

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COM
DIFERENTES CIMENTOS PORTLAND E COM CINZA
DE CASCA DE ARROZ NATURAL E MOÍDA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fábio Maciel de Oliveira da Trindade

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COM
DIFERENTES CIMENTOS PORTLAND E COM CINZA DE
CASCA DE ARROZ NATURAL E MOÍDA**

Fábio Maciel de Oliveira da Trindade

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Geraldo Cechella Isaia

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Trindade, Fábio Maciel de Oliveira da
Propriedades mecânicas de concretos com diferentes cimentos Portland e com cinza de casca de arroz natural e moída / Fábio Maciel de Oliveira da Trindade.-2012.
114 p.; 30cm

Orientador: Geraldo Cechella Isaia
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2012

1. Cinza de casca de arroz natural. 2. Cinza de casca de arroz moída. 3. Resistência à compressão axial. 4. Resistência à compressão diametral. 5. Módulo de elasticidade. I. Isaia, Geraldo Cechella II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COM DIFERENTES
CIMENTOS PORTLAND E COM CINZA DE CASCA DE ARROZ
NATURAL E MOÍDA**

elaborada por
Fábio Maciel de Oliveira da Trindade

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Geraldo Cechella Isaia, Dr.
(Presidente/Orientador)

Antonio Luiz Guerra Gastaldini, Dr. (UFSC)

Luiz Roberto Prudêncio Jr., Dr. (UFSC)

Santa Maria, Junho de 2012.

*Este trabalho é dedicado às
pessoas que estão ao meu lado.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde para realizar com sucesso todas as tarefas exigidas no decorrer da vida e do mestrado.

À minha família, que sempre está ao meu lado, incentivando-me e guiando meus passos, em especial à minha noiva Dra. Fernanda Pauletto Taschetto, e à minha mãe, Dra. Tânia Maciel de Souza.

Ao professor Dr. Geraldo Cechella Isaia, pela incansável orientação e ajuda para a elaboração desta dissertação.

Aos meus colegas e amigos da pós-graduação André de Souza Pereira e Roger Mazza, que transformaram as árduas horas de trabalho em momentos mais agradáveis.

Ao amigo Cristiano Custódio Rodrigues, pelo incentivo para o ingresso na pós-graduação.

À professora Tatiana Cureau Cervo, pela boa vontade de ajudar sempre que foi preciso.

Aos meus professores de graduação no curso de Arquitetura e Urbanismo, Eng. Marcos Alberto Oss Vaghetti, Eng. Elisabeth Veleda e Priscila Quesada, pela carta de recomendação para o ingresso no mestrado.

Aos bolsistas Bruno Gonçalves, Daniel Luis Teixeira, Henrique Bolacel Antunes, Lucas Lamberti, Maurício Silveira dos Santos, Patrícia Hennig Osmari, Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior e Usama Nessim Sâmara, pela dedicação, ajuda e amizade.

A todos que de alguma maneira colaboraram para a elaboração desta dissertação.

Muito Obrigado!

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COM DIFERENTES CIMENTOS PORTLAND E COM CINZA DE CASCA DE ARROZ NATURAL E MOÍDA

AUTOR: FÁBIO MACIEL DE OLIVEIRA DA TRINDADE

ORIENTADOR: GERALDO CEHELLA ISAIA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 22 de Junho de 2012.

Devido às altas taxas de emissão de dióxido de carbono liberado na produção do cimento, uma alternativa para minimizar esta poluição é o uso parcial de cinza de casca de arroz no concreto em substituição ao cimento. Esta pesquisa teve o objetivo de investigar a viabilidade técnica, quanto às propriedades mecânicas do emprego de cinza de casca de arroz natural (sem moagem) e moída, em concretos para fins estruturais. Foram utilizadas cinza de casca de arroz com teor de 15% em substituição em massa de cimento CII-Z e CII-V, nas formas moída em moinho de bolas e natural (sem beneficiamento), e comparadas com o concreto de referência, com três relações água/aglomerante: 0,45; 0,55; e 0,65. Foram executados os ensaios de resistência por compressão axial e compressão diametral nas idades de 28 e 91 dias e módulo de elasticidade aos 28 dias. Os resultados aos 28 dias indicaram resistências axiais, módulo de elasticidade e resistência por compressão diametral inferiores ao de referência; aos 91 dias, os resultados dos concretos com adições minerais foram semelhantes ao concreto de referência. As misturas com cimento CII-Z apresentaram resistências à compressão axial superiores com CII-V, este com consumo de cimento maior nas relações a/ag do que o anterior. Tal fato, aliado com a presença de altos teores de cinza volante, classifica o cimento CII-V com maior resistência à agressividade ambiental de agentes deletérios como cloretos e carbonatação, o que representa maior durabilidade frente aos agentes agressivos. Também foi constatado que as misturas com CCAN tiveram menores resistências mecânicas comparadas com CCAM, em razão de a CCAN possuir partículas maiores e reatividade química menor do que a cinza moída. Estas diferenças entre os dois tipos de misturas não se revelaram significativas, ficando em aproximadamente 10%, e consumo, em torno de 20 kg/m³ em igualdade de relação a/ag se comparadas com as misturas de CCAM para os dois tipos de cimentos. Como conclusão, os resultados obtidos nos ensaios revelam que existe viabilidade técnica para o emprego de cinza de casca de arroz natural no emprego em concreto estrutural, em razão de as diferenças constatadas com as misturas com CCA moída terem sido pouco significativas. Os valores obtidos nos ensaios foram bastante próximos, tanto para cinza de casca de arroz natural como moída, com vantagem para esta última, pois ambas desenvolveram resistências à compressão axial, módulos de elasticidade e resistências por compressão diametral similares ao concreto de referência. Estes resultados contribuem para conferir maior sustentabilidade ao concreto pelo aproveitamento de subprodutos da agricultura, contribuindo para diminuir a emissão de poluentes na atmosfera e o efeito estufa, devido à diminuição do uso de clínquer nas misturas.

Palavras-chave: Cinza de casca de arroz natural. Cinza de casca de arroz moída. Resistência à compressão axial. Resistência à compressão diametral. Módulo de elasticidade. Cimento Portland composto. Cimento Portland pozolânico.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduation Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITH DIFFERENT PORTLAND CEMENT AND NATURAL AND GROUND RICE HUSK ASHES

AUTHOR: FÁBIO MACIEL DE OLIVEIRA DA TRINDADE

COORDINATOR: GERALDO CEHELLA ISAIA

City and Date: Santa Maria, June 22th, 2012.

Due to high rates of emissions of carbon dioxide released in cement production, an alternative to minimize this pollution is the use of rice husk ash in concrete as partial cement replacement. This research aims to investigate the technical feasibility, and the mechanical properties of the use of rice husk ash in concrete for structural purposes. Rice husk ash content to 15% by mass replacement of cement CII-Z and CIV were used in natural state and ground in a ball mill and compared with the reference concrete, with three water/binder relationships: 0.45; 0.55 and 0.65. Mechanical strength tests by axial compression and diametral compression at ages 28 and 91 days and elasticity modulus at 28 days were performed. The 28 days results indicated axial compression strength, modulus of elasticity and diametral compression strength below the reference at 91 days and the concrete results with mineral admixtures were similar to the reference concrete. The mixtures containing CII-Z, presented higher axial compressive strength than CIV, because the higher cement consumption compared with the CII-Z with the same w/b relationship. This fact coupled with the presence of high levels of fly ash, classifies cement CIV with resistance to higher environmental aggressiveness, which represents more durability and useful life. It was found that mixtures containing CCAN reduced axial compressive and diametral strength compared with CCAM, because of the smaller chemical reactivity and bigger particles of CCAN compared with ground rice husk ash. These differences between the mixtures were not relevant, being about 10% and consumption of about 20 kg/m³ in relation to the same w/b compared with mixtures of CCAM for the two cement types. In conclusion, the results of the tests show that there is technical feasibility for the use of natural rice husk ash in structural concrete due to the differences observed with the ground mixtures were negligible. The values obtained in the tests were satisfactory for natural rice husk ash and ground rice husk ash with slight advantage for the latter compared to first one, because both developed axial compressive and diametral strength and elasticity modulus similar to the reference concretes. These results reveal the greater sustainability to the concrete utilizing agriculture by-products, contributing to reducing the pollutants emissions and the global warming, due to decreased use of clinker in the mixtures.

Keywords: Natural rice husk ash. Ground rice husk ash. Compressive strength. Diametral compressive strength. Modulus of elasticity. Portland cement. Portland cement pozzolanic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Panteão de Roma, 120 d.C.....	19
Figura 2 – Panteão de Roma, 120 d.C.....	19
Figura 3 – Burj Khalifa com 828 m e 160 pavimentos habitáveis, em Dubai, Emirados Árabes Unidos	20
Figura 4 – Deposição de cinza de casca de arroz nas margens de um riacho	24
Figura 5 – Fluxograma do processo de fabricação do cimento Portland	30
Figura 6 – Classificação das adições minerais para concreto estrutural	33
Figura 7 – Estrutura celular da casca de arroz.....	38
Figura 8 – Micrografias de cinza de casca de arroz produzida em forno comum.....	40
Figura 9 – Micrografias de cinza de casca de arroz produzida em leito fluidizado	40
Figura 10 – Variações nas características mineralógicas e físicas de CCA provenientes de processos de queima diferentes.....	41
Figura 11 – Cinza cristalina, após moagem.....	41
Figura 12 – Cinza amorfa, após moagem	41
Figura 13 – Resultado do ensaio de difração de raio X CCA cristalina.....	42
Figura 14 – Resultado do ensaio de difração de raio X CCA amorfa	43
Figura 15 – Difração de raios X da CCA.....	43
Figura 16 – Micrografia de concreto com 25% de CCAN, ampliada 3.000 vezes, aos 91 dias	44
Figura 17 – Microscopia eletrônica de varredura da CCA após moagem de 15 min (a) e moagem de 20 h (b).....	44
Figura 18 – Evolução de resistência à compressão com o tempo	46
Figura 19 – Micrografia do concreto ampliada 12.000 vezes aos 28 dias	51
Figura 20 – Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto	52
Figura 21 – Comportamento tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto.....	52
Figura 22 – Fissuração microestrutural do concreto quando submetido a um esforço de tração	53
Figura 23 – Fissuração microestrutural do concreto quando submetido a um esforço de compressão	53
Figura 24 – Fissuração em corpo de prova sob compressão axial	54

Figura 25 – Arranjo esquemático do ensaio de tração por compressão diametral.....	55
Figura 26 – Distribuição das tensões através do diâmetro carregado de um corpo de prova cilíndrico	55
Figura 27 – DR-X da CCA natural.....	63
Figura 28 – DR-X da CCA moída	63
Figura 29 – Curva granulométrica dos agregados miúdos	66
Figura 30 – Curva granulométrica dos agregados graúdos.....	66
Figura 31 – Controle de temperatura do concreto	70
Figura 32 – Abatimento do concreto.....	71
Figura 33 – Adensamento dos corpos de prova em mesa vibratória	71
Figura 34 – Desmoldagem após as primeiras 24 horas após a mistura	72
Figura 35 – Corpos de prova curando na câmara úmida	72
Figura 36 – Ensaio de compressão axial	73
Figura 37 – Ensaio de compressão diametral	74
Figura 38 – Ciclos de carregamento e descarregamento para determinação de Eci segundo a ABNT NBR 8522:2008	75
Figura 39 – Ensaio de módulo de elasticidade	76
Figura 40 – Resistência à compressão axial CPII-Z (28 dias x 91 dias).....	78
Figura 41 – Resistência à compressão axial CPIV (28 dias x 91 dias).....	78
Figura 42 – Resistência à compressão axial aos 28 dias. Esta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)	83
Figura 43 – Resistência à compressão axial aos 91 dias. Esta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)	83
Figura 44 – Resistência à compressão diametral CPII-Z (28 dias x 91 dias)	86
Figura 45 – Resistência à compressão diametral CPIV (28 dias x 91 dias)	86
Figura 46 – Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral, aos 28 dias, para CPII-Z.....	89
Figura 47 – Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral, aos 91 dias, para CPII-Z.....	90
Figura 48 – Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral aos 28 dias.....	91
Figura 49 – Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral aos 91 dias.....	91
Figura 50 – Resistência à compressão diametral aos 28 dias. Esta pesquisa (CPII-Z) x	

Meira (2009) (CPII-F).....	93
Figura 51 – Resistência à compressão diametral aos 91 dias. Esta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F).....	94
Figura 52 – Módulo de elasticidade longitudinal aos 28 dias para os cimentos CPII-Z e CPIV	96
Figura 53 – Compressão axial x módulo de elasticidade CPII-Z aos 28 dias	99
Figura 54 – Compressão axial x módulo de elasticidade CPIV aos 28 dias	99
Figura 55 – Módulo de elasticidade aos 28 dias. Esta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da CCA em %, segundo diversos autores.....	39
Tabela 2 – Características físico-químicas das CCAs.....	42
Tabela 3 – Caracterização física dos cimentos, cinza volante e CCA.....	61
Tabela 4 – Análise química dos cimentos, cinza volante e CCA.....	62
Tabela 5 – Convenções de ensaio de pozolanicidade.....	64
Tabela 6 – Índice de atividade pozolânica.....	64
Tabela 7 – Características dos agregados usados neste trabalho.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Maiores consumidores de cimento do mundo.....	21
Quadro 2 – Estrutura cronológica sobre o conhecimento da cinza de casca de arroz.....	35
Quadro 3 – Materiais por m ³ de concreto para o cimento CII-Z (kg/m ³).....	68
Quadro 4 – Materiais por m ³ de concreto para o cimento CII-V (kg/m ³).....	68
Quadro 5 – Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira.....	69
Quadro 6 – Resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias, cimentos CII-Z e CII-V	77
Quadro 7 – Dados de resistência à compressão axial para classes C15 a C30 para os cimentos CII-Z e CII-V	81
Quadro 8 – Resistência à compressão axial CII-Z x CII-F (28dias).....	82
Quadro 9 – Resistência à compressão axial CII-Z x CII-F (91 dias)	82
Quadro 10 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 91 dias para cimentos CII-Z e CII-V	85
Quadro 11 – Resistência à tração por compressão diametral para classes C15 a C30 para CII-Z e CII-V	88
Quadro 12 – Compressão diametral CII-Z x CII-F (28 dias).....	93
Quadro 13 – Compressão diametral CII-Z x CII-F (91 dias)	93
Quadro 14 – Módulo de elasticidade longitudinal aos 28 dias para os cimentos CII-Z e CII-V	95
Quadro 15 – Módulo de elasticidade longitudinal, tangente na origem, para classes C15 a C30 para CII-Z e CII-V	97
Quadro 16 – Módulo de elasticidade aos 28 dias para CII-Z x CII-F	101

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	70
-----------------	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

– Abertura da malha da peneira

Φ – Diâmetro I

15M – Mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao cimento, em massa, no concreto

15M45 – Mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao cimento, em massa, no concreto, relação $a/ag=0,45$

15M55 – Mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao cimento, em massa, no concreto, relação $a/ag=0,55$

15M65 – Mistura composta com 15% de CCA, moída, em substituição ao cimento, em massa, no concreto, relação $a/ag=0,65$

15N – Mistura composta com 15% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento, em massa, no concreto

15N45 – Mistura composta com 15% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento, em massa, no concreto, relação $a/ag=0,45$

15N55 – Mistura composta com 15% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento, em massa, no concreto, relação $a/ag=0,55$

15N65 – Mistura composta com 15% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento, em massa, no concreto, relação $a/ag=0,65$

a/ag – Relação água (água + aditivo)/aglomerante (cimento + adição), em massa

a/c – Relação água (água + aditivo)/cimento, em massa

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

CaSO₄ – Sulfato de cálcio

CCA – Cinza da casca do arroz

CCAM – Cinza da casca do arroz moída

CCAN – Cinza da casca do arroz ao natural

CEB – Comitê Europeu de Concreto

CO₂ – Dióxido de carbono

CPIV – Cimento Portland Pozolânico

CPII-F – Cimento Portland composto com filler calcário

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

Eci – Módulo de elasticidade

fc – Resistência à compressão axial

f_{tD} – Resistência à compressão diametral

Gepecon – Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto/UFSM

GPa – Giga pascal

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

Lemit – Laboratório de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica/Argentina

LMCC – Laboratório de Materiais e Construção Civil

m² – Metro quadrado

m³ – Metro cúbico

min – Minuto

mm – Milímetro

MPa – Mega pascal

NaOH – Hidróxido de sódio

NBR – Norma brasileira

R – Mistura de referência com 100% de cimento

R45 – Mistura de referência com 100% de cimento, relação a/ag=0,45

R55 – Mistura de referência com 100% de cimento, relação a/ag=0,55

R65 – Mistura de referência com 100% de cimento, relação a/ag=0,65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Apresentação	19
1.2 Justificativa	23
1.3 Objetivos	25
1.3.1 Objetivos específicos	25
1.4 Estrutura da dissertação	26
2 CIMENTO PORTLAND E CINZA DE CASCA DE ARROZ	29
2.1 Cimentos Portland	29
2.1.1 Cimento Portland Composto (CPII: NBR 11578).....	30
2.1.2 Cimento Portland CPIV (com pozolana - NBR 5736)	31
2.2 Adições minerais pozolânicas	31
2.3 A cinza de casca de arroz	33
2.4 Características da cinza de casca de arroz	36
2.5 O efeito da finura da cinza de casca de arroz sobre as propriedades do concreto	45
3 RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ NATURAL E MOÍDA	49
3.1 O efeito das adições minerais nas propriedades do concreto	49
3.1.1 Concretos com adição de cinza de casca de arroz	50
3.2 Resistência mecânica do concreto	51
3.2.1 Resistência à compressão axial	54
3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral	54
3.2.3 Módulo de elasticidade	56
3.3 Resistência mecânica do concreto com cinza de casca de arroz	57
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
4.1 As variáveis	59
4.1.1 Variáveis independentes	59
4.1.2 Variáveis dependentes.....	59
4.2 Materiais utilizados	60
4.2.1 Aglomerantes.....	60
4.2.2 Agregados.....	64

4.2.3 Aditivos	67
4.2.4 Água	67
4.3 Traços	67
4.4 Ordem de colocação dos materiais na betoneira.....	69
4.5 Moldagem de corpos de prova de concreto e procedimento de cura úmida	69
4.6 Ensaio realizado	73
4.6.1 Resistência à compressão axial.....	73
4.6.2 Resistência à tração por compressão diametral	74
4.6.3 Módulo de elasticidade.....	74
5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	77
5.1 Resistência à compressão axial	77
5.2 Análise em igualdade de relação a/ag.....	79
5.3 Análise em igualdade de resistência à compressão	80
5.4 Resultados desta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)	82
5.5 Resistência à tração por compressão diametral.....	84
5.6 Análise em igualdade de relação a/ag	87
5.7 Análise em igualdade de resistência à compressão diametral.....	87
5.8 Resistência à compressão axial x resistência à tração por compressão diametral	89
5.9 Resultados desta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)	92
5.10 Módulo de elasticidade.....	95
5.11 Análise em igualdade de relação a/ag	95
5.12 Análise em igualdade de resistência à compressão	96
5.13 Compressão axial x módulo de elasticidade	98
5.14 Resultados desta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)	100
6 CONCLUSÕES	103
6.1 Conclusão geral.....	104
6.2 Sugestões para outras pesquisas.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Desde o surgimento do Homem, a busca por abrigo tornou-se uma necessidade básica, e com isso o desenvolvimento de materiais apropriados para a construção tornou-se parte da História. Dentre os materiais descobertos, a argila, cal, gesso e pedra revelaram-se materiais com incríveis possibilidades construtivas.

Os assírios e babilônios utilizavam argila como aglomerante ou cimento; os egípcios usavam aglomerantes, cal e gesso; os gregos utilizavam terra vulcânica com cal como argamassa e misturado com agregado vulcânico, formando o concreto, que era utilizado principalmente na construção de reservatórios de água, atingindo, conforme Kouli e Ftikos (1998), resistência à compressão de 13,5 MPa.

Os romanos, diferentemente dos gregos, utilizaram o concreto de uma nova maneira, utilizando-o como material estrutural na moldagem de pilares, vigas, lajes, abóbodas, cúpulas, arcos etc. Ainda hoje, após 2.000 anos, podem ser visitadas as primeiras edificações que utilizavam este material, como o Panteão de Roma, construído ao redor de 120 d.C. (Figuras 1 e 2), cuja abóboda deteve por 18 séculos o recorde mundial de vão livre.



Figuras 1 e 2 – Panteão de Roma, 120 d.C.

Fonte: <<http://arquitetandoteoria.blogspot.com>>.

A partir dessa nova técnica construtiva, construtores aprimoraram o conhecimento sobre este novo material, permitindo que, em 1756, o engenheiro britânico John Smeaton fizesse o primeiro concreto moderno (cimento hidráulico), adicionando seixos como um agregado graúdo e tijolo. Em 1824, o inglês Joseph Aspdin inventou o Cimento Portland, que se manteve dominante na produção de concreto. Ele criou o primeiro verdadeiro cimento artificial, produzido pela queima de calcário e argila juntos. No final do século XIX, pesquisadores trataram de tornar esse material mais conhecido e mais confiável, resultando no uso generalizado em estruturas. Nessa época, o material mais utilizado na construção civil era o aço, que havia chegado às mãos dos arquitetos e engenheiros civis há pouco mais de cem anos.

Com esse embasamento teórico e experimental sobre a confiabilidade desse novo material, François Hennebique (1841-1921), um construtor francês e autodidata, desenvolveu e obteve patente para o projeto e construção com base em um novo sistema construtivo, por ele denominado de *béton armé* (concreto armado). Mais de dois séculos após a Era Romana, pesquisadores do mundo inteiro estão reinventando as utilidades do concreto e permitindo a realização de obras de alta complexidade, como o Burj Khalifa, em Dubai (Figura 3).



Figura 3 – Burj Khalifa com 828 m e 160 pavimentos habitáveis, em Dubai, Emirados Árabes Unidos

Fonte: <<http://www.jokestation.org>>.

Atualmente, o concreto é o segundo material mais largamente utilizado pelo homem, perdendo apenas para a água. Em 2006, o consumo estimado de concreto foi entre 21 e 31 bilhões de toneladas e 2,55 bilhões de toneladas de cimento, (WORLD BUSINESS COUNCIL OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2009). As justificativas para tamanho emprego estão na vantajosa relação custo/desempenho, facilidade de emprego, diversidade de formas e tamanhos possíveis. Isso representa um grande consumo mundial de cimento; somente no Brasil, no ano 2010, foram vendidos 60 milhões de toneladas de cimento. (ver Quadro 1).

Maiores Consumidores de Cimento (milhões de toneladas)									
Países	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	% cresc.
China	857,8	961,9	1058	1218,1	1345,3	1369,9	1600,0	1851,0	116%
Índia	117,8	124,8	133,7	152,6	166,4	181,5	185,1	212,0	80%
USA	113,5	121,3	128,3	127,4	114,8	96,8	70,5	69,0	-39%
Brasil	34,9	35,8	37,7	41,1	45,1	51,6	51,9	60,0	72%
Iran	29,7	31,4	31,3	34,8	40,0	43,5	47,8	56,0	89%
Vietnã	24,2	26,2	30,9	32,7	35,0	40,0	47,9	50,0	107%
Rússia	39,4	44,0	46,6	52,5	60,5	60,3	44,0	50,0	27%
Egito	26,5	26,9	31,9	34,3	36,8	39,6	47,9	50,0	89%
C. do Sul	58,3	54,9	46,3	48,4	50,8	50,6	48,5	47,7	-19%
Turquia	28,1	30,7	35,1	41,6	42,5	40,6	41,1	46,0	64%
Mundo	2014,2	2178,7	2334	2588,2	2778,8	2824,0	3004,7	3294,0	64%

Quadro 1 – Maiores consumidores de cimento do mundo

Fonte: <<http://cimento.org>>.

Para a produção de uma tonelada de cimento, é lançada ao ar aproximadamente, em média, 0,7 tonelada de dióxido de carbono (CO₂), um dos gases causadores do efeito estufa (ISAIA, 2011).

O uso de cimentos com maior percentual de adições minerais e a substituição parcial do clínquer por adições diminuem a utilização de matéria-prima (calcário e argila e a consequente liberação de CO₂ proveniente do consumo de combustíveis no forno e da transformação química do calcário (calcinação). Assim, reduzem-se as emissões totais de CO₂ por tonelada de cimento produzido.

Uma delas é a adição de cinza de casca de arroz, em substituição de parte do cimento, na mistura do concreto. A maioria das cinzas apresenta características pozolânicas, ou seja, quando finamente moídas e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e formam compostos cimentantes.

O Brasil produz anualmente cerca de 13 milhões de toneladas de arroz, cerca de 2,6 milhões de toneladas de casca e 500 mil toneladas de cinza. Para se ter uma ideia, a queima de 500 kg de casca de arroz produz a energia de um barril de petróleo (AMATO, 2002). O Brasil poderia gerar mais de 200 MW de energia em sistemas termoelétricos de queima da casca, o equivalente a aproximadamente 1% de toda a energia produzida no país. Este volume de energia seria suficiente para abastecer uma cidade de mais de 800 mil habitantes. No momento, a utilização da casca tem sido conduzida em apenas alguns engenhos na geração direta de calor e na geração de energia termoelétrica da própria indústria.

É altamente vantajoso o uso da casca de arroz como combustível, pois substitui combustíveis fósseis na geração de energia e diminui os danos à natureza, já que a deposição da casca em aterros sanitários resulta na emissão de gás metano à natureza (ROVERE et al., 2003). Com a utilização da casca de arroz, é possível diminuir o custo de armazenagem e transporte do resíduo industrial do arroz, reduzir gastos com energia elétrica e ainda gerar como subproduto a sílica, que possui crescente valor de mercado. Por ser rica em sílica, a cinza da casca de arroz (CCA) pode ser usada como matéria-prima para a indústria eletrônica, de cerâmica e vidro, para a indústria química e na construção civil.

A substituição parcial da cinza de casca de arroz no concreto tem sido estudada há vários anos por pesquisadores, entre eles Mehta (1992), Isaia (1995), Isaia e Gastaldini (2009), Barbosa et al. (2006), Tashima (2006), Nascimento (2002), Saraswathy e Song (2006), Rego (2001, 2004), Moraes, Isaia, Gastaldini (2000), Hasparyk et al. (2003), Silveira e Ruaro (1995), Meira (2009), Trindade (2011), Pedrozo (2008), Cezar (2011), Del Carpio (2009) e Santos (2006), sendo que a cada ano novas pesquisas estão demonstrando as grandes vantagens da substituição parcial do concreto por cinza de casca de arroz.

Segundo James e Rao (1986), as CCAs com baixa área superficial, contendo sílica cristalina, como a cinza natural, mostraram reação inicial baixa, ao contrário da cinza moída, que obteve resultados melhores em menores idades. Mehta e Monteiro (1994) sugerem que a cinza deve ser finamente moída para desenvolver certa atividade pozolânica, pois a consideram pouco reativa. Prudêncio e Santos (1996) demonstraram que o índice de atividade pozolânica da CCA residual aumenta com o tempo de moagem até o limite de quatro horas. Hoppe (2008) concluiu que é possível obter concretos melhores que o traço de referência utilizando CCA sem moagem.

O autor utilizou a ordem de colocação de materiais na betoneira como processo de moagem da CCA natural, aumentando o tempo de amassamento total, o que fez com que a granulometria da CCA diminuísse, produzindo melhores resultados.

1.2 Justificativa

A média mundial de emissão de gases de efeito estufa pela indústria cimenteira está em 5% (MCT, 2010), sendo que a média brasileira é de 1,1%. Devido às altas taxas de emissão de dióxido de carbono liberado na produção do cimento, uma alternativa para minimizar esta poluição é o uso parcial de cinza de casca de arroz no concreto em substituição ao cimento. Trata-se também de um resíduo poluidor do meio ambiente, em vista de sua deposição irregular em locais inapropriados, em que pode provocar danos à natureza. Além disso, a casca de arroz é uma biomassa com elevado teor energético, podendo-se utilizá-la em substituição a outras fontes de energia não-renováveis, com possibilidade, ainda, de utilização de seu resíduo, a cinza de casca de arroz.

A produção nacional de arroz, projetada na safra 2010/2011, é de 12.831 milhões de toneladas, sendo que, somente no estado do Rio Grande do Sul, a produção está estimada em 8,2 milhões de toneladas, totalizando, aproximadamente, 64% da produção nacional (CONAB, 2011). Essa grande produção anual garante ao Brasil destaque mundial na produção de arroz, transformando-o em um dos principais produtores do grão.

É comum, nas indústrias arroseiras, a utilização da casca do arroz como combustível no processo de beneficiamento de grão. Isso gera uma quantidade considerável de cinza residual, que geralmente não tem destinação específica e acaba sendo dispensada no meio ambiente.

A CCA é considerada um resíduo agroindustrial sem destinação certa, sendo simplesmente descartada ou lançada em aterros, o que gera problemas ambientais, tais como poluição de mananciais de água, do ar e do solo. A figura 4, que exemplifica e evidencia o impacto ambiental, apresenta a foto de um depósito localizado nas margens de um riacho.



Figura 4 – Deposição de cinza de casca de arroz nas margens de um riacho

Fonte: Rego (2001).

