

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

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E RETRAÇÃO DO
CONCRETO COM ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE
ARROZ NATURAL, SEM BENEFICIAMENTO DE
MOAGEM**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Leticia Ribeiro Meira

Santa Maria, RS, Brasil

2009

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E RETRAÇÃO DO
CONCRETO COM ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE
ARROZ NATURAL, SEM BENEFICIAMENTO DE MOAGEM**

por

Leticia Ribeiro Meira

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

2009

© 2009

Todos os direitos autorais reservados a Leticia Ribeiro Meira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho somente com autorização por escrito do autor.

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, CEP: 97105-900.

Fone: (55) 3220-8837 Fax: (55) 3220-8030 e-mail: pgcivil@ct.ufsm.br



<http://www.ufsm.br/gepecon>

**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 E RETRAÇÃO DO CONCRETO COM
ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NATURAL, SEM
BENEFICIAMENTO DE MOAGEM**

elaborada por
Leticia Ribeiro Meira

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia - UFSM
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini - UFSM

Prof^a Dr^a Maria Tereza Pouey - UFPEL

Santa Maria, 28 de Fevereiro de 2009.

Ao meu marido pela compreensão, carinho e apoio e ao meu filho que é a razão de nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

A gratidão pelo apoio vai aos seguintes colaboradores:

- Em especial ao professor Dr. Geraldo Cechella Isaia pela orientação e incentivo na elaboração da pesquisa, pela dedicação e apoio em todas as horas e pelo exemplo de profissional que ama sua profissão;
- Ao professor Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini pelas importantes colaborações no projeto;
- Aos colegas da pós-graduação em especial aos meus amigos Eder Claro Pedroso e Alessandro Eduardo Hoppe que tornaram os infundáveis trabalhos laboratoriais em lazer.
- Aos colegas do GEPECON, Tatiana Cureau Cervo, Régis da Costa Moraes, Marcelo Duart, José Valdenir Bitencourt;
- Aos bolsistas Dilnei Dorneles Severo, Marcelo Dias Oliveira, Mauren Nabaes Ferrari, Rogério Quinhones Pereira, Jociano Dalmaso e Karina Kozoroski pelo difícil trabalho laboratorial e amizade;
- Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil, em especial “Seu” João e Vítor;
- À Universidade Federal de Santa Maria, pela graduação e pós-graduação, que com seu excelente quadro de docentes viabilizou mais esta conquista;
- À Fundação de Apoio à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pelos recursos financeiros destinados ao projeto;
- Ao CNPq, pela bolsa de ensino indispensável para a elaboração deste trabalho;
- A todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a elaboração dessa dissertação;
- E finalmente à Deus, que me deu saúde e me guiou no caminho certo, e acima de tudo me deu um filho lindo.

Vocês serão para sempre lembrados com muito carinho!

Muito Obrigada!

Leticia Meira

*“...Não faças do amanhã
o sinónimo de nunca,
nem o ontem te seja o mesmo
que nunca mais.
Teus passos ficaram.
Olhes para trás...
mas vá em frente
pois há muitos que precisam
que chegues para poderem seguir-te.”*

Charles Chaplin

RESUMO

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

PROPRIEDADES MECÂNICAS E RETRAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NATURAL, SEM BENEFICIAMENTO DE MOAGEM

AUTORA: LETICIA RIBEIRO MEIRA

ORIENTADOR: GERALDO CEHELLA ISAIA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 13 de março de 2009.

A presente pesquisa teve por objetivo investigar a viabilidade técnica, quanto à propriedade mecânica e de retração, do emprego de cinza de casca de arroz residual, ou seja, em seu estado natural, em concretos para fins estruturais.

Este estudo trata das propriedades mecânicas de resistência por compressão axial e diametral, módulo de elasticidade e das retrações de concretos moldados com adição de CCA natural, com teores de 15% e 25% em substituição em massa de cimento CP II-F, 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 realizados ensaios de resistência por compressão axial nas idades de 7, 28 e 91 dias, resistência por compressão diametral aos 28 e 91 dias, módulo de elasticidade aos 28 e 91 dias e retração total aos 28, 91 e 300 dias. Os resultados indicaram que existe viabilidade técnica para o emprego de cinza de casca de arroz natural, sem moagem, para o teor de 15% de substituição, para emprego em concreto estrutural. Os valores obtidos nos ensaios dos concretos com 15% de CCA natural desenvolveram resistências axiais superiores ao referência, retrações inferiores, módulo de elasticidade e resistência por compressão diametral inferiores porém com quedas não significativas .

Palavras chave: concreto; cinza de casca de arroz; pozolana; resistência mecânica; retração.

ABSTRACT

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

MECHANICAL PROPERTIES AND SHRINKAGE OF CONCRETE WITH ADDITION OF RICE HUSK ASH NATURAL, WITHOUT GRINDING

Author: Leticia Ribeiro Meira
Coordinator: Geraldo Cechella Isaia
City and Date: Santa Maria, march 13th of 2009.

To present research has for objective investigate the technical feasibility of the job of rice husk ash ungrounded, in concretes for structural ends. This study tries the mechanical properties of axial compression strength, tensile strength by diametrical compression, elasticity modulus and total shrinkage of concretes molded with addition of RHA natural, with contents of 15% and 25% in substitution in mass of cement CP II-F, in the forms ground in mill of balls and natural (without grinding), and compared with the concrete of reference, with 0.45, 0.55, and 0.65 water/cementations materials relationships. Were tested for resistance to axial compression on the ages of 7, 28 and 91 days, resistance to diametric compression by 28 and 91 days, modulus of elasticity at 28 and 91 days and total shrinkage at 28, 91 and 300 days. The results indicated that technical feasibility exists for the use of rice husk ash ungrounded, for the content of 15% of substitution, in structural concrete. The values from tests of concrete with 15% of RHA without grinding developed axial compression strength over the reference, lower shrinkages, tensile strength by diametrical compression and elasticity modulus lower however with not significant falls.

Keywords: concrete; rice husk ash; mechanical strength; shrinkage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Coliseu (Wikipédia, acesso 06/01/09)	21
Figura 2: Ponte mais extensa do mundo- Lake Pontchartrain Causeway, com 38,42 Km e 6.000 pilares de concreto (Wikipédia, acesso 6/01/09)	22
Figura 3: Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz queimada a 560 °C (Silveira e Ruaro, 1995).....	30
Figura 4: Cinza cristalina, após moagem (Barbosa,2006).....	31
Figura 5: Cinza amorfa, após moagem (Barbosa,2006).....	31
Figura 6: Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA cristalina (Barbosa, 2006).	31
Figura 7: Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA amorfa (Barbosa, 2006).	31
Figura 8: Difração de Raios-X da CCA (Duart, 2008).....	32
Figura 9: Micrografia concreto com 25% de CCAN, 3000X, 91 dias (DUART, 2008).	33
Figura 10: Microscopia eletrônica de varredura da CCA após moagem (Santos, 1997).	34
Figura 11: Micrografia do concreto 12000x, 28 dias (Fagury e Liborio (2004)	38
Figura 12: Evolução de resistência à compressão com o tempo (Pouey, 2002).	40
Figura 13: Representação do rompimento por compressão diametral (Eduardo C. S. Thomaz)	41
Figura 14: Comportamentos típicos tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto (Mehta e Monteiro, 1994).	43
Figura 15: Gráfico do módulo de elasticidade com o tempo (Hasparyk et al , 2003).....	44
Figura 16: Distribuição granulométrica à laser dos aglomerantes.....	49
Figura 17: Pozolanicidade de cimento pozolânico.	52
Figura 18: Curva granulométrica dos agregados miúdos.	54
Figura 19: Curva granulométrica dos agregados graúdos.....	54
Figura 20: Controle de temperatura do concreto.....	59
Figura 21: Abatimento do concreto.	59
Figura 22: Adensamento dos corpos de prova em mesa vibratória.	59
Figura 23: Primeiras 24 horas após a moldagem.....	60
Figura 24: Câmara úmida.....	60

Figura 25: Ensaio de compressão axial.	61
Figura 26: Disposição do cp para ensaio de $F_{t,D}$	63
Figura 27: Posicionamento do cp para o ensaio de compressão diametral.	63
Figura 28: Cp rompido após ensaio de compressão diametral.	63
Figura 29: Ensaio do módulo de elasticidade.	64
Figura 30: Pino de inserção de 22,5mm Φ 6.0mm.	65
Figura 31: Estocagem dos cps em sala climatizada.	66
Figura 32: Medição da retração.	66
Figura 33: Gráfico da evolução da resistência à compressão axial, com relação água aglomerante de 0,45.	68
Figura 34: Gráfico da evolução da resistência à compressão axial, com relação água aglomerante de 0,55.	68
Figura 35: Gráfico da evolução da resistência à compressão axial, com relação água aglomerante de 0,65.	69
Figura 36: Resistência à compressão-28 dias.	70
Figura 37: Resistência à compressão-91 dias.	70
Figura 38: Consumo de Materiais cimentícios em função da relação água/aglomerante, para 28 dias.	74
Figura 39: Consumo de Materiais cimentícios em função da relação água/aglomerante, para 91 dias.	75
Figura 40: Gráfico da resistência axial por Volume Total de Intrusão de Mercúrio, aos 91 dias.	77
Figura 41: Resistência à compressão diametral a 28 dias.	79
Figura 42: Resistência à compressão diametral a 91 dias.	80
Figura 43: Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral, aos 28 dias.	83
Figura 44: Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral, aos 91 dias.	83
Figura 45: Módulo de elasticidade em função da relação a/ag, aos 28 dias.	87
Figura 46: Módulo de elasticidade em função da relação a/ag, aos 91 dias.	87
Figura 47: Eci pelos métodos da NBR 6118, CEB, ACI e NBR 8522, aos 28 dias.	91
Figura 48: Eci pelos métodos da NBR 6118, CEB, ACI e NBR 8522, aos 91 dias.	91
Figura 49: Gráfico do Módulo de elasticidade pela resistência, ensaiado e estimado, aos 91 dias.	92

Figura 50: Gráfico da resistência por módulo de elasticidade, aos 28 dias.....	93
Figura 51: Gráfico da resistência por módulo de elasticidade, aos 91 dias.....	93
Figura 52: Evolução da retração para uma relação a/a_g de 0,45.....	96
Figura 53: Evolução da retração para uma relação a/a_g de 0,55.....	96
Figura 54: Evolução da retração para uma relação a/a_g de 0,65.....	96
Figura 55: Gráfico de resistência por retração aos 300 dias.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vendas de cimento no Brasil - 2008	22
Tabela 2: Produção de cinza por material (Mehta (1992) e COOK (1986), apud TIBONI (2007)).....	29
Tabela 3: Áreas de pesquisa e/ou utilização da CCA. (J.L.Calmon, 2007)	34
Tabela 4: Caracterização física dos materiais.	50
Tabela 5 : Composição química dos aglomerantes.....	51
Tabela 6: Índice de atividade Pozolânica (Fratini).	52
Tabela 7: Características físicas dos agregados.	53
Tabela 8: Consumo de materiais por m ³ de concreto.....	57
Tabela 9: Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira.	58
Tabela 10: Compressão axial nas idades estudadas.	67
Tabela 11: Comparação entre concretos com adição mineral e concretos sem adição → [(R – CCA)/R].100	71
Tabela 12: Relação entre concretos com adição de cinza natural e concretos com de cinza moída → [(M – N)/M].100	72
Tabela 13: Equações de Abrams para cada traço.	73
Tabela 14: Relações a/ag para 30MPa e 40MPa.	73
Tabela 15: Consumo de cimento e cinza para resistências de 30MPa e 40MPa, nas idades de 28 e 91 dias.	74
Tabela 16: Valores do Volume Total de Intrusão de Mercúrio aos 91 dias.....	77
Tabela 17: Compressão diametral, aos 28 e 91 dias.....	78
Tabela 18: Comparação entre concretos com adição mineral e concretos sem adição [(R – CCA)/R/100].....	81
Tabela 19: Relação entre concretos com adição de cinza natural e concretos com de cinza moída. [(M – N)/M].100	82
Tabela 20: Equações de f _c em função de f _{t,D}	82
Tabela 21: Resistência a compressão diametral para resistências de 30 MPa e 40 MPa.....	83
Tabela 22: Relação entre resistência à tração por compressão diametral e compressão axial.	84

Tabela 23: Resultados de $f_{t,D}$, obtidos de acordo com a NBR 6118/2003.....	85
Tabela 24: Módulo de Elasticidade, dos concretos aos 28 e 91 dias.....	86
Tabela 25: Índices de variação do Módulo de elasticidade.....	88
Tabela 26: Módulo de elasticidade E_c (GPa), através da NBR 6118, CEB e ACI. ...	90
Tabela 27: Equações de resistência em função do módulo.	94
Tabela 28: Módulo de elasticidade para resistências de 30MPa e 40 MPa.....	94
Tabela 29: Valores de Retração em porcentagem.	95
Tabela 30: Equações de resistência em função da retração.	98
Tabela 31: Retração para resistências de 30 MPa e 40 MPa, aos 300 dias.....	98
Tabela 32: Propriedades mecânicas e de retração estimadas para resistências de 30 MPa e 40 MPa, nas idades finais.	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características físico-químicas da CCA (Barbosa, 2006).	32
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- Abertura da malha da peneira

∅ - Diâmetro

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

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

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

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

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

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

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

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

25M – Mistura composta com 25% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto

25M45 – Mistura composta com 25% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,45$

25M55 – Mistura composta com 25% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,55$

25M65 – Mistura composta com 25% de CCA, moída, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,65$

25N – Mistura composta com 25% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto

25N45 – Mistura composta com 25% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto, relação $a/ag=0,45$

25N55 – Mistura composta com 25% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto, relação a/ag=0,55

25N65 – Mistura composta com 25% de CCA, ao natural, em substituição ao cimento no concreto, relação a/ag=0,65

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

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

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI- American Concrete Institute

ASTM- American Society for Testing and Materials

C₂S - silicato bicálcico

C₃A – Aluminato tricálcico

C₃S - silicato tricálcico

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 – Anidrido carbônico ou dióxido de carbono

CP – Cimento Portland

CP II – F – Cimento Portland composto com filler calcário

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

E_{ci}- módulo de elasticidade

E_f – Eficiência cimentícia

f_c – Resistência à compressão axial

f_{t,D}- resistência à compressão diametral

GEPECON- Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto / UFSM

GPa- giga pascal

IBRACON- Instituto Brasileiro do Concreto

L- retração

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

PIM - Porosimetria por intrusão de mercúrio

r - coeficiente de correlação

R – Mistura de referência com 100% de cimento

R² - coeficiente de determinação

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

SiO₂ - dióxido de silício

SO₂ - dióxido de enxofre

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE QUADROS	14
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	15
SUMÁRIO	18
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Apresentação	21
1.2 Justificativa	24
1.3 Objetivos	25
1.3.1. Objetivos específicos:	25
1.4 Estrutura da Dissertação	26
2 CINZA DE CASCA DE ARROZ	28
2.1 Características da Cinza de Casca de Arroz	29
3 RESISTÊNCIA MECÂNICA E DEFORMAÇÕES DO CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ	36
3.1 Concretos com adições pozolânicas	36
3.1.1 Concretos com adição de cinza de casca de arroz	37
3.2 Resistência por compressão axial	38
3.3 Resistência à compressão diametral	41
3.4 Módulo de Elasticidade	42
3.5 Retração	45
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
4.1 As variáveis	47
4.1.1 Variáveis independentes	47
4.1.2 Variáveis dependentes	47
4.2 Materiais Utilizados	48
4.2.1 Aglomerantes	48

4.2.2 Agregados	53
4.2.3 Aditivos.....	55
4.2.4 Água.....	55
4.3 Traços	55
4.4 Ordem de colocação dos materiais na betoneira	57
4.5 Moldagem de corpos de prova de concreto e procedimento de cura úmida	58
4.6 Ensaio realizado	60
4.6.1 Resistência à compressão axial	61
4.6.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio – PIM	62
4.6.3 Resistência à compressão diametral.....	62
4.6.4 Módulo de elasticidade.....	64
4.6.5 Retração.....	65
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	67
5.1 Resistência à compressão axial	67
5.1.1 Variação da resistência à compressão axial	70
5.1.2 Consumo de materiais cimentícios em igualdade de resistência.....	72
5.1.3 Resistência á compressão x volume de mercúrio intrudido	76
5.2 Compressão diametral	78
5.3 Módulo de elasticidade	86
5.3.1 Evolução de E_c com a idade e relação a/ag	86
5.3.2 Módulo de elasticidade x resistência à compressão	88
5.4 Retração	95
5.5 Resumo.....	99
6 CONCLUSÕES	102
6.1 Quanto à ordem de colocação dos materiais na betoneira e tempo de mistura.....	102
6.2 Quanto à resistência por compressão axial.....	103
6.2.1 Para resistências de 30 MPa e 40 MPa	103
6.2.2 Consumo de cimento	104
6.3 Quanto à resistência à compressão diametral do concreto	105
6.3.1 Em igualdade de resistência	105
6.3.2 Resistência por compressão diametral estimados	106
6.4 Quanto ao Módulo de Elasticidade	106

6.4.1 Módulo de elasticidade estimado	107
6.4.2 Em igualdade de resistência	107
6.5 Quanto à retração	108
6.5.1 Em igualdade de resistência	109
6.6 Conclusão geral	109
6.7 Sugestões para pesquisas futuras.....	109
7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O concreto nada mais é que um material plástico, moldado para adquirir a forma desejada antes que endureça e adquira resistência suficiente para resistir sozinho aos esforços solicitantes.

Inicialmente, era utilizado o concreto de cal nas construções. Ainda hoje podem ser vistas edificações deste material, como o Coliseu de 80 d.c (Figura 01).



Figura 1: Coliseu (Wikipédia, acesso 06/01/09)

Somente em 1824, na Inglaterra, Joseph Aspdin inventa o cimento portland. Atualmente o concreto é utilizado em diversas áreas, como estruturas de edifícios, fundações de plataformas petrolíferas, túneis, pontes, etc, (Figura 02).



Figura 2: Ponte mais extensa do mundo- Lake Pontchartrain Causeway, com 38,42 Km e 6.000 pilares de concreto (Wikipédia, acesso 6/01/09)

Isso representa um grande consumo mundial de cimento, somente no Brasil, no ano 2008 foram vendidas 51,6 milhões de toneladas de cimento (ver Tabela 1), das quais 51,1 milhões para o mercado interno, representando 12,4% de aumento em relação à 2007.

