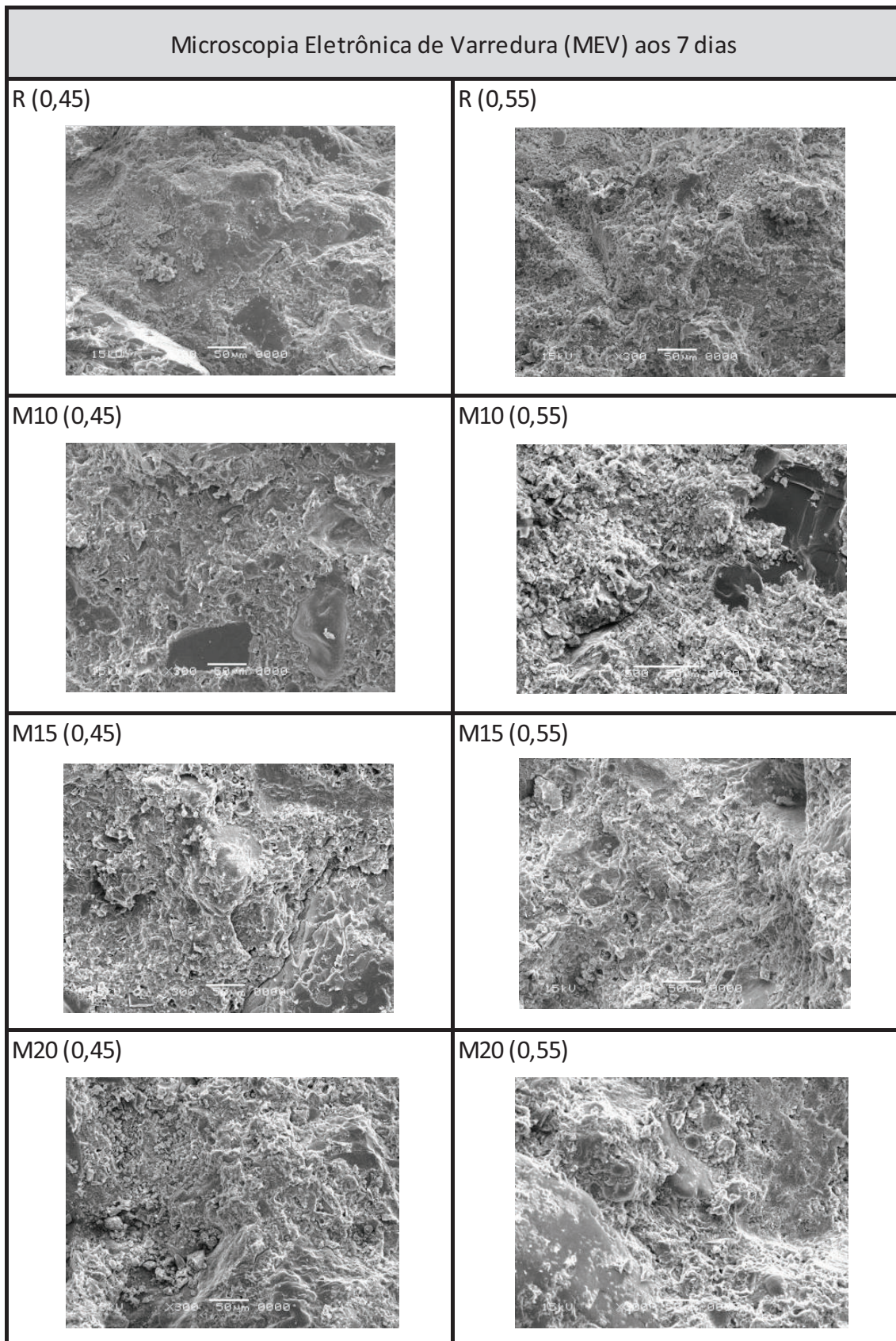


Figura 21: Micrografia dos traços aos 7 dias de idade, ampliação 300X

3.2.2 Interface entre a resistência a compressão e microscopia aos 28 dias

A Figura 22 apresenta as micrografias obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com ampliação de 300X, das amostras retiradas dos diferentes traços para as relações a/ag 0,45 e 0,55, na idade de 28 dias.