Para Prudêncio, Santos e Dafico (2003), é inaceitável o não-reaproveitamento da CCA, uma vez que ela é disponibilizada em grande quantidade pela indústria de arroz em vários estados do país. Assim, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de utilizar esse produto em diversos setores industriais e, de maneira especial, na indústria da construção civil. Em trabalho publicado em 1972, Houston apresenta uma listagem com 262 referências bibliográficas sobre as possíveis aplicações da cinza e da casca do arroz. No Brasil, merecem destaque os trabalhos pioneiros sobre CCA desenvolvidos por Guedert (1989), Isaia (1995), Silveira, Ferreira e Dal Molin (1996), Santos (1997), Dafico (2001) e Pouey (2006).

Apesar de o Brasil, China e Índia serem grandes produtores de arroz, o que representa um imenso transtorno sob o ponto de vista ambiental, a utilização da CCA no concreto como adição mineral continua sendo predominantemente experimental, havendo pouco uso em escala industrial. Dafico (2001) relata que a falta de visão comercial talvez tenha sido o motivo pelo qual, diversos pesquisadores se detiveram apenas na busca de um material altamente reativo, não se preocupando em desenvolver um produto que, além de propriedades pozolânicas, apresentasse cor clara (baixo teor de carbono), aumentando seu valor comercial. Outro fator importante a ser levado em consideração são os custos com transporte e queima da CCA.

Por essas razões, esta pesquisa tem por objetivo investigar a viabilidade técnica quanto à propriedade mecânica do emprego de cinza de casca de arroz em concretos para fins estruturais,

em substituição parcial ao clínquer Portland, tanto na forma moída quanto natural, sem beneficiamento.

Para tanto, formou-se um grupo técnico composto pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Estruturas de Concreto (Gepecon) (UFSM/Brasil), pela Universidad de La Republica (Udelar/Uruguai) e pelo Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para La Investigación Tecnológica (Lemit/Argentina), inseridos no projeto-programa denominado “Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz *in natura*, sem beneficiamento”. Os estudos propostos dentro deste programa investigaram as propriedades mecânicas, durabilidade e desempenho do concreto com adição de CCA natural e moída, no estado fresco e endurecido.

Esta dissertação é uma parcela da fase IV da pesquisa acima, tendo como objetivo principal o estudo das reações álcali-sílica entre a CCA e os cimentos dos tipos CPII-Z e CPIV e, ainda, a reprodução de ensaios da etapa I anterior, ou seja: propriedades mecânicas, elásticas e algumas características de durabilidade devido à mudança do tipo de cimento (CPII-F por CPII-Z e CPIV) em relação às etapas precedentes. O cimento CPIV foi escolhido em razão dos seus efeitos benéficos sobre a RAS e por ser o único tipo de cimento fabricado no RS.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho, inserido no contexto geral do projeto-programa Prosul, financiado pelo CNPq, é estudar a viabilidade do emprego da CCA natural (sem beneficiamento) quando comparada à CCA moída, em concreto estrutural. O propósito final deste trabalho visa a buscar subsídios para que a CCA deixe de ser considerada um resíduo agrícola e passe a ser um material cimentício para emprego na construção civil, sem necessidade de moagem prévia.

1.3.1 Objetivos específicos

Esta dissertação tem os seguintes objetivos específicos:

- a) comparar o desempenho da cinza de casca de arroz com teor de 15% em substituição em massa de cimento CPII-Z (utilizado geralmente em produtos pré-moldados na região de

Santa Maria-RS) e CPIV (tipo de cimento mais utilizado no sul do Brasil), nas formas moída em moinho de bolas e natural (sem beneficiamento) e comparadas com o concreto de referência, com três relações água/aglomerante: 0,45; 0,55; e 0,65 nos ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade de corpos de prova de concreto moldados e curados em igualdade de relação água/aglomerante e igualdade de resistência à compressão axial. O teor de 15% advém das fases anteriores da pesquisa, por ter sido considerado o que apresentou melhor desempenho técnico-econômico;

- b) comparar os resultados dos ensaios dos concretos com CCA natural e CCA moída com os similares sem nenhuma adição (referência);
- c) comparar os resultados desta pesquisa com os obtidos na fase II, quando o cimento empregado foi do tipo CPII-F.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, a seguir discriminados:

- Capítulo 1 – Introdução: são apresentados os objetivos da pesquisa ao utilizar cinza natural e moída e justificada a substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz na mistura do concreto;
- Capítulo 2 – Cimento Portland e cinza de casca de arroz: são explanadas as características dos tipos de cimentos e da cinza de casca de arroz, com suas propriedades de acordo com o tempo e temperatura de queima;
- Capítulo 3 – Resistência mecânica do concreto com cinza de casca de arroz natural e moída: apresenta fundamentação teórica dos ensaios realizados com as misturas de concreto e o efeito da substituição em parte do cimento por cinza de casca de arroz nas características do concreto;
- Capítulo 4 – Programa experimental: é apresentado um breve histórico sobre a mudança do tipo de cimento, são explicadas as variáveis que influenciam nos ensaios, materiais utilizados, traços executados, ordem de colocação dos materiais na betoneira, relação água/aglomerante, temperatura, capeamento, uso do aditivo superplastificante, metodologia de moldagem e cura e a normalização utilizada nos ensaios de resistência por compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de

elasticidade;

- Capítulo 5 – Apresentação, análise e discussão de resultados: apresenta os resultados obtidos nos ensaios, juntamente com uma análise teórica e comparativa entre resultados de dissertações anteriores e um resumo dos valores encontrados em igualdade de relação água/aglomerante e de resistência à compressão axial;
- Capítulo 6 – Conclusões: sintetiza os comentários sobre os resultados obtidos e dá sugestões para pesquisas futuras.

2 CIMENTO PORTLAND E CINZA DE CASCA DE ARROZ

Os tipos de cimentos utilizados nesta investigação são classificados conforme as especificações das normas brasileiras, como: Cimento Portland Composto CPII-Z (NBR 11578/91) e Cimento Portland Pozolânico CPIV (NBR 5736/91).

2.1 Cimentos Portland

Em 1824, após vários decênios de experiências infrutíferas para obtenção de um aglomerante produzido industrialmente, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila e, a seguir, moeu-as, transformando a mistura em pó fino, que, após a secagem, não dissolvia em água e tornava-se tão duro quanto as pedras empregadas nas construções locais. Devido à grande semelhança de propriedades com as rochas da ilha de Portland, a nova invenção recebeu o nome de cimento Portland e recebeu a patente pelo Rei George IV, em outubro de 1824.

Atualmente, o cimento Portland tem como principal constituinte o clínquer Portland, resultante da calcinação a 1.450°C da mistura de calcário, argila e eventuais corretivos silicosos. Na figura 5, é possível observar o esquema de fabricação do cimento Portland.

No Brasil, atualmente são fabricados oito tipos básicos de cimento (CPI, CPII, CPIII, CPIV, CPV - ARI, RS, BC e CPB) e cinco subtipos (CPI e CPI-S, CPII-E, CPII-Z e CPII-F), sendo que, a seguir, serão nomeadas as características dos dois tipos de cimento empregados nesta pesquisa.

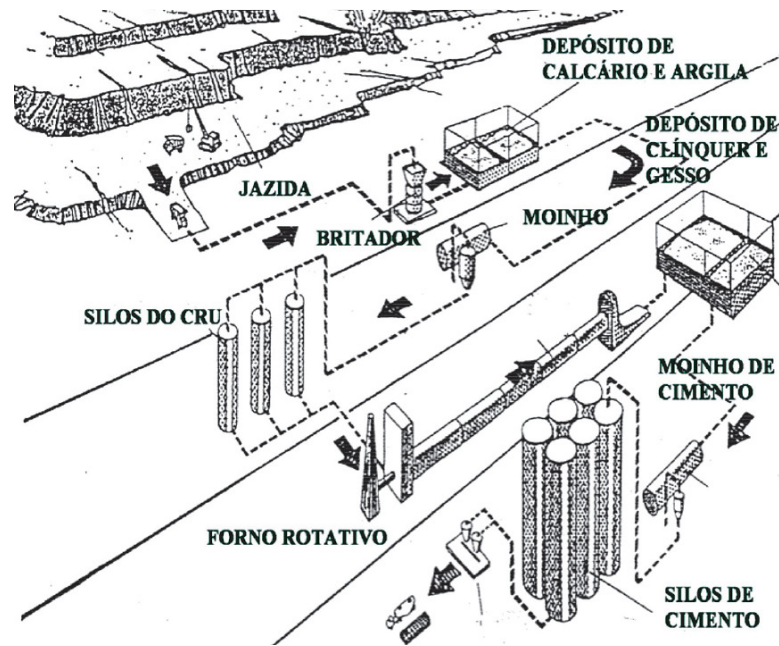


Figura 5 – Fluxograma do processo de fabricação do cimento Portland

Fonte: Kihara et al. (1990).

2.1.1 Cimento Portland Composto (CPII: NBR 11578)

É um cimento recomendado para obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. Abaixo, as recomendações de cada tipo de CPII:

- a) Cimento Portland CPII-Z (com adição de material pozolânico): empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais. Também serve para a produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. Possui entre 6 e 24% de adições (fíler + pozolana). O concreto feito com este produto é mais impermeável e por isso mais durável;
- b) Cimento Portland Composto CPII-E (com adição de escória granulada de alto-forno): o CPII-E possui entre 6 a 34% (escória), podendo ou não ter adição de material carbonático no limite máximo de 10% em massa. É uma composição intermediária entre o Cimento Portland Comum e o Cimento Portland com Adições (alto-forno e pozolânico). Este cimento combina com bons resultados o baixo calor de hidratação com o aumento de resistência do Cimento Portland Comum. Recomendado para

estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacadas por sulfatos;

- c) Cimento Portland Composto CII-F (com adição de material carbonático - fíler): o cimento CII-F possui entre 6 e 10% de fíler e é utilizado para aplicações gerais. Pode ser usado no preparo de argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro, concreto-massa, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solo-cimento, dentre outros.

2.1.2 Cimento Portland CIII (com pozolana - NBR 5736):

Para obras correntes, sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. É especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. O concreto feito com este produto se torna mais impermeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com Cimento Portland Comum, a idades avançadas. Apresenta teor de cinza volante que varia de 15 a 50% e características particulares que favorecem sua aplicação em casos de grande volume de concreto devido ao baixo calor de hidratação.

2.2 Adições minerais pozolânicas

As adições minerais são matérias inorgânicas que, quando misturadas a concretos e argamassas, melhoram normalmente, a durabilidade (principalmente carbonatação e penetração de cloretos) e resistência mecânica (em longo prazo). Outro fator importante que deve ser levado em conta é o ambiental. As adições minerais geralmente são subprodutos de processos agroindustriais que, em certos casos, são descartados em locais impróprios, como leitos de rios, margens de rodovias ou sobre o solo, contaminando-o.

Segundo a ASTM C618 (1978) e pela ABNT NBR 12653:92, material pozolânico é definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finalmente dividido e na presença de umidade, reage

quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. A norma brasileira classifica as pozolanas quanto à origem em:

- Naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (maior que ou igual a 65% de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica;
- Artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico (argilas calcinadas ou termicamente ativadas) ou subprodutos industriais com atividade pozolânica, como a cinza volante, a cinza de casca de arroz, a sílica ativa, entre outros.

Tanto os materiais naturais como artificiais podem necessitar de um processamento adicional, como a britagem e a moagem, para se adequar como material pozolânico para uso em cimento e concreto. Os principais tipos de adições minerais empregados em concreto estrutural são a seguir nomeados (DAL MOLIN; ISAIA, 2011):

- A sílica ativa é um subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e silício metálico que possui alta concentração de sílica (SiO_2) e tem grande reatividade com o hidróxido de cálcio, por apresentar elevada finura e amorfismo;
- Cinza volante é um material finamente particulado, proveniente da queima de carvão pulverizado em usinas termoelétricas com o objetivo de gerar energia. É uma adição mineral muito utilizada, sendo, em termos de volume, a pozolana mais utilizada no mundo. Possui geralmente forma esférica concêntrica ou oca, conforme a temperatura de obtenção;
- O metacaulim é uma adição aluminossilicosa obtida normalmente da calcinação, entre 600 e 900°C, de alguns tipos de argilas, como as caulínicas e os caulins de alta pureza;
- A escória de alto forno é o resíduo não-metálico proveniente da produção do ferro-gusa, que em alto-forno produz aproximadamente de 300 a 350 kg de escória a cada tonelada de gusa (CRUZ et al., 1999);
- O fíler é um material finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento, que, devido à sua ação física, traz melhorias para algumas propriedades do concreto (trabalhabilidade, densificação, compacidade, capilaridade ou exsudação) quando presente em quantidades menores que 15% sobre a massa do cimento. O tipo de fíler mais utilizado no cimento é o calcário calcítico, finamente moído;
- Cinza de casca de arroz é o material resultante da combustão da casca de arroz, usada pelas indústrias beneficiadoras nos processos de secagem e parboilização dos grãos, ou ainda em usinas termoelétricas geradoras de energia.

Novas adições minerais estão sendo pesquisadas ultimamente, como a cinza de bagaço

de cana-de-açúcar, escórias de aciaria, escórias de bronze, resíduos do beneficiamento de rochas, entre outras. A figura 6 resume as principais adições.

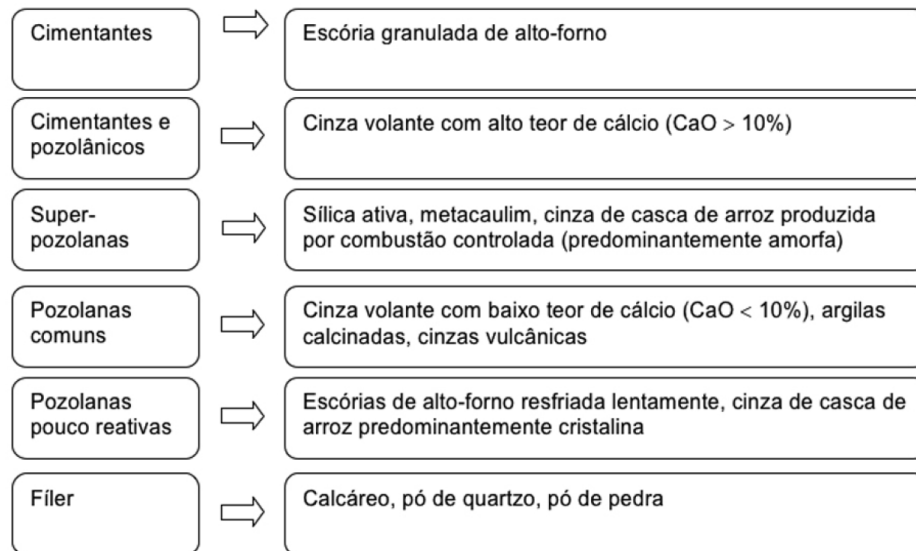


Figura 6 – Classificação das adições minerais para concreto estrutural

Fonte: adaptação de Mehta e Monteiro (2008) e Rilem (1998).

2.3 A cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz tem sido bastante pesquisada nos últimos 20 anos, principalmente a partir dos estudos que Mehta e colaboradores desenvolveram na Universidade da Califórnia, em Berkeley. Muitos países, principalmente os asiáticos, têm empregado a cinza de casca de arroz amorfa no cimento ou concreto, porque apresentam grande produção de arroz e, por consequência, utilizam a cinza de sua casca como material cimentício.

Segundo a ONU, a produção mundial em 2010 chegou a 700 milhões de toneladas, sendo 90% do arroz cultivado e consumido na Ásia (www.fao.org - 2011). O Brasil ocupa lugar de destaque no cenário internacional, sendo o maior produtor fora do continente asiático, com produção de 11,31 milhões de toneladas, representado 2% do total mundial e 50% da América Latina.

O Rio Grande do Sul, na safra 2010/2011, produziu 8,2 milhões de toneladas de arroz,

representando 64% da produção nacional, que foi de 12,83 milhões de toneladas. No sul do Brasil, boa parte da casca de arroz é aproveitada para abastecer as caldeiras de indústrias cerâmicas e para gerar energia em usinas termoelétricas. A casca queimada produz uma elevada quantidade de cinzas, representando cerca de 20% da massa da casca de arroz.

Grande parte das pesquisas realizadas no Brasil para uso da CCA em concreto tem utilizado cinza com a maior reatividade possível, para possibilitar maiores ganhos de resistência e de durabilidade. São poucos os estudos que utilizam a CCA residual, sem controle de queima, como as pesquisas desenvolvidas por Dafico Alves na UFG, Geraldo Isaia e Antonio Luiz Gastaldini na UFSM, João H. Silva na UnB, Luiz Roberto Prudêncio Jr. na UFSC, Denise Dal Molin na UFRGS, entre outros.

Os resultados obtidos mostram a viabilidade técnica e econômica do uso dessas cinzas residuais em concreto, aos quais proporciona desempenho adequado, embora não no mesmo nível da cinza com queima controlada. Os resultados de dezenas de trabalhos publicados pelo Gepecon da UFSM com uso de CCA residual em misturas binárias ou ternárias comprovam este comportamento.

No quadro 2, a seguir, é apresentada a sequência cronológica dos estudos e publicações mais importantes sobre a utilização da CCA no concreto.

Ano (s)	Local	Autor (es)	Trabalho (s)
1924	Alemanha	BEAGLE	Utilização de casca de arroz no concreto
1940 e 1950	-	Diversos	Blocos confeccionados com cimento Portland e cinza de casca de arroz
1973	Bélgica	MEHTA	Primeira patente no assunto
1976	-	PITT	Controle de combustão em leito fluidizado
1978	Índia	MEHTA E PIRTZ	Substituição de cimento Portland por CCA em concreto massa
1979	Índia	PRAKASH	Utilização de CCA em trabalhos de alvenaria e fundações
1979	Paquistão	-	Primeiro workshop sobre o assunto
1981	Ásia	COOK	Estudo da fluência e retração de concretos de cimento Portland com a adição de CCA
1982	Japão	-	Produção e emprego de CCA como material cimentício
1984	Israel	HANA YOUSIF	Efeito da queima e moagem nas propriedades da argamassa
1986	Índia	JAMES E RAO	Morfologia e características químicas e físicas da CCA
1989	Tailândia	HWANG E WU	Hidratação e microestrutura de pastas de cimento produzidas com diferentes CCAs
1994	EUA	MEHTA	Patente relativa a produtos altamente duráveis com cinzas, com o emprego de 5 a 30% de CCA substituindo o cimento
1995	Brasil	ISAIA	Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de alto desempenho
1999	Brasil	GAVA	Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica
2001	Espanha	PAYA	Determinação da sílica amorfa na CCA por um rápido método analítico
2003	Brasil	ISAIA	Cinza de casca de arroz in: concreto ensino pesquisa e realizações
2006	Brasil	POUEY	Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico
2008	Brasil	DUART	Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento
2008	Brasil	MEHTA E MONTEIRO	Cinza de casca de arroz in: concreto, microestrutura, propriedades e materiais
2008	Brasil	HOPPE	Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem
2008	Brasil	PEDROZO	Estudo da utilização da cinza de casca de arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos
2009	Brasil	CORDEIRO	Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica
2009	Brasil	MEIRA	Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem
2011	Brasil	TRINDADE	Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos
2011	Brasil	CEZAR	Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento

Quadro 2 – Estrutura cronológica sobre o conhecimento da cinza de casca de arroz

Fonte: Adaptado de Tiboni (2007, p. 73).

2.4 Características da cinza de casca de arroz

Após as primeiras operações de beneficiamento do grão de arroz, obtém-se a casca como o principal subproduto. A casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, de baixa densidade e elevado volume. Possui alto teor de sílica, sendo composta de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra (MEHTA, 1992). O resíduo inorgânico contém, em média, 95 a 98%, em massa, de sílica, na forma amorfa hidratada, perfazendo 13 a 29% do total da casca (HOUSTON, 1972). A lignina e a celulose podem ser removidas através da combustão.

A cinza de casca de arroz, devido ao seu efeito pozolânico, reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}[\text{OH}_2]$) e forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa reação, por ser mais lenta que as reações de hidratação do C_3S e C_2S do cimento Portland, apresenta um ganho de resistência também mais lento. A maior reatividade das partículas de CCA induz a formação mais rápida de compostos hidratados, sendo que, a partir de um a três dias, já é possível observar as modificações na estrutura. Com a adição das partículas finas de CCA no concreto, ocorrem a segmentação dos poros maiores e a redução do teor de hidróxido de cálcio pela combinação com a sílica, resultando em uma interface pasta/agregado mais uniforme.

As características químicas desse material estão intimamente ligadas à intensidade com a qual a queima é realizada. Caracteriza-se por conter alto teor de sílica e apresentar partículas bastante finas e alongadas. Dependendo do grau de moagem (finura), pode apresentar alta superfície específica (quanto maior a finura, maior a superfície específica) e, conseqüentemente, maior reatividade nas primeiras idades (um a três dias), induzindo um aumento nas resistências inicial e final. Em virtude das características morfológicas dos grãos, essa cinza possui elevada reatividade, apresentando vantagens técnicas quando incorporada ao concreto (NEVILLE, 1997).

Mehta e Monteiro (2008), ao classificarem as adições minerais para concreto, enquadram a cinza de casca de arroz em duas categorias de pozolanas:

- Superpozolana: quando queimada em processo 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 de 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.

Um dos pontos críticos apontados por alguns pesquisadores para obtenção de uma boa reatividade da CCA com a cal é o controle da temperatura de queima, que determina o teor de sílica amorfa e, por consequência, a atividade pozolânica.

Segundo Neville (1997), como pozolana, a sílica deve estar em estado amorfo, pois a forma cristalina possui pouca reatividade. Além disso, deve estar finamente subdividida para poder se combinar com hidróxido de cálcio na presença da água e formar silicatos estáveis (reação pozolânica). Ainda segundo o autor, o fenômeno da pozolanicidade é complexo, já que, além da composição química, estão envolvidas a área superficial e a relação entre elas.

Porém, a necessidade de queima controlada e moagem da CCA são fatores que contribuíram para que tal pozolana não ganhasse interesse no mercado, em relação tanto à sua reatividade química quanto coloração, diferente de outras pozolanas, como a cinza volante e a sílica ativa, em que o processo de industrialização é mais facilitado.

A utilização da CCA como adição mineral tem sido restringida devido ao custo do processo de queima controlada e aos custos de moagem. Assim, os resultados positivos das pesquisas, que revelam o grande potencial da CCA como adição mineral, não são efetivamente aplicados no mercado da construção civil (MISSAU, 2004). Feng et al. (2003) concluíram que a CCA, sob queima controlada e moída adequadamente, tem alta atividade pozolânica e propicia o aumento da resistência à compressão de concretos com determinados teores de substituição de cimento por CCA, além de também possibilitar o aumento da durabilidade destes concretos. Para Vieira et al. (2005), a diferença básica entre a CCA residual e a CCA produzida com o processo de queima controlada é o teor de material amorfo das cinzas. A temperatura e duração de queima controlada, bem como o tempo de moagem influenciam as características das cinzas. Abaixo, na figura 7, é possível ver a estrutura celular da casca de arroz ampliada em até 1.000 vezes.

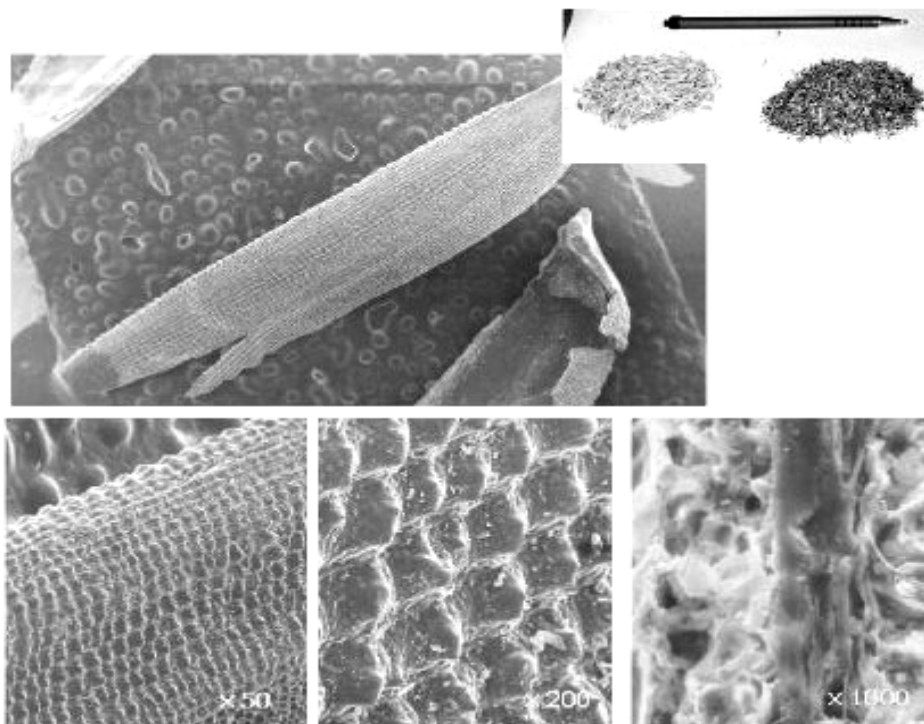


Figura 7 – Estrutura celular da casca de arroz

Fonte: Coutinho (2003).

Após a queima da casca, com ou sem controle de temperatura, a quantidade de CCA gerada gira em torno de 20% em massa, e o teor de sílica presente neste resíduo é elevado. Houston (1972) apresenta análises químicas, que foram realizadas entre 1870 e 1970, de amostras de CCA nas quais os teores de sílica variam de 87 a 97%, e os teores de álcalis, de 1 a 5%, sendo que os álcalis, juntamente com o carbono, são as maiores impurezas encontradas no resíduo. O álcali encontrado em maior quantidade na CCA é o potássio K_2O , com seus teores variando em função do tipo e da quantidade de fertilizante utilizado no plantio, podendo chegar a 2,5%. Abaixo (Tabela 1), como a composição química de cinzas distintas é utilizada por diversos autores.

Tabela 1 – Composição química da CCA em %, segundo diversos autores

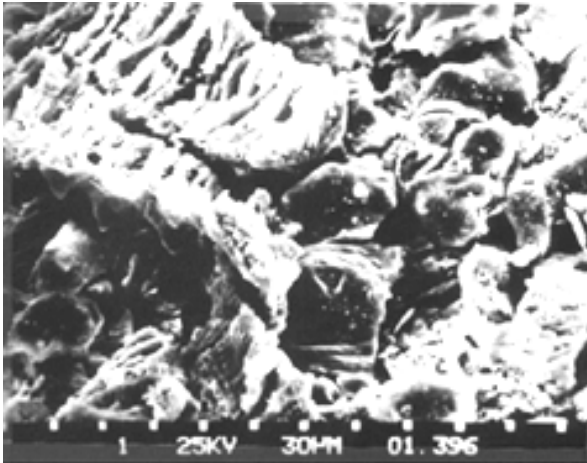
Amostras / Autores	Composição típica em óxidos (% em peso)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	PF
Cook (1976)	93,15	0,41	0,2	0,45	0,41	0,08	2,31	2,77
Salas (1986)	91,26	0,94	0,37	0,88	2,15	nd	nd	nd
Cincotto (1988)	94,7	0,09	1,46	0,95	0,99	0,04	1,75	7,29
Gueder (1989)	93,11	0,92	0,40	0,85	0,52	0,12	1,12	nd
Farias (1990)	91,78	0,60	0,34	0,52	0,50	0,11	1,30	nd
Sugitaetal.(1992)	90	0,10	0,40	0,30	0,4	0,06	2,41	4,2
Isaia (1995)	78,6	2,30	2,30	0,80	1,00	0,01	0,56	11,80
Fonseca (1999)	83,68	0,17	0,17	nd	1,03	nd	3,65	8,54
Della (2001)	72,1	0,3	0,15	0,7	0,43	0,5	0,72	24,3
Rego (2004)	89,2	0,50	0,42	0,66	0,91	0,04	0,89	4,85
Quinge (2005)	92,4	0,3	0,4	0,3	0,7	0,07	2,54	2,31
Pouey (2006)	85,81	0,06	0,05	0,46	0,51	0,11	1,7	10,5

Isaia = CCA 50 % à 650°C + 50 % sem controle; Rego (2004) = CCA 8; Pouey (2006) = CCA 7; nd = não determinado. Fonte: Pouey (2006), adaptado e complementado.

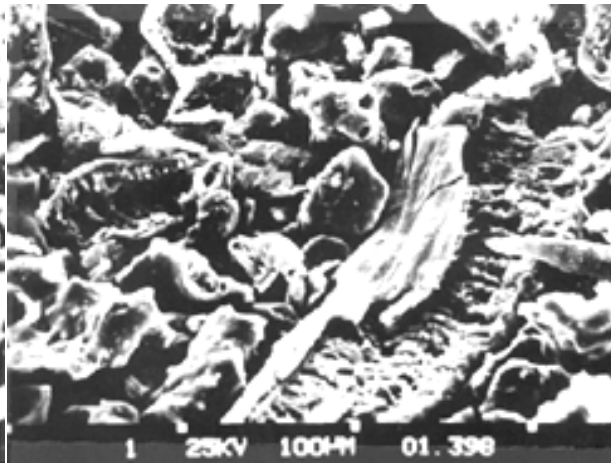
Quando parcialmente queimada, a casca de arroz gera uma cinza com certo teor de carbono e, por isso, possui cor preta. Quando totalmente queimada, resulta em uma cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima (PRUDÊNCIO; SANTOS; DAFICO, 2003).