Tabela 1: Vendas de cimento no Brasil - 2008

Vendas de Cimento Brasil 2008			
Dados preliminares do SNIC (1.000 ton)			
Origem	Jan - Dez/08		%
	2007	2008	2008/2007
Norte	1.575	2.069	31,4%
Nordeste	8.197	9.416	14,9%
Centro Oeste	5.094	5.478	7,5%
Sudeste	23.473	26.294	12,0%
Sul	6.367	7.848	23,3%
Venda Merc. Interno	44.706	51.105	14,3%
Exportação	1.234	513	-58,4%
Venda Total	45.940	51.618	12,4%

Fonte: www.cimento.org

Para a produção de 1 tonelada de cimento, é lançada ao ar aproximadamente 1 tonelada de monóxido de carbono (CO₂), um dos gases causadores do efeito estufa.

Segundo Mehta (1997):

“Na aurora do século XXI, entramos em uma era de desenvolvimento sustentável. A indústria do cimento será chamada para solucionar as duas necessidades presentes da sociedade atual, ou seja, proteção do meio ambiente e encontrar soluções para a crescente industrialização e urbanização do mundo”.

Devido à crescente necessidade mundial, em se reduzir as cargas poluentes lançadas no ambiente, tem-se pesquisado em vários campos da construção civil formas de se manter o crescimento, porém diminuindo o custo ambiental.

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 11 milhões de toneladas de arroz, cerca de 2 milhões de toneladas de casca e 400 mil toneladas de cinza.

Para se ter uma idéia, a queima de 500 kg de casca de arroz produz a energia de 1 barril de petróleo (Amato, 2002). O Brasil poderia gerar mais de 200MW 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.

O uso da casca de arroz como combustível é extremamente vantajoso, pois substitui combustíveis como diesel, na geração de energia, e provoca menos danos à natureza, pois a deposição da casca em aterros sanitários resulta na emissão de gás metano à natureza, Rovere (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 CCA pode ser usada como matéria prima para a indústria eletrônica, de cerâmica, vidro, indústria química e na construção civil.

Várias pesquisas na área da construção civil apontam para a utilização da cinza de casca de arroz como substituto de parte do cimento, na produção de concreto. Mehta (1992) está entre os pesquisadores que mais fez publicações sobre

a utilização da CCA no concreto. No Brasil podemos citar Isaia (1995, 2000, 2004, 2008) com vários trabalhos publicados e pesquisas constantes sobre o assunto, demonstrando vantagens consideráveis na utilização da CCA, que sozinho ou aliado a outras adições pode substituir parte do cimento e produzir concretos com características de durabilidade e desempenho de resistências superiores. Podemos citar ainda Barbosa, et. al. (2006), Tashima, et al (2004), Nascimento (2002), Rego (2002, 2004), Moraes, et. al. (2000), Hasparyk (1999, 2003), Silveira, et al (1995, 1996).

1.2 Justificativa

A maioria das pesquisas existentes cita a necessidade da utilização de fornos com queima controlada, para a obtenção de cinzas amorfas. Porém os fornos para a queima da casca de arroz para a obtenção de energia são, na sua grande maioria, sem controle de temperatura, o que descartaria para o uso em concretos um volume de cinza muito grande.

Outra causa do pouco interesse, na utilização da CCA seria a necessidade de moagem do material, para ativar sua pozolanicidade, o que exige instalações industriais que aumentam o seu custo de produção.

A finalidade dessa dissertação é estudar a adição da cinza natural, sem queima controlada e sem moagem, em misturas de concreto, pois esta é a forma mais comumente encontrada nas diversas beneficiadoras de produção de arroz do interior do Brasil, e verificar o comportamento mecânico, e a durabilidade de um concreto com cinza natural, sem beneficiamento por moagem.

Com isso formou-se um grupo técnico composto pelo GEPECON (UFSM/ Brasil), Universidad de La Republica (UDELAR/ Uruguai) e o 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.

Essa dissertação faz parte do Programa supracitado e consiste no estudo experimental das propriedades mecânicas e de retração de concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento, comparadas com CCA moída em laboratório.

1.3 Objetivos

O objetivo geral dessa dissertação, inserido no contexto geral do projeto-programa acima citado, é verificar as propriedades mecânicas e de retração de concretos estruturais com adição de cinza de casca de arroz, obtida sem queima controlada e sem beneficiamento (sem moagem e sem peneiramento). O propósito final desta pesquisa visa buscar subsídios para que a cinza de casca de arroz deixe de ser considerada um resíduo agrícola e passe a ser um material cimentício para emprego na construção civil.

1.3.1 Objetivos específicos:

Os seguintes objetivos específicos foram objeto de estudo de dissertações de mestrados anteriores:

- a) determinar as características físicas e químicas da cinza de casca de arroz sem beneficiamento;
- b) estudar a melhor seqüência de colocação dos materiais na betoneira e o tempo de mistura necessário para uma pré-moagem da cinza natural com os agregados;
- c) comparar o desempenho da cinza de casca de arroz moída em moinho de bolas, com o da cinza de casca de arroz sem moagem, em dois teores de substituição de cimento; e o desempenho de ambas em relação ao concreto de referência, somente com cimento Portland;

- d) estudo de durabilidade com respeito à resistência à penetração de cloretos, carbonatação acelerada, absorção capilar de água, difusão de oxigênio, resistividade elétrica.

A presente dissertação tem por objetivos específicos os seguintes:

- a) estudar o comportamento da resistência à compressão axial e diametral de corpos de prova de concreto moldados e curados em laboratório, com substituição de 15% e 25% de cimento Portland por CCA natural e moída;
- b) avaliar o comportamento tensão-deformação por meio de ensaios de módulo de elasticidade de concretos com as mesmas composições do item a);
- c) estudar a retração total de corpos de prova prismáticos de concretos com as mesmas composições do item a)
- d) comparar os resultados dos ensaios dos concretos com CCA natural e moída com os similares sem nenhuma adição (somente cimento Portland – referência);
- e) comparar os resultados dos ensaios em igualdade de relação água/materiais cimentícios e de resistência de projeto de 30 MPa e 40 MPa.

1.4 Estrutura da Dissertação

Essa dissertação encontra-se dividida em 06 capítulos, a seguir discriminada.

No capítulo 1, intitulado Introdução, é abordada a justificativa da adição da cinza de casca de arroz na mistura do concreto, os objetivos da pesquisa em se utilizar cinza natural, sem beneficiamento.

O capítulo 2: Cinza de Casca de Arroz- traz uma breve explanação sobre as adições minerais e um detalhamento da CCA, com suas variâncias de acordo com o tempo e temperatura de queima.

O capítulo 3: Resistência mecânica e deformações do concreto com adições minerais- contém uma explicação teórica dos ensaios realizados nos corpos de prova de concreto e o efeito da adição de cinza de casca de arroz às propriedades do concreto.

No capítulo 4: Programa experimental- são detalhadas as variáveis que influem nos ensaios, os materiais utilizados, os traços executados, a escolha da ordem de colocação dos materiais na betoneira e a metodologia de moldagem e cura, assim como a normatização utilizada nos ensaios de resistência por compressão axial, resistência por compressão diametral, módulo de elasticidade e retração.

O capítulo 5: Análise e discussão de resultados- traz os resultados obtidos, juntamente com uma análise teórica e comparação entre grandezas pertinentes, e um resumo dos valores encontrados em igualdade de relação água/materiais cimentícios e de resistência.

No capítulo 6: Conclusão- encontram-se os comentários sobre os resultados obtidos e sugestões para pesquisas futuras.

2 CINZA DE CASCA DE ARROZ

As adições minerais são matérias inorgânicas que, quando misturadas a concretos e argamassas, melhoram a durabilidade e resistência mecânica. Outro fator importante que deve ser levado em conta é o ambiental. As adições minerais geralmente são subprodutos de processos agro-industriais que comumente são descartados em locais impróprios, como leitos de rios, às margens de rodovias, ou sobre o solo, contaminando-o.

Uma das adições bastante utilizada é a sílica ativa, que possui altas concentrações de sílica (SiO_2) e tem grande reatividade com o hidróxido de cálcio. Outra adição mineral que pode ser citada é a cinza volante que em termos de volume é a pozolana mais utilizada no mundo e é formada a partir da combustão do carvão para a geração de energia. A escória de alto forno é, segundo Pecchio e Battagin (1999), apud Brizola (2007), um subproduto da manufatura do ferro-gusa que em alto-forno produz aproximadamente 300kg de escória por tonelada de material.

Destacam-se neste meio, as produções do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto, GEPECON, da Universidade Federal de Santa Maria, que em mais de dez anos de existência, tem se dedicado ao estudo do concreto, com especial atenção às adições minerais, com mais de cento e cinquenta publicações em periódicos e anais de eventos nacionais e internacionais.

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 conseqüência, utilizam a cinza queimada de sua casca como material cimentício.

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. Poucos estudos utilizam a CCA residual, sem controle de queima, a não ser as pesquisas desenvolvidas por Dafico

Alves na UFG, Geraldo Isaia e Antonio Luiz Gastaldini na UFSM, João H. Silva na UnB, entre outros.

Os resultados obtidos mostram a viabilidade técnica e econômica do uso destas 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 com uso de CCA residuais em misturas binárias ou ternárias comprovam este comportamento.

2.1 Características da Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz tem apresentado um desempenho bastante satisfatório, sendo comparável com a sílica ativa. A substituição do cimento pode chegar a até 40% do volume utilizado. Além do ganho econômico, há o ganho ambiental.

Para a geração de energia elétrica nas usinas de beneficiamento de arroz, é feita a queima da casca de arroz produzindo uma quantidade de cinzas maior que qualquer outro resíduo da agricultura (Tabela 02).

Tabela 2: Produção de cinza por material (Mehta (1992) e COOK (1986), apud TIBONI (2007)).

Cereal	Parte da Planta	Cinza (% em peso)	Sílica (%)
Milho	Folha	12	64
Arroz	Casca	20	93
Arroz	Palha	14	82
Cana-de-açúcar	Bagaço	15	73
Girassol	Folhas e talo	11	25
Trigo	Folha	10	91

A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura e com alto teor de sílica, entre 74 a 97%, composta de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra (Mehta, 1992). Com a queima, a lignina e a celulose são removidas, resultando uma estrutura celular e porosa (ver Figura 03).

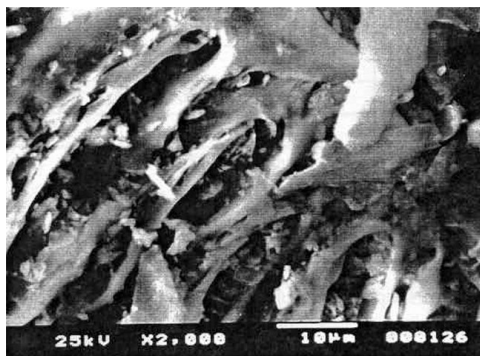


Figura 3: Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz queimada a 560 °C
(Silveira e Ruaro, 1995)

Quando a queima da casca se faz de forma parcial, obtém-se um resíduo negro com até 15% de carbono que pode ser nocivo à saúde. Enquanto que quando inteiramente queimada, resulta numa cinza de cor acinzentada, branca ou púrpura, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima. Para Boateng e Skeete (1990), temperatura elevada e longo tempo de exposição geram cinzas branco-rosadas, o que indica a presença de sílica nas suas formas cristalinas: cristobalita e tridimita.

Em 1988, o RILEM Technical Reports (apud Tiboni, 2007) incluiu a cinza de casca de arroz produzida por combustão controlada como altamente pozzolânica, quando adicionada ao concreto, juntamente com a sílica ativa de ferro-silício. Sendo que o formato das partículas da CCA é angular e o da sílica de ferro-silício é esférica. A atividade pozzolânica da CCA está diretamente relacionada a composição morfológica e ao tempo de moagem.

Estudos realizados mostram que as cinzas apresentam morfologias diferentes conforme a temperatura de queima. Dentre eles, Mehta (1992) demonstra que para temperaturas de queima entre 400 e 600°C a sílica contida na cinza é do tipo amorfa, com forma angular e elevada superfície específica (de 40 a 110 m²/g- por absorção de nitrogênio). Barbosa (2006) demonstrou a influência do tempo e da temperatura na queima da casca de arroz. Foi apresentada uma cinza com controle de queima onde a temperatura atinge aproximadamente 600°C (cinza cristalina, ver Figura 04). E outra cinza, onde a queima se dá por autocombustão sem controle de queima, e o processo dura 36 horas e chega à temperaturas de até 850°C (cinza amorfa, ver Figura 05).



Figura 4: Cinza cristalina, após moagem (Barbosa,2006).



Figura 5: Cinza amorfa, após moagem (Barbosa,2006).

Foi realizado nesta pesquisa o ensaio de difração de raio-x nas duas amostras, onde é possível observar a presença de cristais em especial cristobalita e trimidita na cinza cristalina (ver Figura 06), enquanto que na cinza amorfa não ocorrem picos (ver Figura 07).

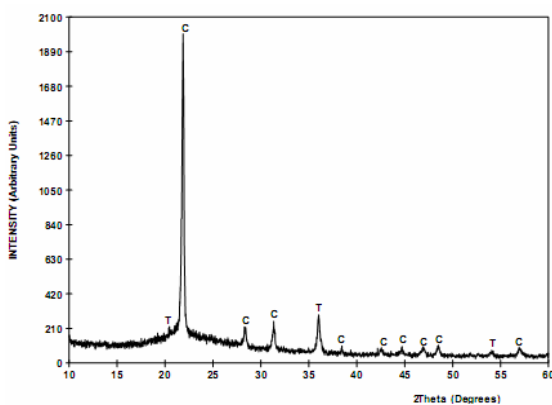


Figura 6: Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA cristalina (Barbosa, 2006).

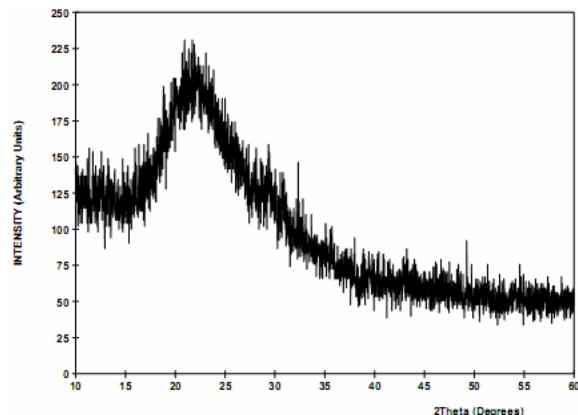


Figura 7: Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA amorfa (Barbosa, 2006).

O Quadro 01 abaixo mostra as características físico-químicas das duas cinzas, encontradas por Barbosa (2006).

Análise Físico-química das CCAs		CCA Cristalina	CCA Amorfa
Densidade absoluta	(g/cm ³)	2,18	2,15
Finura Peneira 325	(% retida)	1,3	3,4
Superf. espec. Blaine	(cm ² /g)	6376	17302
Diâmetro dos grãos (micras)		13,44	12,38
Reatividade c/ álcalis	Redução expansão (%)	12,38	-
	Expansão argamassa (%)	0,017	-
Índices atividade pozolânica	Água requerida (%)	100,6	114,6
	com cimento (%)	90,8	60,7
	com cal (MPa)	3,5	4,9
Análise Química (%)	Perda ao fogo	6,17	2,36
	SiO ₂	88,50	92,99
	SO ₃	0,03	0,10

Quadro 1: Características físico-químicas da CCA (Barbosa, 2006).

Observa-se que a cinza amorfa possui uma quantidade maior de sílica que a cinza cristalina.

Duart (2008), integrante deste mesmo projeto, apresenta o difratograma da CCA utilizada nesta pesquisa e classificada como amorfa (Figura 08). Nele se verificam alguns picos cristalinos de Quartzo (Q) e de Cristobalita (C), resultado de uma queima não controlada da casca de arroz.

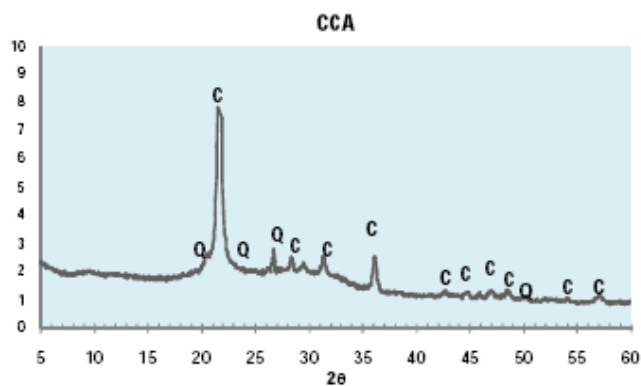


Figura 8: Difração de Raios-X da CCA (Duart, 2008).

Akasaki (2005), afirma que a CCA produzida a partir de uma combustão controlada, com temperatura de queima inferior a 600°C resulta numa composição morfológica com a presença marcante de sílica (dióxido de silício) em estado amorfo, garantindo maior reatividade com o cimento e com a cal.

A microscopia eletrônica de um concreto com adição de 25% de cinza de casca de arroz sem moagem (natural) mostra uma estrutura porosa característica da CCA (ver Figura 09), e responsável pela absorção da água de amassamento e que também implica em porosidade maior quando submetido o concreto ao ensaio de Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM).

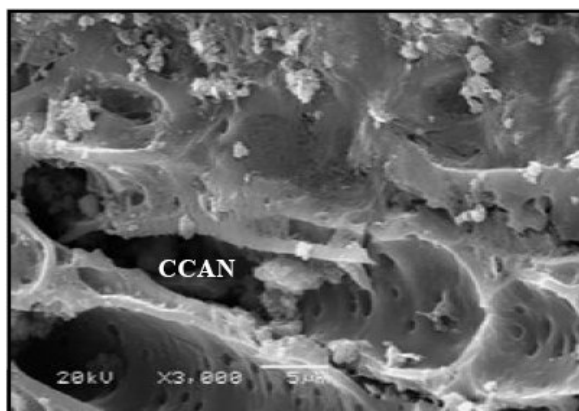
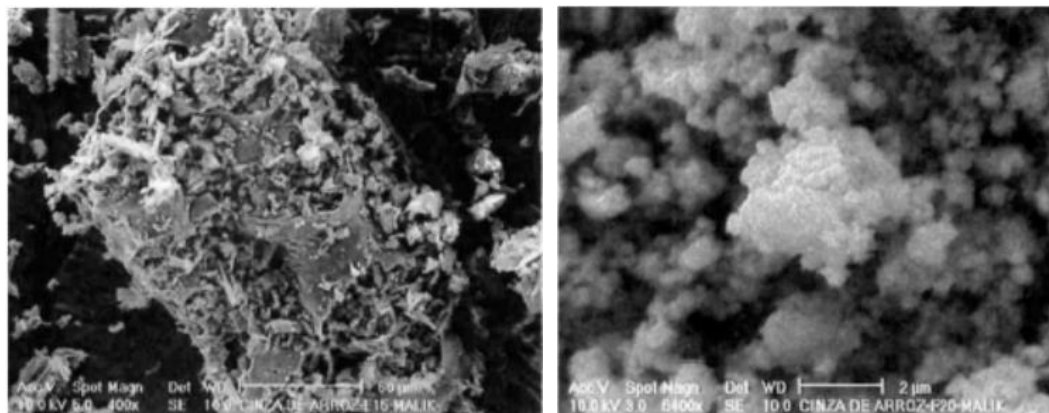


Figura 9: Micrografia concreto com 25% de CCAN, 3000X, 91 dias (DUART, 2008).