Para todos os traços com relação a/ag 0,45, a matriz pasta cimento apresenta-se mais homogênea, com menos poros ou com poros de menor diâmetro e apresentam-se como uma pasta mais densa do que os mesmos traços na relação a/ag 0,55.

Comparando-se o R (0,45) aos 28 dias com o M10 (0,45) nota-se que o M10 (0,45) ultrapassou os valores de resistência a compressão axial do R(0,45). Esse fato deve-se, a maior reatividade da microssílica nesta idade, ocasionando um maior fechamento dos poros. Essa maior reatividade da MCCA acontece devido a melhor hidratação da sílica (estrutura molecular amorfa), gerando uma pasta menos heterogênea e mais resistente.

O traço M10 (0,45) apresenta um aspecto de pasta mais compacta em comparação ao traço M15 (0,45), já que apresenta resistência superior a este. Observando as fotos de microscopia de 7 e de 28 dias, nota-se que o traço M15 (0,45) apresentou uma redução da porosidade, devido à reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio produzido na hidratação dos silicatos do cimento e a sílica presente na MCCA, que se intensifica ao longo do tempo e causa o refinamento dos poros, diminuindo a porosidade total, alterando assim a microestrutura da pasta.

O mesmo ocorre para o M20 (0,45), que devido a substituição de 20% de cimento pela microssílica da cinza de casca de arroz, acabou por ter um ganho de resistência maior que os demais traços, melhorando sua microestrutura em relação aos 7 dias de idade.

Quanto ao fechamento dos poros do M15 (0,45) e M20 (0,45), observa-se que estes estão praticamente iguais, já que suas resistências são também muito parecidas.

Na relação a/ag 0,55, o traço R continuou sendo o traço com menor porosidade já que este apresentou aos 28 dias maior resistência que os demais traços. Os traços M10, M15 e M20 apresentaram resistências praticamente iguais, apresentando microestruturas parecidas, porém mais compactas em relação aos 7 dias.