Segundo Mehta e Pitt (1977), se houver controle da temperatura na combustão da casca, obtém-se sílica, em estado amorfo e microporoso, altamente reativa. O mesmo é afirmado por Akasaki et al. (2005), que também mostram que a temperatura de queima deve ser inferior a 600°C. Já Mehta e Monteiro (2008) asseguram que, a fim de isso ocorrer, a temperatura de queima deve ser mantida entre 500 e 700°C.

Segundo Agopyan (1991 apud POUHEY, 2006), a microestrutura da CCA é diferente conforme o tipo de queima. Como exemplos são apresentadas, nas figuras 8 e 9, as micrografias de uma mesma cinza produzida em leito fluidizado e forno comum. De acordo com o autor, a cinza do leito fluidizado tem uma estrutura porosa, como a da própria casca, enquanto a cinza comum tem uma fração de estrutura compacta e granulada, provavelmente devido ao longo período no forno.



(Figura 8)



(Figura 9)

Figura 8 – Micrografias de cinza de casca de arroz produzida em forno comum
Figura 9 – Micrografias de cinza de casca de arroz produzida em leito fluidizado

Fonte: Agopyan (1991 apud POUHEY, 2006).

Não existe consenso a respeito da temperatura ideal para a queima da CCA, porém a grande parte dos autores apresenta valores que estão entre 500 e 700°C. A maioria concorda que a quantidade de fases cristalinas na sílica deve ser a menor possível e que temperaturas mais elevadas tendem a produzir CCA mais cristalina, principalmente pelo fato de estas serem resfriadas naturalmente ao ambiente.

Hara et al. (1989) constataram variações nas suas características mineralógicas e físicas, conforme a figura 10.

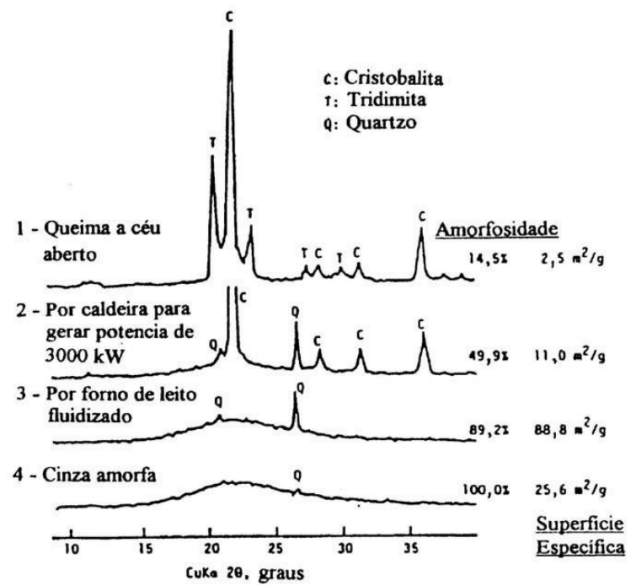


Figura 10 – Variações nas características mineralógicas e físicas de CCA provenientes de processos de queima diferentes

Fonte: Hara et al. (1989).

Estudos realizados revelam que as cinzas apresentam morfologias diferentes conforme a temperatura de queima. Dentre eles, Barbosa et al. (2006) estudaram a influência do tempo e da temperatura na queima da casca de arroz. Foram apresentadas uma cinza com controle de queima em que a temperatura atinge aproximadamente 600°C (Figura 11); e outra cuja queima se dá por autocombustão sem controle de queima e o processo dura 36 horas e chega a temperaturas de até 850°C (Figura 12).



(Figura 11)



(Figura 12)

Figura 11 – Cinza cristalina, após moagem

Figura 12 – Cinza amorfa, após moagem

Fonte: Barbosa et al. (2006).

Na tabela 2, abaixo, segundo Barbosa et al. (2006), é possível analisar as características físico-químicas das cinzas de casca de arroz.

Tabela 2 – Características físico-químicas das CCAs

Análise Físico-química das CCAs		CCA	CCA
		Cristalina	Amorfa
Densidade absoluta (g/cm ³)		2,18	2,15
Finura peneira 325 (% retida)		1,3	3,40
Superf. Espec. Blaine (cm ³ /g)		6376	17302
Diâmetro dos grãos (micras)		13,44	12,38
Reatividade c/álcalis	Redução expansão (%)	12,38	-
	Expansão argamassa (%)	0,017	-
Índice atividade pozolânica	Água requerida (%)	100,6	114,6
	Com cimento CP11-F (%)	60,7	90,8
	Com cal (MPa)	3,50	4,90
Análise química (%)	Perda ao fogo	6,17	2,36
	SiO ₂	88,50	92,99
	SO ₃	0,03	0,10

Fonte: Barbosa et al. (2006).

No mesmo estudo, foi realizado o ensaio de difração de raio X, para as duas amostras, em que é possível observar a presença de cristais, principalmente a cristobalita e a tridimita na cinza cristalina (Figura 13), enquanto que, na cinza amorfa, não ocorrem picos (Figura 14).

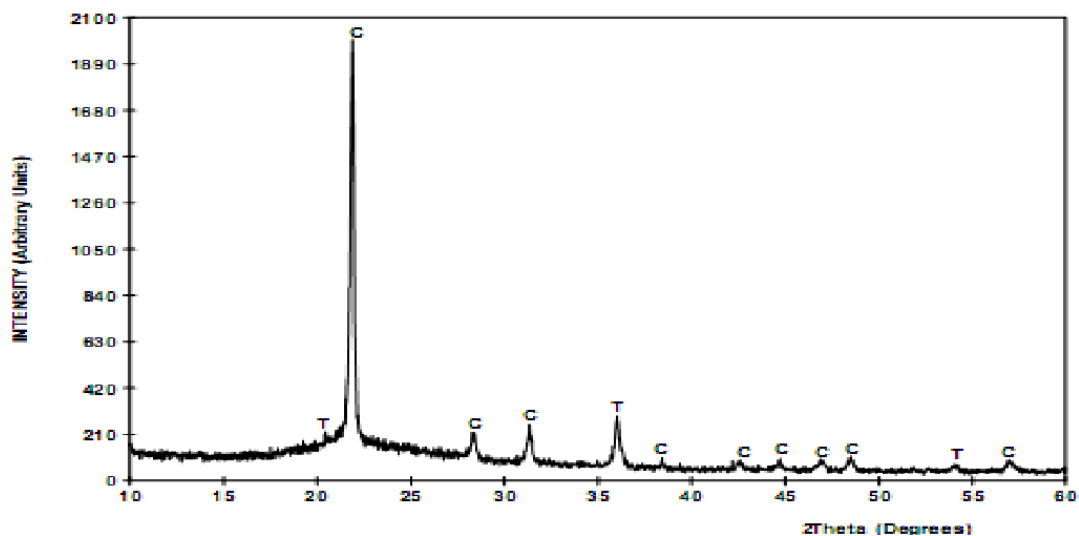


Figura 13 – Resultado do ensaio de difração de raio X CCA cristalina

Fonte: Barbosa et al. (2006).

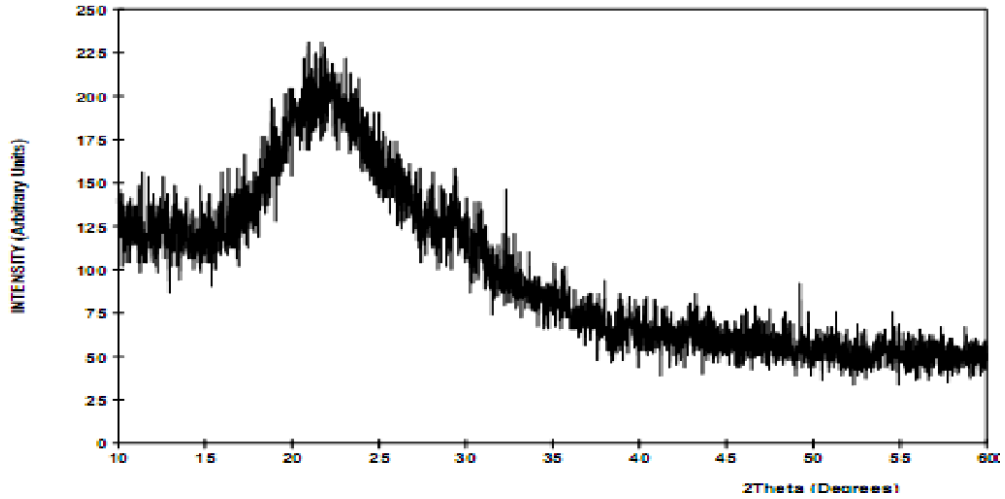


Figura 14 – Resultado do ensaio de difração de raio X CCA amorfa

Fonte: Barbosa et al. (2006).

Duart (2008), em sua pesquisa, apresenta o difratograma da CCA amorfa utilizada no seu estudo (Figura 15). Nele verificam-se alguns picos cristalinos de Quartzo (Q) e de Cristobalita (C), resultado de uma queima não controlada da casca de arroz.

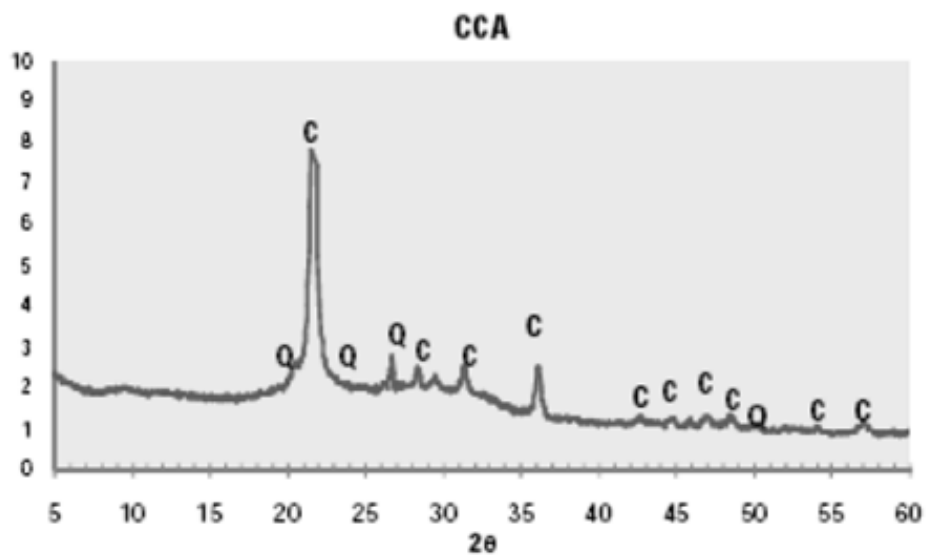


Figura 15 – Difração de raios X da CCA

Fonte: Duart (2008).

O autor também realizou a microscopia eletrônica de um concreto com adição de 25% de cinza de casca de arroz sem moagem (Figura 16), que revela a estrutura porosa da CCA. Esta característica da CCA é importante, pois é responsável pela absorção da água de amassamento e também implica porosidade maior quando submetido o concreto ao ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

Essa estrutura porosa pode ser modificada através do processo de moagem da cinza em moinhos de bolas metálicas. A modificação também se dá durante o processo de mistura do concreto, por meio do atrito interno provocado pelos materiais (cimento, areia e brita), de acordo com o tempo de mistura. A moagem da cinza torna as partículas originalmente aciculares em praticamente esféricas, como mostra a figura 17, do ensaio de microscopia eletrônica de varredura.

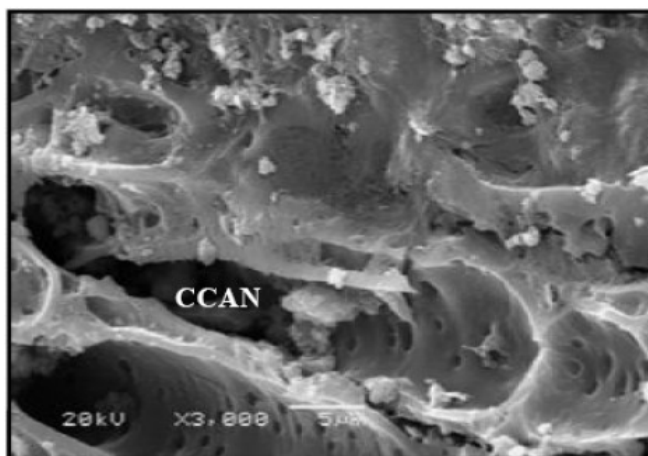
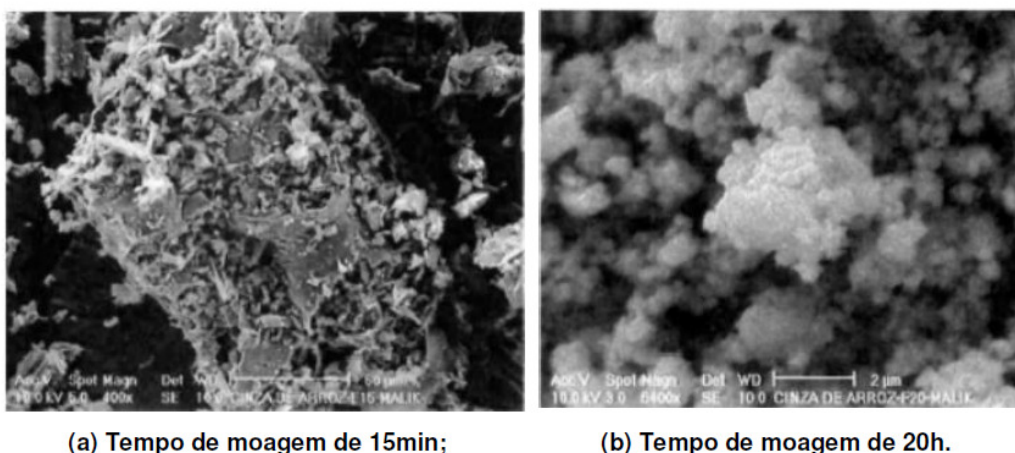


Figura 16 – Micrografia de concreto com 25% de CCAN, ampliada 3.000 vezes, aos 91 dias
Fonte: Duart (2008).



(a) Tempo de moagem de 15min;

(b) Tempo de moagem de 20h.

Figura 17 – Microscopia eletrônica de varredura da CCA após moagem de 15 min (a) e moagem de 20 h (b)
Fonte: Santos (1997).

Assim, as várias características que a CCA apresenta fazem desta pozolana uma adição de interesse entre os pesquisadores, devido às propriedades já comprovadas desta cinza quanto ao aumento na durabilidade das estruturas de concreto.

2.5 O efeito da finura da cinza de casca de arroz sobre as propriedades do concreto

A finura da casca de arroz influencia a sua reação com a água. Geralmente, quanto mais fino o cimento, mais rapidamente ele reagirá. Porém existem limites para a finura, devido ao calor de hidratação do cimento; com isso, partículas maiores do que 45 μm são difíceis de hidratar, e aquelas maiores do que 75 μm nunca se hidratam completamente. A adição de cinza de casca de arroz ao concreto provoca um aumento significativo na resistência à compressão, devido ao refinamento dos poros e dos grãos e pela melhoria na microestrutura da zona de transição (M. GOMES DA SILVA, 2007).

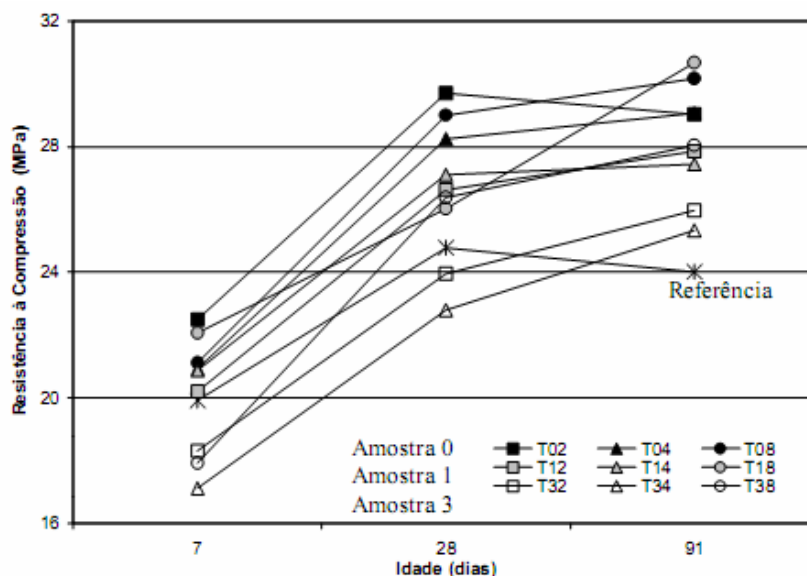
Al-khalaf e Yousift (1984) constataram que a finura da cinza de casca de arroz aumenta com o aumento no tempo de moagem da cinza para todas as temperaturas de queima. Para um mesmo tempo de moagem, o aumento na temperatura de queima reduz consideravelmente a superfície específica da cinza, indicando que as partículas de carbono mais finas têm maior área específica do que as partículas de sílica. Segundo Day e Shi (1994), a finura do cimento é um fator importante que afeta o nível de desenvolvimento da resistência. A utilização de pozolana mostra que a resistência mecânica alcançada com o tempo tem correlação com a finura. Porém a finura não é o único fator que afeta a reatividade pozolânica. A composição química, mineral, o conteúdo de vidro da pozolana e o nível de resfriamento do magma fundido são também importantes na reatividade. Observou-se que um aumento na finura das pozolanas tem o efeito geral de aumentar a resistência da pasta dos três para os 90 dias.

Prudêncio e Santos (1996) demonstraram que o índice de atividade pozolânica (IAP) da CCA residual aumenta com o tempo de moagem (aumento da superfície específica) até o limite de quatro horas. Após este tempo, há um decréscimo no índice, apesar de a superfície específica continuar aumentando. Este comportamento inesperado talvez possa ser atribuído ao fato de que o aumento da superfície específica dificulta a dispersão da cinza na argamassa. As partículas da cinza acabam formando grupos que não reagem na sua totalidade com a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberada no processo de hidratação do cimento.

Segundo Frizzo (2001), comparando-se as misturas com mesma pozolana, cinza volante

e cinza de casca de arroz, verificou-se que o aumento na finura, ao mesmo tempo que aumentou a resistência à compressão axial, reduziu a penetração média de cloretos. Este comportamento ocorreu devido ao aumento na finura das adições minerais que proporcionaram melhor preenchimento dos espaços capilares grandes, resultando em maior densificação da microestrutura da pasta e impermeabilidade do concreto.

A influência do tempo de moagem da cinza de casca de arroz na resistência do concreto pode ser observada na pesquisa de Pouey e Dal Molin (2002). Foram utilizadas três tipos de cinza, uma amorfa (produzida com controle de queima e de temperatura), uma pouco cristalina (produzida sem controle de temperatura e queima) e outra cristalina (produzida sem controle de temperatura e queima), chamadas respectivamente de amostras 0, 1 e 3. O traço foi constituído de relação a/ag 0,50 e teor de substituição de cimento por cinza de 10%. Foram utilizados três tempos de moagem: 2, 4 e 8 horas. Os resultados podem ser observados na figura 18.



(*) Resultado com valor discrepante.

Figura 18 – Evolução de resistência à compressão com o tempo.

Fonte: Pouey e Dal Molin (2002).

Verifica-se que, independente do tempo de moagem, nas idades finais, a resistência mecânica dos concretos com adição de CCA supera a de referência. Aos 91 dias, os corpos de prova com adição de cinza moída por oito horas apresentaram resistências superiores às moídas em menos tempo. Pode ser observado também que a amostra 0 (cinza amorfa) teve melhor

desempenho que a amostra 1 (pouco cristalina).

Pouey (2006) produziu cimentos diferentes com distintas CCAs submetidas a tratamentos físicos, térmicos e químicos. A autora afirmou que, em termos de resistência à compressão, o tratamento físico (redução da granulometria) foi o que produziu maiores benefícios. Ficou clara a influência da CCA no seu desempenho, ou seja, até o limite de 4,55 μm testado, quanto menor foi a dimensão dos grãos, maior foi a pozolanicidade da CCA e, por consequência, a resistência à compressão dos compósitos. Ainda de acordo com a autora, para cimentos 50% passantes inferiores a 6 μm , obtidos pelo moinho periquito, parece haver uma padronização do comportamento. Quando desconsiderados o tipo de CCA e tipo de tratamento empregado, todas as CCAs atingiram IAP acima do limite mínimo estabelecido pelas normas brasileiras e os cimentos atingiram bom desempenho.

Seguindo a mesma tendência, Cordeiro (2006) afirmou que os estudos de moagem desenvolvidos com a cinza residual da casca de arroz possibilitaram verificar que a moagem ultrafina foi adequada para conferir elevada atividade pozolânica ao material. Dentre os procedimentos investigados pelo autor, as moagens efetuadas por períodos de 120 e 240 minutos em moinho vibratório conduziram às cinzas de maior atividade pozolânica, na avaliação tanto por método mecânico quanto por método químico.

De acordo com Silva (2009), a utilização de pozolanas extremamente finas e reativas deve ser controlada pelo fato da necessidade de dosagens corretas de aditivos, uma vez que estas pozolanas possuem uma maior dificuldade de se dispersarem. Assim, o uso de um aditivo superplastificante não se faz necessário somente pela necessidade de obtenção de uma boa trabalhabilidade, fixando-se a consistência, e sim pela necessidade de dispersão completa dos grãos das adições utilizadas, proporcionando a sua eficiência. Em seu trabalho, o autor constatou que a aglomeração de CCA amorfa no interior das barras de argamassa com teores de 20% de substituição favoreceu a expansão devido à reação álcali-agregado.

Cordeiro, Toledo Filho e Farbain (2008) verificaram, através de diversas formas de avaliar a pozolanicidade (IAP com cimento, Fratini, Chapelle e propriedades do concreto com até 20% de substituição de cimento por CCA), que é possível obter, a partir de CCAs cristalinas e com alto teor de carbono, alta reatividade, desde que tenha sua granulometria levada à condição de ultrafina, ou seja, aproximadamente 6 μm .

Hoppe (2008), ao contrário aos conceitos descritos anteriormente, concluiu em sua dissertação que é possível obter concretos melhores que o traço de referência utilizando CCA em seu estado físico natural, sem moagem. O diferencial de sua pesquisa é que o autor utilizou a ordem de colocação de materiais na betoneira como processo de moagem da CCA natural,

aumentando o tempo de amassamento total em relação à CCA moída, o que fez com que a dimensão dos grãos da CCA diminuísse.

Pedrozo (2008) afirma que ficou evidenciado, frente às propriedades estudadas, que é viável tecnicamente a utilização da CCA residual, moída (nos teores de 15 e 25%) e ao natural (no teor de 15%). A constatação desta viabilidade representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de um resíduo que até agora vem sendo descartado de forma prejudicial ao meio ambiente. Além disso, a descoberta de que mesmo a CCA ao natural, que não sofreu nenhum tipo de beneficiamento, pode ser utilizada em baixos teores representa um avanço significativo para o setor produtivo, possibilitando que se agregue mais valor aos concretos produzidos na medida em que há um menor consumo de energia.

Meira (2009) indicou que existe viabilidade técnica para o emprego de cinza de casca de arroz natural, sem moagem, para emprego em concreto estrutural. Os resultados foram satisfatórios para cinza natural, para o teor de 15% de substituição, pois desenvolveram resistências axiais superiores ao referênciã, retrações inferiores, módulo de elasticidade e resistência por compressão diametral inferiores, porém com quedas não significativas.

3 RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ NATURAL E MOÍDA

3.1 O efeito das adições minerais nas propriedades do concreto

As adições minerais em concretos com cimento Portland apresentam resultados benéficos em relação às propriedades do concreto, devido ao reduzido tamanho físico das partículas, pelo efeito químico pozolânico e pela ação simultânea (sinérgica) dos dois efeitos, conforme constatado por Isaia (1995). A eficiência da adição mineral varia principalmente em função da composição química, granulométrica e mineralógica, grau de amorficidade, quantidade utilizada e condições de cura.

Segundo Silva (2007), as adições minerais possuem a propriedade de reagir com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), da hidratação do clínquer do cimento Portland, e formar como produto o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) secundário, que precipita nos poros capilares, reduzindo a permeabilidade e a absorção. Essa característica é chamada de efeito pozolânico.

As adições minerais têm um vasto campo de atuação em estruturas de concreto, tais como: pré-moldados, edifícios, pontes, plataformas marítimas, obras hidráulicas, pavimentação, recuperação de estruturas etc.

Entre as vantagens que as adições minerais apresentam no concreto, pode-se ressaltar (DAL MOLIN; ISAIA, 2011):

- Inibição da reação álcali-agregado, devido à redução da permeabilidade do concreto, redução dos álcalis do aglomerante, pela substituição parcial do cimento e consumo parcial dos álcalis através da reação pozolânica;
- Bloqueamento dos poros, aumentando a coesão, reduzindo a permeabilidade e, conseqüentemente, aumentando a durabilidade do concreto;
- Aumento da viscosidade do concreto, agindo como inibidor dos movimentos dos grãos;
- Redução do calor de hidratação, devido à menor quantidade de clínquer presente no concreto, resultando em menor liberação de calor durante a hidratação, pois a reação de pozolânica normalmente é lenta e a liberação de calor ocorre após a formação do hidróxido de cálcio;
- Exsudação e segregação são reduzidas devido ao volume maior de finos;

- Resistência mecânica superior em idades avançadas (geralmente acima de 91 dias), devido ao refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento na medida em que aumenta a resistência da matriz na zona de transição;
- Aumento da resistência aos sulfatos pela dificuldade de acesso devido ao menor número e dimensão dos poros da pasta hidratada, reduzindo o nível de hidróxido de cálcio disponível para combinação com os sulfatos, que geram etringita e, conseqüentemente, a reação expansiva;
- Redução da porosidade da matriz e da zona de transição;
- Redução das emissões de dióxido de carbono, liberados na atmosfera pelas indústrias cimenteiras, através da utilização de resíduos industriais e agrícolas, para a produção de materiais cimentícios, em substituição parcial ao cimento Portland.

Entretanto, as adições minerais apresentam algumas desvantagens (DAL MOLIN; ISAIA, 2011):

- Redução dos níveis de hidróxido de cálcio, responsável pelo ambiente alcalino protetor das armaduras contra a corrosão das armaduras, sendo que tal aspecto pode ser compensado através de cura úmida adequada, de forma a reduzir a porosidade e permeabilidade superficial e impedir e/ou retardar o acesso de dióxido de carbono e, logo, da carbonatação;
- Necessidade de uso de aditivos plastificantes, em função da elevada finura da sílica ativa e cinza de casca de arroz;
- Fissuração por dessecação superficial ou retração plástica devido à baixa exsudação do concreto, dificultando a ascensão da água à superfície, principalmente quando a taxa de evaporação for elevada (temperatura ambiente alta, baixa umidade relativa do ar, velocidade elevada do vento etc.);

3.1.1 Concretos com adição de cinza de casca de arroz

Como citado no item anterior, a adição de cinza de casca de arroz ao concreto tem grande influência nas propriedades químicas, físicas e mecânicas do material e melhora tanto no estado fresco como no endurecido. A figura 19 apresenta uma micrografia de uma amostra fraturada de concreto com adição de cinza de casca de arroz de 28 dias.

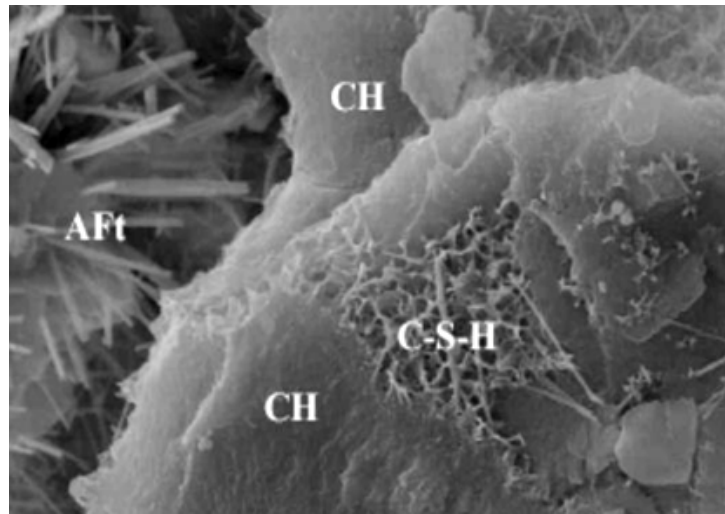


Figura 19 – Micrografia do concreto ampliada 12.000 vezes aos 28 dias

Fonte: Fagury e Liborio (2004).

Com a ampliação de 12.000 vezes, ficam evidentes os feixes fibrosos de C-S-H entre placas sobrepostas de hidróxido de cálcio e bastões aciculares de etringita (AFt), confirmando a atividade pozolânica da CCA residual.