Essa estrutura porosa pode ser modificada através do processo de moagem da cinza em moinhos de bolas metálicas ou mesmo durante o processo de mistura do concreto, através 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 pode ser visto na Figura 10, do ensaio de microscopia eletrônica de varredura.



(a) Tempo de moagem de 15min; (b) Tempo de moagem de 20h.
Figura 10: Microscopia eletrônica de varredura da CCA após moagem (Santos, 1997).

Autores como Mehta e Monteiro (1994) classificam a CCA residual como sendo uma pozolana pouco reativa, e sugerem que este material deve ser finamente moído para desenvolver certa atividade pozolânica. De acordo com Della et al. (2001), quando a temperatura ou o tempo de queima da CCA é baixa, a sílica contida na cinza é predominantemente amorfa, ou seja, ocorre menos cristalização.

As vantagens geradas pelas adições minerais em concretos já foram constatadas por pesquisadores de diversos centros tecnológicos internacionais e no Brasil (UFRGS, UFSM, UFPEL, USP, FURNAS, UFPB, UFRJ, dentre outras) e vão de ganhos de durabilidade e resistência à ganhos ambientais.

De acordo com J.L.Calmon (2007), a cinza de casca de arroz encontra-se em fase de pesquisa ou utilização em várias áreas da construção civil (ver Tabela 03).

Tabela 3: Áreas de pesquisa e/ou utilização da CCA. (J.L.Calmon, 2007)

RESÍDUO	ORIGEM NO PROCESSO	PESQUISA/UTILIZAÇÃO
Cinzas de casca de arroz	Queima da biomassa da casca de arroz em termelétricas.	Cimentos, Concretos, fabricados, cerâmicos, Painéis pré-fabricados para vedação, Estabilização físico-química dos solos Cimento refratário, Concreto de alto desempenho, Concretos pré-fabricados, Argamassas, Tijolos de Solo Cimento, Materiais para vedação, Estabilização físico-química dos solos

A cinza de casca de arroz, devido ao seu efeito pozolânico, reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa reação por ser mais lenta que a reação de hidratação do C_3S do cimento portland, apresenta um ganho de resistência também mais lento.

De acordo com Mehta (1983), a “reação pozolânica” não é apenas entre hidróxido de cálcio e sílica, mas inclui todas as reações cimentícias do CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 e H_2O . Essas reações ocorrem tanto nos concretos com adição quanto nos de cimento Portland, porém a taxas mais lentas de reação, que podem ser aceleradas quimicamente, ou pela temperatura.

3 RESISTÊNCIA MECÂNICA E DEFORMAÇÕES DO CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ

3.1 Concretos com adições pozolânicas

A adição pozolânica em concretos de cimento Portland apresenta inúmeros benefícios às propriedades do concreto, tanto em relação à sua reologia no estado fresco, mas principalmente, ao comportamento mecânico e de durabilidade no estado endurecido (Netto, 2006).

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

Devido a presença da sílica ativa, a zona de transição sofre alterações como a diminuição da quantidade de cristais orientados de hidróxido de cálcio, dos vazios capilares e o aumento da adesão pasta-agregado.

De acordo com o tipo de pozolana utilizada, podem ocorrer variações quanto às propriedades dos concretos. Porém os benefícios são, em geral, bem semelhantes. Dentre os principais, pode-se destacar (Netto, 2006):

- minimização ou retardamento do progresso da reação álcali- agregado;
- minimização do impacto ambiental, através da utilização de subprodutos industriais (caso da cinza volante e CCA), reduzindo o consumo de cimento, e contribuindo para a redução de emissões de CO_2 ;
- reduzir a permeabilidade e conseqüente aumento da durabilidade do concreto, desde que curado convenientemente;
- redução do calor de hidratação, durante o período crítico em que o calor gerado ultrapassa o dissipado, provocando uma menor elevação da temperatura do concreto;
- diminuição da exsudação em função do efeito microfíller;

- obtenção de resistências mecânicas superiores, particularmente em idades mais avançadas;

- melhor comportamento frente ao ataque de sulfatos e cloretos, em função da diminuição dos poros da pasta hidratada;

- melhor desempenho da zona de transição da interface pasta-agregado.

As desvantagens que podem ser enumeradas são:

- redução dos níveis de hidróxido de cálcio, responsável pelo ambiente alcalino protetor contra a corrosão das armaduras, sendo que tal aspecto pode ser compensado pela redução da permeabilidade, sob certas condições;

- necessidade de aditivos plastificantes, em função do aumento da demanda de água nas misturas;

- desenvolvimento mais lento das resistências iniciais.

3.1.1 Concretos com adição de cinza de casca de arroz

A adição de cinza de casca de arroz ao concreto torna a matriz da pasta mais densa devido à elevada área específica da sílica presente na cinza, e pelo efeito fíller gerado pela presença de carbono não combusto, que é um material extremamente fino.

Gastaldini (1996) investigou a influência de adições minerais na porosidade de pastas de cimento através da porosimetria por intrusão de mercúrio, incluindo a cinza de casca de arroz. Com base nos resultados, o autor afirma que, da mesma forma que a sílica ativa, a cinza proporciona um refinamento dos poros diminuindo a porosidade e permeabilidade do concreto.

A Figura 11 apresenta uma micrografia de uma amostra fraturada de concreto com adição de cinza de casca de arroz de 28 dias.

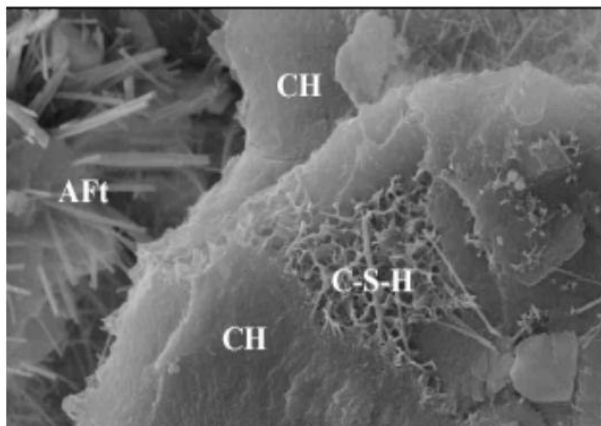


Figura 11: Micrografia do concreto 12000x, 28 dias (Fagury e Liborio (2004))

Com aproximação de 12000x, é possível observar 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 por compressão axial

A resistência à compressão axial é uma das propriedades mais analisadas do concreto. Geralmente, à medida que se aumenta a resistência melhoram-se as demais variáveis, como estanqueidade, por exemplo, e a partir dos resultados de resistência é possível estimar os valores de outras propriedades como módulo de elasticidade, por isso o interesse neste ensaio. Em indústrias de fabricação de concreto este é o parâmetro utilizado para controlar a qualidade do concreto.

A resistência de um concreto depende de diversos fatores, o principal é a relação água/materiais cimentícios. Porém existem outros, de acordo com P. Helene e T. Andrade (2007) a qualidade potencial do concreto depende da relação água/cimento e do grau de hidratação, pois eles definem as propriedades mecânicas, como resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade e outras.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência varia de acordo com os parâmetros do corpo de prova (dimensões, geometria e estado de umidade),

parâmetros de carregamento (tipo de tensão e velocidade de aplicação da tensão), e resistência das fases componentes, que depende da porosidade da matriz (relação água/cimento, aditivos minerais, grau de hidratação e teor de ar aprisionado e incorporado), porosidade do agregado, e porosidade da zona de transição (em função da relação água/cimento, aditivos minerais, características de exsudação, grau de compactação, grau de hidratação e a interação química entre agregado e a pasta de cimento).

O tipo de cimento também interfere na resistência. A finura do material influencia a sua reação com a água. Geralmente, quanto mais fino o cimento, mais rápido ele reagirá. Porém existem limites para a finura, devido ao calor de hidratação do cimento, com isso partículas menores do que $45\mu\text{m}$ são difíceis de hidratar e aquelas maiores do que $75\mu\text{m}$ nunca se hidratam completamente.

A adição de cinza de casca de arroz ao concreto provoca um aumento significativo na resistência à compressão. Isso se deve ao refinamento dos poros e dos grãos, e pela melhoria na microestrutura da zona de transição (M. Gomes da Silva, 2007).

A resistência por compressão axial em concretos com adição de cinza de casca de arroz, tende a ter ganhos mais lentos de resistência, devido a presença da sílica ativa, pois a proximidade entre as partículas reagentes (sílica e cimento) aumenta, aumentando os pontos de nucleação. Isso ocorre, principalmente devido ao efeito fíller.

ISAIA (1995) estudou os efeitos de adições minerais ao concreto, com o objetivo de verificar a sua durabilidade. Entre os resultados encontrados, pode-se citar o traço com 30% de CCA e relação a/ag 0,3, onde obteve-se aos 07 dias resistências de 70.9 MPa, e resistência de 50.5 MPa para misturas com 30% de cinza de casca de arroz e relação a/ag 0.50.

Outra pesquisa que pode ser citada é a de Feng et.al. (2003), onde foi estudada a adição de CCA em substituição de cimento nos teores de 10%, 20% e 30%, com relações a/ag 0,35, 0,45 e 0,55, e ensaiados à compressão axial aos 3, 7, 28 e 91 dias. A cinza utilizada foi produzida em forno comercial com queima controlada. Os resultados obtidos mostraram que com o aumento dos teores de substituição aumentaram também as resistências. Essa observação pode ser constatada no ensaio aos 28 dias, e relação a/ag 0,35, onde os concretos com

adições de 0%, 10%, 20% e 30% apresentaram resistências de 51,2 MPa, 66,2 MPa, 75,2 MPa e 82,2MPa, respectivamente.

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 0,5 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 pela Figura 12.

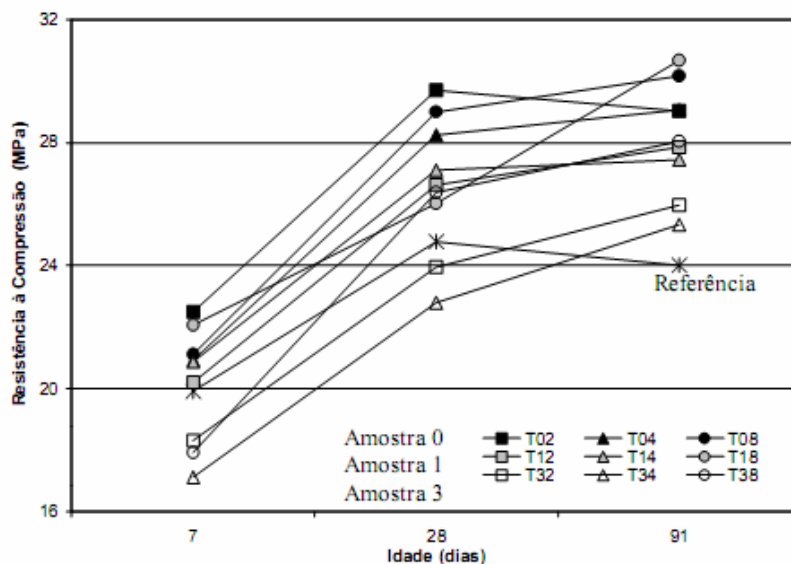


Figura 12: Evolução de resistência à compressão com o tempo (Pouey e Dal Molin, 2002).

Verifica-se que independente do tempo de moagem, nas idades finais a resistência dos concretos com adição superam o referência. Aos 91 dias, os cp's com adição de cinza moída por 8 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).

3.3 Resistência à compressão diametral

Este ensaio é conhecido internacionalmente como Ensaio Brasileiro, foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro, no ano de 1943. É um ensaio simples e fornece resultados mais uniformes que os de tração indireta.

Após algumas verificações, idealizou-se o método de determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ver Figura 13).

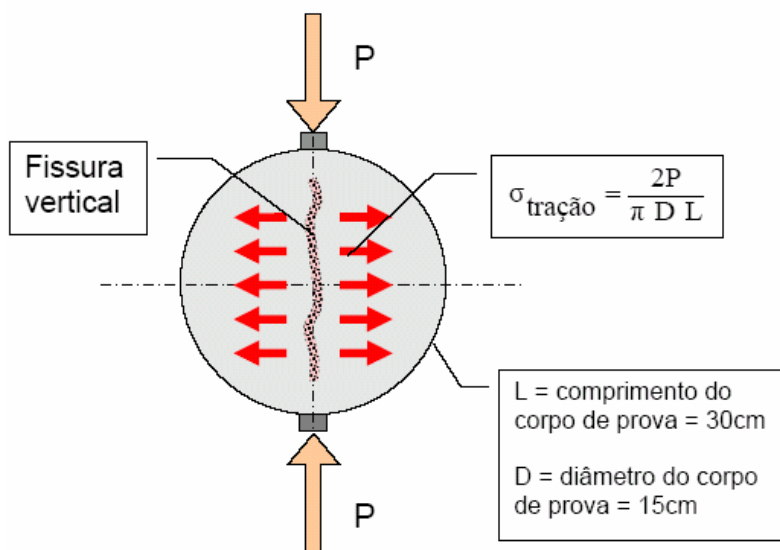


Figura 13: Representação do rompimento por compressão diametral (Eduardo C. S. Thomaz)

Segundo De Larrard (1992), a resistência à tração por compressão diametral atinge o seu valor máximo por volta dos 14 dias, ao contrário da resistência à compressão, que pode aumentar 10 a 20% de seu valor após os 14 dias. Deve se levar em consideração que estes valores são estimados para concretos sem adições minerais, com isso os percentuais podem sofrer alterações, conforme o tipo de concreto analisado.

Em concretos com adição de cinza de casca de arroz, melhora-se a porosidade da matriz e da zona de transição devido à grande presença de sílica ativa que tem elevada finura, resultando numa maior compacidade da pasta e

aumento da formação de C-S-H. Com isso ocorre um aumento da resistência à tração. Porém “esse aumento é relativamente pequeno até que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação da zona de transição seja mais significativa, isto é, a resistência à tração do concreto com uma zona de transição com menor porosidade continuará a ser fraca enquanto uma grande quantidade de cristais orientados de CH estiver presente” (Tiboni, 2007).

3.4 Módulo de Elasticidade

Para fazer uma análise das deformações elásticas ou visco-elásticas de estruturas de concreto é necessário conhecer o módulo de elasticidade.

O concreto é um material heterogêneo, e apesar dos agregados graúdos e da pasta de cimento apresentarem uma linearidade no gráfico tensão x deformação, o concreto quando submetido à compressão observa-se a não linearidade da curva. Alterações na microestrutura, como aumento do volume de vazios ou da quantidade de microfissuras na zona de transição podem exercer grande influência nas suas propriedades principalmente de resistência e deformabilidade.

A zona de transição é o elo entre a pasta e o agregado graúdo. A rigidez do concreto não reflete totalmente a rigidez de cada um dos seus componentes, tanto que a curva tensão-deformação do concreto fica entre os diagramas da pasta de cimento e do agregado, geralmente lineares. A não-linearidade do diagrama do concreto decorre da existência da zona de transição e de suas microfissuras.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), “a quantidade de microfissuras depende de inúmeros parâmetros, incluindo a distribuição granulométrica e 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 (DALMOLIN/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.

Fatores que afetam o Módulo de Elasticidade do concreto:

- Estado de umidade da amostra em condições de carregamento: parâmetros de testes
- Módulo de deformação da matriz da pasta de cimento – porosidade – matriz da pasta de cimento
- Porosidade e composição da zona de transição – zona de transição
- Módulo de deformação do agregado – porosidade – Agregado
- Fração volumétrica – agregados
- Tipo de agregado graúdo.
- Velocidade de aplicação da carga. (Mehta/1994)

Na Figura 14, é verificado o comportamento do módulo de elasticidade para a pasta de cimento, agregado e concreto, mostrando que concretos com maior quantidade de pasta tendem a obter menores módulos de deformação (Mehta e Monteiro, 1994).

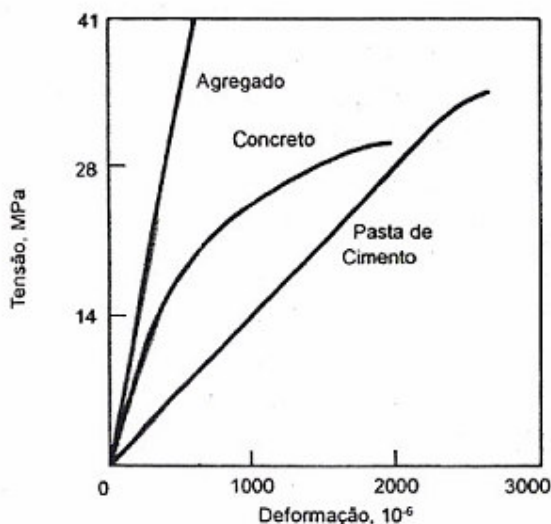


Figura 14: Comportamentos típicos tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto (Mehta e Monteiro, 1994).

O uso da cinza de casca de arroz como adição ao concreto ocasiona um aumento do teor de pasta o que provoca uma redução no módulo de elasticidade na mesma proporção do teor de adição mineral em substituição de cimento (M. Gomes da Silva, 2007).

Nos estudos de microscopia eletrônica de varredura, realizados por Hasparyk (1999), utilizando argamassas confeccionadas para ensaios de reatividade verificou-se que à medida que se aumenta o teor da cinza altamente reativa, a pasta torna-se mais densa, a porosidade é reduzida e há uma melhor aderência na interface entre a pasta e o agregado.

Hasparyk, et al (2003) pesquisou a adição de CCA (sem moagem e moída), amorfa (com queima controlada), em substituição parcial ao cimento, nos teores de 8%, 10%, 12%, 16%, 20%, e obteve os valores de módulo de elasticidade apresentados na Figura 15.

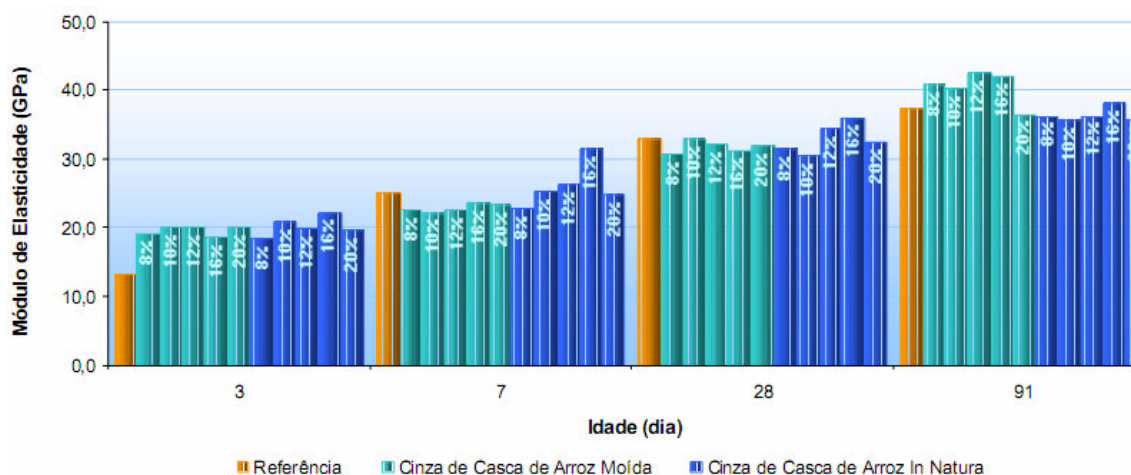


Figura 15: Gráfico do módulo de elasticidade com o tempo (Hasparyk et al , 2003).