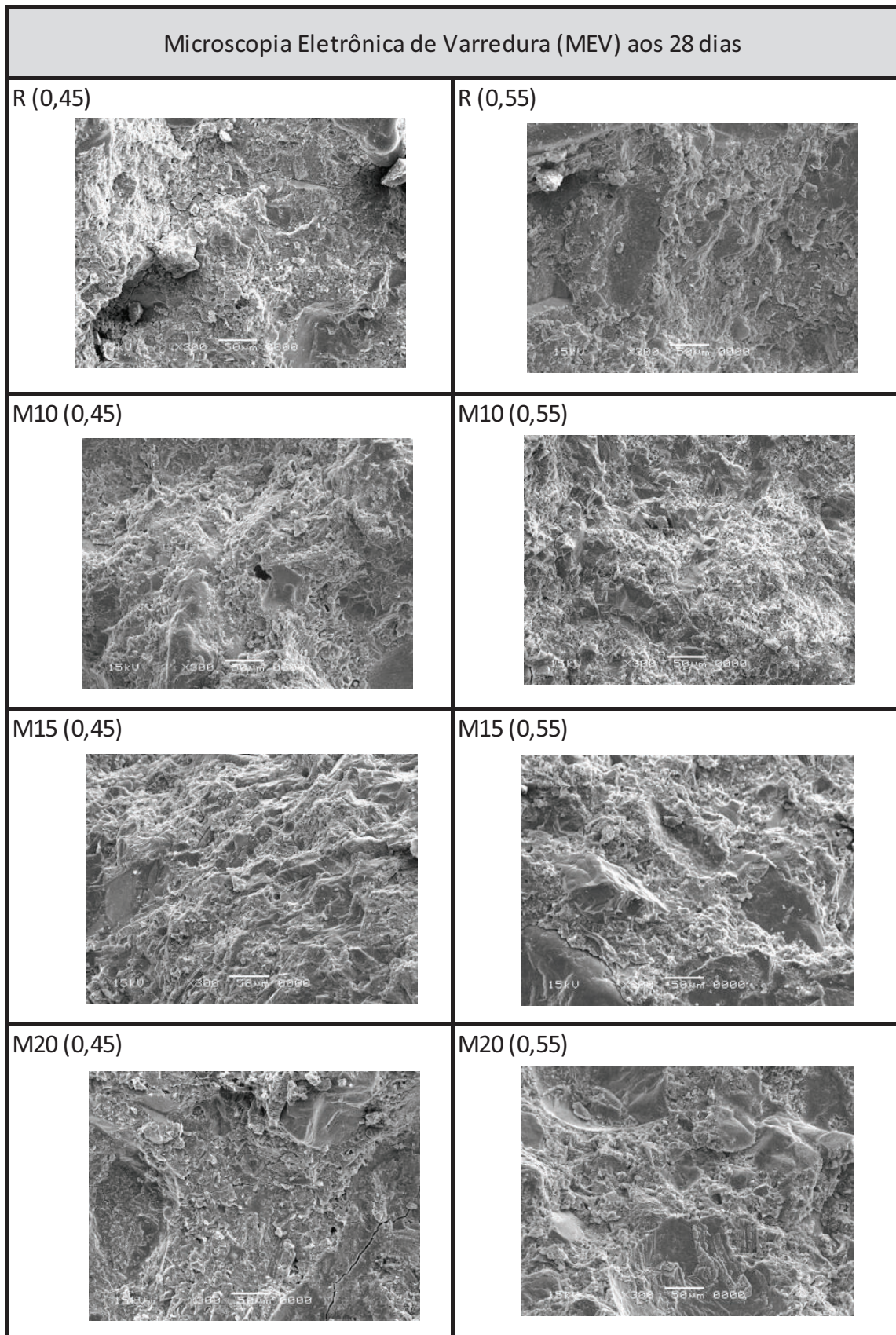


Figura 22: Micrografia dos traços aos 28 dias de idade, ampliação 300X

CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou avaliar a substituição de cimento por microsilica da cinza de casca de arroz em teores de 10%, 15% e 20% com relações a/ag 0,45 e 0,55, analisando a resistência e a microestrutura em comparação ao concreto referência moldado somente com cimento.

Partindo do questionamento proposto para a realização desta pesquisa, pode-se concluir através dos dados obtidos, que a influência da substituição do cimento por microsilica da cinza de casca de arroz se dá da seguinte maneira:

- **Quanto à resistência a compressão**

Mediante os resultados, constatou-se que aos 7 dias de idade todos os traços com microsilica da cinza de casca de arroz apresentaram valores inferiores de resistência em comparação ao traço referência moldado somente com cimento, tanto para a relação a/ag 0,45 quanto para a relação a/ag 0,55. Observou-se também, que quanto maior o teor de substituição de cimento pela MCCA, menor foi o valor de resistência adquirido nesta idade.

Com um tempo de cura maior, aos 28 dias de idade para a relação a/ag 0,45, os traços com MCCA tiveram um maior ganho de resistência devido ao efeito físico e pozolânico, sendo que conseguiram ultrapassar a resistência do concreto referência. O traço M10 foi o que obteve maior resistência, seguido do traço M15, M20 e por último o traço referência R, que obteve a menor resistência.

Porém, o mesmo não ocorreu para a relação a/ag 0,55, em que o traço referência continuou obtendo o maior valor de resistência em comparação aos traços com MCCA. Mas, observou-se que quanto ao ganho de resistência dos 7 aos 28 dias, os traços com a microsilica possuíram as maiores taxas de aumento do que o traço referencial.

Analisando-se o teor de substituição, notou-se que o traço M20 (0,45), foi o que apresentou maior ganho de resistência no período dos 7 aos 28 dias, chegando a obter cerca de 43% de aumento. Já o traço R(0,45), apresentou o menor ganho de resistência com cerca de 15%.

Através das curvas de avanço de resistência ao longo do tempo, notou-se que se fosse realizado ensaio em idades maiores, os concretos com MCCA poderiam alcançar ainda maiores resistências.