3.2 Resistência mecânica do concreto

Define-se a resistência mecânica do concreto como sendo a sua capacidade de suportar as cargas aplicadas sobre ele, sem que entre em ruína. Segundo Higgins (1982, p. 59), “A resistência é uma medida das forças externas aplicadas ao material, as quais são necessárias para vencer as forças internas de atração entre as partículas elementares do mesmo”.

Segundo (MEHTA; MONTEIRO, 1994), existem diversos fatores que influenciam na resistência mecânica do concreto, alguns dos quais observados na figura 20:

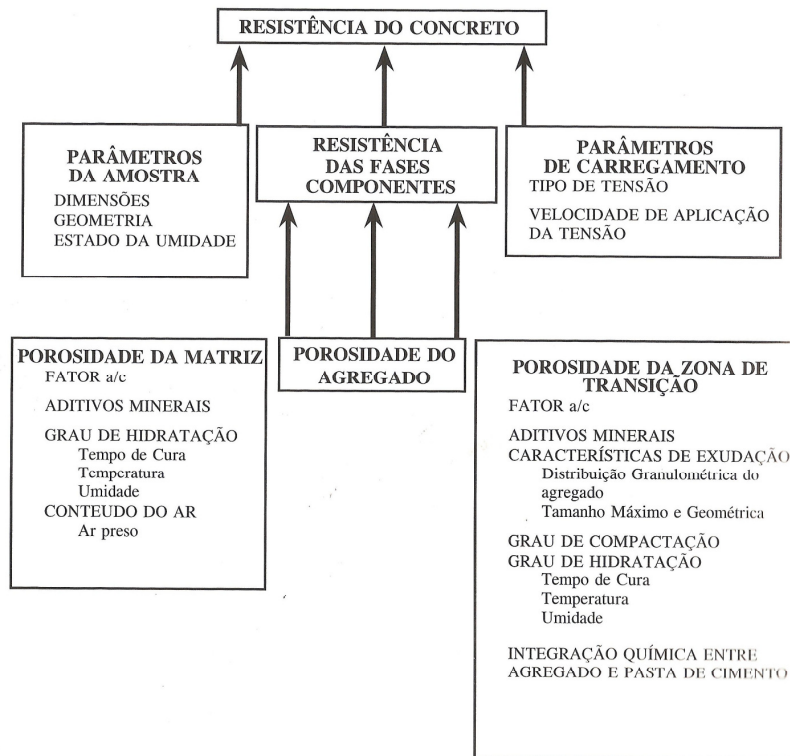


Figura 20 – Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto

Fonte: Mehta e Monteiro (1994, p. 63).

O concreto após a cura é formado pela pasta de cimento Portland hidratada e pelos agregados. Ambos apresentam comportamento tensão-deformação distinto do concreto. Conforme a figura 21, o concreto convencional apresenta um comportamento não-linear, sujeito a deformações viscoplásticas. Este comportamento é atribuído à natureza dos poros, água adsorvida, água zeolítica e água interlamelar que predominam no C-S-H que está inserido na pasta.

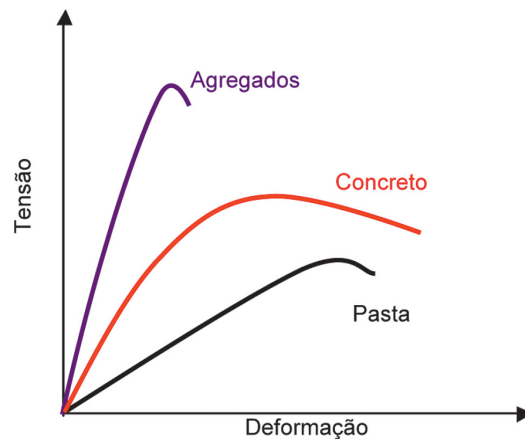


Figura 21 – Comportamento tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Também é fundamental considerar a presença de zona de transição ou interface pasta-agregado, pois esta área apresenta grandes vazios que podem ter comportamentos diferenciados quando submetidos a diferentes tipos de esforços.

Segundo Hanai (2005), quando submetido a um esforço de tração, uma pequena falha genérica na pasta de cimento causa um processo de localização de tensões que, conseqüentemente, provocam um aumento e propagação das microfissuras na zona de transição, conforme a figura 22.

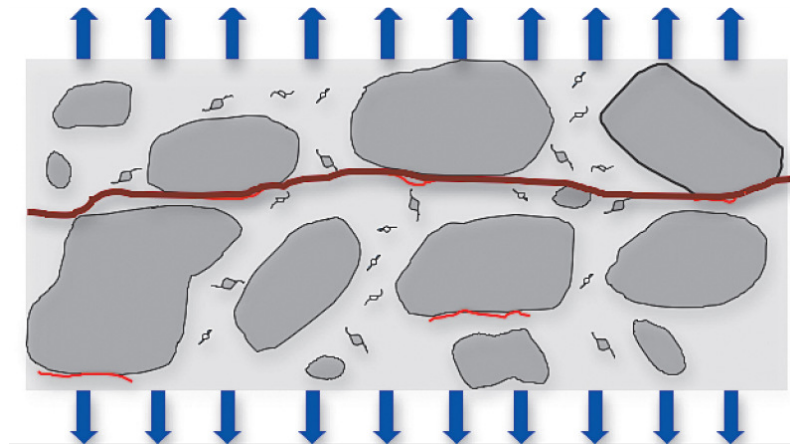


Figura 22 – Fissuração microestrutural do concreto submetido a um esforço de tração

Fonte: Hanai (2005).

No concreto submetido a um esforço de compressão, conforme a figura 23, a ruptura se dá por tração indireta, pois o mecanismo de propagação das microfissuras é o mesmo, causando um deslocamento superficial do material, que resulta na ruptura do concreto.

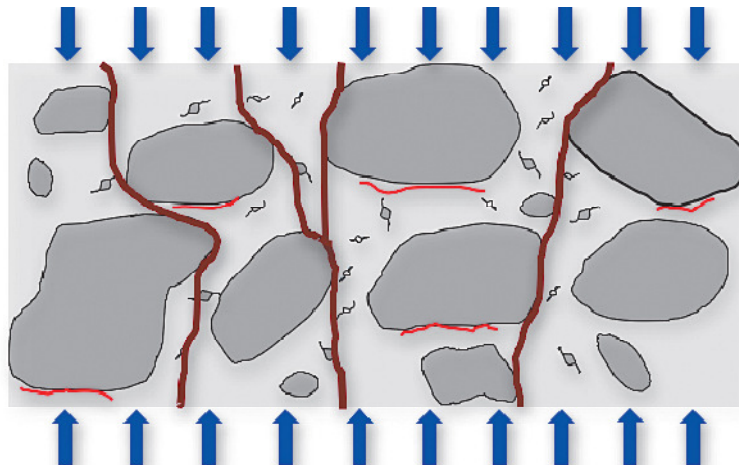


Figura 23 – Fissuração microestrutural do concreto submetido a um esforço de compressão

Fonte: Hanai (2005).

3.2.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é considerada a propriedade mais importante do concreto. Normas nacionais e internacionais a associam às demais propriedades e resistências do concreto. Este comportamento foi primeiramente demonstrado por Duff Abrams, em 1918, que constatou a denominada Lei de Abrams, universalmente aceita pela correlação existente entre a resistência mecânica e a relação a/c . Tanto é fato que este é o parâmetro básico utilizado para controlar a qualidade do concreto. Normalmente, à medida que se aumenta a resistência, melhoram-se as demais variáveis, como estanqueidade, resistência à tração, módulo de elasticidade, resistência à penetração de cloretos, resistividade elétrica etc. Abaixo, na figura 24, é possível ver a fissuração de um corpo de prova submetido a um esforço de compressão axial.

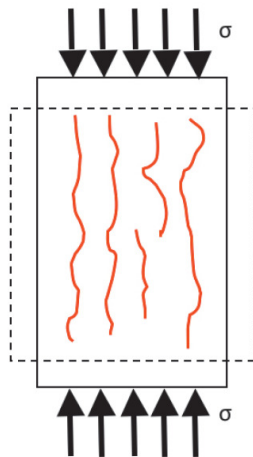


Figura 24 – Fissuração em corpo de prova sob compressão axial

Fonte: Jacintho e Giongo (2005).

3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio foi desenvolvido pelo professor Eng. Fernando Luiz Lobo Carneiro (1913-2001) no ano de 1943. Conhecido internacionalmente como Ensaio Brasileiro, é um ensaio simples e fornece resultados mais uniformes que os de tração indireta (Figura 25).

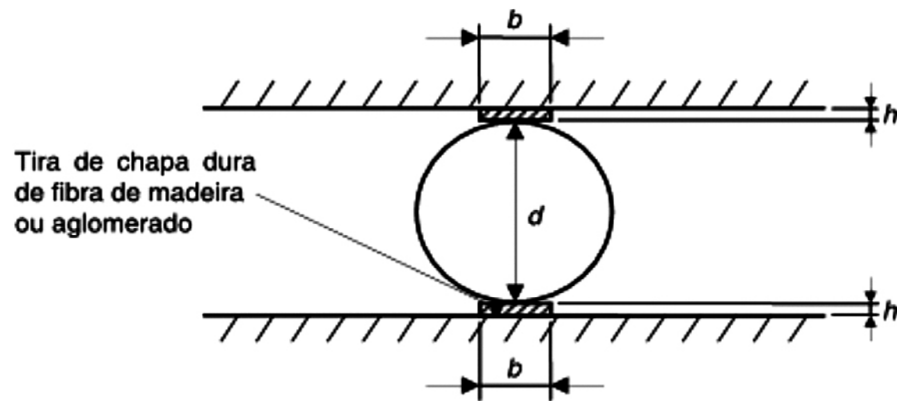


Figura 25 – Arranjo esquemático do ensaio de tração por compressão diametral

Fonte: ABNT NBR 7222:2010.

A configuração do ensaio faz com que se desenvolvam tensões de tração perpendiculares ao plano de ação da força aplicada, conforme figura 26.

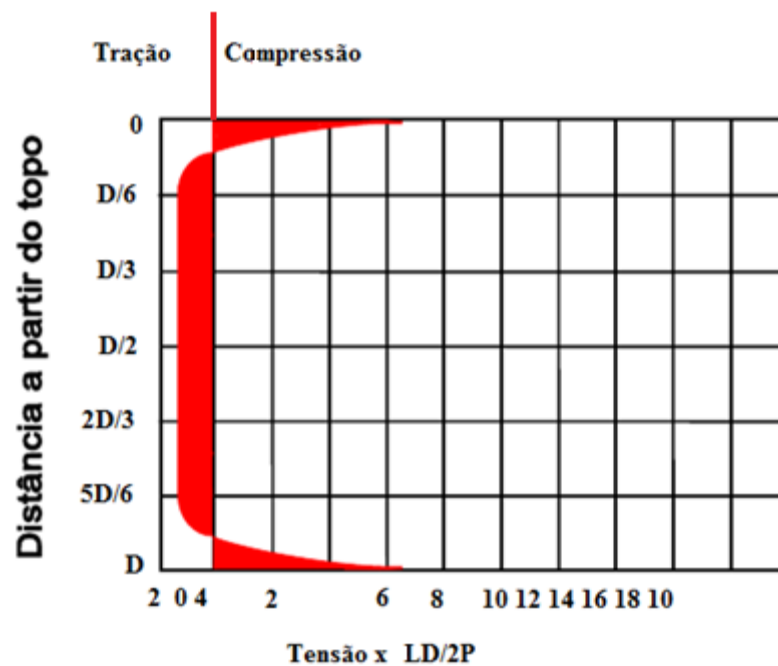


Figura 26 – Distribuição das tensões através do diâmetro carregado de um corpo de prova cilíndrico

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

3.2.3 Módulo de elasticidade

Quando, em 1660, Robert Hooke escreveu a lei fundamental da elasticidade sob a forma de anagrama: *Ut tensio sic vis* (*tensio* = extensão, deslocamento; *vis* = força), ele apenas afirmava que existia uma proporcionalidade entre deslocamentos e forças. Não existia, em sua época, o conceito de tensão, que somente surgiria 150 anos depois, com Cauchy. Por causa da “falta de sintonia” de Hooke com Isaac Newton (1643-1727), o assunto ficou esquecido na Inglaterra por mais de 100 anos. Somente em 1802, cerca de 75 anos após a morte de Newton e 100 anos depois da de Hooke, é que o físico inglês Thomas Young retomou os estudos de Hooke e avançou um pouco mais, chegando à noção de “módulo de elasticidade”.

No concreto, existindo alguma sollicitação, os poros cheios de ar ou água se comprimem (ou se distendem, conforme o caso) e tendem a produzir um fluxo desses fluidos. Isso demora algum tempo e, se o carregamento for lento, haverá tempo para o escoamento dos fluidos que ocupam os poros, como no caso dos seres vivos, em que haverá tempo para o desenrolamento das fibras (ou seu deslizamento). Se o carregamento for muito rápido, as condições em que se processam aqueles escoamentos, desenrolamentos, deslizamentos ou o que for são diferentes, e os resultados podem não ser os mesmos. Os resultados ocorrem no final do nível das cadeias moleculares, que são sollicitadas diferentemente, conforme o tipo de carregamento. Outro elemento importante é a ligação pasta-agregado. Verificou-se que, mesmo na ausência de cargas externas, existe alguma microfissuração na interface pasta-agregado (VASCONCELOS; GIAMMUSSO, 2009).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), “a quantidade de microfissuras depende de inúmeros parâmetros, incluindo a distribuição granulométrica, tamanho do agregado, teor de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto fresco, condições de cura, umidade ambiente e história térmica do concreto”. Com o aumento da fissuração, ocorre uma redução da área da seção transversal que resiste ao carregamento aplicado, surgindo tensões localizadas.

Nos concretos convencionais, o módulo de elasticidade é uma grandeza regida pelas propriedades da pasta de cimento (DAL MOLIN, 1995). Os concretos com baixa resistência apresentam maior capacidade de acomodação plástica, rompendo com deformações maiores, enquanto concretos de resistências elevadas têm uma curva tensão x deformação com maior inclinação na origem, sendo relativamente frágeis.

3.3 Resistência mecânica do concreto com cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz, devido ao alto teor de sílica amorfa e alta finura de suas partículas, é mais reativa que a cinza volante; assim sendo, a resistência nas primeiras idades não cai, como ocorre com a cinza volante; ao contrário, acelera o processo de endurecimento do concreto. Segundo Rodriguez de Senzale e Dalmolin (1998), a contribuição da CCA para o aumento da resistência do concreto inicia no primeiro dia; para a sílica ativa, inicia no terceiro dia; e para cinza volante, no 17º dia aproximadamente. As mesmas autoras, pesquisando substituição de 10 a 20% de cimento por CCA, concluíram que, para as idades de 28 e 91 dias, não é significativa a diferença de resistência entre os concretos com CCA e o concreto de referência, somente com cimento Portland. Isaia (1995) observou que, na resistência à compressão aos 91 dias, os teores de 10 e 30% de CCA proporcionaram resistências superiores em relação ao concreto de referência, de 12 e 42%, respectivamente.

Segundo Cervo (2001), as misturas contendo CCA, mesmo na idade de 28 dias, apresentaram valores adequados, superiores àqueles obtidos somente com cimento Portland, colocando em evidência as características de reatividade desta pozolana, superando substancialmente inclusive os valores obtidos nas misturas com sílica ativa. Comportamento diferenciado observa-se com o aumento na finura da pozolana. Assim, nas misturas compostas com 25% de cinza volante, aos 28 dias, os valores obtidos ultrapassaram aqueles de referência, sobretudo aos 91 dias de idade, para as relações água/aglomerante 0,35 e 0,50.

Segundo Tashima (2004), a adição de CCA provoca um incremento na resistência à compressão devido à capacidade da pozolana de fixar o hidróxido de cálcio, gerado durante as reações de hidratação do cimento. Em todos os graus de substituição de CCA, aumentou a resistência à compressão. Para 5% de CCA, 25% de aumento foi verificado quando comparado com a mistura de referência. Quanto aos resultados de compressão diametral (7 e 28 dias), todos os graus de substituição de CCA pesquisados obtiveram resultados semelhantes à compressão axial. De acordo com os resultados, não há interferência de adição de CCA na resistência à compressão diametral. Para o módulo de elasticidade, há um decréscimo quando se aumentam os níveis de CCA na mistura.

Frizzo (2001) afirmou que, aos 91 dias, os concretos com CCA com quatro horas de moagem e substituição de 25 e 50% de cimento atingiram praticamente a mesma resistência, que foi maior entre todos os concretos ensaiados, mostrando que, em relação à resistência, a moagem da CCA é compensatória. O único tração que obteve resultado inferior ao referência

foi o concreto com CCA sem moagem e 50% de substituição.

Pedrozo (2008) afirmou que, em consonância ao esperado, todas as misturas com utilização de CCA apresentaram os melhores desempenhos em idades mais avançadas, embora a mistura 15M tenha evidenciado percentuais superiores em todas as idades estudadas, e pelo contrário, a mistura 25N tenha apresentado percentuais sempre inferiores. Assim, as misturas 15M, 15N e 25M apresentaram, aos 91 dias, resistências em média 21%, 11% e 11%, superiores aos concretos de referência, respectivamente, perfazendo as maiores diferenças.

Segundo Duart (2008), enquanto a resistência do traço referência cresceu pouco quando comparado aos 28 dias, os traços com CCAM apresentaram o crescimento superior a 20% dos 28 para 91 dias, para todas as relações a/ag estudadas e este comportamento se explica pelo maior desenvolvimento das reações pozolânicas, que foram possibilitadas pelo alto teor de sílica das partículas de CCA, que reagiram com o CH produzido pelas reações de hidratação do cimento e também pela finura da CCAM, que potencializou tais reações, além de possibilitar maior nucleação de cristais. O melhor desempenho ainda foi para os traços com 15% de substituição, porém pouca diferença quando comparado com os traços com 25% de substituição, reforçando a idéia que economicamente o melhor teor estaria entre 15 e 25%. Os traços CCAN com 15% tiveram uma recuperação de resistência aos 91 dias e superaram o traço de referência em todas as relações a/ag e também apresentaram valores bem próximos aos traços com CCAM, tal comportamento foi possível graças à reação pozolânica.

Meira (2009), observou que praticamente todos os traços apresentaram um aumento de resistência quando se usou cinza moída, apenas o traço com 15N45 teve um aumento de resistência aos 7 dias. Sendo que aos 91 dias, para relações água/aglomerante 0,45 e 0,65, os concretos com adição de 15% de cinza natural obtiveram uma queda percentual não significativa na sua resistência quando comparado aos concretos com cinza moída. Verificou-se que os traços com adição de 25% de cinza natural apresentaram maior queda, esse fato pode ser explicado pela diminuição de finura do material cimentício como um todo. Os traços com cinza moída apresentaram maior pozolanicidade que os traços com cinza natural, propriedade essa que foi ativada com a moagem da cinza.

Segundo Cezar (2011), nas misturas ternárias, compostas com cinza de casca de arroz moída, observou-se crescimento médio da resistência à compressão dos 7 para os 28 dias de 75% contra 101% para a cinza de casca de arroz ao natural. Aos 182 dias, a mistura 15 CCAM superou a mistura de REF. A mistura CCAN apresentou resistências à compressão inferiores às misturas CCAM e REF, em todas as idades estudadas. Porém, aos 182 dias, as resistências de CCAN e REF aproximaram-se.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a execução do estudo sobre a adição de cinza de casca de arroz ao concreto, foi necessário um estudo prévio dos materiais, assim como da ordem de mistura dos materiais para moagem conjunta da cinza de casca de arroz natural com os agregados, bem como do tempo de mistura para obtenção de uma finura mais eficiente, conforme descrito a seguir.

4.1 As variáveis

4.1.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes consideradas no experimento foram as seguintes:

- Relações água/aglomerante: 0,45; 0,55; e 0,65, em massa;
- Tempo de cura: idade em que as amostras foram ensaiadas:
 - Resistência à compressão axial: 28 e 91 dias;
 - Resistência à compressão diametral: 28 e 91 dias;
 - Módulo de elasticidade: 28 dias;
- Tipos de adições minerais (utilizadas em substituição de parte do cimento, em massa): cinza de casca de arroz sem moagem (CCAN) e cinza de casca de arroz moída (CCAM);
- Teor de substituição de cimento por CCA: 15% em massa;
- Classes de resistência à compressão axial do concreto (f_{ck}): C15, C20, C25 e C30.

4.1.2 Variáveis dependentes

As variáveis independentes consideradas neste estudo foram:

- Resistência à compressão axial;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Módulo de elasticidade longitudinal tangente na origem;

4.2 Materiais utilizados

Os materiais foram escolhidos de acordo com a disponibilidade na Região Central do estado do Rio Grande do Sul, ao redor de Santa Maria. Após, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais.

4.2.1 Aglomerantes

Foram utilizados como aglomerantes cimento e cinza de casca de arroz. Os cimentos usados nas misturas foram o Portland CII-Z e CII-V. Estes cimentos foram escolhidos em substituição ao cimento do tipo CII-F, utilizado na fase II, porque apresentam pozolanas em sua composição e, portanto, apresentam a propriedade de mitigar a reação álcali-sílica detectada nessa fase.

A CCA utilizada nos traços com adição mineral foi escolhida entre diversas amostras de indústrias de arroz da cidade de Santa Maria, RS (Induber Berleze, Induber Trevo, Marzari, Coocal e Cauduro), sendo que a que apresentou melhor desempenho foi a da Induber Berleze. Ela é produzida por queima em fornos sem controle de temperatura para a geração de energia. A cinza foi aplicada de duas formas: sem moagem e moída. O processo de moagem foi realizado em moinho de bolas metálicas durante 60 minutos. Em pesquisas anteriores, verificou-se que um tempo de moagem maior aumentou a pozolanicidade, porém essa melhoria não compensava o gasto energético que esse processo demandava. Essas CCAs foram as mesmas empregadas na fase II deste projeto. Abaixo, os ensaios realizados na caracterização dos aglomerantes e a tabela 3, com a caracterização física dos cimentos, cinza volante e CCA:

- NBR NM 23/01: Cimento Portland – Determinação da massa específica;
- NBR NM 76/98: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine);
- NBR 146556/01: Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios X;
- NBR NM 22/04: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos – Análise química.

Tabela 3 – Caracterização física dos cimentos, cinza volante e CCA

Composição Química	CPIIZ	CPIV	CCA natural	CCA moída
Massa específica (g/cm ³)	2,96	2,68	1,96	2,09
Área específica (cm ² /g)	5240	4940	4441	4501
Dimensão média (µm)	7,70	8,18	33,19	15,54
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas (µm)	0,97	1,06	5,19	2,38
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas (µm)	27,52	25,59	80,51	54,14
Expansibilidade em autoclave (%)	-	-	-	-

Sendo: (-) não determinado.

A CCA natural utilizada no ensaio em argamassa foi obtida no laboratório através de um processo de simulação do traço utilizado em concreto. Nessa simulação, a quantidade de CCA adicionada na betoneira equivale aos 15% de substituição ao cimento. A sequência do processo foi:

- 1º - as britas 0 e 1 foram colocadas, 50% de cada, junto com a CCA na betoneira. A CCA foi moída por 5 min;
- 2º - as areias fina e média, 50% de cada, previamente peneiradas em uma malha de 0,149 mm (Tyler 100), foram adicionadas à CCA e às britas na betoneira. Neste segundo processo, a CCA foi moída por mais 10 min;
- 3º - após o término do tempo total de 15 min, esses materiais foram retirados da betoneira. Eles foram peneirados para se obter somente a CCA passante na malha de 0,074 mm (Tyler 200). A seguir, na tabela 4, a análise química dos cimentos e CCA.

Tabela 4 – Análise química dos cimentos e CCA

Composição Química	CPIIZ	CPIV	CCA	CCA
			natural	moída
CaO	50,84	34,18	1,25	1,32
SiO ₂	21,92	35,37	95,04	94,84
Al ₂ O ₃	6,33	10,17	0,00	0,39
Fe ₂ O ₃	3,27	5,17	0,44	0,54
SO ₃	2,53	2,04	0,01	0,01
MgO	5,70	4,30	0,45	0,40
K ₂ O	1,17	1,67	1,40	1,45
TiO ₂	0,26	0,51	-	-
Na ₂ O	0,16	0,16	0,09	0,11
SrO	0,10	0,06	-	-
P ₂ O ₅	0,09	0,10	-	-
MnO	0,10	0,14	-	-
PF	5,46	4,45	-	-
Total	97,93	98,32	-	-
Resíduo insolúvel	10,42	41,80	-	-
CaO livre	2,00	1,43	-	-

Sendo: (-) não determinado e (PF) perda ao fogo. Os teores de cada constituinte estão apresentados em % de massa.

As figuras 27 e 28 apresentam os difratogramas das CCAs natural e moída, porém com alguns picos cristalinos de quartzo (q) e cristobalita (c) em destaque, resultado de uma queima não controlada da casca de arroz. Acredita-se que o maior pico de quartzo no ângulo 26,642° presente no difratograma da CCA natural se deva à contaminação no processo de pré-moagem com agregados. A análise de DR-X da CCA natural e moída foi realizada no laboratório de física da UFSM.

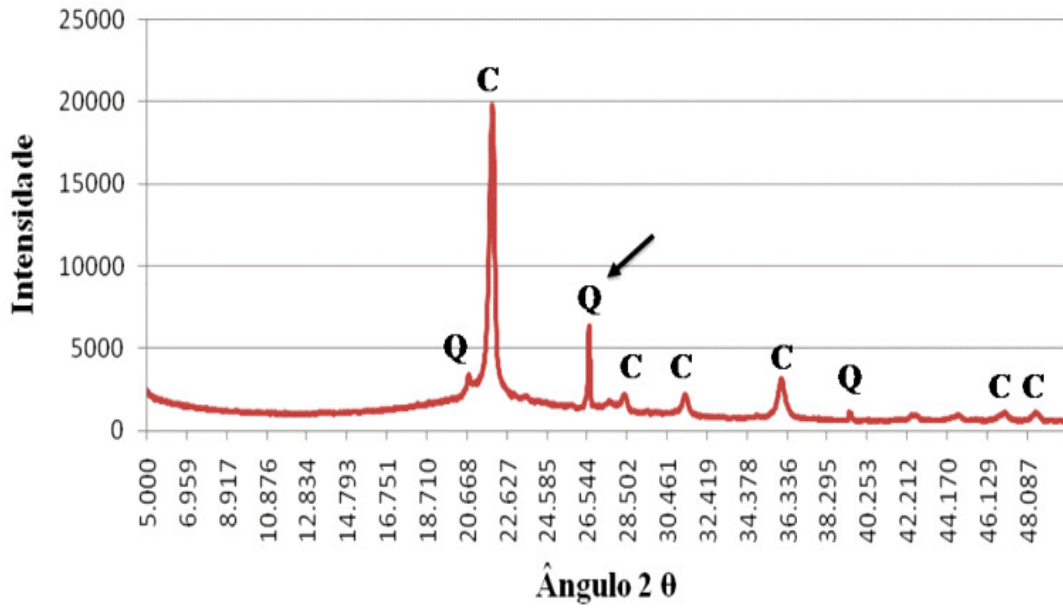


Figura 27 – DR-X da CCA natural

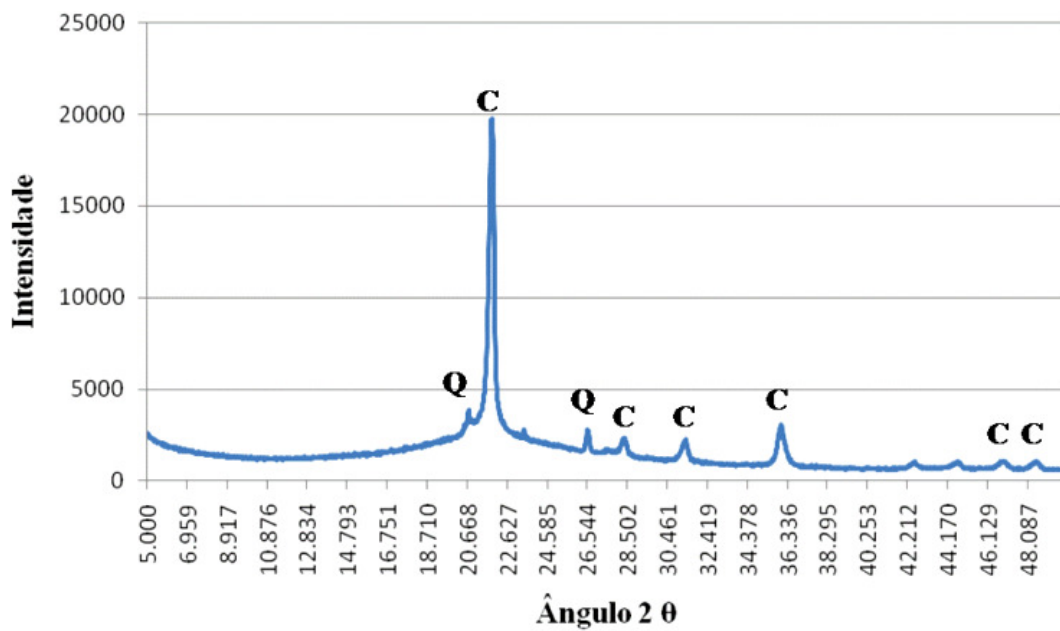


Figura 28 – DR-X da CCA moída

A caracterização da CCA natural e moída que determinou seus índices de atividade pozolânica (IAP) foi feita através do método proposto por Isaia (1995). As convenções adotadas para o ensaio de pozolanicidade estão representadas na tabela 5.