O autor verificou que os valores de módulo de elasticidade na presença da CCA moída foram, na maioria dos casos, superiores ao obtido para a amostra de referência aos 91 dias. Os resultados das amostras in natura foram, no geral, inferiores às da amostra moída. Para o módulo de elasticidade das amostras com cinza moída foi observado um ganho em relação ao referência de, aproximadamente, 14% no teor de substituição de 12% de CCA moída. Em relação

aos teores de cinza moída de 8%, 10% e 16%, o ganho foi de 9%, 8% e 12%, respectivamente.

Os autores ainda concluíram que a CCA “in natura” não apresentou propriedades pozolânicas, não refletindo em melhorias no módulo de elasticidade.

3.5 Retração

A retração por ser uma propriedade complexa e com diversos fatores influentes é pouco estudada pelo meio técnico.

A secagem do concreto é o resultado das condições climáticas e independe do carregamento. Ela se baseia nos fenômenos capilares que ocorrem nas redes de poros existentes no interior do concreto. As primeiras manifestações de retração verificam-se antes da pega (Neville, 1997).

A retração plástica é reservada para concretos frescos e ocorre pela perda de água por exsudação, evaporação, absorção de água pelos agregados, entre outras (P. Helene e T. Andrade, 2007).

A retração por secagem é um fenômeno natural que ocorre como consequência da hidratação dos compostos anidros do cimento Portland e é tanto mais acentuada quanto maior a perda de água que estes sofrem como consequência de um ambiente mais ou menos seco. Esta variação dimensional está ligada a remoção da água adsorvida da pasta de cimento, ou seja, aquela aderida fisicamente no produto de hidratação do C-S-H. O qual é relativamente maior no caso de compostos de cimento Portland com adição pozolânica.

Retração autógena que dificilmente ocorre em concretos convencionais, incide quando o volume total dos produtos de hidratação é menor que o volume de cimento anidro e água, ocorrendo a remoção da água capilar para a hidratação do cimento anidro remanescente (P. Helene e T. Andrade, 2007).

Segundo Aïtcin (2000), a tensão capilar é inversamente proporcional ao diâmetro dos capilares. Enquanto as forças capilares forem menores que a resistência à tração do concreto, o concreto se retrai de maneira elástica.

Andrade (1997) cita que são inúmeros os fatores que podem influenciar a retração, tais como: as condições ambientais, tipo litológico do agregado, dimensão

máxima característica, propriedades físicas (absorção, massa específica) e elásticas do agregado, proporção dos materiais (principalmente a quantidade de água), microfissuras (interface pasta/agregado graúdo, assim como pela aderência entre os mesmos).

De acordo com Isaia (1995), que estudou os efeitos da retração total, em concretos com elevados teores de pozolanas, a influência destas na retração dos concretos de elevado desempenho, depende da quantidade de água adicionada, do nível de resistência, assim como o tipo e teor de pozolanas. As baixas relações a/ag dos CAD aliadas ao teor de finos presentes levam a uma retração autógena elevada, tanto maior quanto menor a relação a/ag, entretanto, a retração por secagem é reduzida devido a baixa quantidade de água na mistura. Deste modo, a retração total será maior ou menor conforme o teor de pozolana, dimensões da peça e condições de cura.

Silva (2004) apresentou estudo de argamassas moldadas com cimento CP-V ARI com adição de CCA, em substituição de cimento, obtida por queima sem controle de temperatura e moída, nos teores de 5 e 10 % e se verificou retrações de 0,003% e 0,007%, respectivamente, aos 28 dias. Tais resultados foram considerados excelentes, pois o aumento da retração foi relativamente pequeno, e indica que a adição do material provocou pouca variação da retração.

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 a 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

- Relações água/aglomerante - 0,45; 0,55 e 0,65, em massa.
- Tempo de cura - idade onde as amostras foram ensaiadas:
 - resistência à compressão axial: 7, 28 e 91 dias
 - resistência à compressão diametral: 28 e 91 dias
 - módulo de elasticidade: 28 e 91 dias
 - retração: 28, 91 e 300 dias
- Tipo de adições minerais - (utilizadas em substituição de parte do cimento):
 - cinza de casca de arroz sem moagem (CCAN) e moída (CCAM).
- Teor de substituição de cimento por CCA: 15% e 25%, em massa.

4.1.2. Variáveis dependentes

- Resistência à compressão axial.
- Resistência à compressão diametral.

- Módulo de elasticidade.
- Retração
- Porosimetria por intrusão de mercúrio

4.2 Materiais Utilizados

Os materiais foram escolhidos de acordo com a disponibilidade na região central do estado do Rio Grande do Sul, após foram realizados ensaios de caracterização dos materiais.

4.2.1. Aglomerantes

Foram utilizados como aglomerantes cimento e cinza de casca de arroz.

O cimento usado nas misturas foi o Portland CII F – 32, por ser um cimento livre de adição de pozolanas conforme NBR 11578/1991.

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 (CCAN), e moída (CCAM). O processo de moagem foi realizado em moinho de bolas metálicas durante 60 minutos.

Para uma melhor caracterização da cinza natural (sem moagem), que durante o processo de fabricação do concreto sofre uma moagem por atrito com os demais materiais, foi realizado ensaio de distribuição granulométrica à laser da CCA natural após mistura a seco com os agregados graúdos na betoneira, na mesma composição dos traços, ou seja com teores de 15 e 25% de substituição de cimento por CCA, pelos mesmos intervalos de tempo utilizados, posteriormente, nas misturas.

Os ensaios realizados foram:

- Distribuição granulométrica à laser: ABCP/SP, PO-GT-1043 (Figura 16);
- Massa específica: NBRNM 23 (Tabela 04);
- Finura # 0,075 mm: NBR 11579 (Tabela 04);
- Área específica BET: norma ASTM D-3663 (Tabela 04);
- Análise química: ABCP/SP, PO-GT-3051 Revisão 02 (Tabela 05);
- Tempo de início e fim de pega: NBRNM 65 (Tabela 05);
- Pozolanidade de Cimento Portland Pozolânico: ABCP/SP, PO-GT-3004 (Tabela 06);
- Porosimetria por intrusão de mercúrio – PIM
- Resistência à compressão axial: NBR 5739/2007
- Resistência à compressão diametral: NBR 7222/1994
- Módulo de elasticidade: NBR 8522/2003
- Retração: ASTM C490/1996

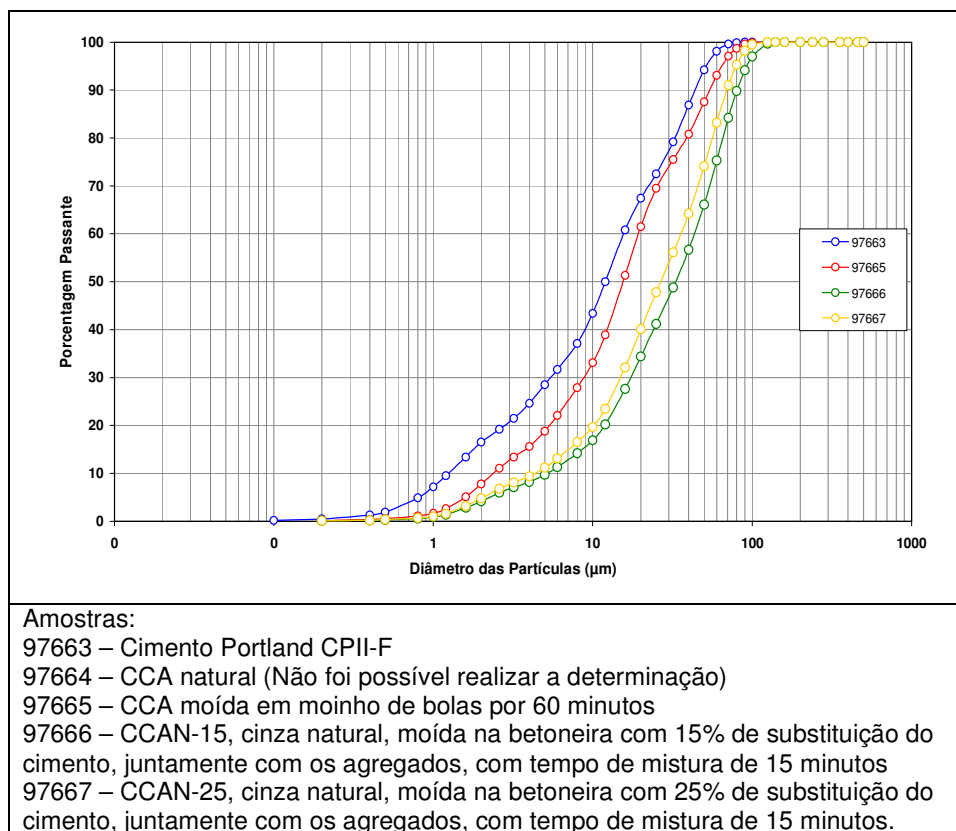


Figura 16: Distribuição granulométrica à laser dos aglomerantes

Pela distribuição granulométrica (Figura 16), observa-se que o cimento foi o material mais fino, seguido pela cinza moída em moinho de bolas. As cinzas naturais moídas na betoneira apresentaram uma distribuição granulométrica com grãos maiores que o cimento e a CCA moída. Entre as cinzas naturais, a amostra com 25% de substituição de cimento teve a distribuição granulométrica de material mais fino, principalmente no intervalo entre 10 e 100 μm , isso se deve pela maior quantidade de cinza (material mais frágil) que pelo atrito com as partículas de areia e cimento produziram uma CCA com granulometria mais fina.

A caracterização física dos aglomerantes encontra-se na Tabela 04.

Tabela 4: Caracterização física dos materiais.

CARACTERÍSTICA FÍSICA	CP II-F	CCAN	CCAM	CCAN-15 ¹	CCAN-25 ²	
Massa específica (Kg/dm ³)	3,06	1,41	2,09	1,96	1,93	
Área específica BET (m ² /g)	1,44	9,67	49,25	44,41	45,01	
Finura # 0,075 (%)	2,98	2,18	4,97	9,09	4,84	
Diâmetro característico (μm)	D _m ³	11,50	*	15,54	33,19	26,70
	D ₁₀ ⁴	1,28	*	2,38	5,19	4,34
	D ₉₀ ⁵	41,57	*	54,14	80,51	69,39

¹ CCAN-15: cinza natural, misturada por 15 minutos na betoneira com agregados e cimento, com 15% de substituição de cimento por cinza

² CCAN-25: cinza natural, misturada por 15 minutos na betoneira com agregados e cimento, com 25% de substituição de cimento por cinza

³ D_m: Diâmetro médio

⁴ D₁₀: Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas

⁵ D₉₀: Diâmetro acima do qual se encontram 90% das partículas

** Não procedeu-se à determinação pois não é possível dispersar a amostra durante o ensaio.

Devido a maior finura do cimento, observa-se seu menor diâmetro característico e por consequência sua maior massa específica e menor área específica.

A composição química dos aglomerantes encontra-se na Tabela 05.

Tabela 5 - Composição química dos aglomerantes.

Componentes	Porcentagem em massa dos materiais (%)		
	CP II-F-32	CCAN	CCAM
Perda ao fogo	1,31	0,51	0,25
SiO ₂	18,92	95,04	94,84
Al ₂ O ₃	4,32	0,00	0,39
Fe ₂ O ₃	2,58	0,44	0,54
CaO	60,15	1,25	1,32
MgO	4,91	0,45	0,40
SO ₃	3,19	0,01	0,01
Na ₂ O	-	0,09	0,11
K ₂ O	-	1,40	1,45
Início de pega (min)	157	-	-
Fim de pega (min)	205	-	-
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	15,0	-
	3 dias	26,3	-
	7 dias	32,2	-
	28 dias	40,0	-

Observa-se pela Tabela 05, a grande presença de sílica nas cinzas, cerca de 95 %, superando o cimento com apenas 19%.

Para uma completa caracterização dos aglomerantes, foi determinado o índice de atividade pozolânica (IAP) através do método proposto por Isaia (1995), Onde foi medido no gráfico (Figura 17) do ensaio Fratini, a distancia "d", que é a diagonal entre a origem dos eixos até o ponto em questão, e a partir desta, calculou-se o IAP em porcentagem, Tabela 06.

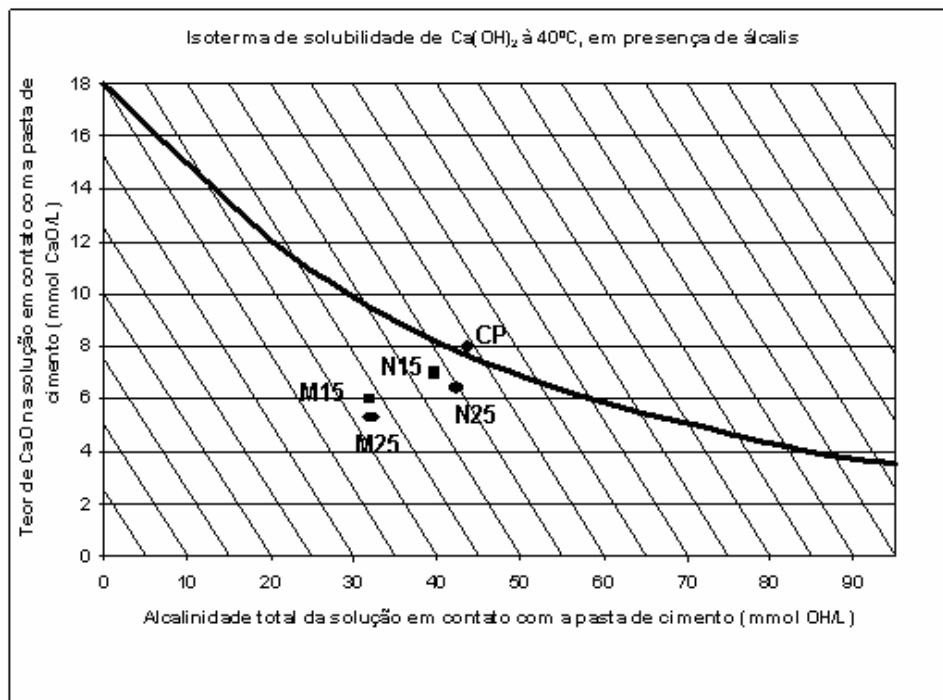


Figura 17: Pozolanicidade de cimento pozolânico.

Tabela 6: Índice de atividade Pozolânica (Fratini).

Misturas	Atividade Pozolanica		Distância "d" (cm)	Índice de atividade pozolanica ¹ IAP
	mmol CaO/l	mmol OH/l		
CP II-F	8,0	59	6,8	14,7
N15	9,0	48	6,0	16,7
N25	8,5	49	5,8	17,2
M15	6,0	43	5,2	19,2
M25	5,5	42	5,0	20,0

Nota: ¹ Obtenção do índice (IAP=1/d %) conforme Isaia (1995).

Através do índice de atividade pozolânica (IAP), apresentado na Tabela 06 e calculado em função do gráfico da Figura 17, pode-se verificar que, quanto maior este índice, maior é a atividade pozolânica da mistura considerada, proporcionando maior consumo de hidróxido de cálcio e menor alcalinidade total. Este índice, IAP, representa o inverso da distância (d), em cm, que separa os pontos do gráfico com a origem das coordenadas, multiplicado por 100. Portanto, concluindo que a maior pozzolanicidade é da mistura com 25% de CCA moída.

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 seca a temperatura ambiente e estocada em baias até a data das moldagens.

Com o intuito de se obter uma granulometria mais fechada, foi utilizado uma composição de duas areias e duas pedras, e as porcentagens ótimas encontradas foram 50% de agregado A + 50% de agregado B, tanto para a areia quanto para a pedra. As características físicas dos agregados estão apresentadas na Tabela 07 e as curvas granulométricas nas Figuras 18 e 19.

Tabela 7: Características físicas dos agregados.

Grandeza física	Agregados graúdos		Agregados miúdos	
	Pedra-A	Pedra-B	Areia-A	Areia-B
Massa específica (Kg/ dm ³)	2,55	2,49	2,60	2,63
Massa unitária no estado solto (Kg/dm ³)	1,40	1,39	1,51	1,57
Massa unitária no estado solto da composição (50% A+50% B) (Kg/dm ³)	1,45		1,61	
Módulo de finura	5,42	6,91	2,81	1,89
Índice de forma	-	2,31	-	-
Absorção de água (%)	3,03	2,87	-	-
Coef. de Inchamento	-	-	1,37	1,33
Dim. máxima característica (mm)	9,5	19	4,75	1,18

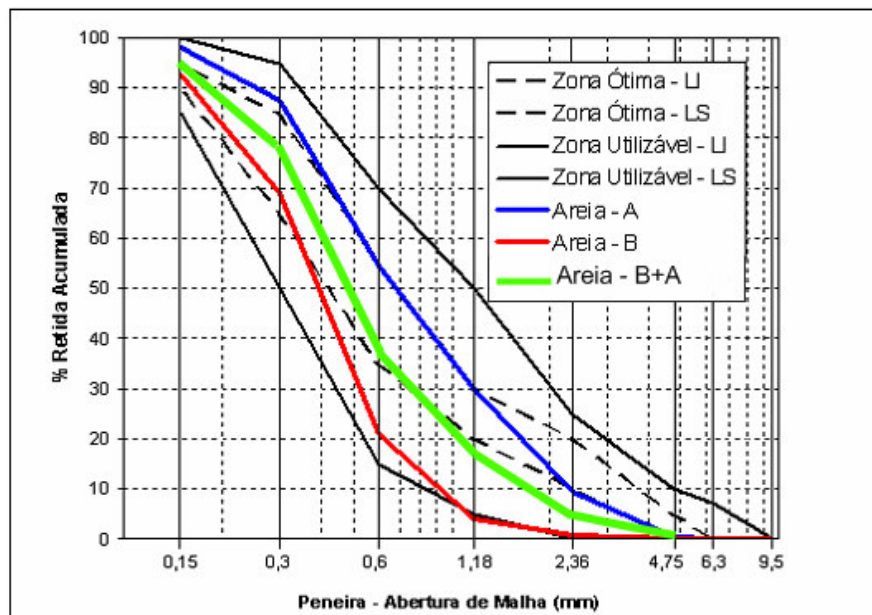


Figura 18: Curva granulométrica dos agregados miúdos.