- **Quanto à microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Os ensaios de MEV se mostraram como uma ferramenta de significativa utilidade para a avaliação dos resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão, permitindo através de sua análise, a confirmação visual daquilo que tinha sido constatado.

Os resultados obtidos, confirmam que a utilização da MCCA no concreto provoca mudanças microestruturais, que tendem a causar o refinamento dos poros, diminuindo a porosidade, principalmente na menor relação a/ag de 0,45 e em idade maior de 28 dias.

Observou-se que aos 7 dias, o traço R(0,45), foi o que apresentou maior fechamento dos poros em relação aos demais traços, sendo que este apresentou a maior resistência nesta idade.

Aos 28 dias de idade, o traço M10 (0,45) foi o que obteve um maior refinamento dos poros, apresentando uma pasta mais compacta, o que evidencia a sua maior resistência em comparação aos demais traços.

Contudo, percebe-se que a utilização deste resíduo agroindustrial em concretos além de possibilitar o aumento da resistência, contribui para o meio ambiente, diminuindo o consumo de cimento, apresentando-se, portanto como uma ótima alternativa para a diminuição do impacto ambiental.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Dar continuidade a este trabalho analisando suas propriedades de resistência e microestrutura para idades maiores;
- Analisar o comportamento de concretos com MCCA, utilizando outros tipos de cimento no estudo;

- Avaliar a resistência mecânica utilizando diferentes teores de substituição de cimento por microssílica da cinza de casca de arroz;
- Verificar o comportamento da microssílica de cinza de casca de arroz quanto à durabilidade do concreto, através de ensaios de permeabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto**: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: método de ensaio. NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998 b.

_____. **Concreto** – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

_____. **Materiais pozolânicos** – Especificação. NBR 12653: Rio de Janeiro, 1992. 3p.

_____. **Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica**. NM 23. Rio de Janeiro, 1998. 4p.

_____. **Cimento Portland** – determinação da finura por meio da peneira 200. NBR 11579. Rio de Janeiro, 1991. 3p.

_____. **Agregados** – Determinação da composição granulométrica. NBR 7217. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **Agregados** – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. NBR 9776. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **Agregados** – Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo. NBR 9937 – NM 53. Rio de Janeiro. 2003.

_____. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de concreto**. NBR 5738. Rio de Janeiro, 1984.

BRIZOLA, Rodrigo Matzenbacher. **Microestrutura do cobrimento de concretos com altos teores de escória e cinza volante ativados por cimento portland e cal hidratada**. 2007. 179p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

CIENTEC. **Relatório de ensaio**. Porto Alegre, 2010.

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.

FRIZZO, Benildo Tocchetto. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto**. 2001. 158p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

FURQUIM, Paulo Ricardo de Vargas. **Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais**. 2006. 208 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini; 1992. 349 p.

HOPPE, Alessandro Eduardo. **Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2008. 148p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

IBGE. **Em 2011, IBGE prevê safra de grãos 2,8% menor que a de 2010**. Disponível em: F:\IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.mht. Acesso em: 20/05/2011

MEHTA, Providar Kumar.; MONTEIRO, Paulo . **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MISSAU, Fabiano. **Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2004. 146 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

MORAES, Régis da Costa. **Efeitos físicos e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. 2001. 178p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2001.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

PANZERA, T.H et al. **Compósito cimentício reforçado com fibras de carbono para recuperação de monumentos históricos**. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132010000400015&script=sci_arttext. Acesso em: 25/05/11.

PEDROZZO, Éder Claro. **Estudo da utilização da cinza de casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos**. 2008. 143p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

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 em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SOKOLOVICZ, Bóris Casanova; ISAIA, Geraldo Cechella; GASTALDINI; Antônio Guerra. **Estudo da variabilidade técnica e econômica da cinza de casca de arroz residual e natural, sem beneficiamento, na produção de concreto estrutural. Estudo de protótipos. Penetração de cloretos**. In: 51º IBRACON (CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO), 2009.