Tabela 5 – Convenções do ensaio de pozolanicidade

Misturas	Composição
CP	100 % Cimento Portland
N15	85 % Cimento Portland + 15 % CCA natural
M15	85 % Cimento Portland + 15 % CCA moída

Através do gráfico do ensaio Fratini, mediu-se a distância “d”, que é a reta que une a origem dos eixos até o ponto em questão; a partir desta, calculou-se o IAP em porcentagem (Tabela 6).

Tabela 6 – Índice de atividade pozolânica

Misturas	Atividade Pozolanica		Distância (“d”cm)	IAP ¹
	mmol CaO/l	mmol OH ⁻ /l		
CP	8	59	6,8	14,7
N15	9	48	6,0	16,7
M15	6	43	5,2	19,2

1 - Obtenção do índice ($IAP=(1/d) \times 100$) conforme Isaia (1995).

Os resultados mostram, como esperado, menor índice de pozolanicidade para o cimento, seguido da CCAN15 e, por fim, o maior de todos para a CCAM15, tendo em vista que esta última consumiu maior quantidade de CaO e diminuiu o pH (menor OH).

4.2.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi areia natural de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria, RS. Procederam-se nesta a secagem em estufa, peneiramento na peneira # 4,8 mm e estocagem em baias de alvenaria em local coberto, até o dia das moldagens.

O agregado graúdo utilizado foi a pedra britada de rocha diabásica, proveniente do município de Itaara, RS. Procederam-se nesta o peneiramento na peneira # 19 mm e a lavagem na peneira # 6,3 mm, para eliminar possíveis impurezas que de alguma forma pudessem influenciar nas propriedades do concreto. Posteriormente, a pedra foi secada à temperatura ambiente e estocada em baias até a data das moldagens.

Os ensaios realizados na caracterização dos agregados foram os seguintes:

- NBR 7211/2005: Agregado miúdo – Determinação de massa específica;
- NBR NM 52/2003: Agregado miúdo – Determinação de massa específica;
- NBR NM 53/2003: Agregado graúdo – Determinação de massa específica;
- NBR NM 45/2006: Agregados – Determinação da massa unitária.

Com o intuito de se obter uma granulometria mais fechada, foi utilizada uma composição de dois agregados miúdos e dois graúdos, e a porcentagem ótima encontrada foi 50%, tanto para a areia quanto para a pedra. As características físicas dos agregados estão apresentadas na tabela 7, e as curvas granulométricas, nas figuras 29 e 30.

Tabela 7 – Características dos agregados usados neste trabalho

Agregados	Modulo de finura	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária solta (g/cm³)	Massa unitária compactada (g/cm³)
Areia fina A	1,97	2,64	1,62	1,73
Areia grossa B	2,80	2,63	1,68	1,77
Areia 50 % de cada	-	2,635	1,65	1,78
Brita 0	5,85	2,52	1,39	1,43
Brita 1	6,9	2,54	1,40	1,48
Brita 50 % de cada	-	2,53	1,45	1,52

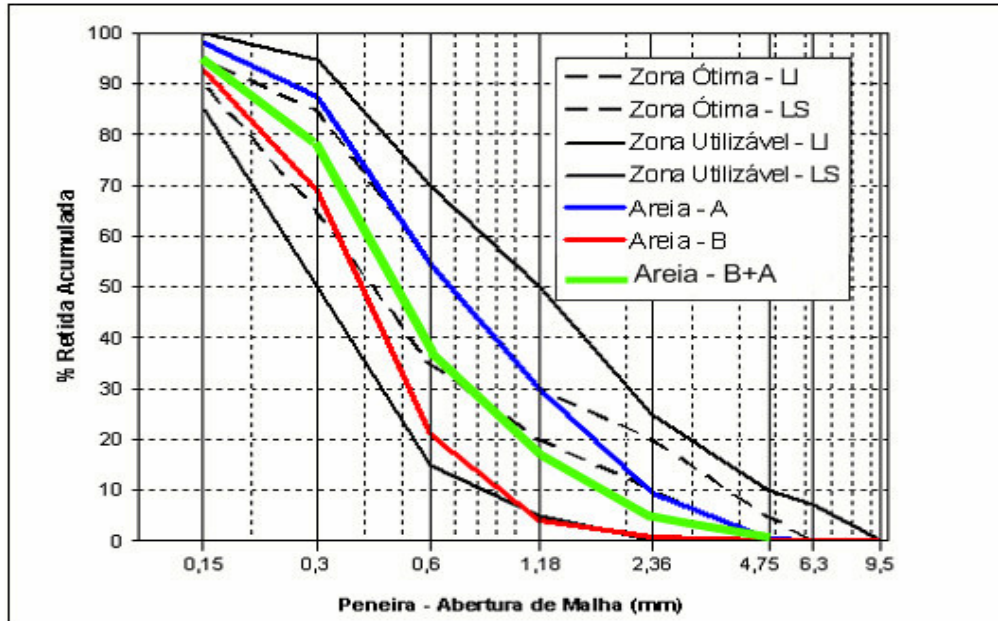


Figura 29 – Curva granulométrica dos agregados miúdos

Observa-se pelo gráfico da figura 29 que, com a mistura de 50% de cada areia, obteve-se uma distribuição granulométrica bastante próxima da zona aceitável inferior na faixa granulométrica 4,8-0,6 mm e da zona aceitável superior na faixa 0,6-0,15 mm.

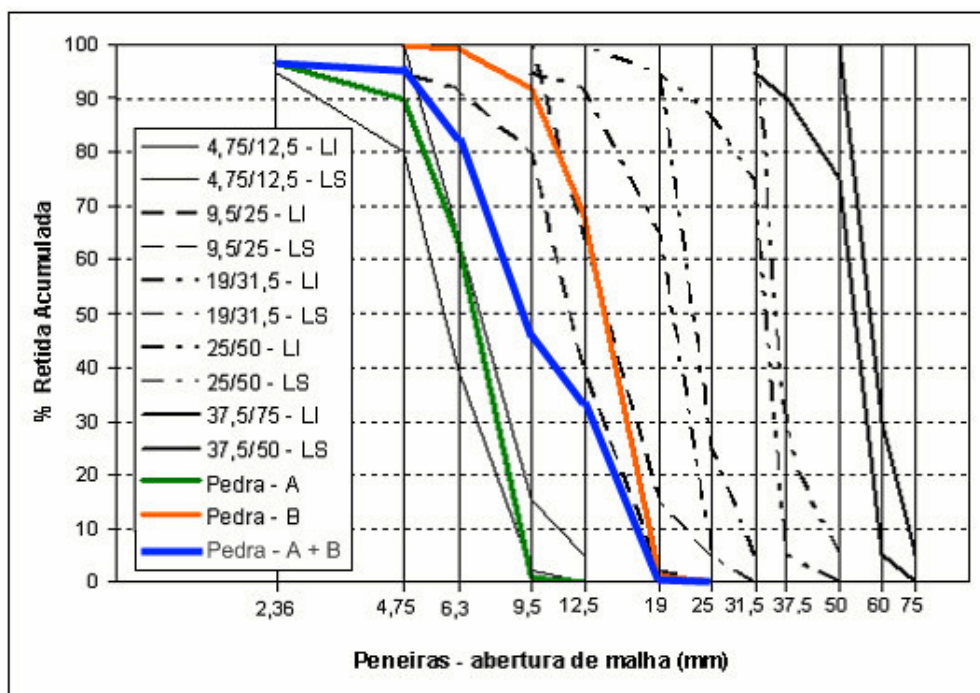


Figura 30 – Curva granulométrica dos agregados graúdos

Com a mistura em partes iguais do agregado graúdo, obteve-se um material com granulometria intermediária às utilizadas, ficando aproximadamente em uma zona granulométrica 4,75/25, entre o limite inferior (LI) e o limite superior (LS).

4.2.3 Aditivos

Nas misturas em concreto, foi empregado aditivo tipo superplastificante à base de policarboxilatos, com teor de cloretos $< 0,1\%$ para que se alcançassem a consistência e trabalhabilidade desejadas. O aditivo superplastificante adotado foi o Power flow 1059 fabricado pela indústria MC-Bauchemie.

Foi fixado o valor de abatimento no cone de Abrams de 80 ± 20 mm, determinados através do ensaio de abatimento do tronco de cone segundo a norma NBR NM 67.

Devido ao fato de que os aditivos podem influenciar nas condições de hidratação, modificando a microestrutura dos concretos, optou-se por utilizá-los em todas as misturas aglomerantes, possibilitando uma maior homogeneidade dos concretos. As quantidades de aditivo por metro cúbico de concreto estão apresentadas nos quadros 3 e 4.

4.2.4 Água

Para moldagem dos corpos de prova, utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento da UFSM.

4.3 Traços

Foram utilizados quatro tipos de aglomerantes: cimento Portland CPII-Z, CPIV, cimento com cinza sem moagem (CCAN) e cimento cinza moída (CCAM). Com isso, obtiveram-se seis misturas aglomerantes para cada relação a/ag: dois traços de referência com 100% de cimento Portland, dois com CCAN em teores de substituição de 15% e outros dois com CCAM em teor de substituição de 15%. Três relações a/ag foram utilizadas para cada uma das misturas

estudadas: 0,45; 0,55; e 0,65, com proporções aglomerante/agregado de 1:4,38; 1:5,87; e 1:7,38.

Nos traços com adição de CCA, foram realizadas correções nas quantidades do agregado miúdo, devido à CCA ter menor massa específica que o cimento utilizado e também porque a CCAM e a CCAN têm massas específicas diferentes. Com isso, foi possível manter constante o percentual de 50% de argamassa seca para todos os traços.

O proporcionamento dos concretos foi realizado segundo procedimento proposto por Helene e Terzian (1992), e as quantidades de materiais por m³ de concreto são apresentadas nos quadros 3 e 4.

Misturas	a/ag	Cimento (CPII-Z)	CCA natural	CCA moída	Areia	Brita	Água	Adit.
Referência	0,45	407	-	-	735	1014	183	0,49
	0,55	332	-	-	807	1009	183	0,90
	0,65	280	-	-	855	1006	183	1,01
15% CCA natural	0,45	346	61	-	681	1014	181	6,63
	0,55	282	50	-	762	1009	181	5,51
	0,65	238	42	-	819	1006	181	4,71
15% CCA moída	0,45	346	-	61	712	1014	183	1,14
	0,55	282	-	50	787	1009	183	0,90
	0,65	238	-	42	840	1006	183	1,01

Quadro 3 – Materiais por m³ de concreto para o cimento CPII-Z (kg/m³)

Misturas	a/ag	Cimento (CPIV)	CCA natural	CCA moída	Areia	Brita	Água	Adit.
Referência	0,45	401	-	-	725	999	181	1,00
	0,55	328	-	-	797	998	181	0,65
	0,65	280	-	-	855	1006	182	0,28
15% CCA natural	0,45	341	60	-	702	999	181	2,01
	0,55	279	49	-	745	998	181	1,64
	0,65	238	42	-	841	1006	182	0,70
15% CCA moída	0,45	341	-	60	706	999	181	2,01
	0,55	279	-	49	784	998	181	0,39
	0,65	238	-	42	844	1006	182	0,28

Quadro 4 – Materiais por m³ de concreto para o cimento CPIV (kg/m³)

4.4 Ordem de colocação dos materiais na betoneira

Foi realizado um estudo experimental desenvolvido anteriormente pelos autores, Pedrozo (2008), Hoppe (2008), Meira (2009) e Cezar (2011) para determinar a melhor ordem de colocação dos materiais, assim como o tempo de mistura ideal para se atingir a trabalhabilidade desejada, com o menor consumo de superplastificante.

Os melhores resultados foram aplicados nos traços definitivos e estão apresentados no quadro 5, iguais ao procedimento adotado na fase II deste projeto, conforme descrito nas dissertações acima citadas.

Traço	Ordem/ Tempo	Materiais						Tempo de mistura
		Cimento	CCA	Brita	Areia	Água	Aditivo	
R	Ordem	2º	-	1º	4º	1º	3º	10min
	Tempo	2min	-	2min	4min	2min	2min	
M15	Ordem	2º	2º	1º	4º	1º	3º	10min
	Tempo	2min	2min	2min	4min	2min	2min	
N15	Ordem	3º	1º	1º	4º	2º	2º	15min
	Tempo	2min	2min	2min	9min	2min	2min	

Quadro 5 – Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira

4.5 Moldagem de corpos de prova de concreto e procedimento de cura úmida

Utilizou-se a equação 1, proposta por Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997), para evitar as variações do parâmetro temperatura do concreto. O objetivo foi manter a temperatura do concreto constante, independentemente da temperatura ambiente, devido às grandes variações térmicas que ocorrem na cidade de Santa Maria, RS. A correção foi feita através da temperatura da água em função da temperatura ambiente e dos materiais. Para isso, aqueceu-se ou resfriou-se a água de amassamento com o objetivo de manter a temperatura do concreto aproximadamente em $19 \pm 2^\circ\text{C}$ (ver Figura 31). Abaixo, equação 1:

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.M_a}{0,22.(M_m + M_c) + M_a}$$

Onde:

T – Temperatura da massa de concreto (°F)

T_m – Temperatura dos agregados (°F)

T_c – Temperatura do cimento (°F)

T_a – Temperatura da água (°F)

M_m – Massa dos agregados (kg)

M_c – Massa de cimento (kg)

M_a – Massa de água (kg)



Figura 31 – Controle de temperatura do concreto

A consistência do concreto foi determinada de acordo com o ensaio de abatimento do tronco de cone (NM67/1998), conforme figura 32.



Figura 32 – Abatimento do concreto

As moldagens dos corpos de prova foram realizadas de acordo com a norma NBR 5738/2003 em fôrmas metálicas de 10 x 20 cm, e os adensamentos foram efetuados através de mesa vibratória em duas camadas (Figura 33).



Figura 33 – Adensamento dos corpos de prova em mesa vibratória

Posteriormente, os CPs foram desmoldados (Figura 34) e acondicionados em câmara úmida (figura 35) sob temperatura em $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade $> 95\%$, onde permaneceram até a data dos ensaios.



Figura 34 Desmoldagem após as primeiras 24 horas após a mistura



Figura 35 – Corpos de prova curando na câmara úmida

4.6 Ensaio realizados

Na sequência, serão descritas as metodologias dos ensaios que foram realizados nas datas determinadas. Os ensaios são: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

4.6.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial (Figura 36) foram realizados de acordo com a NBR 5739/2007, no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM. Foram moldados três corpos de prova por idade, cilíndricos de 10 x 20 cm, capeados com enxofre e ensaiados em prensa hidráulica nas idades de 28 e 91 dias.



Figura 36 – Ensaio de compressão axial

Os resultados apresentados representam a média aritmética de três determinações de cada traço, com desvio relativo máximo de 10%. Quando esse desvio era maior, foram utilizadas as médias de dois valores.

4.6.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 7222/1994, e seguiu-se a mesma sequência de moldagem e acondicionamento em câmara úmida e efetuado o ensaio nas idades de 28 e 91 dias. Os resultados apresentados representam a média aritmética de três determinações de cada traço, com desvio relativo máximo de 10%. Quando esse desvio era maior, foi utilizada a média de dois valores.

De acordo com a norma NBR 7222/1994 (ABNT, 2010, p. 1), o ensaio, apresentado na figura 37, consiste em:

Colocar o corpo de prova, repousando ao longo de uma geratriz sobre o prato da máquina de compressão. Colocar entre os pratos e o corpo de prova em ensaio, duas tiras de madeira, isentas de defeitos, de comprimento igual ao da geratriz do corpo de prova. Em seguida, é aplicada uma leve compressão para manter estável a posição do cp. A carga é aplicada com velocidade constante de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, até a ruptura do corpo de prova.



Figura 37 – Ensaio de compressão diametral

4.6.3 Módulo de elasticidade

Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados de acordo com a NBR 8522/2008. Para isso, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, capeados com enxofre e ensaiados na idade de 28 dias.

Para a determinação do módulo de elasticidade, primeiramente determina-se a resistência por compressão axial; em seguida, outro Cp é conectado ao compressômetro mecânico com resolução mínima de 0,001mm e é levado à prensa, aplicando um carregamento básico de 0,5 Mpa (/s) e aumentado a carga à velocidade de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, até a tensão de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto (σ_{c2}). Essa tensão é mantida por 60 segundos e depois reduzida à tensão básica à mesma velocidade. Realizam-se mais dois ciclos de cargas no último ciclo de pré-carga e no período de 60 segundos sob a tensão (σ_{c2}), quando são registradas as deformações específicas lidas (ϵ_{c1}), tomadas em, no máximo, 30 segundos. Após, o cp é carregado novamente com a tensão σ_{c2} e são registradas as deformações (ϵ_{c2}), tomadas em, no máximo, 30 segundos. Abaixo, esquema de carregamentos do ensaio (Figura 38).

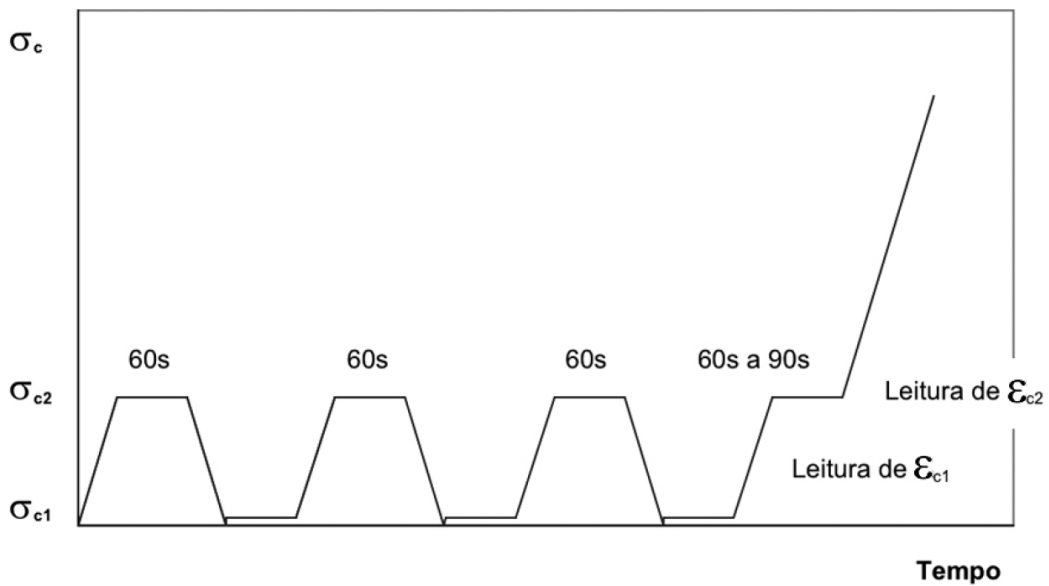


Figura 38 – Ciclos de carregamento e descarregamento para determinação de E_{ci} segundo a ABNT NBR 8522:2008

Após a realização de todas as leituras, o corpo de prova é levado à ruptura (Figura 39). Se a resistência efetiva (f_{cef}) à compressão diferir de f_c em mais de 20%, os resultados do cp são descartados. Os resultados apresentados representam a média de três determinações de cada traço, com desvio relativo máximo de 10%.



Figura 39 – Ensaio de módulo de elasticidade

5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados, analisados e discutidos todos os resultados dos três ensaios realizados nesta pesquisa. A partir desses valores, várias questões serão respondidas através de análises em igualdade de relação água/aglomerante, idade e mistura. Devido ao fato de as estruturas de concreto serem projetadas a partir da resistência característica à compressão (f_{ck}), os ensaios de resistência à compressão axial foram analisados também em igualdade de resistência, pois, para concretos contendo adições minerais, a alteração da microestrutura dos poros em igualdade de relação a/ag se modifica quando alterada a quantidade de adição mineral.

5.1 Resistência à compressão axial

Os resultados apresentados representam a média aritmética de três determinações de cada traço, com desvio relativo máximo de 10%. Quando esse desvio era maior, foram utilizadas as médias de dois valores ou o resultado de maior valor. Os valores apresentados no quadro 6 são para ensaios de resistência por compressão axial, aos 28 e 91 dias com cimentos CII-Z e CIII-V.

Misturas	a/ag	CII-Z (MPa)			CIII-V (MPa)			CII-Z/CIII-V	
		28 dias	91 dias	91/28	28 dias	91 dias	91/28	28	91
REF	0,45	40,8	48,0	1,20	33,8	42,5	1,26	1,21	1,13
	0,55	30,5	38,5	1,26	24,8	28,6*	1,15	1,23	1,35
	0,65	28,7	30,5	1,06	21,1	27,0	1,28	1,36	1,13
CCAN	0,45	37,8	40,5	1,07	31,6	35,0	1,11	1,20	1,16
	0,55	29,2	33,0	1,13	22,8	30,5	1,34	1,28	1,08
	0,65	23,2	26,6	1,15	15,5	24,6	1,59	1,50	1,08
CCAM	0,45	39,3	44,6	1,13	35,0	41,5	1,19	1,12	1,07
	0,55	31,3	37,8	1,21	24,5	30,0	1,22	1,28	1,26
	0,65	24,7	29,5	1,19	16,5	24,6	1,49	1,50	1,20
CCAN/CCAM	0,45	0,96	0,91	-	0,90	0,84	-		
	0,55	0,93	0,87	-	0,93	1,02	-		
	0,65	0,94	0,90	-	0,94	1,00	-		
CCAN/REF	0,45	0,93	0,84	-	0,93	0,82	-		
	0,55	0,96	0,86	-	0,92	1,07	-		
	0,65	0,81	0,87	-	0,73	0,91	-		

* Resultado atípico

Quadro 6 – Resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias, cimentos CII-Z e CIII-V

Os resultados do Quadro 6 apresentaram coeficientes de determinação r^2 muito fortes calculados a partir das equações de Abrams entre as relações a/ag e respectivas resistência à compressão, situando-se para o cimento CII-Z entre 0,91 e 1,00 e, para o CIII entre 0,88 e 1,00, para as 28 e 91 dias. Os dois valores menores correspondem ao concreto referência.

As figuras 40 e 41 demonstram os resultados em forma de gráfico, para uma melhor interpretação.

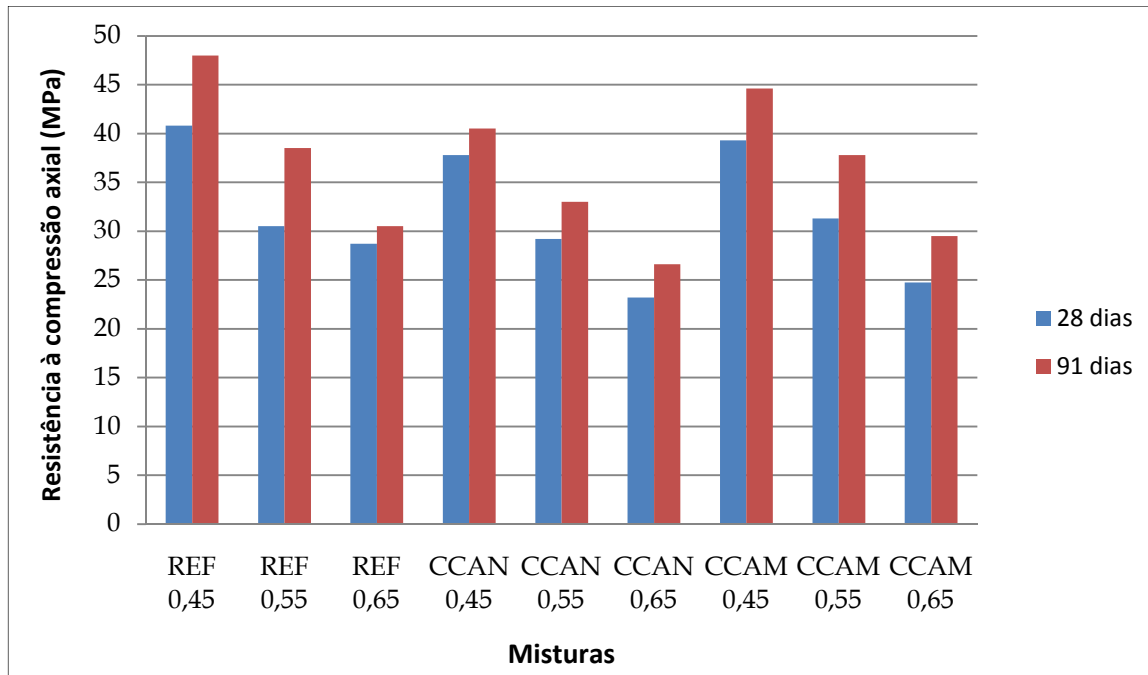


Figura 40 – Resistência à compressão axial CII-Z (28 dias x 91 dias)

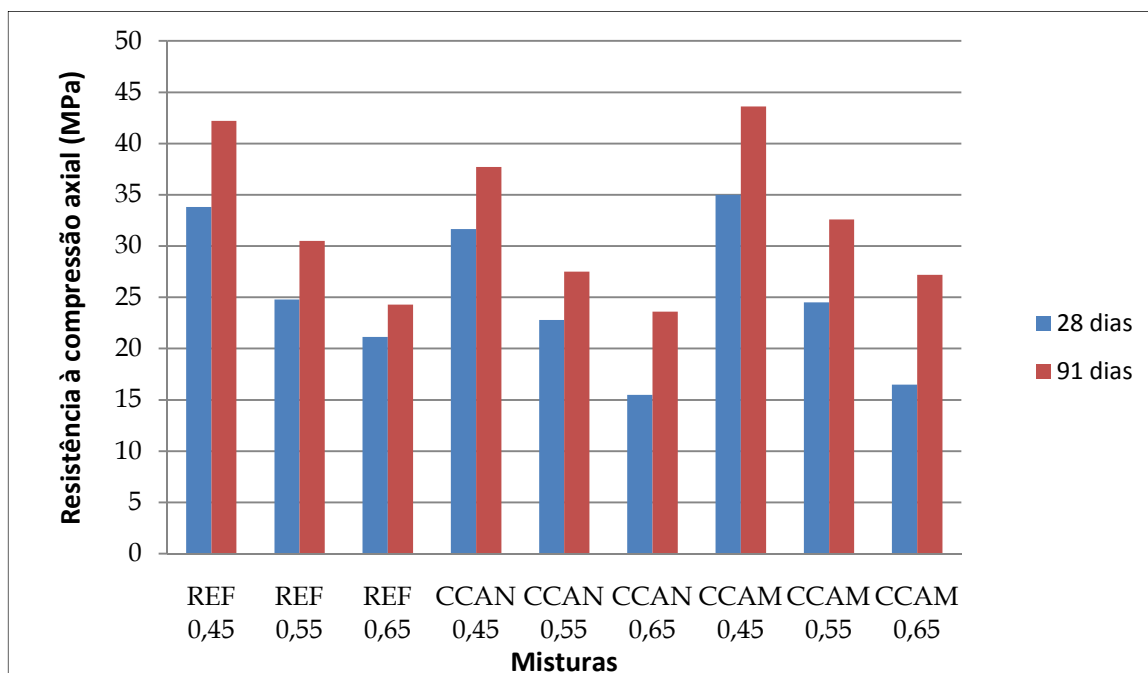


Figura 41 – Resistência à compressão axial CIII (28 dias x 91 dias)

5.2 Análise em igualdade de relação a/ag

Observa-se que, com o aumento da relação água/aglomerante, ocorre um decréscimo na resistência à compressão axial para todos os traços. Na relação a/ag de 0,45 C_{PII-Z}, todos os traços obtiveram resistências inferiores ao referênciã. Os corpos de prova com adição de cinza moída apresentaram valores 3,8% superiores aos com cinza natural, porém, aos 91 dias, a moagem apresentou maior ganho de resistência (9,2%) em relação à natural.

Na relação a/ag 0,55 C_{PII-Z}, aos 28 dias, somente o CCAM obteve resultado superior ao referênciã (2,6%), enquanto que, aos 91 dias, todas ficaram abaixo do referênciã. Como a quantidade de sílica amorfa da cinza é mais elevada quando comparada ao cimento empregado e esta apresenta maior pozolanicidade e finura, acaba resultando em um ganho de durabilidade, devido a uma maior compacidade da pasta e aumento da formação de C-S-H.

Com a relação água/aglomerante de 0,65 C_{PII-Z}, aos 28 dias, verifica-se que todos os concretos com adição mineral ficaram abaixo do referênciã. Aos 91 dias, os concretos com adição não superaram o referênciã em compressão resistência axial, mas ficaram com resultados muito próximos (9,4%). A causa deste comportamento pode estar relacionada com o tempo maior para reagir e formar o C-S-H, tendo em vista que a maior porosidade afasta os grãos uns dos outros.

Pode-se observar que, com o aumento da relação água/aglomerante, ocorre um decréscimo na resistência à compressão axial para todos os traços. Os corpos de prova com adição de cinza moída apresentaram valores 9,6% em média superiores aos com cinza natural. Aos 91 dias, a moagem apresentou ganho de resistência ainda maior, com 15,7% em relação aos concretos com cinza natural.