Observa-se pelo gráfico da Figura 18, que com a mistura de 50% de cada areia, obteve-se uma distribuição granulométrica mais próxima da aceitável.

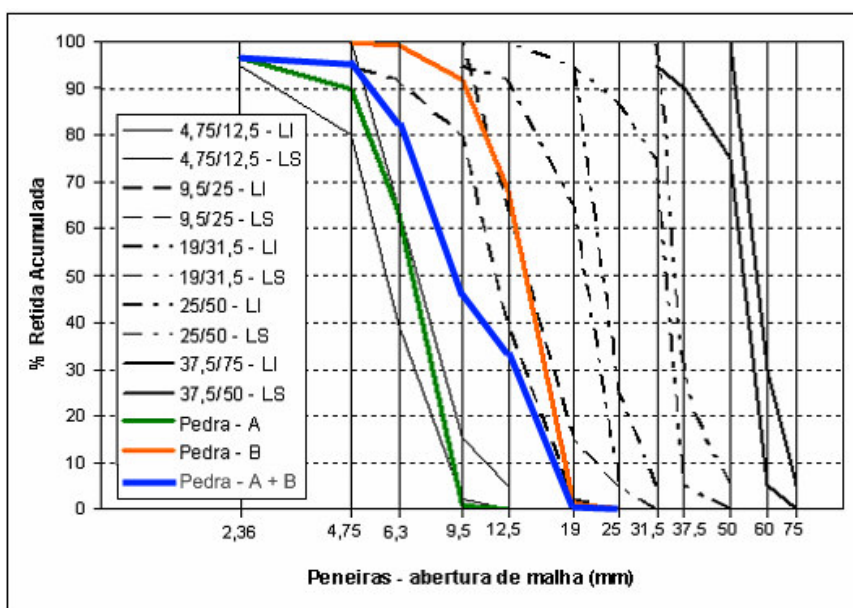


Figura 19: Curva granulométrica dos agregados graúdos.

Com a mistura em partes iguais do agregado graúdo, obteve-se um material com granulometria intermediária as utilizadas, ficando aproximadamente numa zona granulométrica 4,75/25.

4.2.3 Aditivos

Foi necessária a utilização de aditivo superplastificante a base de policarboxilatos, isento de cloretos conforme ASTM C 494 para que se alcançassem a consistência e trabalhabilidade desejadas. Para tanto foi convencionado valor de abatimento no cone de Abrams de 80 ± 20 mm, determinados através do ensaio de abatimento do tronco de cone segundo norma NBRNM 67.

Devido ao fato de que os aditivos podem influenciar nas condições de hidratação, modificando a microestrutura dos concretos, optou-se por utilizá-lo em todas as misturas aglomerantes, possibilitando uma maior homogeneidade dos concretos. A quantidade de aditivo por metro cúbico de concreto está apresentada na Tabela 08.

4.2.4 Água

Para moldagem dos corpos-de-prova utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento da Universidade Federal de Santa Maria.

4.3 Traços

Foram utilizados três tipos de aglomerantes: cimento Portland CPII-F, cinza sem moagem (CCAN) e cinza moída (CCAM), com isso se obteve cinco misturas aglomerantes para cada relação a/ag: traço de referência com 100% cimento

Portland e dois com CCAN em teores de substituição de 15% e 25% e outros dois com CCAM em teores de substituição de 15% e 25%.

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.

Os teores de substituição de 15 e 25% foram arbitrados em função de revisões bibliográficas de pesquisadores como ISAIA (1995), e visando a obtenção de resistências mecânicas aceitáveis com o maior teor de substituição possível.

Nos traços com adição de CCA foram realizadas correções nas quantidades do agregado miúdo, devido a CCA ter menor massa específica que o cimento utilizado e também por ter a CCAM e a CCAN massas específicas diferentes também, 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 são apresentadas na Tabela 08.

Tabela 8: Consumo de materiais por m³ de concreto.

Misturas	a/ag	Cimento (Kg/m ³)	CCA (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Pedra (Kg/m ³)	Aditivo ⁶ (l/m ³)
R ¹	0,45	407,2	-	688,1	1095,3	0,1
	0,55	319,8	-	779,3	1098,6	0,3
	0,65	262,7	-	838,0	1100,8	0,1
15 M ²	0,45	346,1	61,1	663,7	1095,3	1,3
	0,55	271,5	47,9	760,1	1098,6	1,4
	0,65	223,3	39,4	822,3	1100,8	1,2
25 M ³	0,45	305,4	101,8	647,4	1095,3	1,8
	0,55	239,5	79,8	747,3	1098,6	1,8
	0,65	197,0	65,7	811,8	1100,8	1,3
15 N ⁴	0,45	346,1	61,1	627,1	1095,3	2,2
	0,55	271,5	47,9	731,7	1098,6	2,1
	0,65	223,3	39,4	798,6	1100,8	2,2
25 N ⁵	0,45	305,4	101,8	586,3	1095,3	3,6
	0,55	239,5	79,8	699,4	1098,6	3,2
	0,65	197,0	65,7	772,4	1100,8	3,1

¹ Mistura com 100% de cimento Portland.
² Mistura com 15% de CCAM em substituição parcial (S.P.) ao cimento.
³ Mistura com 25% de CCAM em S.P. ao cimento
⁴ Mistura com 15% de CCAN em S.P. ao cimento.
⁵ Mistura com 25% de CCAN em S.P. ao cimento.
⁶ Adotou-se densidade igual a 1,1g/cm³

4.4 Ordem de colocação dos materiais na betoneira

Foi realizado um estudo experimental com o intuito de 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 apresentadas na Tabela 09.

Tabela 9: Ordem de colocação e tempo de mistura dos materiais na betoneira.

Traço	Ordem / Tempo	Materiais							Tempo de mistura
		CCAN	Pedra	Água	Aditivo	CCAM	Cimento	Areia	
R	Ordem	-	1º	1º	3º	-	2º	4º	10min
	Tempo	-	2min	2min	-	2min	4min		
15 M	Ordem	-	1º	1º	3º	2º	2º	4º	10min
	Tempo	-	2min	2min	2min	4min			
25 M	Ordem	-	1º	1º	3º	2º	2º	4º	10min
	Tempo	-	2min	2min	2min	4min			
15 N	Ordem	1º	1º	2º	2º	-	3º	4º	15min
	Tempo	2min	2min	-	2min	9min			
25 N	Ordem	1º	1º	2º	2º	-	3º	4º	15min
	Tempo	2min	2min	-	2min	9min			

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

Para evitar as variações do parâmetro temperatura do concreto, utilizou-se a equação proposta por Metha e Monteiro (1994) e Neville (1995). O objetivo foi manter a temperatura constante do concreto independentemente da temperatura ambiente, visto as variações que ocorrem na região central do estado do Rio Grande do Sul. A correção foi feita através da temperatura da água, pela Equação 01, 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 constante em $19^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, (ver Figura 20).

$$T = \frac{0,22 * (Tm * Mm + Tc * Mc) + Ta * Ma}{0,22 * (Mm + Mc) + Ma} \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

- T – Temperatura da massa de concreto (°F)
- Tm – Temperatura dos agregados (°F)
- Tc – Temperatura do cimento (°F)
- Ta – Temperatura da água (°F)
- Mm – Massa dos agregados (Kg)
- Mc – Massa de cimento (Kg)
- Ma – Massa de água (Kg)

A determinação da consistência, foi realizada de acordo com o ensaio de abatimento do tronco de cone (NBRNM67/ 1998), Figura 21.



Figura 20: Controle de temperatura do concreto.



Figura 21: Abatimento do concreto.

As moldagens dos corpos de prova foram realizadas de acordo com a norma NBR 5738/2003 em fôrmas metálicas 10x20cm (para os ensaios de resistência axial, diametral e módulo de elasticidade) e 10 x 10 x 28,5cm (para o ensaio de retração), e os adensamentos foram através de mesa vibratória em duas camadas, Figura 22.



Figura 22: Adensamento dos corpos de prova em mesa vibratória.

Os corpos de prova ficaram à temperatura ambiente pelas primeiras 24 horas (Figura 23), sendo posteriormente desmoldados e acondicionados em câmara úmida

sob temperatura em $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade $> 95\%$, onde permaneceram até a data dos ensaios, com exceção dos corpos de prova prismáticos para determinação da retração (Figura 24).

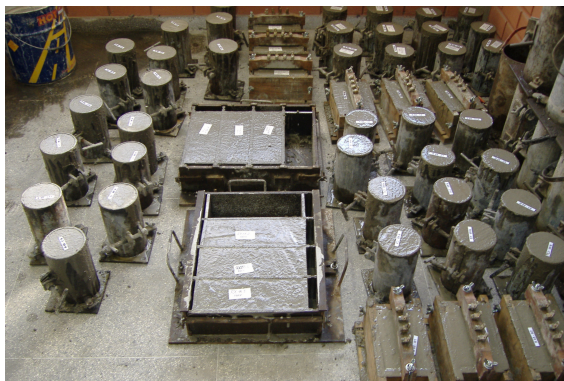


Figura 23: Primeiras 24 horas após a moldagem.



Figura 24: Câmara úmida

Ensaio:

Resistência à compressão: idades de 7, 28 e 91 dias, de acordo com a NBR 5739/2003.

Ensaio de Porosimetria por intrusão de mercúrio - PIM: idade de 91 dias.
Procedimento ABCP

Compressão diametral: idades de 28 e 91 dias, de acordo com a NBR 7222/1994.

Módulo de elasticidade: idades de 28 e 91 dias, de acordo com NBR 8522/2003.

Retração: idades de 28, 91 e 300 dias, de acordo com a ASTM C490/1996.

4.6 Ensaio realizados

Na sequência serão descritas as metodologias dos ensaios realizados nos corpos de prova, que passaram por cura úmida até as datas requeridas. Os ensaios são: resistência à compressão axial e diametral, módulo de elasticidade e retração.

Está descrito ainda o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, retirado de outra dissertação de mestrado pertencente ao mesmo projeto de pesquisa.

4.6.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739/2007, no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Para tanto foram moldados três (03) corpos-de-prova por idade, cilíndricos de 10x20 cm, capeados com enxofre e ensaiados em prensa hidráulica nas idades de 7, 28 e 91 dias (Figura 25).



Figura 25: Ensaio de compressão axial.

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

4.6.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio – PIM

Este ensaio foi realizado por Duart M.A. (2008), em sua dissertação de mestrado, como parte da pesquisa sobre cinza de casca de arroz, realizada pelo grupo GEPECON, da UFSM.

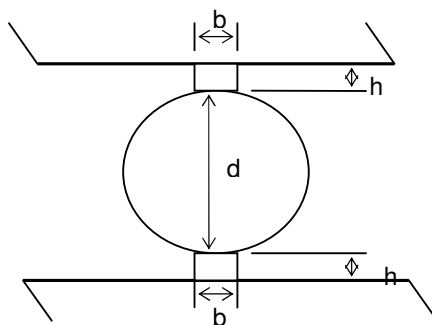
O ensaio foi realizado nos Laboratórios da Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP) no equipamento da marca Micromeritics, modelo Autopore II 9220.

Após os ensaios de compressão axial, foram retirados amostras de argamassa de aproximadamente 6 mm de aresta retirados dos corpos de prova de concreto. Para remover a água livre e induzir a paralização das reações de hidratação e pozolanicidade, sem alterar a microestrutura dos materiais, as amostras foram imersas em álcool etílico absoluto, por 24 horas e secas em estufa a 60°C por 12 horas, e posteriormente acondicionados em recipientes hermeticamente fechados.

4.6.3 Resistência à compressão diametral

Para se obter os resultados de compressão diametral ($f_{t,D}$), 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 apresentados representam a média aritmética de três determinações de cada traço, com desvio máximo relativo de 10%. Quando esse desvio era maior, foi utilizada a média de dois valores ou o resultado de maior valor.

O ensaio consiste em, de acordo com a NBR 7222/1994: *“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 e seção transversal com as seguinte dimensões”*: (ver Figura 26).



Onde: $b = (0,10 \pm 0,01) \cdot d$
 $h = (0,5 \pm 0,1) \text{ cm}$

Figura 26: Disposição do cp para ensaio de $F_{t,D}$.

Em seguida, é aplicada uma leve compressão para manter estável a posição do cp. A carga é aplicada com velocidade constante de $(0,05 \pm 0,02) \text{ MPa}$ por segundo, até a ruptura do corpo de prova (ver Figuras 27 e 28).



Figura 27: Posicionamento do cp para o ensaio de compressão diametral.



Figura 28: Cp rompido após ensaio de compressão diametral.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela equação 02:

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (\text{Equação 02})$$

Onde:

$f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa), com aproximação de 0,05

F= carga máxima obtida no ensaio
d= diâmetro do corpo de prova
l= altura do corpo de prova

4.6.4 Módulo de elasticidade

Para os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados de acordo com a NBR 8522/2003. Para isso, os corpos de prova eram retirados da câmara úmida, capeados com enxofre e ensaiados nas idades de 28 e 91 dias.

O primeiro passo é determinar a resistência por compressão axial. Em seguida, posiciona-se o corpo de prova no compressômetro mecânico (ver Figura 29) com resolução de 1 ± 10^{-3} mm, e erro relativo máximo inferior a 1%.



Figura 29: Ensaio do módulo de elasticidade.

Em seguida o cp é levado à prensa, aplicado um carregamento básico de 0,5 MPa (σ_a) 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_b). Essa tensão é mantida por 60 segundos e depois reduzida à tensão básica à mesma velocidade. Deve-se realizar mais dois ciclos de cargas para no último ciclo de pré-carga e no período de 60 segundos sob a tensão σ_a onde são registradas as deformações específicas lidas (ϵ_a), tomadas em no máximo 30 segundos. É então carregado novamente o cp com a tensão σ_b , e registrado as deformações (ϵ_b), tomadas em no máximo 30 segundos.

Após a realização de todas as leituras, é carregado novamente o corpo de prova e levado à ruptura. Se a resistência efetiva (f_{cef}) à compressão diferir de f_c em mais de 20% os resultados do cp são descartados.

O módulo de elasticidade, E_{ci} , em gigapascal, é dado pela Equação 03:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (\text{Equação 03})$$

Onde:

$\sigma_a = 0,3 f_c$, é a tensão maior (MPa).

$\sigma_b = 0,5$ MPa, é a tensão básica (MPa).

ε_b é a tensão específica média dos cps ensaiados sob tensão maior.

ε_a é a tensão específica média dos cps ensaiados sob tensão básica.

Os resultados apresentados representam a média de duas determinações de cada traço, com desvio máximo relativo de 10%. Quando esse desvio era maior, foi utilizado o resultado de maior valor.

4.6.5 Retração

Os ensaios de retração foram realizados de acordo com a ASTM C490/1996. Para tanto, foram moldados três corpos de prova por traço pesquisado, com formato prismático nas dimensões 10 x 10 x 28,5 cm, e inseridos pinos de medição de 22,5mm de comprimento em suas extremidades (ver Figura 30).



Figura 30: Pino de inserção de 22,5mm Φ 6.0mm.

Os resultados apresentados são média aritmética de três determinações de cada traço, com desvio máximo relativo de 10%. Quando esse desvio era maior, foi utilizada a média de dois valores ou o resultado de maior valor.

Após as moldagens os corpos de prova permaneceram à temperatura ambiente por 24 horas até a desmoldagem. Após foram levados à câmara úmida onde permaneceram por 7 dias, data da primeira leitura. Em seguida foram acondicionados em sala climatizada até as datas de ensaios de 28, 91 e 300 dias (Figura 31).

As medições de retração forma realizadas com comparador de expansibilidade, com relógio digital, sensível a 0,001mm (Figura 32).



Figura 31: Estocagem dos cps em sala climatizada.



Figura 32: Medição da retração.

Os resultados de retração (L) são dados em porcentagem e calculados pela equação 04:

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (\text{Equação 04})$$

Onde:

- L é a retração na idade do ensaio (%)
- L_x é a leitura medida na data do ensaio (mm)
- L_i é a leitura inicial, medida aos 7 dias (mm)
- G é distância interna entre os pinos, igual a 250 mm

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos laboratoriais. Serão feitas análises em função da relação água/aglomerante e em função do tempo. Também serão comparados dados pertinentes à análise das propriedades mecânicas dos concretos.

5.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5739/2003. Os valores de resistência à compressão axial apresentados são a média de 3 (três) corpos de prova, com desvio máximo relativo de 10%. Quando esse desvio era maior, foi utilizada a média de dois valores ou o resultado de maior valor.

Os valores apresentados na Tabela 10 são para ensaios de resistência por compressão axial, aos 7, 28 e 91 dias.

Tabela 10: Compressão axial nas idades estudadas.

Traço	Rel a/ag	Resistência axial (MPa)		
		7 dias	28 dias	91 dias
R	0,45	27,4	42,2	43,0
	0,55	22,6	30,5	33,6
	0,65	18,8	24,3	28,0
15M	0,45	29,2	43,6	53,1
	0,55	22,1	32,6	40,4
	0,65	18,9	27,2	33,4
25M	0,45	28,9	43,5	50,9
	0,55	19,5	30,3	36,9
	0,65	12,7	22,4	29,6
15N	0,45	29,8	37,7	50,5
	0,55	19,4	27,5	33,8
	0,65	16,1	23,6	31,9
25N	0,45	16,3	22,7	30,5
	0,55	12,5	17,5	24,2
	0,65	9,9	13,9	19,0

Pode-se observar que com o aumento da relação água/aglomerante, ocorre um decréscimo na resistência a compressão axial, para todos os traços. Essa influência da relação água/cimento na resistência à compressão do concreto foi descoberta inicialmente por René Féret no século XIX, mas principalmente apresentada por Abrams (1918), hoje chamada de Lei de Abrams.

Para uma melhor visualização, é possível traçar gráficos da evolução da resistência com o tempo, em igualdade de relação água/aglomerante (ver Figuras 33, 34 e 35).

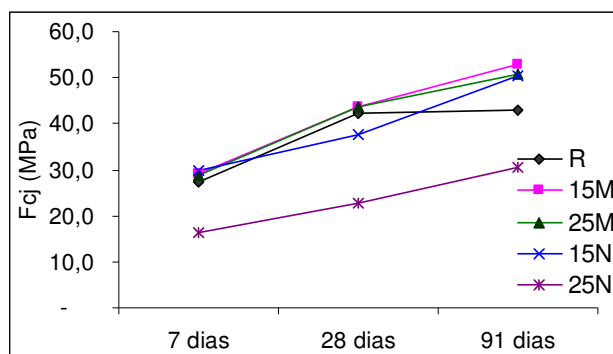


Figura 33: Gráfico da evolução da resistência à compressão axial, com relação água aglomerante de 0,45.

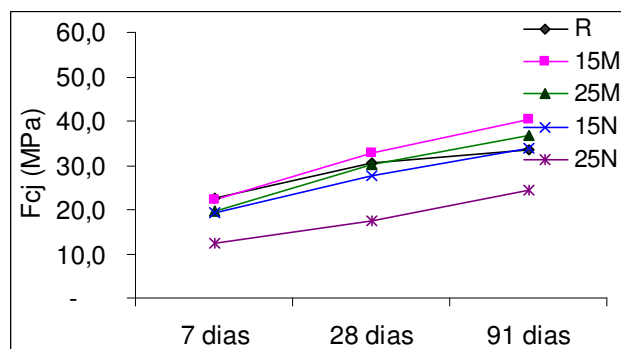


Figura 34: Gráfico da evolução da resistência à compressão axial, com relação água aglomerante de 0,55.

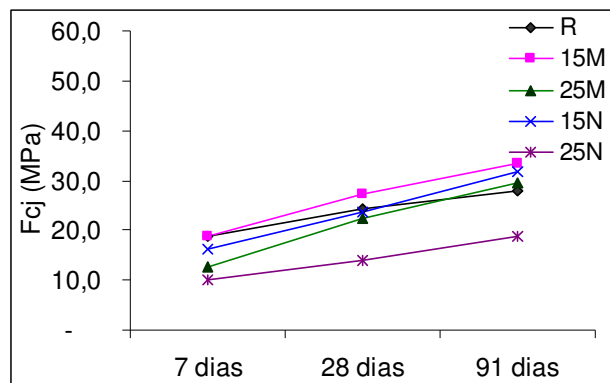


Figura 35: Gráfico da evolução da resistência à compressão axial, com relação água aglomerante de 0,65.

Com relação a/ag de 0,45 (Figura 33), observa-se que quase todos os traços obtiveram resistências superiores ao referência, ficando abaixo apenas o 15N aos 28 dias, e o 25N para todas as idades. Os corpos de prova com adição de cinza moída apresentaram valores superiores aos com cinza natural, para uma mesma porcentagem de substituição. Porém, aos 91 dias, com 15% de substituição de cimento por cinza, a moagem apresentou pouco ganho de resistência, apenas 5%, em relação à natural.

Porém, para uma relação a/ag de 0,55 (Figura 34), aos 7 dias, todos os traços apresentaram resistências inferiores ao referência, enquanto que aos 91 dias apenas o 25N ficou abaixo. Como a quantidade de sílica ativa da cinza é elevada quando comparada ao cimento empregado (em torno de 95% da cinza contra 19% do cimento), e esta apresenta grande pozolanicidade e grande finura, acaba resultando num ganho de resistência, em prazo mais dilatado, devido a uma maior compacidade da pasta e aumento da formação de C-S-H. Porém para os concretos com adição de 25% de cinza natural a pozolanicidade da cinza fica prejudicada pela falta de moagem que gera um aumento de grãos de material cimentício mais grossos, tornando o concreto menos resistente.

Com a relação água/aglomerante de 0,65 (Figura 35), aos 7 dias verifica-se que quase todos os concretos com adição mineral ficaram abaixo do referência, apenas o traço com adição de 15% de cinza moída ficou acima. Porém aos 91 dias os concretos com adição de 15% de cinza natural ou moída e 25% de cinza moída superaram o referência em resistência axial. Isso devido à grande quantidade de

sílica amorfa presente na cinza, que precisa de um tempo maior que o cimento para reagir e formar o C-S-H.

As Figuras 36 e 37 demonstram a evolução das resistências com a variação da relação água/aglomerante, para 28 e 91 dias, respectivamente.

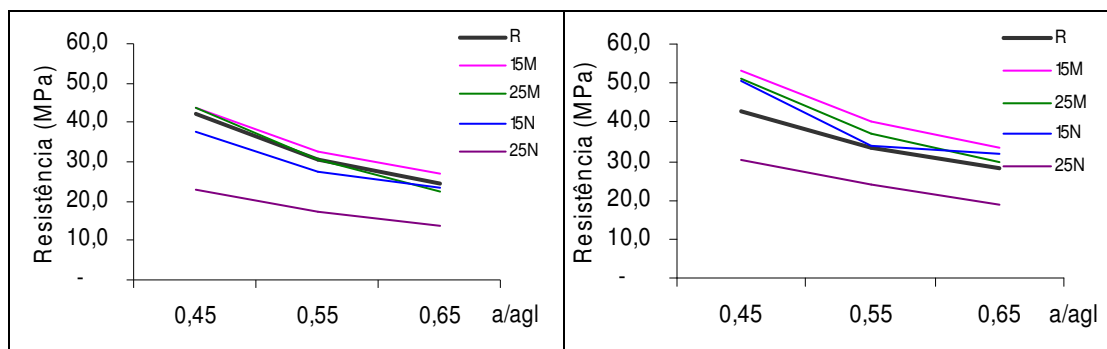


Figura 36: Resistência à compressão-28 dias.

Figura 37: Resistência à compressão-91 dias.

De acordo com a Figura 36, observa-se que com o aumento da relação água/aglomerante ocorre um maior decréscimo na resistência no traço 25M, enquanto que o 15N com o aumento da quantidade de água na mistura aproxima-se do referênciã. O traço 15M se mantém superior ao R para todas as relações, enquanto que o 25N apresenta resistências bastante inferiores aos demais.

Aos 91 dias, verifica-se pela Figura 37, que os traços com cinza moída evoluem com resistências superiores ao referênciã, sendo que o traço 15N com 0,55 de água aproxima-se do R porém volta a superá-lo com relação a/ag de 0,65. O traço 25N, se mantém inferior aos demais para todas as relações água/aglomerantes.

5.1.1 Variação da resistência à compressão axial

A variação na resistência que ocorre com a adição mineral, pode ser expressa na forma de porcentagem, como é observada na Tabela 11, onde é feita uma

comparação dos resultados dos concretos com adição de cinza em relação aos de referência, em igualdade de relação água/aglomerante.

Tabela 11: Comparação entre concretos com adição mineral e concretos sem adição → $[(R - CCA)/R].100$

Traço		Variação da resistência(%)		
		7 dias	28 dias	91 dias
15M	0,45	6,8%	3,3%	23,3%
	0,55	-2,2%	7,2%	20,2%
	0,65	0,5%	12,1%	19,4%
25M	0,45	5,5%	3,1%	18,4%
	0,55	-13,5%	-0,5%	9,7%
	0,65	-32,2%	-7,6%	6,0%
15N	0,45	8,9%	-10,6%	17,4%
	0,55	-14,0%	-9,6%	0,5%
	0,65	-14,1%	-2,7%	13,9%
25N	0,45	-40,4%	-46,1%	-29,1%
	0,55	-44,8%	-42,5%	-27,9%
	0,65	-47,1%	-42,9%	-32,2%

Nota-se, pela Tabela 11, que as resistências obtidas aos 7 dias, para concretos com adição mineral foram inferiores aos de referência, com exceção dos concretos com baixa relação água/aglomerantes, de 0,45, e adição de cinza moída ou 15% de cinza natural. Aos 91 dias, porém, apenas o 25N apresentou valores inferiores ao R, sendo que quanto menor a relação água/aglomerante maior foi a diferença entre os concretos com adição e os sem adição.

Observa-se que os acréscimos de resistência são maiores nos corpos de prova com adição de cinza moída do que nos com cinza natural, uma causa desse efeito pode ser explicado pela finura que é uma propriedade importante da CCA, pois influencia na atividade pozolânica, de modo que, quanto mais fina, mais rapidamente reage com o cimento (ISAIA, 1991).

Para se analisar a influência da moagem na resistência, pode-se comparar os resultados de concretos com mesma porcentagem de adição mineral, em igualdade de relação água/aglomerante (Tabela 12).

Tabela 12: Relação entre concretos com adição de cinza natural e concretos com de cinza moída $\rightarrow [(M - N)/M].100$

Traço	Variação da resistência – N / M			
	7 dias	28 dias	91 dias	
15N X 15M	0,45	2,0%	-13,5%	-4,8%
	0,55	-12,1%	-15,6%	-16,4%
	0,65	-14,5%	-13,2%	-4,6%
25N X 25M	0,45	-43,5%	-47,7%	-40,1%
	0,55	-36,2%	-42,2%	-34,3%
	0,65	-22,0%	-38,2%	-36,0%

De acordo com a Tabela 12, observa-se que praticamente todos os traços apresentaram um aumento de resistência quando se usa 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 tiveram uma queda percentual não significativa na sua resistência quando comparado aos concretos com cinza moída. Verifica-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 apresentam maior pozolanicidade que os traços com cinza natural, propriedade essa que é ativada com a moagem da cinza.

5.1.2 Consumo de materiais cimentícios em igualdade de resistência

É possível extrair dos gráficos de resistência em função da relação água/aglomerante, as equações de Abrams e os valores de r^2 , obtidos através da fórmula de regressão exponencial, como mostrado na Tabela 13.

Tabela 13: Equações de Abrams para cada traço.

Traço	28 DIAS		91 DIAS	
	r^2	$f_c = A/B^{a/ag}$	r^2	$f_c = A/B^{a/ag}$
R	0,989	$f_c = 144,15e^{-2,7666.(a/ag)}$	0,993	$f_c = 112,32e^{-2,1548.(a/ag)}$
15M	0,983	$f_c = 123,81e^{-2,3592.(a/ag)}$	0,990	$f_c = 148,39e^{-2,315.(a/ag)}$
25M	0,997	$f_c = 191,06e^{-3,3111.(a/ag)}$	0,988	$f_c = 169,35e^{-2,7081.(a/ag)}$
15N	0,962	$f_c = 105,6e^{-2,3465.(a/ag)}$	0,844	$f_c = 134,67e^{-2,3054.(a/ag)}$
25N	0,999	$f_c = 68,81e^{-2,4717.(a/ag)}$	1,000	$f_c = 89,04e^{-2,3752.(a/ag)}$

Com as equações de Abrams, apresentadas na Tabela 13, é possível verificar as relações a/ag para as idades de 28 e 91 dias, para resistências de projeto de 30MPa e 40MPa, Tabela 14.

Tabela 14: Relações a/ag para 30MPa e 40MPa.

Traço	28 DIAS		91 DIAS	
	30MPa	40MPa	30MPa	40MPa
R	0,57	0,46	0,61	0,48
15M	0,60	0,48	0,69 **	0,57
25M	0,56	0,47	0,64	0,53
15N	0,54	0,41 **	0,65	0,53
25N	0,34*	0,22 *	0,46	0,34*

(*) rel. água/aglomerante fora da zona de estudo, obtidas por extrapolação ($\Delta > 10\%$).

(**) valores que diferiram menos de 10% da faixa de estudo.

Observa-se que apenas o traço 15M apresentou maiores relações a/ag que o referência, para todas as idades e resistências, o 25M só não superou para 30 MPa aos 28 dias, e o 15N foi maior para 30 e 40 MPa aos 91 dias.

Abaixo, na Tabela 15, pode-se verificar o consumo de cimento e de cinza de casca de arroz para as relações água/aglomerante apresentadas na Tabela 14.

Tabela 15: Consumo de cimento e cinza para resistências de 30MPa e 40MPa, nas idades de 28 e 91 dias.

Traço	Unid	28 DIAS		91 DIAS	
		30MPa	40MPa	30MPa	40MPa
R	cim(kg/m ³)	312	392	283	379
15M	cim(kg/m ³)	247	322	203	266
	cinza(kg/m ³)	44	57	36	47
25M	cim(kg/m ³)	239	289	200	253
	cinza(kg/m ³)	80	97	67	85
15N	cim(kg/m ³)	284	372	221	290
	cinza(kg/m ³)	50	66	39	51
25N	cim(kg/m ³)	*	*	298	*
	cinza(kg/m ³)	*	*	100	*

(*) relações água/aglomerante fora da zona de estudo.

Com os valores da Tabela acima, desenharam-se os gráficos das Figuras 38 e 39, com o consumo dos materiais cimentícios em função da relação água/aglomerante, para cada idade.

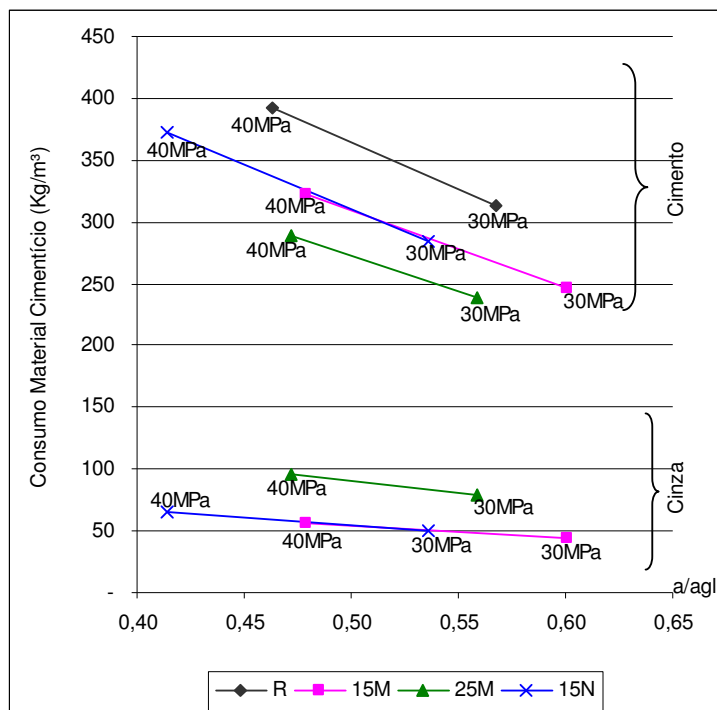


Figura 38: Consumo de Materiais cimentícios em função da relação água/aglomerante, para 28 dias.

Para se alcançar a resistência à compressão axial de 30 MPa e 40 MPa, aos 28 dias, é necessário, em relação ao concreto de referência, utilizar 80%, 75% e 93% da massa de cimento, para os traços 15M, 25M e 15N, respectivamente. Verifica-se que o traço com 15% de cinza moída, necessita cerca de 13% menos cimento que o traço com 15% de cinza natural, devido à maior pozolanicidade da cinza quando moída, e com uma maior relação água/aglomerante, acarretando uma maior trabalhabilidade.

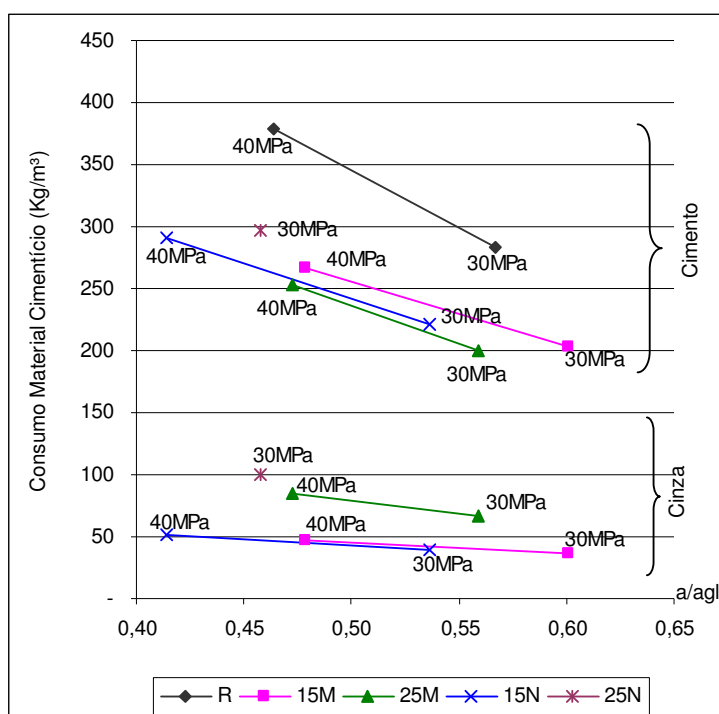


Figura 39: Consumo de Materiais cimentícios em função da relação água/aglomerante, para 91 dias.

Para se alcançar resistências de 30 MPa e 40 MPa, aos 91 dias de cura, é necessário, em relação ao concreto de referência, cerca de 71%, 69% e 77% da massa de cimento para os traços 15M, 25M e 15N respectivamente. Enquanto que para o traço com 25% de cinza natural chegar à 30MPa aos 91 dias, é necessário 5% à mais de cimento que o traço de referência, e uma relação água /aglomerante 34% menor, o que diminui a trabalhabilidade.

Os menores teores de cimento por m³ de concreto, em igualdade de resistência à compressão, trazem como conseqüência ganhos financeiros e ambientais, especialmente pelo menor consumo de energia e de emissão de CO₂. Com efeito, segundo Isaia (2008):

os decréscimos de consumo foram proporcionais ao teor de CCA, chegando a 30%, em média, para os traços CCAM15 e 23% para CCAN15. Para o custo houve acréscimo de 5% para o CCAN15 no nível de resistência de 30 MPa, enquanto que para 40 e 50 MPa houve decréscimos de 2 e 9%, respectivamente. Os decréscimos para as diferenças de energia e emissão de CO₂ foram muito semelhantes, situando-se entre 24% e 30% para o traço CCAM15 e 16% e 27% para CCAN15. Observa-se que para todas as variáveis estudadas, os decréscimos aumentam com o crescimento do nível de resistência, ou seja, os concretos de resistência mais elevada apresentam maior redução do consumo de cimento e de custo e menor consumo de energia e emissão de CO₂ em relação ao concreto de referência.

Pelos resultados obtidos por Isaia (2008) não é vantajosa a substituição de 25% de cimento por CCAN, ao menos para o nível de resistência de 30 MPa, valor máximo obtido nos ensaios para este teor, porque há acréscimo do consumo de cimento, de custo, de energia e de emissão de CO₂.

5.1.3 Resistência à compressão x volume de mercúrio intrudido

A resistência por compressão axial pode ser relacionada com a porosidade total, obtida através do ensaio de volume total de intrusão de mercúrio. O ensaio de Intrusão foi realizado aos 91 dias, onde foram obtidos os valores apresentados na Tabela 16, obtidos por Duart (2008), cuja dissertação integra o mesmo projeto deste trabalho.

Tabela 16: Valores do Volume Total de Intrusão de Mercúrio aos 91 dias (Duart, 2008).

Traço	VTI (mL/g)		
	0,45	0,55	0,65
R	0,083	0,082	0,087
15M	0,056	0,078	0,103
25M	0,079	0,083	0,096
15N	0,075	0,079	0,090
25N	0,078	0,090	0,093

Pela Tabela 16, observa-se que com uma relação água/aglomerante de 0,45, todos os traços apresentaram VTI inferior ao concreto de referência, ou seja, menor volume de poros abertos e, logo, possibilidade de menor fluxo de fluidos pelos mesmos. Com uma relação a/ag de 0,55, os traços com 15% de adição mineral tiveram menor VTI quando comparados ao referência, enquanto que os concretos com 25% de adição de cinza apresentaram maior VTI. Porém com 0,65 de relação a/ag, todos os traços com adição tiveram VTI superior ao referência, ou seja, maior permeabilidade.