Com a relação água/aglomerante de 0,65 (Figura 40), aos 28 dias, observa-se que todos os concretos com adição mineral ficaram abaixo do referênciã. Apenas os concretos com adição de CCAM, na idade de 91 dias, superaram o referênciã na resistência à compressão axial.

Observa-se que todos os traços apresentaram um aumento de resistência quando se usa cinza moída, sendo que, aos 28 dias, para relações água/aglomerante 0,55 e 0,65, os concretos com adição de cinza natural tiveram uma queda percentual de 6,6% em média na sua resistência quando comparados aos concretos com cinza moída. Conforme mostra a figura 39, de 28 para 91 dias, no cimento C_{PII-Z}, as resistências à compressão axial cresceram entre 6 e 26% e de 11 a 59% para o C_{PIV}. Devido ao alto teor de pozolana contido no C_{PIV} (até 50%), esta variação era esperada, pois as reações ocorrem com mais intensidade em prazo maior que 28 dias. Isto

demonstra que o cimento CII-Z apresenta maiores resistências relativas aos 28 dias do que aos 91 dias em relação ao CIII. Tal característica foi verificada pelas relações entre as resistências de CII-Z/CIII que se situaram entre 20 e 50% mais altas aos 28 dias e entre 7 e 35% aos 91 dias.

Os concretos com cimento CII-Z apresentaram para as misturas CCAN resistências entre -4 e -13% em relação às CCAM e -16 e +2% para o CIII, com os melhores resultados na idade de 91 dias para o CIII. Em relação ao concreto de referência, os traços CCAN se mantiveram entre -4 e -19% para CII-Z e -27 a +7% para CIII. Os maiores decréscimos foram observados aos 28 dias no cimento CII-Z, nas relações a/ag mais elevadas, devido à maior porosidade.

Observa-se, ainda, que os resultados de resistência à compressão axial em igualdade de relação a/ag para o cimento CII-Z são maiores do que o CIII, porque o primeiro apresenta maior teor de clínquer e, logo, de C_3S , o que determina níveis de resistências maiores do que o cimento pozolânico, que apresenta somente cerca de 50% de clínquer, o que retarda a evolução da resistência. Conforme mostra a figura 41, aos 91 dias, os acréscimos de resistência para o CIII são maiores do que o CII-Z.

5.3 Análise em igualdade de resistência à compressão

A maneira mais adequada para interpretar os resultados de resistência à compressão é por igualdade de resistência, pois as estruturas de concreto são calculadas a partir da resistência característica à compressão (f_{ck}), e desta obtém-se a resistência de dosagem (f_{cj}) adotando-se os valores de dispersão dos resultados conforme a normalização. O quadro 7, a seguir, apresenta os resultados da resistência à compressão axial, classificados em igualdade de níveis de resistência conforme a ABNT NBR 8953:1992 e ABNT NBR 12655:2006, para as classes C15, C20, C25 e C30. Foram adotados os desvios padrão de dosagem, conforme o tipo de controle da NBR 12655, ou seja, $s_d = 5,5$ MPa para as classes C15 e C20 e $s_d = 4,0$ MPa para as classes C25 e C30. As resistências de dosagem aos 28 dias foram calculadas conforme a referida norma: $f_{c28} = f_{ck} + 1,65 s_d$. A partir das equações de Abrams obtidas do quadro 6, que relacionam $a/ag \times f_{c28}$, obteve-se por interpolação estatística, para cada traço, as relações a/ag que correspondem às respectivas resistências de dosagem constantes do quadro 7, respeitando-se os valores mínimos

da NBR 12655 para cada uma das classes de resistências tanto para as relações a/ag quanto para o consumo mínimo de material cimentício.

Classe	S _d MPa	f _{c28} MPa	Misturas	Cimento CII-Z					Cimento CIII-V				
				a/ag	f _{c91} MPa	CP kg/m ³	MC kg/m ³	Agrev.	a/ag	f _{c91} MPa	CP kg/m ³	MC kg/m ³	Agrev.
C15	5,5	24,0	REF	0,65*	30,5	280	-	I	0,58	29,5	312	-	II
			CCAN	0,64	27,2	242	285	I	0,54	30,5	285	335	III
			CCAM	0,65*	29,8	238	280	I	0,56	30,0	275	323	II
C20	5,5	29,0	REF	0,62	32,7	294	-	I	0,50	35,6	361	-	III
			CCAN	0,55	32,9	282	332	II	0,48	33,7	320	376	III
			CCAM	0,58	35,0	267	314	II	0,51	34,3	301	354	III
C25	4,0	31,6	REF	0,57	37,7	320	-	II	0,47	38,5	384	-	III
			CCAN	0,52	35,1	299	352	III	0,45	35,2	341	401	IV
			CCAM	0,55	37,3	282	332	II	0,48	37,4	320	376	IV
C30	4,0	36,6	REF	0,55	38,5	332	-	III	0,42	44,3	428	-	IV
			CCAN	0,46	39,7	338	398	III	0,40	37,8	382	449	IV
			CCAM	0,48	42,5	324	381	III	0,43	43,8	356	419	IV

Quadro 7 – Dados de resistência à compressão axial para classes C15 a C30 para os cimentos CII-Z e CIII-V

Sendo: S_d = desvio padrão de dosagem; CP = cimento Portland; MC = materiais cimentícios; Agrev. = agressividade.

* Valor máximo adotado para o nível I de agressividade ambiental.

Por serem as mais correntes em concretos misturados em obra, a ABNT NBR 12655:2006 adotou desvios padrão de dosagem de 5,5 MPa (condição B) para as classes C15 e C20; em concretos misturados em centrais dosadoras, 4,0 MPa (Condição A) para as classes C25 e C30, por serem fabricados em locais com maior controle da mistura. Pode-se considerar que o uso de CCAN em centrais de concreto é de difícil implementação, entretanto, nesta mesma fase IV deste projeto foram testadas misturas de concreto dosado em central misturadora de fábrica de blocos de concreto para alvenaria e pavimentos, com bons resultados mecânicos. Certamente que o emprego da CCAN em centrais dosadoras exigiria alguma modificação nos equipamentos para possibilitar o seu uso.

No quadro 7 é evidenciado que as misturas com cimento CII-Z apresentaram relações a/ag superiores às com CIII-V e, conseqüentemente, um consumo de cimento de material cimentício menor em igualdade de f_{c28}. O oposto aconteceu para os cimentos CIII-V que, por este motivo, tiveram classe de agressividade ambiental maior do que o CII-Z, o que representa maior durabilidade frente aos agentes agressivos.

No quadro 7 é explicitado que as misturas com CCAN obtiveram resistência à compressão axial menores se comparadas com CCAM, o que se deve ao fato das primeiras possuírem partículas maiores e reatividade química menor do que a cinza moída. Esta diferença de resistência entre as misturas não foi relevante, ficando aproximadamente 10% inferior e tendo consumo de cimento em torno de 20 kg/m³ maior em comparação com as misturas CCAM, para os dois tipos de cimentos, embora para o cimento CII-Z as diferenças nos consumos tenham sido ligeiramente menores do que para o CII-V.

5.4 Resultados desta pesquisa (CII-Z) x Meira (2009) (CII-F)

Considerando-se que a dissertação de Meira (2009) estudou os mesmos materiais e traços, com as mesmas propriedades mecânicas deste trabalho, com exceção do cimento por ela empregado (CII-F) é pertinente realizar-se a comparação entre os resultados dos seus ensaios com os do cimento CII-Z, embora com tipo e teores distintos de adições minerais. Os quadros 8 e 9 e as figuras 42 e 43 apresentam os resultados obtidos para a resistência à compressão axial nesta pesquisa, comparados com os dados de Meira (2009) e relativos à fase II desta mesma pesquisa,

Misturas	Esta pesquisa CII-Z (MPa)	Meira (2009) CII-F (MPa)	Diferença %
REF 0,45	40,8	42,2	-3,3
REF 0,55	30,5	30,5	0
REF 0,65	28,7	24,3	15,3
CCAN 0,45	37,8	37,7	0,3
CCAN 0,55	29,2	27,5	5,8
CCAN 0,65	23,2	23,6	-1,7
CCAM 0,45	39,3	43,6	-9,9
CCAM 0,55	31,3	32,6	-4,0
CCAM 0,65	24,7	27,2	9,0

Quadro 8 – Resistência à compressão axial CII-Z x CII-F (28 dias)

Misturas	Esta pesquisa CII-Z (MPa)	Meira (2009) CII-F (MPa)	Diferença %
REF 0,45	48	43	10,4
REF 0,55	38,5	33,6	12,7
REF 0,65	30,5	28	8,2
CCAN 0,45	40,5	50,5	-19,8
CCAN 0,55	33	33,8	-2,4
CCAN 0,65	26,6	31,9	-16,4
CCAM 0,45	44,6	53,1	-16,0
CCAM 0,55	37,8	40,4	-6,4
CCAM 0,65	29,5	33,4	-11,7

Quadro 9 – Resistência à compressão axial CII-Z x CII-F (91 dias)

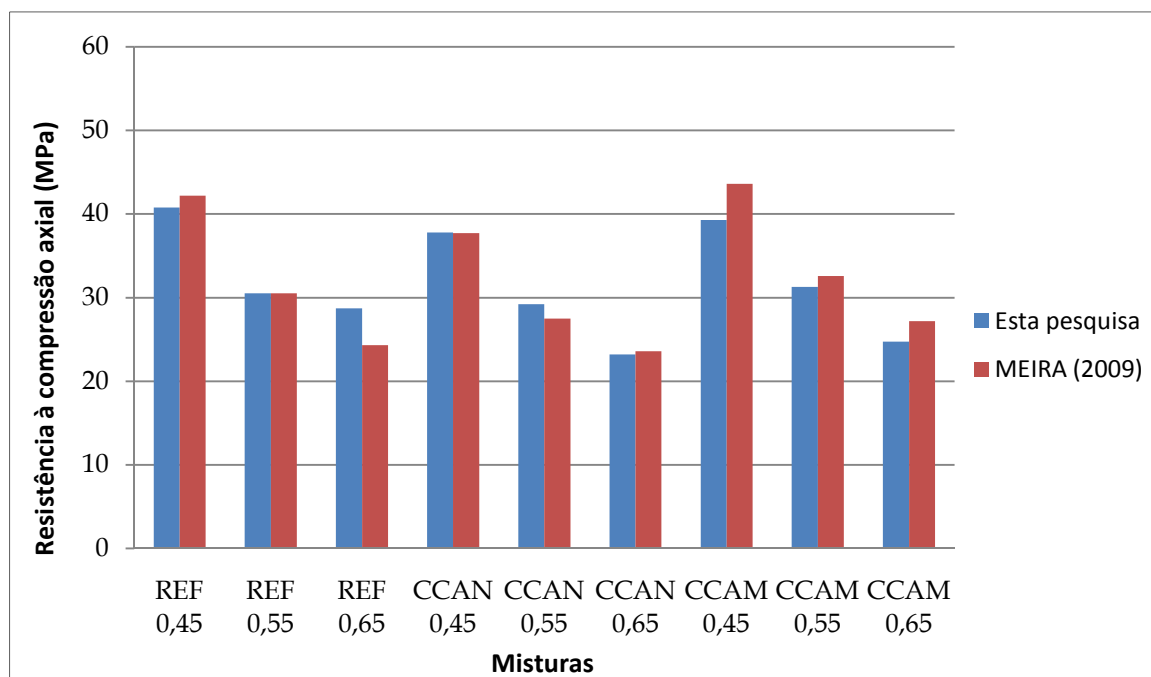


Figura 42 – Resistência à compressão axial aos 28 dias. Esta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)

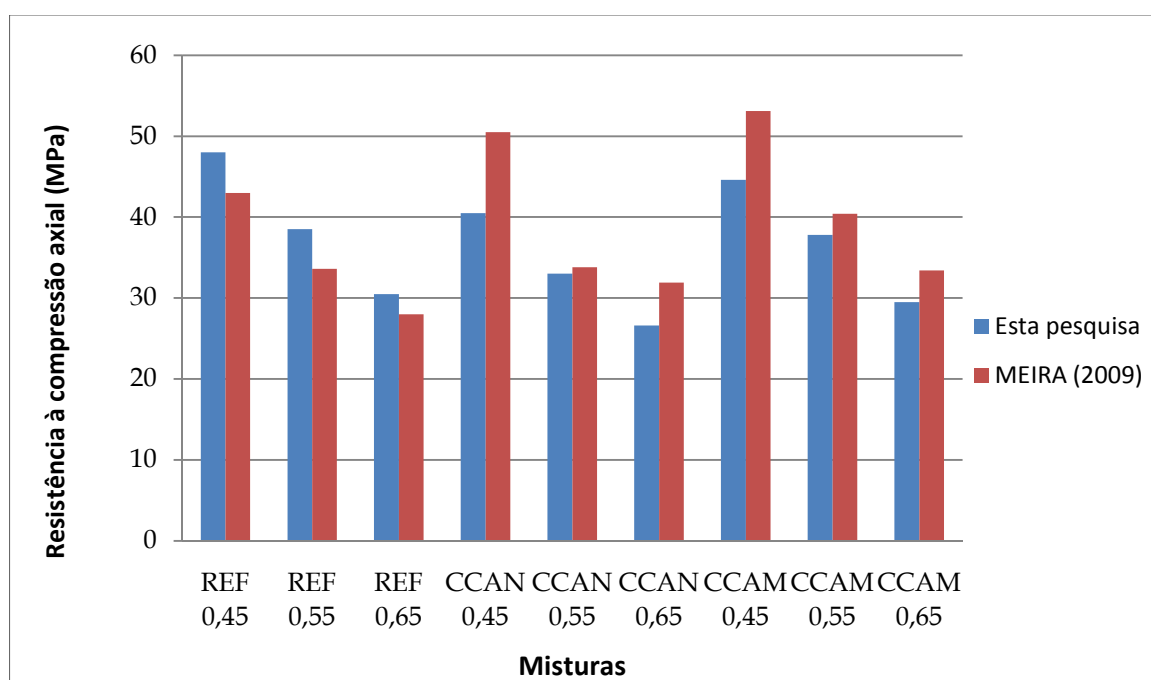


Figura 43 – Resistência à compressão axial aos 91 dias. Esta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)

Devido ao fato de o cimento CPII-F ter entre 6 e 10% de fíler e o cimento CPII-Z ter entre 6 e 24% de adições (fíler + pozolana), sendo que o fíler é praticamente inerte em termos

químicos, tendo apenas efeito de nucleação e a pozolana ter reatividade com a cal, os resultados de compressão axial desta pesquisa obtiveram, aos 28 dias, valores de resistências 1,3% superiores em média aos de Meira (2009); aos 91 dias de idade, os valores foram -4,6%. Tal redução foi observada nas misturas que continham substituição por cinza de casca de arroz.

Referente às diferenças entre os concretos com adição de cinza natural e os concretos com cinza moída, é sabido que, nos concretos com adição de cinza natural, os resultados geralmente são inferiores aos com cinza moída. A diferença entre eles aumentou nesta pesquisa e diminuiu na pesquisa de Meira (2009) de 28 para 91 dias, sendo que nesta pesquisa aumentou respectivamente de 5,7 para 10,5%, devido às reações pozolânicas maiores no concreto com cinza moída; nos dados de Meira (2009), a diferença mitigou de 14,1% aos 28 dias para 8,5% aos 91 dias.

Em suma, pode-se afirmar que os resultados obtidos com os cimentos CII-Z nesta pesquisa e CII-F na de Meira (2009) são semelhantes e não existem diferenças muito significativas entre ambos, de -9,9 a 15,3% aos 28 dias e de -19,8 a 10,4% aos 91 dias. Observa-se também que as diferenças são maiores para a idade de 91 dias, ao contrário do que poderia ser esperado, visto que o cimento CII-Z possui pozolana, enquanto o CII-F não, o que induziria o primeiro a ter níveis mais elevados de resistências em idades mais avançadas. Tendo em vista o tempo decorrido entre os dois ensaios (três anos), diferenças de lotes de materiais, técnicas de ensaios ou, provavelmente, algum problema ocorrido durante a cura (falta de umidade na câmara úmida durante certo tempo) podem ter influenciado para que, aos 91 dias de idade, o primeiro cimento diminuísse o valor da resistência à compressão axial.

5.5 Resistência à tração por compressão diametral

Para se obter os resultados de compressão diametral, seguiu-se a mesma sequência de moldagem e acondicionamento em câmara úmida que os ensaiados à compressão axial. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 7222/1994 e efetuado nas idades de 28 e 91 dias. Os resultados encontrados representam a média aritmética de três determinações de cada traço, com desvio relativo máximo de 10%. Quando esse desvio era maior, foi utilizada a média de dois valores ou o resultado de maior valor.

Os resultados do quadro 10 apresentaram coeficientes de determinação r^2 muito fortes calculados a partir das equações de Abrams entre as relações a/a_g e respectivas resistência à

compressão, situando-se para o cimento CII-Z entre 0,89 e 0,99 e, para o CIII-V entre 0,85 e 1,00, para as 28 e 91 dias. Os dois valores menores correspondem ao concreto com CCAM. Abaixo, no quadro 10 e figuras 44 e 45, estão apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral para os cimentos CII-Z e CIII-V aos 28 e 91 dias e a relação entre os dois tipos. Vale observar que, aos 28 dias, as resistências para o cimento CIII-V foram menores em relação ao CII-Z; posteriormente, aos 91 dias, ocorreu a recuperação devido à ação pozolânica, tal como ocorreu com a resistência à compressão axial.

Misturas	a/ag	CII-Z (MPa)			CIII-V (MPa)			CII-Z/CIII-V	
		28 dias	91 dias	91/28	28 dias	91 dias	91/28	28	91
REF	0,45	3,67	3,76	1,02	3,39	3,78	1,12	1,08	0,99
	0,55	3,29	3,38	1,03	2,87	3,31	1,15	1,15	1,02
	0,65	2,72	2,86	1,05	2,50	3,10	1,24	1,09	0,92
CCAN	0,45	3,39	3,87	1,14	3,21	3,59	1,12	1,06	1,08
	0,55	2,96	3,25	1,10	2,36	3,28	1,40	1,25	0,99
	0,65	2,54	2,69	1,06	1,84	2,57	1,40	1,38	1,05
CCAM	0,45	3,76	4,01	1,07	3,30	4,45	1,35	1,14	0,90
	0,55	3,53	3,86	1,09	2,97	3,26	1,10	1,19	1,18
	0,65	2,90	3,07	1,06	1,86	2,51	1,35	1,56	1,22
CCAN/CCAM	0,45	0,90	0,97		0,97	0,80			
	0,55	0,84	0,84		0,80	1,00			
	0,65	0,88	0,88		0,99	1,02			
CCAN/REF	0,45	0,92	0,92		0,95	0,95			
	0,55	0,90	0,90		0,82	0,99			
	0,65	0,93	0,93		0,74	0,83			

Quadro 10 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 91 dias, cimentos CII-Z e CIII-V

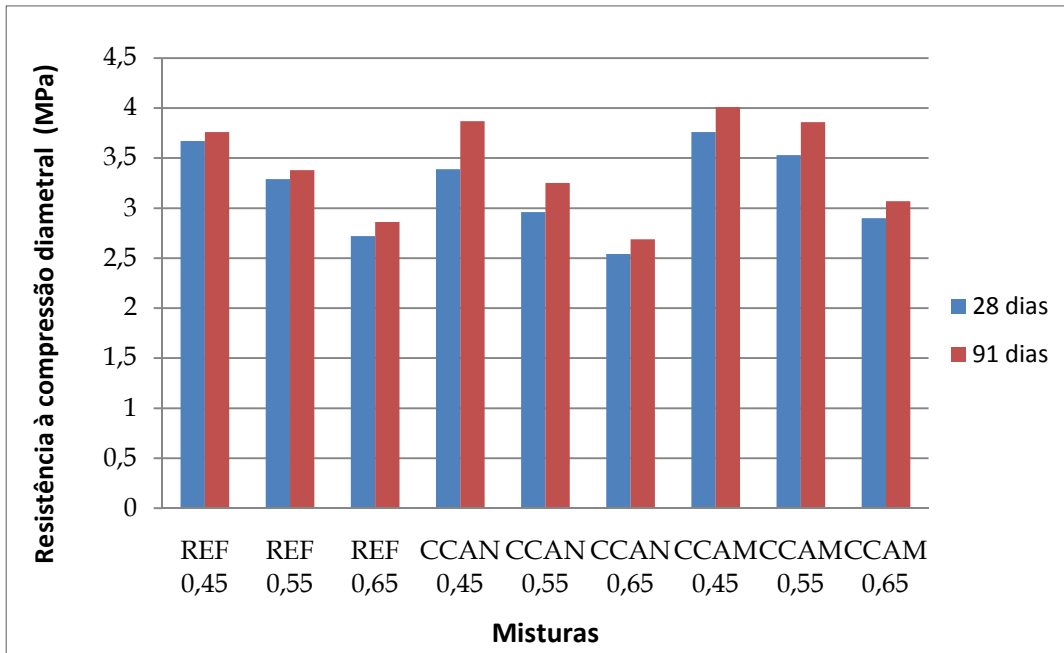


Figura 44 – Resistência à compressão diametral CII-Z (28 dias x 91 dias)

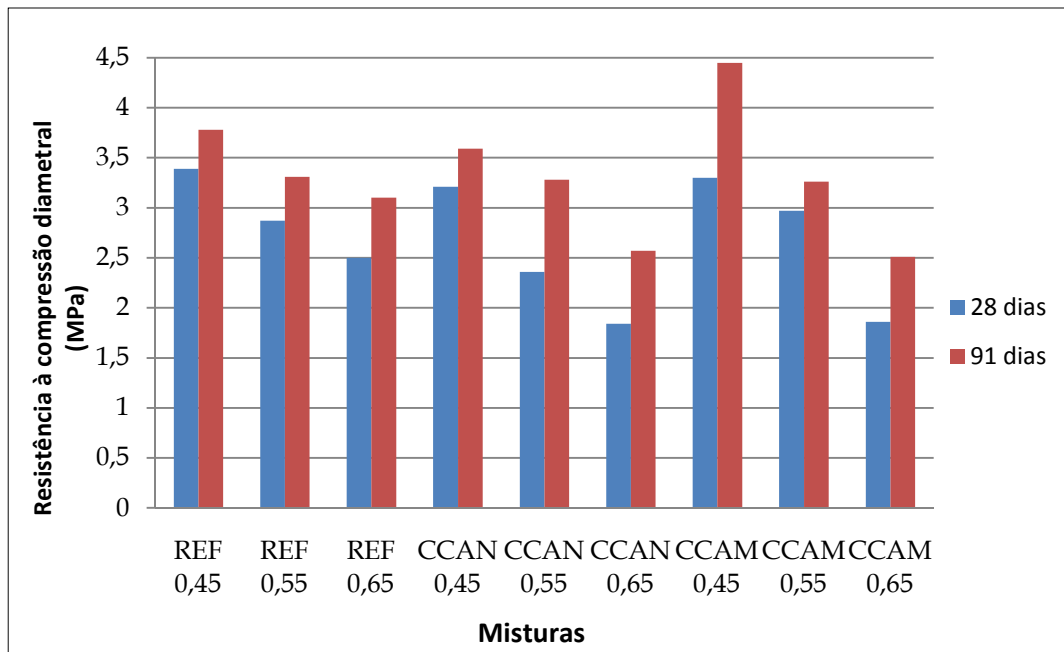


Figura 45 – Resistência à compressão diametral CIV (28 dias x 91 dias)

5.6 Análise em igualdade de relação a/ag

Para o cimento CPII-Z, as misturas CCAN apresentaram resistências à tração por compressão diametral entre -10 e -16% aos 28 dias e -3 e 16% aos 91 dias em relação às CCAM em igualdade de relação a/ag. Para o cimento CPIV, as diferenças foram respectivamente entre -1 e -20% aos 28 dias e -20 a +2% aos 91 dias. Novamente, observa-se o aumento de resistência em longo prazo do cimento CPIV devido à progressão das reações pozolânicas mesmo em uma cinza de menor finura.

Observa-se pela figura 44 que, aos 28 dias, os traços com CCAM superaram o referênciã para todas as relações água/aglomerante. Porém, para os traços com CCAN, todos foram inferiores ao referênciã (entre -8 e -10%), o que já era esperado devido à menor pozolanicidade da cinza natural e ao maior número de vazios na pasta.

Na figura 44, visualiza-se também que, aos 91 dias, os concretos ensaiados apresentaram resultados superiores aos de referênciã, com exceção do CCAN 0,55 e CCAN 0,65. Aos 91 dias, houve um ganho na resistência do concreto com CCAM, quando comparado com o concreto de referênciã. Porém, para o estudo apresentado, observou-se que o referênciã foi superado pelo CCAM em todas as relações a/ag e CCAN 0,45 aos 91 dias.

Já na figura 45, visualiza-se que, aos 91 dias, os concretos com cimento CPIV apresentaram resultados inferiores aos de referênciã, com exceção do CCAM 0,45. Aos 91 dias, houve um ganho na resistência do CCAM 0,45 quando comparado com o concreto de referênciã.

Foi verificado que todos os traços apresentaram um aumento de resistência quando se usa cinza moída. Esse efeito é provavelmente provocado porque, nas primeiras idades, a cinza moída, por apresentar maior área específica, reage mais rapidamente, porém com o passar do tempo a cinza natural reage e essa diferença diminui.

5.7 Análise em igualdade de resistência à compressão diametral

O quadro 11, a seguir, mostra a resistência à tração por compressão diametral para as classes de resistência à compressão C15 a C30. À medida que aumenta o nível de resistência à compressão, a tração incrementa em maior valor, devido à menor porosidade e principalmente à maior aderência que existe na zona de transição pasta-agregado.

Procedeu-se do mesmo modo para os cálculos realizados à compressão axial para encontrar-se os valores das resistências à compressão diametral, a partir das relações a/ag calculadas. Adotaram-se os mesmos valores de f_{c28} para cada classe de concreto e, a partir dessas relações a/ag assim determinadas, a partir das equações de Abrams que relacionam a/ag x f_{td28} , encontrou-se as resistências à tração para cada traço por interpolação estatística.

Classe	f_{c28} MPa	Misturas	Cimento CII-Z				Cimento CIII		
			f_{ct28} MPa	f_{ct91} MPa	$f_{ct28}/$ f_{c28}	NBR 6118 $f_{ct,sp28}$	f_{ct28} MPa	f_{ct91} MPa	$f_{ct28}/$ f_{c28}
C15	24,0	REF	2,75	2,88	0,12	2,03	2,75	3,27	0,11
		CCAN	2,59	2,75	0,10		2,43	3,20	0,10
		CCAM	2,97	3,18	0,12		2,64	3,17	0,11
C20	29,0	REF	2,89	3,02	0,10	2,45	3,11	3,54	0,11
		CCAN	2,94	3,23	0,10		2,91	3,50	0,10
		CCAM	3,27	3,51	0,11		3,00	3,66	0,10
C25	31,6	REF	3,13	3,24	0,10	2,85	3,27	3,66	0,10
		CCAN	3,07	3,41	0,10		3,21	3,66	0,10
		CCAM	3,40	3,65	0,11		3,21	4,03	0,10
C30	36,6	REF	3,23	3,33	0,09	3,19	3,59	3,90	0,10
		CCAN	3,35	3,81	0,09		3,83	3,91	0,11
		CCAM	3,70	3,98	0,10		3,57	4,78	0,10

Quadro 11 – Resistência à tração por compressão diametral para classes C15 a C30 para CII-Z e CIII

Para o cimento CII-Z, as relações $f_{ctCCAN28}/f_{ctREF28}$ variaram de -6 a +4% e as relações $f_{ctCCAN28}/f_{ctCCAM28}$ de -10 a -13%, aos 28 dias. Para o cimento CIII, essas relações foram respectivamente de -6 a +7% e de -8 a +7%. Observa-se que essas diferenças são pequenas e as resistências à tração por compressão diametral podem ser consideradas similares.

Para o cimento CII-Z, o desempenho da CCAN foi menor do que com o cimento CIII; conseqüentemente, foi necessário rebaixar as relações a/ag , para atingir os níveis de resistência à compressão axial e também os de resistência à tração por compressão diametral.

Todas as misturas ensaiadas apresentaram valores acima daqueles indicados pela norma ABNT NBR 6118:2007 que relacionam o f_{ck} com a resistência à tração por compressão diametral, por meio da equação: $f_{ct,sp}=0,33f_{ck}^{2/3}$. As relações (f_{ct28}/f_{c28}) aos 28 dias permaneceram no intervalo 0,09 e 0,12, dentro da faixa de variação 0,08 a 0,14 citada por Mindess, Young e Darwin (2003).

5.8 Resistência à compressão axial x resistência à tração por compressão diametral

Na sequência, nas figuras 46 e 47, aos 28 e 91 dias, para o cimento CII-Z, pode-se observar o comparativo entre os resultados de compressão axial e diametral. Nota-se que o aumento da resistência à compressão diametral do concreto com CCAN 91 dias foi o suficiente para se aproximar da resistência da amostra de CCAM. As duas misturas apresentaram acréscimos entre 2 e 20% de 28 para 91 dias.