Relacionando-se os valores de compressão axial aos 91 dias, com os de Volume Total Intrudido de Mercúrio, para as mesmas relações água/aglomerante, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 40.

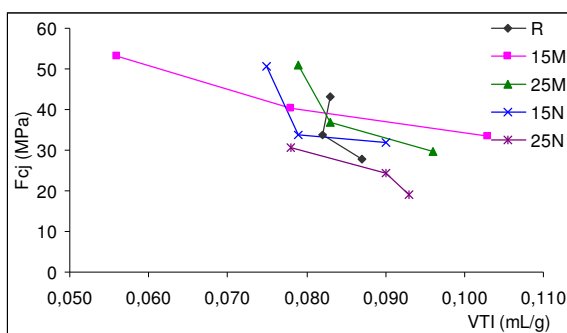


Figura 40: Gráfico da resistência axial por Volume Total de Intrusão de Mercúrio, aos 91 dias.

É possível verificar que com o aumento da resistência por compressão axial, o volume de intrusão de mercúrio diminui, ou seja, com o aumento da relação água/aglomerante ocorre um aumento no volume de intrusão de mercúrio como era

o esperado, tendo em visto o incremento do volume de poros. Apenas para o traço de referência, houve uma estabilização da intrusão de mercúrio quando a relação água/aglomerante passou de 0,45 para 0,55.

Relacionando-se os concretos com adição mineral com os de referência, verifica-se que para uma relação a/ag de 0,45, todos os traços apresentaram um volume de intrusão de mercúrio menor que o de referência, sendo que apenas o concreto com 25% de cinza natural teve um decréscimo na sua resistência. Já para os concretos com relação a/ag de 0,65, todos apresentaram um aumento no volume total de mercúrio intrudido.

5.2 Compressão diametral

Os valores de compressão diametral ($f_{t,D}$), encontrados através do ensaio descrito na NBR 7222/1994, aos 28 e 91 dias, estão na Tabela 17, abaixo.

Tabela 17: Compressão diametral, aos 28 e 91 dias.

Traço	Rel a/ag	$f_{t,D}$ (MPa)	
		28 dias	91 dias
R	0,45	3,52	3,74
	0,55	3,21	3,60
	0,65	2,62	3,23
15M	0,45	4,03	4,11
	0,55	3,49	3,69
	0,65	2,76	2,90
25M	0,45	3,48	3,63
	0,55	3,34	3,38
	0,65	3,11	3,22
15N	0,45	3,24	3,57
	0,55	2,69	2,93
	0,65	1,89	2,47
25N	0,45	2,85	3,27
	0,55	2,03	2,46
	0,65	1,82	2,15

Pode-se verificar que com o aumento da relação água/aglomerante, ocorre um decréscimo na resistência por tração por compressão diametral, para todos os traços, da mesma forma que para a resistência à compressão axial.

Diferentemente do afirmado por De Larrard (1992), página 40, a resistência por compressão diametral continuou a crescer, mesmo após os 28 dias, tanto para o concreto de referência quanto para os traços com adição mineral.

Para uma melhor visualização, é possível traçar gráficos da evolução da resistência com o tempo, em igualdade de relação água/aglomerante.

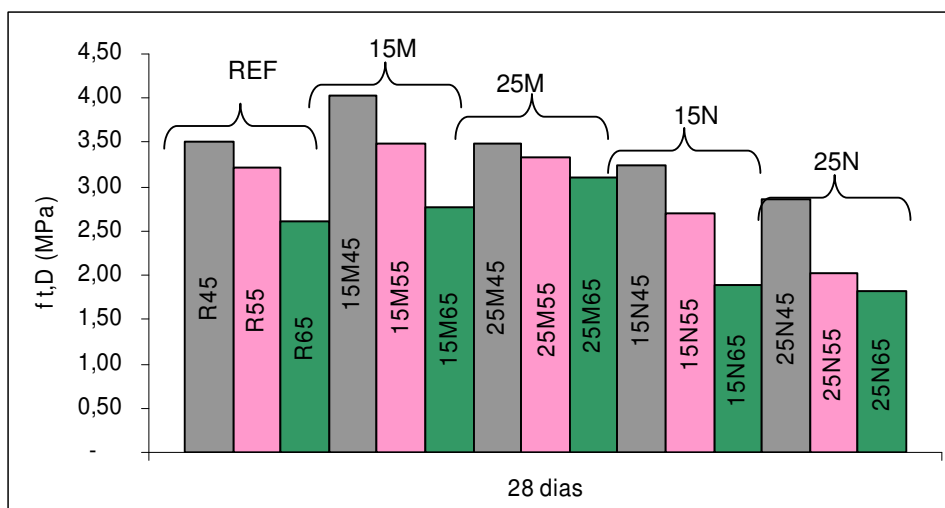


Figura 41: Resistência à compressão diametral a 28 dias.

Observa-se pela Figura 41 que, aos 28 dias, os traços com 15% de CCAM superaram o referênci para todas as relações água/aglomerante, e com 25% de CCAM ele foi superado para as relações água/aglomerante 0,55 e 0,65. Porém para os traços com CCAN, todos foram inferiores ao referênci, o que já era esperado devido à menor pozolanicidade da cinza natural, e ao maior número de vazios na pasta.

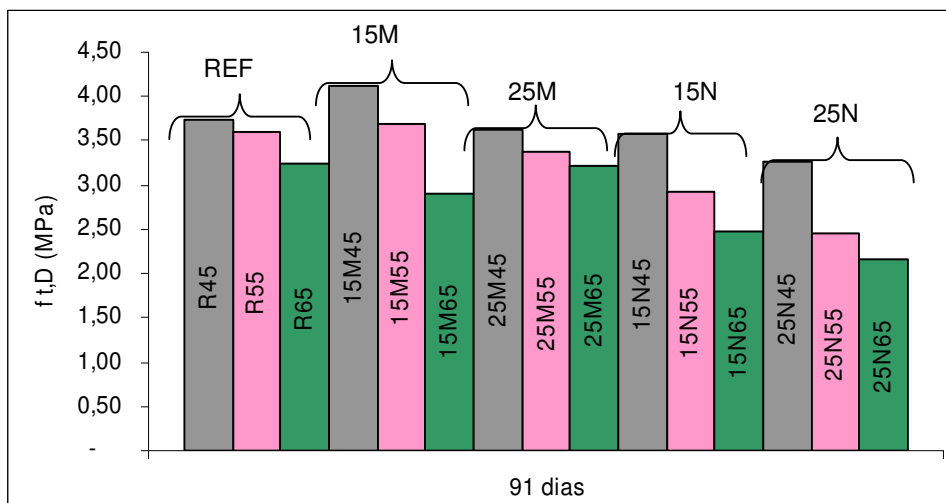


Figura 42: Resistência à compressão diametral a 91 dias.

Na Figura 42 visualiza-se que, aos 91 dias, os concretos ensaiados apresentaram resultados inferiores aos de referência, com exceção do 15M45 e 15M55.

Com resultados semelhantes, está a pesquisa de Hasparyk et al. (2003), que estudou a influência dos teores de CCA moída e in natura no concreto com teor de adição de 12%, sobre a resistência à tração. Aos 91 dias houve um ganho de até 38% na resistência do concreto com CCA moída, quando comparado com o concreto de referência. Porém para o estudo apresentado, verificou-se que o referência foi superado pelo 15M com relação a/ag 0,45 e 0,55, aos 91 dias. Com adições maiores de cinza e o uso de cinza natural a resistência à compressão diametral foi menor que o referência.

Pode ser feita uma comparação entre os concretos com adição mineral e o referência, para verificarmos na forma de porcentagem, a variação que ocorre com a substituição de parte do cimento por cinza natural ou moída. O comparativo foi realizado com igualdade de relação água/aglomerante, Tabela 18.

Tabela 18: Comparação entre concretos com adição mineral e concretos sem adição [(R – CCA)/R/100].

Traço		Variação da $F_{t,D}$ (%)	
		28 dias	91 dias
15M	0,45	14,5%	9,8%
	0,55	8,7%	2,5%
	0,65	5,3%	-10,2%
25M	0,45	-1,0%	-2,9%
	0,55	4,0%	-6,1%
	0,65	18,7%	-0,3%
15N	0,45	-7,9%	-4,5%
	0,55	-16,3%	-18,6%
	0,65	-28,0%	-23,5%
25N	0,45	-19,1%	-12,7%
	0,55	-36,8%	-31,7%
	0,65	-30,5%	-33,4%

Observa-se, que apenas o 15M com relação a/ag de 0,45 e 0,55, apresentaram-se superiores ao concreto de referência, porém essa diferença diminui com a idade. O traço 15M com 0,45 de a/ag, tem uma resistência por compressão diametral cerca de 15% maior que o referência aos 28 dias, passa para menos de 10% aos 91 dias. Enquanto que com 0,55 de relação água/aglomerante a diferença passa de cerca de 10% para quase 3% dos 28 para os 91 dias. Os concretos com adição de cinza sem moagem apresentaram maiores diferenças em relação às amostras de referência, quanto maior as relações água/aglomerantes, indo de 4,5% menor para o 15N45 e chegando a 33,4% para o 25N65.

Observa-se que, tanto para a cinza moída quanto natural, as diferenças com o concreto de referência diminuem com o aumento da idade de 28 para 91 dias, provavelmente devido ao incremento da rigidez da pasta e o crescimento não linear de fcd com o módulo de elasticidade.

Outra forma de análise é a variação que ocorre quando utilizada cinza natural ao invés da moída, que é a forma mais comum de uso. Para se analisar a influência da moagem na resistência, pode-se comparar os resultados de concretos com mesma porcentagem de adição mineral, em igualdade de relação água/aglomerante (ver Tabela 19).

Tabela 19: Relação entre concretos com adição de cinza natural e concretos com de cinza moída. [(M – N)/M].100

Traço	Variação da $F_{t,D}$ (%)	
	28 dias	91 dias
15N X 15M	0,45	-19,6%
	0,55	-23,1%
	0,65	-31,7%
25N X 25M	0,45	-18,2%
	0,55	-39,2%
	0,65	-41,5%

De acordo com a Tabela 19, é verificado que todos os traços apresentaram um aumento de resistência quando se usa cinza moída, porém aos 91 dias essa diferença diminui, ficando próximo a 10% para relações a/ag de 0,45. Esse efeito é provavelmente provocado, porque nas primeiras idades a cinza moída por apresentar maior área específica reage mais rapidamente, porém com o tempo a cinza natural reage, paulatinamente, e essa diferença diminui. Observa-se diferenças maiores para os teores de 25% de CCAN nas relações a/ag mais altas (0,55 e 0,65) como resultado da inclusão de grãos mais grossos e porosos, além do incremento do teor de vazios.

Através das equações de potência, foram encontradas as regressões entre resistência à compressão axial e diametral, para 28 e 91 dias (ver Tabela 20).

Tabela 20: Equações de f_c em função de $f_{t,D}$.

	28 dias		91 dias	
R	$f_c = 4,36 \cdot f_{t,D}^{1,7494}$	$r^2 = 0,903$	$f_c = 1,2 \cdot f_{t,D}^{2,6676}$	$r^2 = 0,881$
15M	$f_c = 7,82 \cdot f_{t,D}^{1,2007}$	$r^2 = 0,930$	$f_c = 8,72 \cdot f_{t,D}^{1,2381}$	$r^2 = 0,903$
25M	$f_c = 0,03 \cdot f_{t,D}^{5,7043}$	$r^2 = 0,958$	$f_c = 0,15 \cdot f_{t,D}^{4,5189}$	$r^2 = 1,000$
15N	$f_c = 13,59 \cdot f_{t,D}^{0,8138}$	$r^2 = 0,868$	$f_c = 9,55 \cdot f_{t,D}^{1,2721}$	$r^2 = 0,873$
25N	$f_c = 7,91 \cdot f_{t,D}^{1,0235}$	$r^2 = 0,937$	$f_c = 8,62 \cdot f_{t,D}^{1,0825}$	$r^2 = 0,952$

Com as equações acima, é possível obter os valores de resistência a compressão diametral em igualdade de resistência por compressão axial. Para as resistências de comparação de 30 MPa e 40 MPa, verifica-se os valores de $f_{t,D}$ da Tabela 21.

Tabela 21: Resistência a compressão diametral para resistências de 30 MPa e 40 MPa.

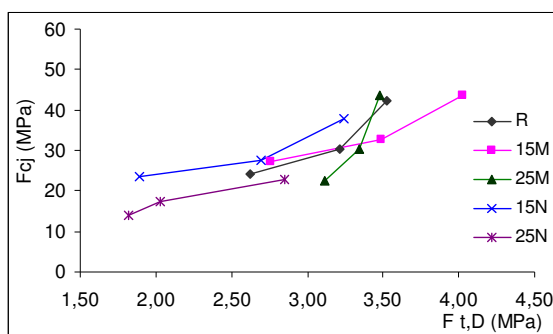
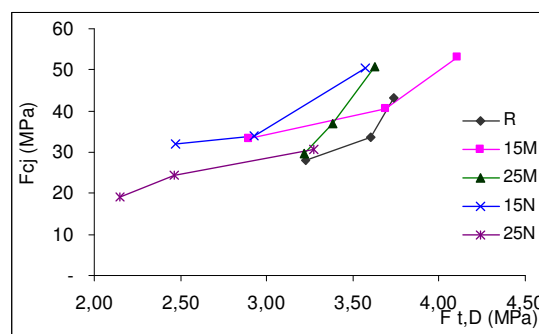
Traço	$F_{t,D}$ (Mpa)			
	28 DIAS		91 DIAS	
	30 MPa	40 MPa	30 MPa	40 MPa
R	3,012	3,550	3,342	3,723
15M	3,064	3,894	2,713	4,000
25M	3,357	3,530	3,230	3,442
15N	2,646	3,768	2,459	3,083
25N	*	*	3,165	*

(*) rel. água/aglomerante fora da zona de estudo, obtidas por extrapolação ($\Delta > 10\%$).

Nas resistências de 30 MPa e 40 MPa, aos 28 dias, a amostra com 15% de CCAM superou o referência, enquanto que o traço com 25% de CCAM superou para resistência de 30 MPa e o traço com 15% de CCAN superou para a resistência de 40 MPa, aos 28 dias.

Nas idades finais, os concretos com adição de cinza são no geral, inferiores ao de referência, com exceção do traço com 15% de cinza moída, para a resistência de 40 MPa.

Com as relações entre resistência e tração são obtidos gráficos para as idades estudadas, com o objetivo de comparar as propriedades.

**Figura 43: Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral, aos 28 dias.****Figura 44: Gráfico da resistência axial em função da resistência diametral, aos 91 dias.**

Pelo gráfico da Figura 43, observa-se que os traçados das misturas referência, 15M e 15N possuem inclinações semelhantes, ou seja, evoluem

similarmente em suas resistências enquanto que os concretos com adição de 25% de cinza apresentam curvas mais acentuadas.

Pela curvas de evolução da Figura 44, verifica-se que aos 91 dias apenas com resistências superiores a cerca de 40 MPa, é que o traço com 15% de CCA moída superou o referência em resistência à compressão diametral.

Fazendo uma comparação entre compressão diametral e compressão axial é possível verificar a relação existente entre as duas resistências, Tabela 22.

Tabela 22: Relação entre resistência à tração por compressão diametral e compressão axial.

Traço	Rel a/ag	Relação $F_{t,d}/F_{c,j}$	
		28 dias	91 dias
R	0,45	8%	9%
	0,55	11%	11%
	0,65	11%	12%
15M	0,45	9%	8%
	0,55	11%	9%
	0,65	10%	9%
25M	0,45	8%	7%
	0,55	11%	9%
	0,65	14%	11%
15N	0,45	9%	7%
	0,55	10%	9%
	0,65	8%	8%
25N	0,45	13%	11%
	0,55	12%	10%
	0,65	13%	11%

Pela Tabela 22, verifica-se que quanto maior a relação água/aglomerante, maior é a diferença entre as resistências, ou seja, a resistência à tração é uma fração maior da resistência á compressão.

Esse fato pode ser explicado pela fórmula apresentada na NBR 6118/2003, que estima o valor de compressão diametral em função da compressão axial, Equação 05:

$$f_{ct,m} = 0,3 * f_{ck}^{2/3} \quad (\text{Equação 05})$$

Sendo que a Lei de Abrams define a resistência à compressão axial de acordo com a Equação 06:

$$f_{ck} = A / B^{a/agl} \quad (\text{Equação 06})$$

Substituindo-se o f_{cj} da equação 06 na 05, chega-se a seguinte expressão da Equação 07:

$$f_{ct,m} = 0,3 * (A/B^{a/agl})^{2/3} \quad (\text{Equação 07})$$

Observa-se pela equação (07) que a relação água/aglomerante tem maior influência no resultado de resistência à tração que na resistência axial.

Através da fórmula apresentada na equação (05) da NBR 6118/2003, pode-se estimar os valores de compressão diametral de cada corpo de prova, a partir dos resultados de resistência por compressão axial (ver Tabela 23).

Tabela 23: Resultados de $f_{t,D}$, obtidos de acordo com a NBR 6118/2003.

Traço	Rel a/ag	Ensaiado		NBR 6118/2003		(ensaiado/NBR 6118)*100	
		Ft,D (MPa)		Ft,D (MPa)		28 dias	91 dias
		28 dias	91 dias	28 dias	91 dias		
R	0,45	3,52	3,74	3,64	3,68	97%	102%
	0,55	3,21	3,60	2,93	3,13	110%	115%
	0,65	2,62	3,23	2,51	2,76	104%	117%
15M	0,45	4,03	4,11	3,72	4,24	108%	97%
	0,55	3,49	3,69	3,06	3,53	114%	104%
	0,65	2,76	2,90	2,71	3,11	102%	93%
25M	0,45	3,48	3,63	3,71	4,12	94%	88%
	0,55	3,34	3,38	2,92	3,33	115%	102%
	0,65	3,11	3,22	2,39	2,87	130%	112%
15N	0,45	3,24	3,57	3,37	4,10	96%	87%
	0,55	2,69	2,93	2,74	3,14	98%	93%
	0,65	1,89	2,47	2,47	3,02	77%	82%
25N	0,45	2,85	3,27	2,41	2,93	118%	112%
	0,55	2,03	2,46	2,02	2,51	100%	98%
	0,65	1,82	2,15	1,73	2,13	105%	101%

Observa-se que os valores obtidos pela NBR 6118/2003, variam com certa significância daqueles obtidos nos ensaios, superestimando resultados como o 15N65 a 28 dias, em 23% de diferença e subestimando outros, como o 25M65 em 30%, também a 28 dias. Por isso esse tipo de análise deve ser realizado com os devidos cuidados tendo em vista que, em geral as normas quando apresentam fórmulas correlacionando resistência à compressão axial e diametral, se referem a concretos sem adições minerais, o que não é o presente caso. Entretanto, pode-se observar que as aproximações entre os resultados dos ensaios e os de norma indicam que a previsão realizada pela NBR é bastante adequada.