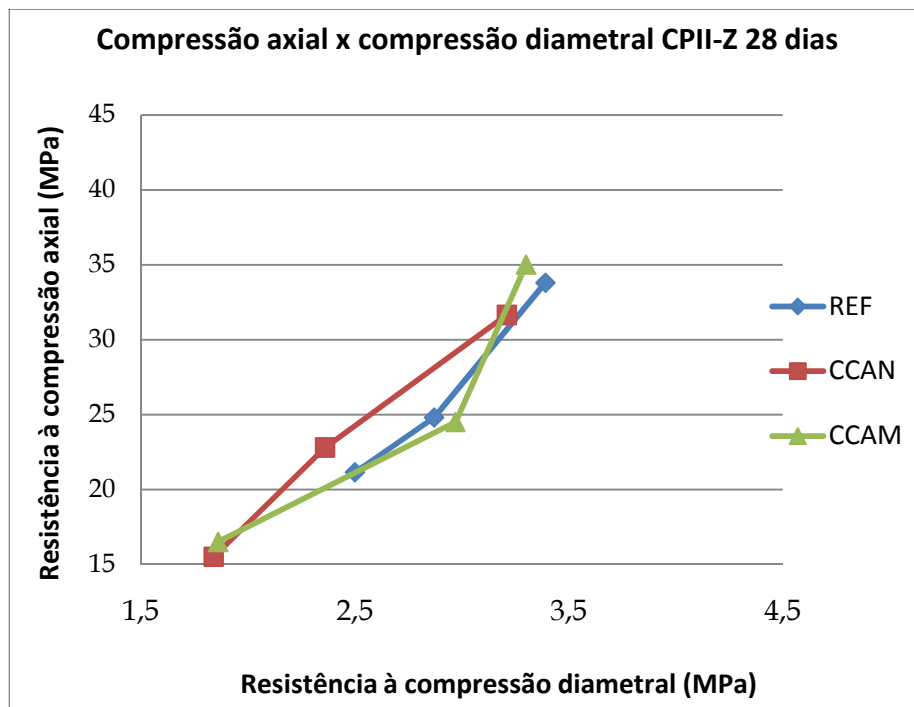


Figura 46 – Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral, aos 28 dias, para CII-Z

Observa-se pela figura 46 que, aos 28 dias, os traços com CCAM superaram o traço de referência somente na relação água/aglomerante 0,55, ficando muito próximo na relação 0,45. Porém, para os traços com CCAN, todos foram inferiores ao referência, o que já era esperado, devido à menor pozolanicidade da cinza natural e ao maior número de vazios na pasta.

Na figura 47, visualiza-se que, aos 91 dias, os concretos ensaiados com CCAM apresentaram resultados superiores aos de referência, e concretos com CCAN apresentaram resultados inferiores. Aos 91 dias, houve um ganho na resistência do concreto com CCAM,

quando comparado com o concreto de referência. Porém, para o estudo apresentado, verificou-se que o referência foi superado em compressão diametral pelo CCAM em todas as relações a/ag.

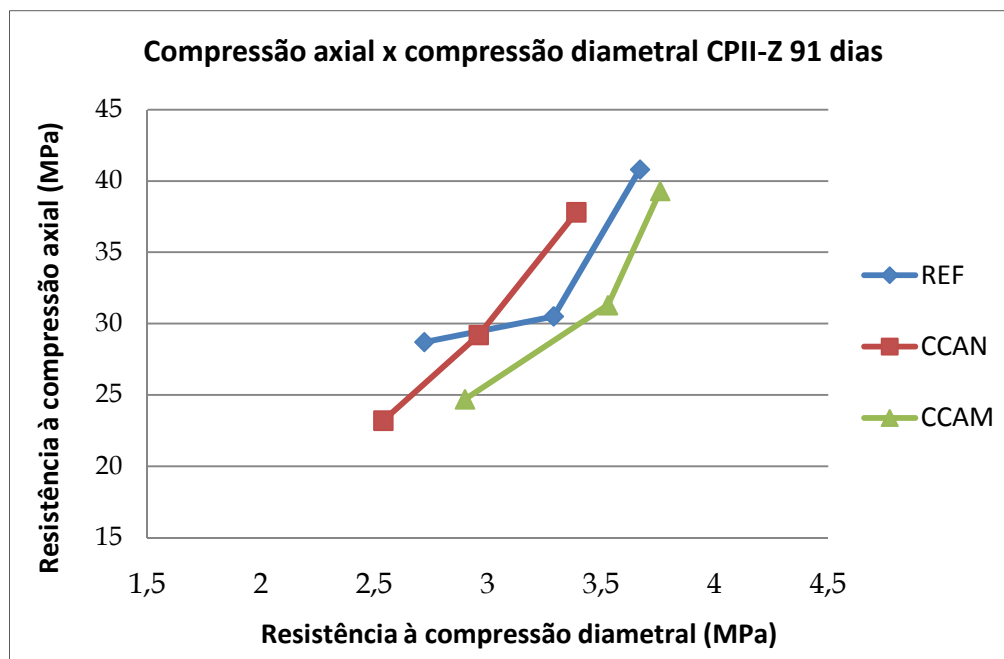


Figura 47 – Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral, aos 91 dias, para CII-Z

Nas figuras 47 e 48, aos 28 e 91 dias, para o cimento CII-Z, pode-se observar o comparativo entre os resultados de compressão axial e diametral. Nota-se que a variação das resistências à compressão diametral aos 28 dias foi maior (entre 2,43 e 3,83 MPa) em relação à compressão axial (15 a 35 MPa); aos 91 dias, a compressão diametral variou (3,17 a 4,78 MPa) devido às reações pozolânicas em idades mais avançadas. Conforme a figura 48, aos 28 dias, o traço com CCAM superou o referência somente na relação a/ag 0,55. Para os traços com CCAN, todos foram inferiores ao referência, devido à menor pozolanicidade da cinza natural frente à moída e ao maior número de vazios na pasta.

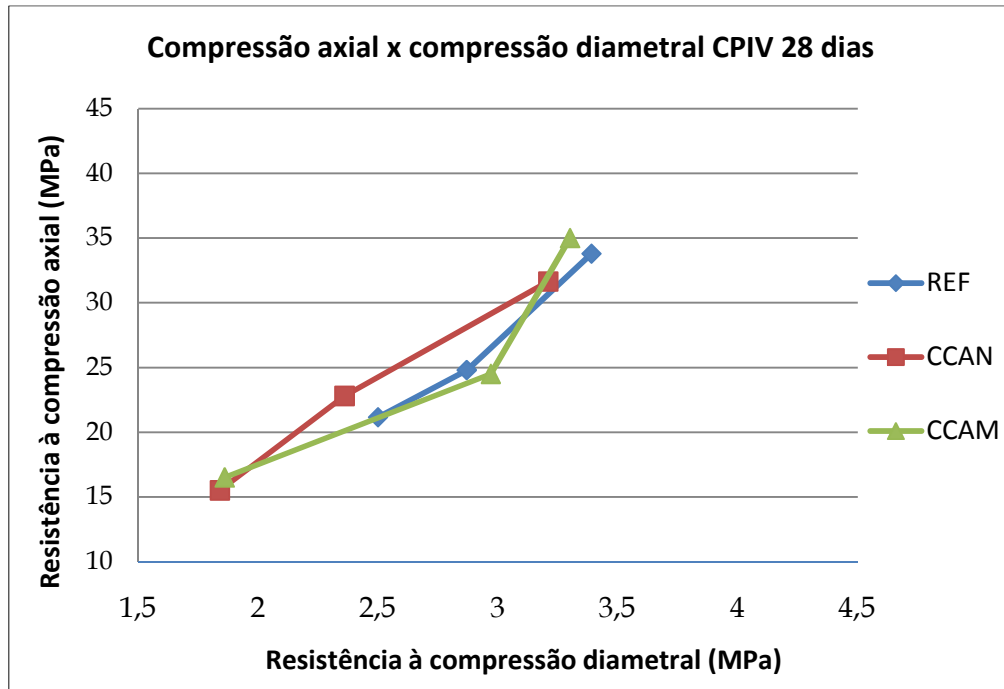


Figura 48 – Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral aos 28 dias

Na figura 49, aos 91 dias, visualiza-se que os concretos com cimento CPIV apresentaram resultados inferiores aos de referência, exceto CCAM 0,45. Aos 91 dias, quando comparado com o concreto de referência, houve um aumento na resistência do CCAM 0,45.

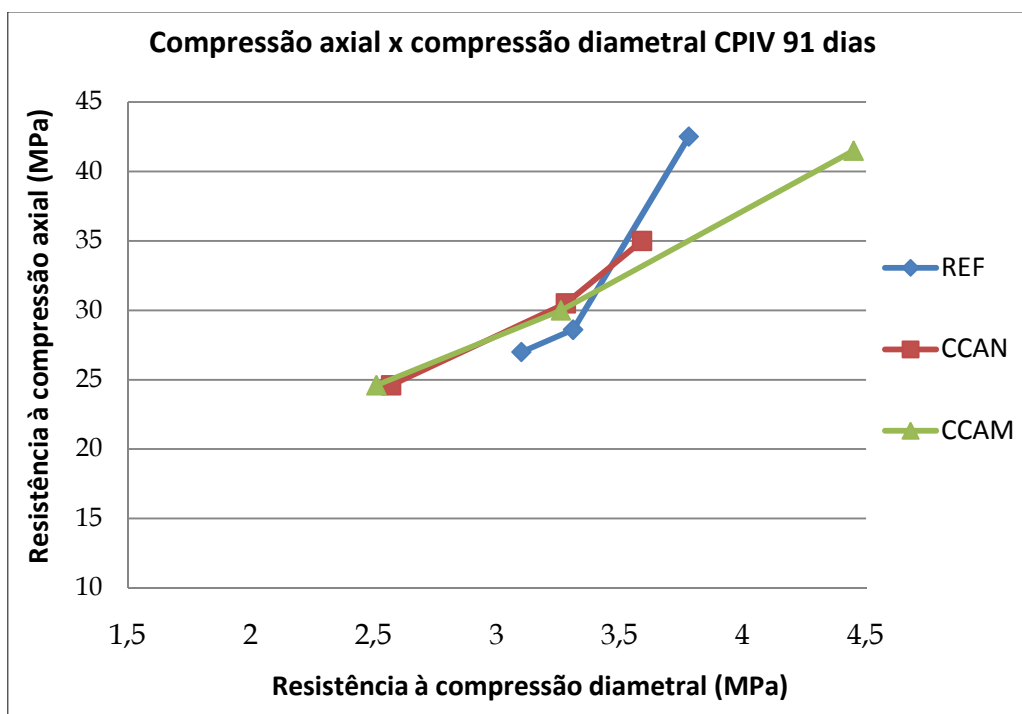


Figura 49 – Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral aos 91 dias

Foi constatado que, quando a cinza moída foi utilizada, todos os traços apresentaram aumento de resistência. Tal comportamento é explicado devido à maior área específica da cinza moída, que nas primeiras idades reage mais rapidamente que a natural. Com idades mais avançadas, a cinza natural reage e diminui a diferença de resistência.

Aos 28 dias, a resistência à compressão diametral da maioria dos valores obtidos pelos traços com CCAN foi inferior à resistência pelos traços de referência.

Aos 91 dias, o comportamento dos traços com CCAM foi pouco superior quando se analisa a resistência principalmente para as relações a/ag menores, onde o aumento de resistência com relação ao traço de referência foi maior.

Enquanto a resistência cresceu pouco quando comparada com a idade de 28 dias, a maioria dos traços com CCA apresentou crescimento para 91 dias. Este comportamento se explica pelo maior desenvolvimento das reações pozolânicas, que foram possibilitadas pelo teor de sílica das partículas de CCA que reagiram como o CH produzido pelas reações de hidratação do cimento e também pela finura da CCAM que potencializou tais reações, além de atuar com material mais fino, possibilitando maior nucleação de cristais.

Os traços com CCAN tiveram uma recuperação de resistência aos 91 dias e também apresentaram valores bem próximos aos dos traços com CCAM. Tal comportamento foi possível graças à reação pozolânica.

5.9 Resultados desta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)

Em igualdade ao que foi apresentado no item 5.4, a seguir serão comparados os ensaios desta pesquisa com os de Meira (2009), com os mesmos agregados. O tipo de cimento utilizado pela autora na época foi o CPII-F.

Os comparativos estão demonstrados nos quadros 12 e 13, e, para um melhor entendimento, os resultados estão em forma de gráfico nas figuras 50 e 51.

Diametral CII-Z 28 dias	Esta pesquisa (MPa)	Meira (2009) (MPa)	Diferença %
REF 0,45	3,67	3,52	4,08
REF 0,55	3,29	3,21	2,43
REF 0,65	2,72	2,62	3,67
CCAN 0,45	3,39	3,24	4,42
CCAN 0,55	2,96	2,69	9,12
CCAN 0,65	2,54	1,89	25,59
CCAM 0,45	3,76	4,03	-6,69
CCAM 0,55	3,53	3,49	1,13
CCAM 0,65	2,9	2,76	4,82

Quadro 12 – Compressão diametral CII-Z x CII-F (28 dias)

Diametral CII-Z 91 dias	Esta pesquisa (MPa)	Meira (2009) (MPa)	Diferença %
REF 0,45	3,76	3,74	0,53
REF 0,55	3,38	3,6	-5,55
REF 0,65	2,86	3,23	-11,45
CCAN 0,45	3,87	3,57	7,75
CCAN 0,55	3,25	2,93	9,84
CCAN 0,65	2,69	2,47	8,17
CCAM 0,45	4,01	4,11	-2,43
CCAM 0,55	3,86	3,69	4,4
CCAM 0,65	3,07	2,9	5,53

Quadro 13 – Compressão diametral CII-Z x CII-F (91 dias)

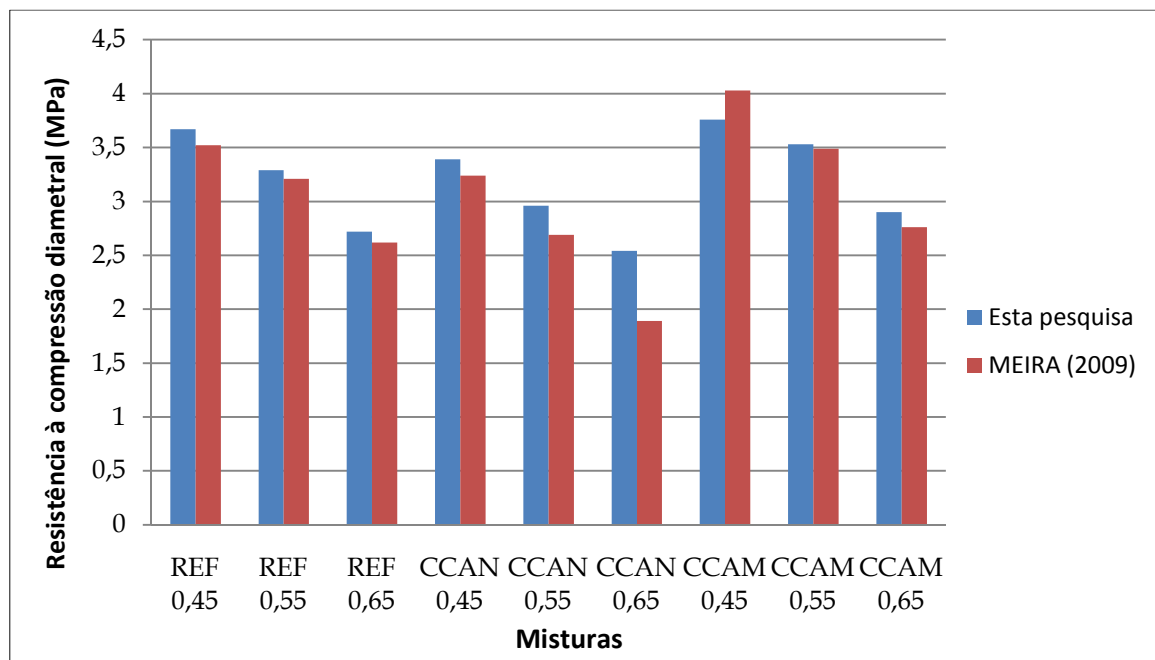


Figura 50 – Resistência à compressão diametral aos 28 dias. Esta pesquisa (CII-Z) x Meira (2009) (CII-F)

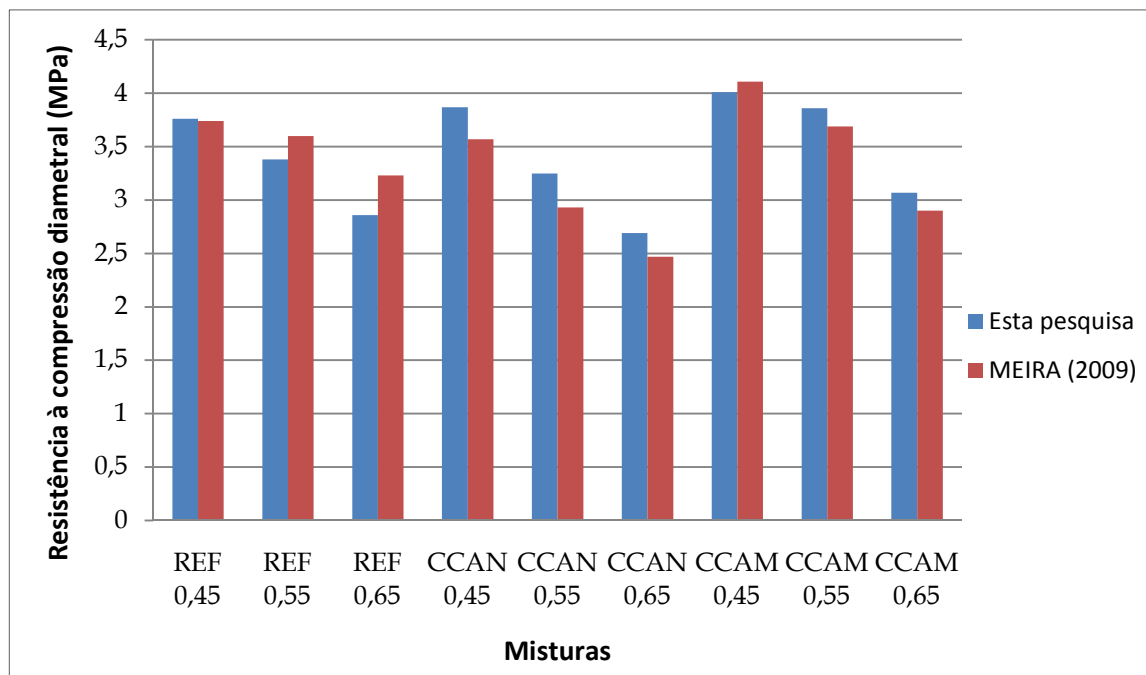


Figura 51 – Resistência à compressão diametral aos 91 dias. Esta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)

Devido ao fato de o cimento CPII-F ter entre 6 e 10% de fíler e o cimento CPII-Z ter entre 6 e 24% de adições (fíler + pozolana), sendo que o fíler é praticamente inerte em termos químicos, tendo apenas efeito de nucleação e a pozolana ter reatividade com a cal, os resultados desta pesquisa obtiveram, aos 28 dias, valores de resistências 5,4% superiores em média aos de Meira (2009); aos 91 dias de idade, 1,86% de vantagem sobre a mesma com o uso de CPII-F.

Referente às diferenças entre os concretos com adição de cinza natural e os concretos com cinza moída, é sabido que, nos concretos com adição de cinza natural, os resultados geralmente são inferiores aos com cinza moída. A diferença entre eles caiu nas duas pesquisas de 28 para 91 dias, sendo que, nesta pesquisa, regrediu respectivamente de 12,69 para 10,1%; nos dados de Meira (2009), a diferença mitigou de 24% aos 28 dias para 16% aos 91 dias.

Foi observado que, conforme a resistência à compressão axial aumenta, a resistência à tração por compressão diametral também acompanha essa evolução, devido à menor porosidade e principalmente à maior aderência que existe na zona de transição pasta-agregado.

5. 10 Módulo de elasticidade

Os ensaios do módulo de elasticidade foram realizados conforme a ABNT NBR 8522:2003, plano de carga II (tangente na origem), em corpos de prova de 10 x 20 cm, cujos resultados estão no quadro 14 e na figura 52, para a idade de 28 dias somente. O comportamento dos dados acompanhou os demais ensaios mecânicos anteriores, ou seja, os módulos de elasticidade das misturas com cimento CII-Z foram entre 7 e 25% superiores ao CIIV, enquanto que as misturas com CCA natural ficaram, em relação à moída, entre -15 e +4%, este último somente para a/ag 0,65.

Os resultados do quadro 14 apresentam coeficientes de determinação r^2 muito fortes calculados a partir das equações de Abrams entre as relações a/ag e respectivas resistências à compressão, situando-se para o cimento CII-Z entre 0,88 e 1,00 e, para o CIIV entre 0,84 e 1,00, aos 28 dias.

Mistura	a/ag	CII-Z 28 dias GPa	CIIV 28 dias GPa	CII-Z/CIIV
REF	0,45	37,8	34,3	1,10
	0,55	33,0	28,0	1,18
	0,65	31,3	25,6	1,22
CCAN	0,45	31,6	29,4	1,07
	0,55	28,3	26,0	1,09
	0,65	25,7	23,5	1,09
CCAM	0,45	35,2	34,7	1,01
	0,55	33,5	28,0	1,20
	0,65	28,2	22,5	1,25
CCAN/CCAM	0,45	0,90	0,85	-
	0,55	0,84	0,93	-
	0,65	0,91	1,04	-
CCAN/REF	0,45	0,87	0,82	-
	0,55	0,90	0,88	-
	0,65	0,95	0,81	-

Quadro 14 – Módulo de elasticidade longitudinal aos 28 dias para os cimentos CII-Z e CIIV

5.11 Análise em igualdade de relação a/ag

Observa-se que as misturas de CCAN 0,45 para ambos os cimentos apresentaram módulo de elasticidade inferior se comparado com os de mesma relação a/ag de referência. O mesmo pode-se afirmar dos concretos com CCAN 0,55 e CCAN 0,65. A única mistura com

cinza natural que obteve módulo maior que o de referência foi a mistura com CCAN 0,65 de cimento CPIV. Nas misturas com adição de casca moída, todos apresentaram módulo de elasticidade superior ao concreto de referência, exceto a relação a/ag 0,65 CCAM CPIV, que teve um decréscimo de 12,1%, devido ao tipo de cimento e relação água/aglomerante mais baixa.

Devido à substituição pela pozolana e, conseqüentemente, à existência de um volume maior de pasta, os concretos com cinza natural e moída obtiveram diferenças maiores se comparados ao referência, pois as misturas com CCA possuem teor de agregado menor e, por consequência, deformações ligeiramente maiores, se comparados aos concretos de referência, devido ao menor esqueleto inerte nessas misturas com pozolanas.

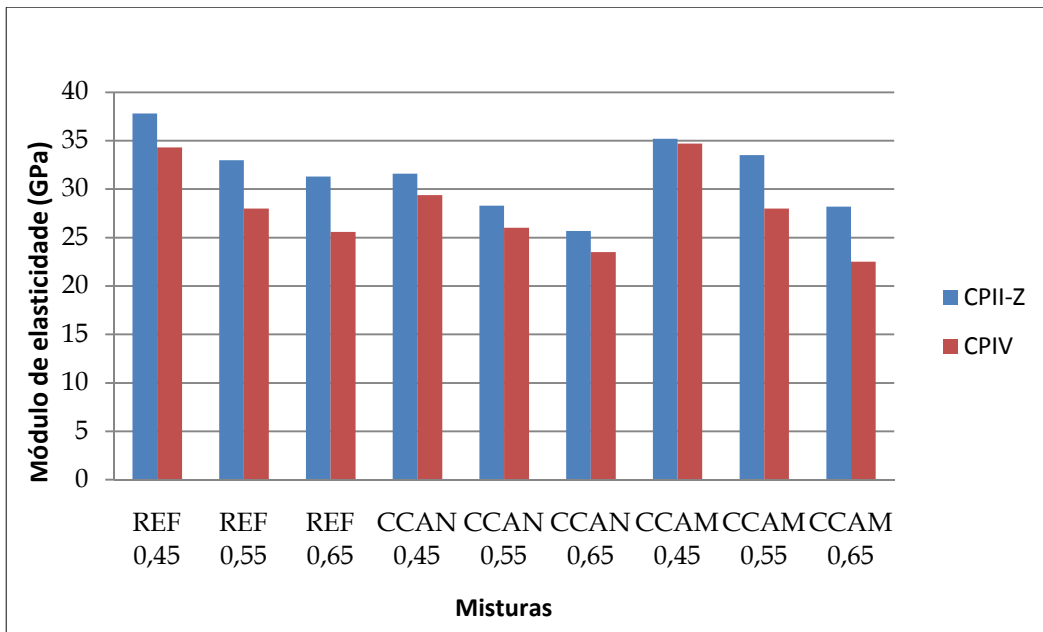


Figura 52 – Módulo de elasticidade longitudinal aos 28 dias para os cimentos CII-Z e CPIV

5.12 Análise em igualdade de resistência à compressão

O quadro 15, a seguir, exibe os valores obtidos para o módulo de elasticidade nas classes C15 a C30, assim como foi observado para as resistências à compressão e tração, cujos resultados com o cimento CII-Z, como nas análises anteriores, são aproximadamente iguais ou

ligeiramente inferiores aos do cimento CPIV. Para o nível C30, o cimento CPIV mostra valores mais elevados, porque as relações a/ag são mais altas para atingir esse nível de resistência, conforme comentado anteriormente. Os valores do quadro 15 para os módulos de elasticidade em igualdade de resistência foram calculados do mesmo modo do que para a resistência à compressão diametral no item 5.7, ou seja, pelo uso das relações a/ag do quadro 7, por meio de interpolação estatística, nas equações de Abrams entre a/ag x E_{c28} .

Classe	f_{c28} MPa	Misturas	Cimento CII-Z				Cimento CPIV	
			E_{c28} GPa	$E_{c28}/$ f_{c28}	ACI 318 E_{c28} - GPa	NBR 6118 E_{c28} - GPa	E_{c28} GPa	$E_{c28}/$ f_{c28}
C15	24,0	REF	30,9	1013	26,5	30,9	27,6	936
		CCAN	25,9	952	25,1	29,2	26,3	862
		CCAM	28,8	966	26,2	30,6	27,0	900
C20	29,0	REF	31,7	969	27,5	32,0	31,1	874
		CCAN	28,3	860	27,6	32,1	28,3	840
		CCAM	31,3	894	28,4	33,1	30,2	880
C25	31,6	REF	33,1	878	29,5	34,4	32,7	849
		CCAN	29,2	832	28,5	33,2	29,3	832
		CCAM	32,3	866	29,3	34,2	32,4	866
C30	36,6	REF	33,7	875	29,8	34,7	35,8	808
		CCAN	31,2	786	30,3	35,3	30,7	812
		CCAM	34,8	819	31,3	36,5	36,8	840

Quadro 15 – Módulo de elasticidade longitudinal, tangente na origem, para classes C15 a C30 para CII-Z e CPIV comparados com ACI 318 e NBR 6118

Devido à menor finura e maior porosidade da pasta e da interface pasta/agregado, os módulos de elasticidade das misturas com CCA natural são menores que os com CCA moída, em sintonia com os resultados dos outros ensaios. Os decréscimos de CCAN em relação à CCAM foram de -10% para o cimento CII-Z e, para as misturas de referência, entre -7 e -16%, sendo respectivamente o maior valor para nível de resistência C15, e o menor, para C30. As diferenças entre os concretos com cinza natural e cinza moída foram de -5% para C15 a -17% para C30 do cimento CPIV em relação ao referência, e de -5% para C15 e -14% para C30.

Para efeito de comparação empregaram-se as equações que relacionam as resistências à compressão e respectivos módulos de elasticidade aos 28 dias das normas do ACI e ABNT. Empregaram-se os valores das resistências f_{c28} do quadro 7, para obter-se os valores de E_{c28} dessas duas normas. As equações que relacionam o módulo de elasticidade longitudinal com a resistência à compressão axial aos 28 dias são respectivamente: $E_c = 4805.f_c^{0,5}$ e $E_c = 5600.f_c^{0,5}$,

segundo as normas ACI 318 (ACI, 2008) e NBR 6118 (ABNT, 2007), sendo que ambas se diferem apenas pelo coeficiente de f_c , que, quando realizado pelo ACI em relação à ABNT, propicia uma diferença de 16% a menos em relação à norma ABNT.

Para o cimento CII-Z, em todas as misturas, os resultados obtidos para E_{c28} são entre -3 e -13% aos da NBR 6118 e entre +3 e +16% aos do ACI 318, conforme dados constantes no quadro 14. Não são apreciáveis as variações de E_{c28} para ambos os cimentos em relação às duas normas.

É importante destacar que as equações citadas são para módulo de elasticidade secante, mas, apesar de as normas oferecerem diferentes denominações para E_c , determinam o módulo tangente inicial, porque, após alguns ciclos de carga-descarga, a curva tensão-deformação das duas tensões (σ_{c1} e σ_{c2}) é praticamente paralela à reta tangente à curva na origem (SHEHATA, 2005).

Ainda é possível analisar, no quadro, a relação entre E_{c28}/f_{c28} , correspondendo ao módulo de elasticidade longitudinal unitário. Esta informação fornece a relação tensão/deformação para cada MPa de resistência à compressão axial. Para os valores de f_{c28} , foram tomados os valores constantes do quadro 14. De C15 para C30, o módulo unitário decresce conforme o aumento do nível de resistência. Tal fato já era esperado, pois é sabido que o crescimento da resistência à compressão axial evolui de forma mais rápida que o módulo de elasticidade. O CII-Z possui valores unitários do módulo maiores que o cimento CIV, pois este último requer relações mais baixas e, conseqüentemente, resistências mais altas. Também pode ser observado que as misturas com cimento CIV possuem teores de pasta maiores do que com cimento CII-Z, pois o CIV possui, em sua composição, até 50% de cinza volante, enquanto o outro possui apenas 14%, o que resulta em menor esqueleto inerte em relação ao CII-Z.

5.13 Compressão axial x módulo de elasticidade

A resistência à compressão axial é uma das propriedades mais importantes do concreto. Geralmente, à medida que se aumenta a resistência, melhoram-se as demais variáveis, como estanqueidade, por exemplo. A partir dos resultados de resistência à compressão, é possível estimar os valores de outras propriedades, como módulo de elasticidade, por isso o interesse nesta comparação. Em indústrias de peças pré-fabricadas de concreto, este é o parâmetro

utilizado para controlar a qualidade do concreto, especialmente o tempo de desmoldagem.

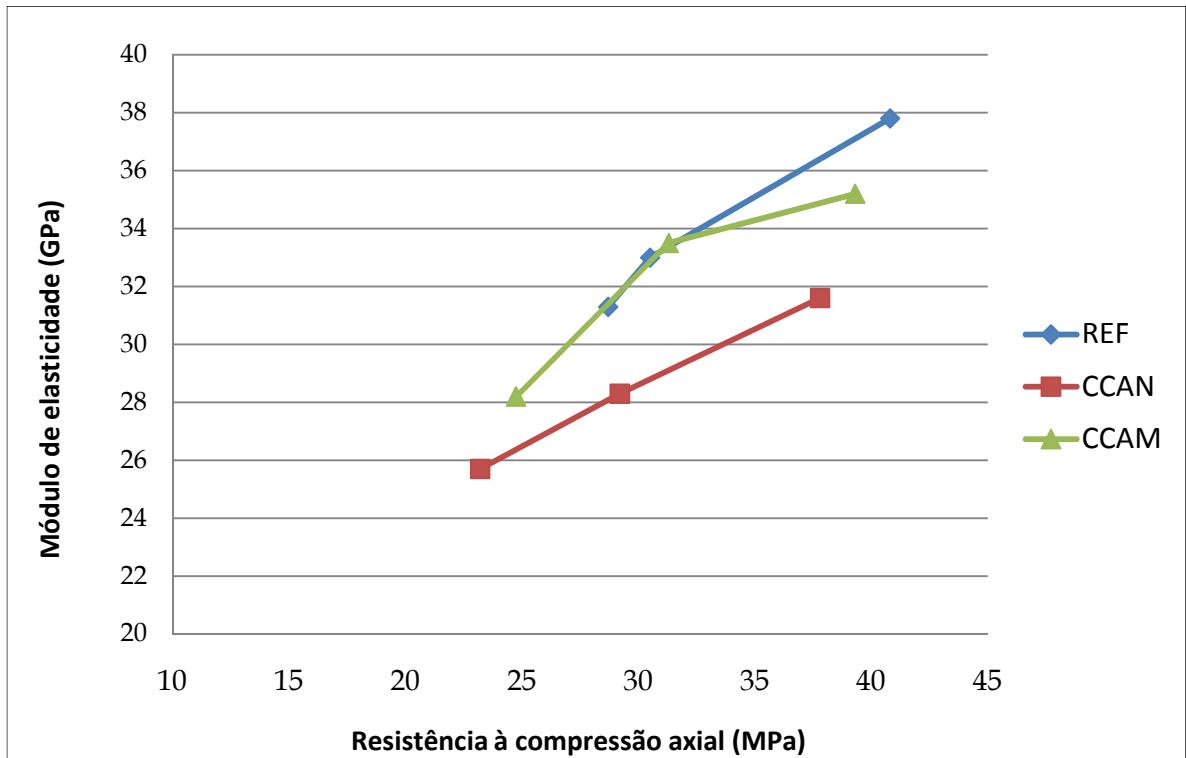


Figura 53 – Compressão axial x módulo de elasticidade CII-Z aos 28 dias

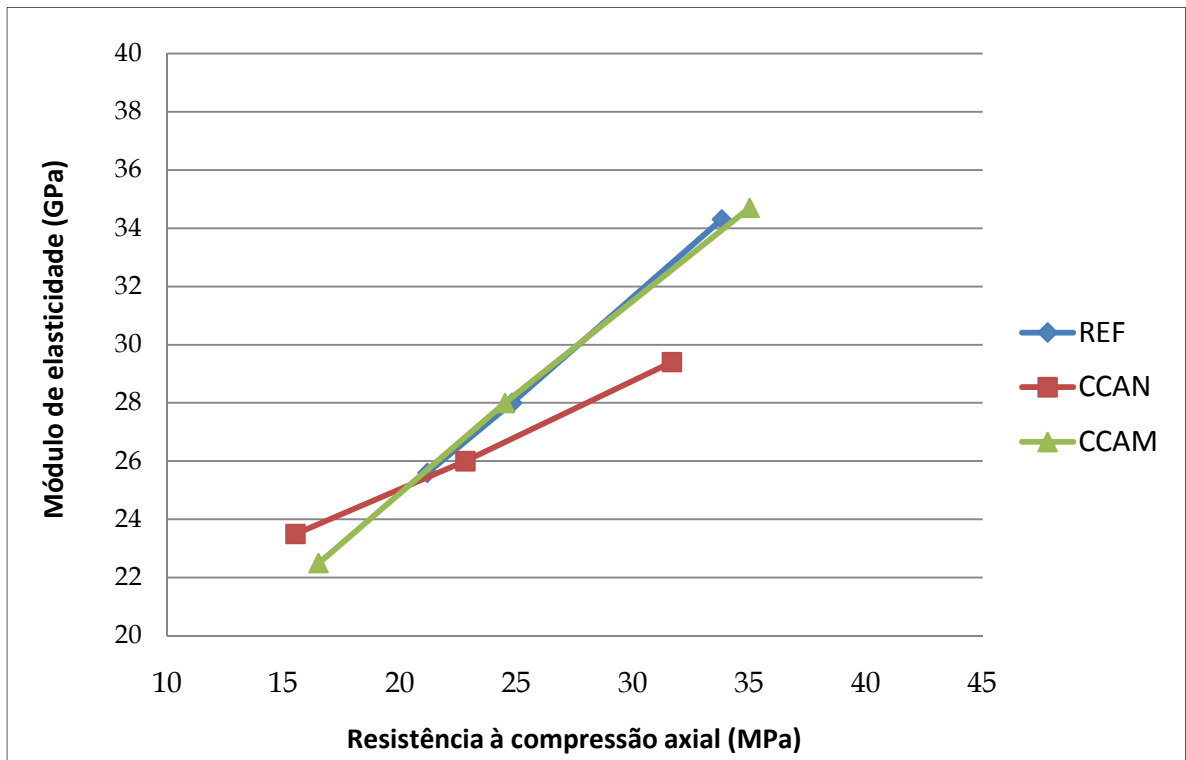


Figura 54 – Compressão axial x módulo de elasticidade CIII aos 28 dias

Nas figuras 53 e 54, observa-se que, com o aumento da resistência à compressão axial, ao mesmo tempo obtém-se a elevação do módulo de elasticidade, devido às características da relação água/aglomerante e do grau de hidratação, pois elas definem as propriedades mecânicas, como resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade e outras.

A resistência por compressão axial *versus* módulo de elasticidade em concretos com adição de cinza de casca de arroz tende a ter ganhos mais lentos de resistência nas idades iniciais, devido à presença da sílica amorfa reagir com a cal com menor velocidade do que as reações de hidratação para formação de C-S-H primário, em detrimento do C-S-H secundário formado pela primeira. Esses efeitos são mais evidentes para a CCAN que apresenta tamanho de grãos maiores que a CCAM, o que retarda mais a progressão das reações pozolânicas. Entretanto, de modo geral, com o passar do tempo, devido ao efeito das reações pozolânicas progredirem, a resistência tende a aumentar. As figuras 53 e 54 apresentam as correlações entre as resistências à compressão axial e os respectivos módulos de elasticidade aos 28 dias, respectivamente para os cimentos CII-Z e CII-V. O mesmo comportamento de $f_{ct} \times f_c$ observa-se para $E_{c28} \times f_{c28}$, onde a amplitude de variação do módulo é menor para o cimento CII-Z do que para o CII-V, em vista da maior densificação da pasta e interface da zona de transição proporcionada pelas pozolanas. Observa-se, também nessas figuras, que as retas com as misturas CCAN possuem menor inclinação, o que significa menor crescimento da resistência à compressão em relação ao módulo de elasticidade, se comparadas com as misturas CCAM e REF, que possuem coeficiente angular mais elevado e traçados bastante coincidentes.

5.14 Resultados desta pesquisa (CII-Z) x Meira (2009) (CII-F)

Em igualdade ao que foi apresentado no item 5.4, a seguir serão comparados os ensaios de módulo de elasticidade desta pesquisa com os de Meira (2009), com os mesmos agregados. O tipo de cimento utilizado pela autora na época foi o CII-F, e os comparativos estão demonstrados no quadro 16 e na figura 55.

Módulo de elasticidade	Esta pesquisa CPII-Z (MPa)	Meira (2009) CPII-F (MPa)	Diferença %
REF 0,45	37,8	37,65	0,4
REF 0,55	33,0	35,40	-6,8
REF 0,65	31,3	29,65	5,3
CCAN 0,45	31,6	28,70	9,2
CCAN 0,55	28,3	26,20	7,4
CCAN 0,65	25,7	19,55	24
CCAM 0,45	35,2	36,15	-2,6
CCAM 0,55	33,5	35,35	-5,2
CCAM 0,65	28,2	34,10	-17,3

Quadro 16 – Módulo de elasticidade aos 28 dias para CPII-Z x CPII-F

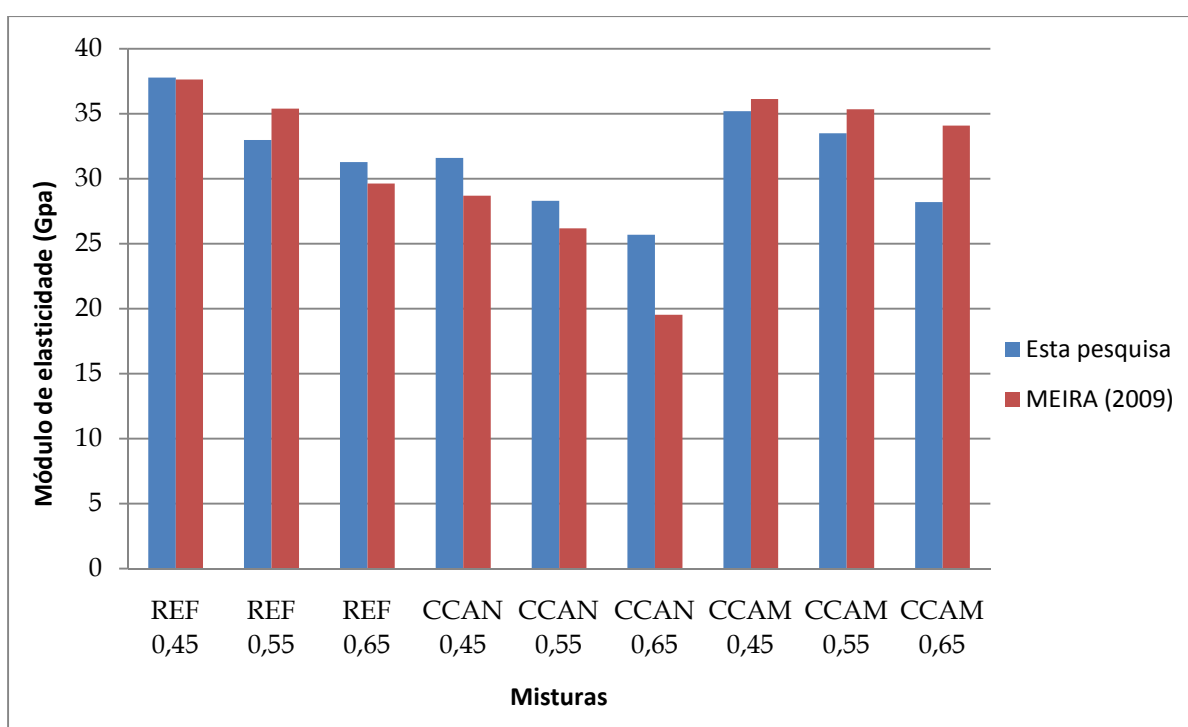


Figura 55 – Módulo de elasticidade aos 28 dias. Esta pesquisa (CPII-Z) x Meira (2009) (CPII-F)

Devido ao fato de o cimento CPII-F ter entre 6 e 10% de fíler e o cimento CPII-Z ter entre 6 e 24% de adições (fíler + pozolana), sendo que o é fíler praticamente inerte em termos químicos tendo apenas efeito de nucleação e a pozolana ter reatividade com a cal, os resultados desta pesquisa obtiveram, aos 28 dias, valores de resistências 1,6% superiores em média aos de Meira (2009), com exceção dos traços CCAM.

Houve um aumento de resistência, nesta pesquisa, de 13,5% para CCAN, comparados com Meira (2009); para CCAM, decréscimo de 8,36% em relação à pesquisa anterior.

Aos 28 dias, o cimento CII-Z obteve decréscimos de E_c das misturas CCAN em relação às CCAM, aproximadamente 10%, enquanto que 9% em média para o cimento CII-F.

Na comparação entre as duas fases desta pesquisa e, conseqüentemente, os dois tipos de cimentos empregados neste projeto, foi observado um comportamento muito semelhante no tocante às resistências mecânicas e ao módulo de elasticidade, de acordo com cada mistura. De modo geral, as misturas do cimento CII-Z com cinza natural apresentaram resistência mecânica e módulo superiores se comparadas com as do CII-F, mas na cinza moída houve o inverso, sendo as diferenças entre cinza moída menores do que as com cinza natural.

Por possuir adição mineral ativa, o cimento CII-Z obtém benefícios, enquanto o cimento CII-F possui fíler em sua composição, sendo inerte como adição. A cinza natural combinada ao cimento CII-Z, que possui pozolana, obteve, em geral, melhor comportamento.

6 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a viabilidade do emprego da cinza de casca de arroz natural e moída (sem beneficiamento), para fins em concreto estrutural, tendo sido comparados dois tipos de cimento (CPII-Z e CPIV) com 15% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz natural e moída, com três relações a/ag: 0,45; 0,55; e 0,65. Para isso, foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão axial, diametral e módulo de elasticidade, para, posteriormente, serem comparados os concretos com CCAN e CCAM em relação ao concreto de referência (sem substituição) e, ainda, compará-los com os resultados obtidos na fase II, onde o cimento utilizado foi o CPII-F.

Aos 28 dias, os resultados de resistência à compressão axial das misturas CCAN para o cimento CPII-Z foram em média 6% inferiores se comparados às misturas CCAM, enquanto que, aos 91 dias de idade, os resultados foram 11% menores em média, o que demonstra desempenho satisfatório. Tendo como comparação os resultados obtidos por Meira (2009) aos 28 dias, as diferenças se situaram entre -10 e +20% e, aos 91 dias, entre -20 e +13% em média. Devido à composição diferente dos cimentos, essas diferenças não foram relevantes.

Para o cimento CPIV, aos 28 e 91 dias, as diferenças entre a resistência à compressão axial entre as misturas CCAN e as CCAM foram em média de -8 e -4%, o que demonstra que estes valores são semelhantes, independentemente da moagem da cinza de casca de arroz.

Para todos os tipos de misturas ensaiadas, em igualdade de resistência, constatou-se que é possível obter concretos com classes de resistência C15 a C30 em consonância com a NBR 12655. Os resultados atestaram que, para o cimento CPII-Z, é possível empregar CCAN em traços de obras para a classe C20, com nível de agressividade II (moderada); e para as classes C25 e C30, com nível III (forte).

Os resultados à compressão axial comprovaram que, para o cimento CPIV, é possível empregar a CCAN em traços de obras de classes C15 e C20 com nível de agressividade ambiental III (forte); para as classes C25 e C30, com nível IV (muito forte). Constata-se, assim, que com o CPIV pode-se utilizar a CCA natural em ambientes mais agressivos que com o cimento CPII-Z, sendo que as relações a/ag para o CPIV devem ser mais baixas para atingir um nível de resistência desejado em relação ao CPII-Z, em igualdade de resistência.

As misturas CCAN em relação às CCAM, com cimento CPII-Z, apresentaram resistência à tração por compressão diametral em igualdade de resistência 10% inferiores, em média, para 28 dias e 8% menores aos 91 dias.

Para o cimento CPIV, constatou-se que as diferenças entre a cinza de casca de arroz natural ou moída não foram significativas, tendo um decréscimo em média de -2 e -7%.

Quanto aos dados de Meira (2009), na fase II do projeto Prosul, comparados a esta pesquisa, o cimento CII-F apresentou acréscimos entre +1 e +9% aos 28 dias e de -11 a +10% em média aos 91 dias, observando-se que a mudança de cimento não trouxe oscilações relevantes para a resistência à tração.

Em relação à previsão do módulo de elasticidade, pela NBR 6118:2007, baseado nos resultados de resistência à compressão axial, as diferenças foram em média de -13% para as misturas CCAN e -6% para CCAM. Observa-se um decréscimo médio de resistência de -11% na comparação CCAN/CCAM para o cimento CII-Z da fase IV em relação ao cimento CII-F, utilizado por Meira (2009).

Pode-se concluir que as propriedades mecânicas obtidas pela CCAN, assim como o módulo de elasticidade longitudinal, tiveram desempenho, em geral, ao redor de 10% menor do que pela CCAM, o que não foi relevante. Os resultados encontrados atestam que é possível o uso em concreto estrutural de cinza de casca de arroz natural, em misturas com os cimentos CII-Z e CPIV, sendo que este último possui vantagens de desempenho com classes de resistências mais altas (classes C25 e C30), atribuindo maior durabilidade às estruturas de concreto com ele confeccionadas.

6.1 Conclusão geral

É possível concluir, a partir dos resultados obtidos, que o emprego de cinza de casca de arroz natural e moída no concreto em 15% de substituição é viável tecnicamente, em relação às propriedades estudadas. Os resultados indicaram que o uso da cinza moída apresenta algumas vantagens em relação à cinza natural, a qual demanda um pouco mais de tempo para ter sua resistência equiparada ou aproximada à moída. Os resultados obtidos evidenciam ligeiro desempenho menor, quase sempre da cinza natural em vista da sua menor finura, entretanto as diferenças constatadas podem ser consideradas não relevantes e/ou compensadas por adequação do traço para o nível de resistência requerido, quando se utiliza a cinza natural.

Dessa maneira, pode-se afirmar que o uso da cinza natural é viável, o que torna este tema relevante atualmente, porque contribui para a maior sustentabilidade da construção civil e a melhor preservação do meio ambiente, tendo em vista ser um resíduo que é, muitas vezes,

descartado sem o devido cuidado. Assim, poderia ser ampliado o seu uso em concreto, com baixo custo, visto que necessitaria apenas do transporte, desde onde é gerado até as obras.

6.2 Sugestões para outras pesquisas

Para o melhor entendimento do uso parcial de cinza de casca de arroz no concreto, sugere-se um estudo com os concretos curados em meio ambiente, para obter um concreto o mais próximo possível da realidade e analisar o desempenho deles sem a cura em câmara úmida. Também seria válido fazer experimentos com cinza de casca de arroz de lugares distantes do Rio Grande do Sul, pois é possível haver diferentes composições químicas e granulométricas nestas regiões, obtendo-se, assim, um conhecimento mais abrangente dos tipos e características de cinzas naturais que podem ser empregadas no concreto estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMATO, G. W. **Casca**: agregando valor ao arroz. Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA). 2002. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20050815133443.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2011.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento**: uso de fibras vegetais. 1991. 99 f. Tese de livre docência. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

AKASAKI, J. L. et al. **Influência da adição de cinza de casca de arroz nos tempos de pega e retração por secagem**, UNESP, PPGEC/2005.

AL-KHALAF, M.; YOUSIFT, H. A. Use of rice husk ash in concrete. **The International Journal of Cement Composites and lightweight Concrete**, v. 6, n. 4, Nov. 1984.

ARQUITETANDO teoria. Disponível em: <<http://www.arquitetandoteoria.blogspot.com.br/Search?updated-max=2010-10-17T15:26:00-07:00&max-results=7>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle e recebimento procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Annual Book of ASTM Standards**. ASTM C618: Standard Specification for Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Philadelphia, 1978.

BARBOSA, M. B. et al. Estudo comparativo das propriedades mecânicas do CAD com resíduos de borracha de pneu e cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, **Anais...** IBRACON, 2006.

CERVO, T. **Influência da finura e do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. 2001. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

CEZAR, D. S. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CIMENTO Org. Disponível em: <http://www.cimento.org/index.php?option=com_content&view=article&id=27&Itemid=30>. Acesso em: 20 dez. 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_11_09_15_03_02_boletim_2o_levantamento_safra_2011_12.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2012.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz com aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FARBAIN, E. M. R. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Rilem, Materials and Structures**, Netherlands, v. 1, n. 1, p. 8, 2008. DOI 10.1617/s11527-008-9437-z, 2008.

COUTINHO, J. S. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. , 2003.

CRUZ, E. B. et al. Pyrometallurgical treatment of BOF slags for the production of construction materials and refining fluxes. In: JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 1., 5 oct. 1999, São Paulo, Brasil; 4 nov. 1999, Sendai, Japão. **Anais...** São Paulo, 1999. p. 99-115.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da cinza de casca de arroz.** 2001. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica.** 1995. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia)–Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, D. C. C.; ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1.

DAY, R. L.; SHI, C. **Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-pozzolan cement pastes: cement and concrete research**, 24: 1495-91, 1994.

DEL CARPIO, J. A. V. **Estudo da influência da adição de cinza de casca de arroz nas propriedades do CCR (concreto compactado com rolo) para seu uso em pavimentos compostos.** Florianópolis. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento.** Santa Maria. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/013/am156e/am156e00.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2011

FAGURY, S. C.; LIBORIO, J. B. L. Algumas considerações na utilização das cinzas de casca de arroz residual de termoeletricas como adição em concretos para estruturas costeiras: durabilidade e resistência. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza. **Anais...** Mendoza, 2004.

FENG, Q. et al. Efficiency of highly active Rice husk ash on the high-strength concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT (ICCC), 11., 2003, Durban, South Africa, **Proceedings...** Durban, South Africa, 2003. 1 CD-ROM.

FRIZZO, B. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade de oxigênio e na absorção capilar do concreto.** 2001. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozzolânico**. 1989. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

HANAI, J. B. Comportamento resistente, ductibilidade e confinamento. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisas e realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. v. 1, p. 165-200.

HARA, N. et al. Hydrothermal Reactivity of Rice Husk Ash and its Use for Calcium Silicate Products. In: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 1989, Trondheim, Norway. **Proceedings...** Cammet, ACI SP-114, 1989. p. 499-516.

HASPARYK, N. P. et al. Estudo da influência da cinza de casca de arroz amorfa nas propriedades do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45., 2003, Espírito Santo. **Anais...** Espírito Santo: IBRACON, 2003.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

HIGGINS, R. A. **Propriedades e estruturas dos materiais em engenharia**. São Paulo: Difel, 1982. 471p.

HOPPE, A. **Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

HOUSTON, D. F. Rice Hulls. **Rice Chemistry and Technology**. Am. ASS. Cereal Chem, Ins. St. Paul, Minesota, USA, 1972.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Sustentabilidade do concreto com altos teores de escória e cinzas volantes**. IBRACON Structures and Materials Journal, v. 2, n. 3, p. 244-253, Sep. 2009. ISSN 1983-4195.

ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo. Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. v. 1, p. 931.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JACINTHO, A. E. P. G. Á.; GIONGO, J. S. Resistência mecânica do concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisas e realizações**. São Paulo. Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. v. 1, p. 605-632.

JAMES, J.; RAO, M. Reactivity of rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, Pergamon Press, v. 16, 1986.

JOKESTATION. Disponível em: <[http://www.jokestation.org/view/1602/Burj-Khalifa-Talles-SkyCrapper#!prettyPhoto\[\]/2/](http://www.jokestation.org/view/1602/Burj-Khalifa-Talles-SkyCrapper#!prettyPhoto[]/2/)>. Acesso em: 23 dez. 2011.

KIHARA, Y. et al. A microscopia do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 2., 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1990.

KOUI, M.; FTIKOS, C. The ancient Kamirian water storage tank: a proof of concrete technology and durability for three Millennium. **Materials and structures**, Cachan, RILEM, v. 31, n. 213, p. 623-627, 1998.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais: produtos minerais**. Brasília: SNIC/ABCP, 2010. 37 p. (Relatórios de referência: Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa).

MEHTA, P. K. Rice Husk Ash: A Unique Supplementary Cementing Material. **Advances in Concrete Technology**, Ottawa: Canmet, p. 407-431, 1992.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 307 p.

MEHTA, P. K.; PITT, N. A. A new process of rice husk utilization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE UTILIZATION OF RICE BY-PRODUCTS, 1974, Valência. **Proceedings...** Valência: IATA, published in 1977. p. 45-58.

MEIRA, L. **Propriedades mecânicas e retração do concreto com cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2. ed. Prentice Hall; Pearson Education, 2003. 664 p.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos em concretos compostos com diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2004. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MORAES, R. C.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Efeitos das cinzas volantes, cinza de casca de arroz e filler calcário sobre a resistência mecânica do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2000.

NASCIMENTO, W. N. et al. Adição de cinza de casca de arroz CCA no concreto, sob o aspecto da durabilidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 44., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2002.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

PEDROZO, É. C. **Estudo da utilização de cinza da casca do arroz residual em concretos estruturais**: uma análise da durabilidade aos cloretos. 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

POUEY, M. T. F.; MOLIN, D. D. Estudo comparativo da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2002.

PRUDÊNCIO, L. R. J.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**, Porto Alegre, 2003. (Coletânea HABITARE, v. 4) Ilustrado. ISBN 85-89478-05-X.

PRUDÊNCIO, J. R.; SANTOS, S. Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1996. p. 46-52.

REGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCA's) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento: aspecto de microestrutura das pastas.** 2004. 274 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

REGO, J. H. S. **Viabilidade técnica da utilização da cinza de casca de arroz produzida sem controle de temperatura como adição mineral ao cimento.** 2001. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001.

RODRIGUEZ DE SENZALE, G.; DALMOLIN, D. C. C. Study of influence of rice-husk ash on compressive strength of concrete at different ages. In: CANMET/ACI, 6., 1998, Bangkok. **Proceeding...** Bangkok: American Concrete Institute, 1998. p. 213-230 (SP-186-13).

ROVERE, E. L. et al. **A utilização da casca de arroz na cogeração de energia e a decorrente mitigação de gases que contribuem para o efeito estufa como mecanismo de desenvolvimento limpo.** Centro Clima, UFRJ. 2003, Disponível em: <http://www.centroclima.org.br/new2/ccpdf/FNMA_arroz.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2010.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos.** 1997. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** 2006. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SARASWATHY, V.; SONG, H.-W. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 8, p. 1.779-1.784, 2006.

SILVA, I. O. **Influência da cinza de casca de arroz amorfa e cristalina e da sílica ativa na reação álcali-agregado.** 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

SILVA, E. J. da. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil.** 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. 2009.

SILVEIRA, A. A.; RUARO, P. A adição de cinza de casca de arroz em concretos: estudo da influência do tipo de cinza na resistência à compressão e na microestrutura do concreto. In: **Seminário da Disciplina de Novos Materiais, PGEC/UFRGS**, 1995.

SILVEIRA, A. A.; FERREIRA, Â. A.; DAL MOLIN, D. C. A cinza da casca de arroz como adição mineral. In: WORKSHOP DE RESÍDUOS, 1996, São Paulo.

SHEHATA, M. H. Avaliação da resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 17., 2005, Olinda. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2005.

TASHIMA, M. M.; SILVA, C. A. R.; AKASAKI, J. L. The possibility of adding the rice husk ash (RHA) to the concrete. In: CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN THE BUILDING AND STRUCTURES, 2004, Barcelona, Espanha. **Anais...** Barcelona, 2004. p. 778-786.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2006.

TIBONI, R. **A utilização da cinza de casca de arroz de termoeétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland.** 2007. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TRINDADE, G. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz sem moagem: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

VASCONCELOS, C. A.; GIAMMUSSO, S. E. **O misterioso módulo de elasticidade.** TQS. 2009. Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/89-artigos/199-o-misterioso-modulo-de-elasticidade?format=pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2012.

VIEIRA, F. L. et al. Comparativo da determinação do teor de amorfismo da cinza de casca de arroz (CCA) através de difração de raios –x e método químico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2005. p. 372-381.

WORLD BUSINESS COUNCIL OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). Washington, D.C. United States, July 2009.