5.3 Módulo de elasticidade

5.3.1 Evolução de E_c com a idade e relação a/ag

Os valores encontrados, através dos ensaios prescritos na NBR 8522/2003, encontram-se na Tabela 24, obtidos pela média de dois corpos de prova. Quando desvio máximo relativo era maior que 10%, era utilizado o resultado de maior valor.

Tabela 24: Módulo de Elasticidade dos concretos aos 28 e 91 dias.

TRAÇO	Eci (Gpa)		
	28 Dias	91 Dias	
R	0,45	37,65	53,75
	0,55	35,40	46,50
	0,65	29,65	45,35
15M	0,45	36,15	49,61
	0,55	35,35	42,57
	0,65	34,10	40,55
25M	0,45	34,95	48,10
	0,55	33,85	42,40
	0,65	30,45	39,95
15N	0,45	28,70	43,80
	0,55	26,20	41,70
	0,65	19,55	40,00
25N	0,45	28,10	34,65
	0,55	23,95	30,65
	0,65	19,70	26,75

A análise dos dados pode ser feita através da evolução do tempo no módulo de elasticidade do concreto, como apresentado nas Figuras 45 e 46.

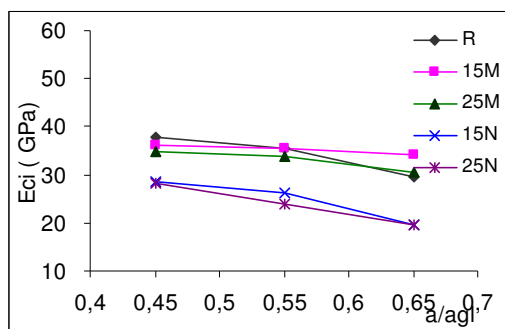


Figura 45: Módulo de elasticidade em função da relação a/ag, aos 28 dias.

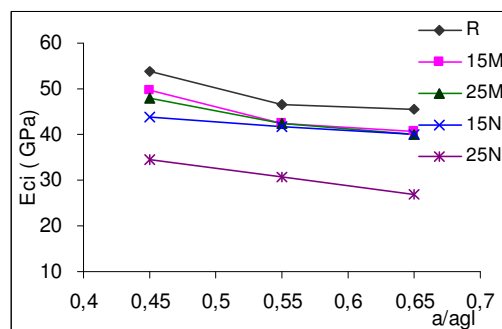


Figura 46: Módulo de elasticidade em função da relação a/ag, aos 91 dias.

Aos 28 dias, de acordo com a Figura 45, verifica-se um decréscimo do módulo de elasticidade, mais acentuado para relações água/aglomerante de 0,65, sendo que para essa relação a/ag, os módulos dos concretos 15M e 25M foram superiores aos referências.

Porém, no ensaio de 91 dias (Figura 46) todos os concretos ficaram abaixo do referências, sendo que para relações água/aglomerante de 0,55 e 0,65, os concretos 15M, 25M e 15N tiveram resultados bastante próximos.

Os resultados finais obtidos foram bastante satisfatórios, pois os traços com 15% e 25% de CCA moída e 15% de CCA natural tiveram queda pouco significativa, em relação ao concreto de referências, cerca de 10%. Observa-se a recuperação no desempenho ao módulo de elasticidade dos 28 para os 91 dias, dos traços com 15% de cinza de casca de arroz natural, devido ao aumento da atividade pozolânica e da resistência mecânica.

Para se ter uma melhor visualização da variação ocorrida entre as amostras de referências e as com adição mineral, é apresentado a Tabela 25.

Tabela 25: Índices de variação do Módulo de elasticidade.

TRAÇO	Índice		Índice Médio (IM)	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
R	0,45	1,000	1,000	1,000
	0,55	1,000		
	0,65	1,000		
15M	0,45	0,960	1,036	0,911
	0,55	0,999		
	0,65	1,150		
25M	0,45	0,928	0,970	0,896
	0,55	0,956		
	0,65	1,027		
15N	0,45	0,762	0,721	0,889
	0,55	0,740		
	0,65	0,659		
25N	0,45	0,746	0,696	0,631
	0,55	0,677		
	0,65	0,664		

Apesar de todos ficarem abaixo do concreto de referência, essa diferença não foi muito significativa aos 91 dias, para os concretos com 15% e 25% de CCAM, que apresentaram respectivamente índices médios (IM) de 0,91 e 0,90 e o traço com 15% de CCAN teve IM de 0,89. A maior queda observada foi para o concreto com adição de 25% de cinza natural, se deve ao fato de uma maior porosidade decorrente dos grãos maiores da cinza não moída.

5.3.2 Módulo de elasticidade x resistência à compressão

Quando não é possível realizar os ensaios de módulo de elasticidade, é possível, através dos resultados de resistência à compressão axial, estimar seus valores.

De acordo com a NBR 6118/2003 o valor do módulo de elasticidade do concreto de cimento sem adições, pode ser estimado em função da resistência média à compressão (f_{cj}), pela Equação 08:

$$E_o = 5.600 \times (F_{cj})^{1/2} \quad (\text{Equação 08})$$

O CEB-FIB/90 também prescreve para a estimativa do módulo do concreto de referência a seguinte Equação 09:

$$E_c = 2,15 \times 10^4 \times \mu \times (f_{cj}/10)^{1/3} \quad (\text{Equação 09})$$

Sendo $\mu = 1,2$ (Basalto)

De acordo com o ACI 318/1977, o módulo de elasticidade do concreto de referência pode ser estimado em função de sua resistência axial, pela Equação 10:

$$E_c = 5.565 \times (f_{cj})^{1/2} \quad (\text{Equação 10})$$

Através das equações 08, 09 e 10 é possível estimar os valores de módulo de elasticidade com os valores de resistência à compressão axial, e fazer a relação entre o valor ensaiado pela NBR 8522, e o estimado pelas normas NBR 6118, CEB e ACI (valores esses entre parênteses), ver Tabela 26.

Tabela 26: Módulo de elasticidade E_c (GPa), através da NBR 6118, CEB e ACI.

TRAÇO	NBR 6118		CEB		ACI		
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	
R	0,45	42,87 (0,88)	36,74 (1,46)	41,69 (0,90)	41,97 (1,28)	36,15 (1,04)	36,51 (1,47)
	0,55	30,90 (1,15)	32,48 (1,43)	37,40 (0,95)	38,66 (1,20)	30,71 (1,15)	32,27 (1,44)
	0,65	27,59 (1,07)	29,61 (1,53)	34,67 (0,86)	36,35 (1,25)	27,41 (1,08)	29,43 (1,54)
15M	0,45	36,98 (0,98)	40,79 (1,22)	42,15 (0,86)	45,00 (1,10)	36,75 (0,98)	40,54 (1,22)
	0,55	31,99 (1,11)	35,61 (1,20)	38,27 (0,92)	41,10 (1,04)	31,79 (1,11)	35,39 (1,20)
	0,65	29,21 (1,17)	32,36 (1,25)	36,01 (0,95)	38,57 (1,05)	29,02 (1,17)	32,16 (1,26)
25M	0,45	36,93 (0,95)	39,97 (1,20)	42,12 (0,83)	44,39 (1,08)	36,70 (0,95)	39,72 (1,21)
	0,55	31,99 (1,06)	35,61 (1,19)	38,27 (0,88)	41,10 (1,03)	31,79 (1,06)	35,39 (1,20)
	0,65	26,52 (1,15)	30,48 (1,31)	33,77 (0,90)	37,06 (1,08)	26,36 (1,16)	30,29 (1,32)
15N	0,45	34,40 (0,83)	39,81 (1,10)	40,17 (0,71)	44,27 (0,99)	34,18 (0,84)	39,56 (1,11)
	0,55	30,90 (0,85)	32,48 (1,28)	37,40 (0,70)	38,66 (1,08)	30,71 (0,85)	32,27 (1,29)
	0,65	27,59 (0,71)	29,61 (1,35)	34,67 (0,56)	36,35 (1,10)	27,41 (0,71)	29,43 (1,36)
25N	0,45	26,70 (1,05)	30,93 (1,12)	33,92 (0,83)	37,42 (0,93)	26,53 (1,06)	30,73 (1,13)
	0,55	27,57 (0,87)	27,57 (1,11)	34,65 (0,69)	34,65 (0,88)	27,40 (0,87)	27,40 (1,12)
	0,65	24,39 (0,81)	24,39 (1,10)	31,94 (0,62)	31,94 (0,84)	24,24 (0,81)	24,24 (1,10)

OBS: entre parênteses estão as relações NBR 8522/norma.

Pela Tabela 26, é possível observar que os valores estimados em alguns casos são próximos dos encontrados através do ensaio laboratorial, porém em outros subestima (exemplo do traço R65 aos 91 dias, cujo valor estimado pela NBR 6118 é 53% menor) ou superestima (exemplo do traço 15N65 aos 28 dias, onde o valor estimado pelo CEB é 56% maior) os valores de módulo de elasticidade.

Com os dados da Tabela 26, é possível traçar comparativos entre os métodos de obtenção do módulo de elasticidade. Para isso traçaram-se gráficos para cada traço, para a idade de 28 dias.

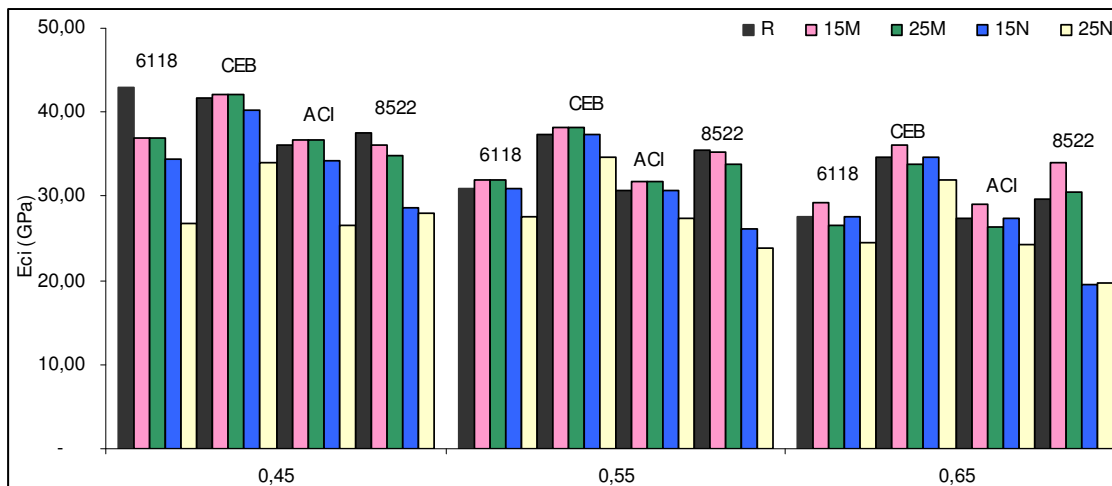


Figura 47: Eci pelos métodos da NBR 6118, CEB, ACI e NBR 8522, aos 28 dias.

Aos 28 dias (Figura 47) os valores encontrados pelo CEB foram todos superiores aos ensaiados de acordo com a NBR 8522. Os da NBR 6118 superestimaram o módulo de elasticidade dos traços R45, 15M45, 25M45, 25N55, 25N65 e todos os traços com 15% de CCAN, chegando a uma diferença de 29% para a amostra 15N65. Os valores obtidos pelo ACI são semelhantes aos da NBR 6118, e superestimaram os concretos 15M45, 25M45, 25N55, 25N65 e todos os traços com 15% de CCAN, chegando a uma diferença de 29% para a amostra 15N65.

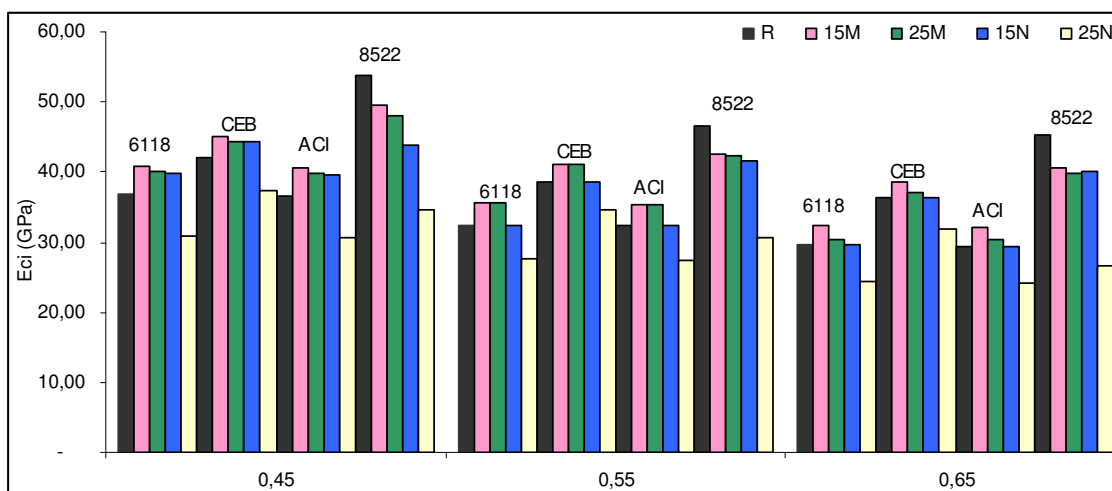


Figura 48: Eci pelos métodos da NBR 6118, CEB, ACI e NBR 8522, aos 91 dias.

Os valores obtidos aos 91 dias em laboratório (Figura 48), superaram praticamente todos os calculados em função da resistência por compressão axial, com exceção do calculado pelo CEB que superestimou o valor de módulo para os concretos com 25% de CCAN e relações a/ag 0,45, 0,55 e 0,65 e com 15% de CCAN e relação a/ag 0,45, em 1%, 7%, 12% e 16% respectivamente.

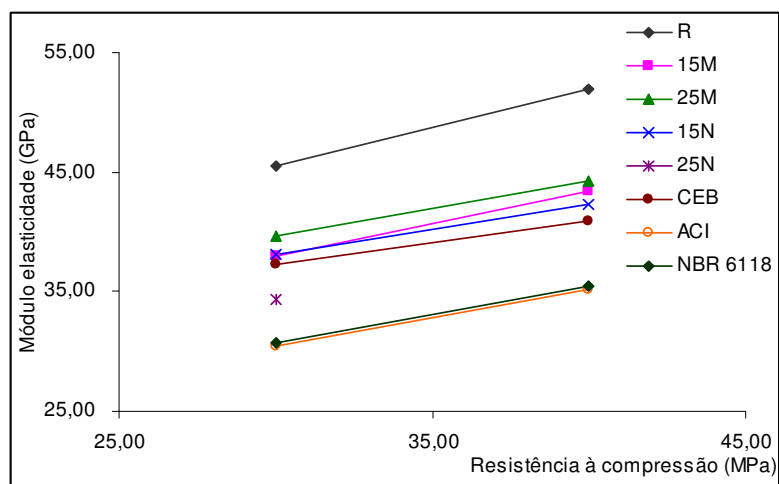


Figura 49: Gráfico do Módulo de elasticidade pela resistência, ensaiado e estimado, aos 91 dias.

Pelo gráfico da Figura 49, visualiza-se na idade de 91 dias que para quase todos os traços com adição, com exceção da amostra com 25% de CCAN, os valores encontrados de módulo de elasticidade superaram os estimados pelas normas ACI, CEB e NBR 6118.

Relacionando-se o módulo de elasticidade dos concretos estudados, com sua resistência à compressão axial, chega-se aos gráficos apresentados nas Figuras 50 e 51, abaixo.

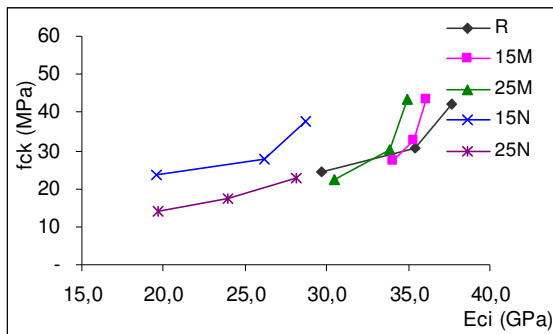


Figura 50: Gráfico da resistência por módulo de elasticidade, aos 28 dias.

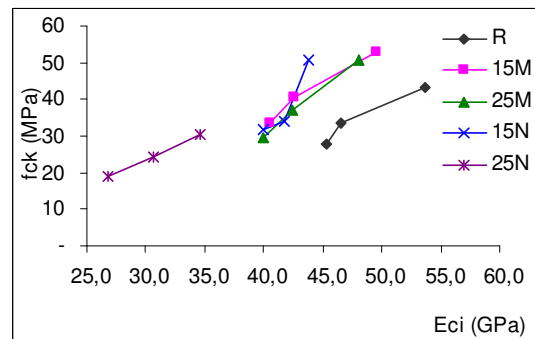


Figura 51: Gráfico da resistência por módulo de elasticidade, aos 91 dias.

Observa-se através da Figura 50, a evolução das resistências mecânicas dos corpos de prova estudados. É possível verificar a proximidade das curvas dos concretos com cinza moída com o referênciã. Nota-se a quase estabilidade do módulo de elasticidade dos concretos com adição de cinza moída quando se passa de uma relação água/aglomerante de 0,55 para 0,65. Observa-se também que o concreto 15N, apesar de apresentar resistências axiais bastante próximas do referênciã, desenvolve resultados de módulo inferiores. Enquanto que o concreto 25N tem menores valores tanto de módulo de elasticidade quanto de resistência axial devido à maior quantidade de grãos da CCA natural.

Aos 91 dias, verifica-se pela Figura 51, que para determinadas resistências os concretos com adição mineral tem menores valores de módulo que o referênciã. Os traços 15M, 25M e 15N possuem curvas bastante próximas, sendo que apenas o 25N se distancia dos valores alcançados pelos demais.

Com os valores de resistência por compressão axial e de módulo de elasticidade, obtêm-se as equações de potência apresentadas na Tabela 27, com suas respectivas regressões.

Tabela 27: Equações de resistência em função do módulo.

	28 dias		91 dias	
R :	$f_{cj}=2.10^{-2} * E_{ci}^{2,0863}$	$r^2=0,865$	$f_{cj}=5,6.10^{-3} * E_{ci}^{2,2489}$	$r^2=0,911$
15M :	$f_{cj}=3.10^{-11} * E_{ci}^{7,7975}$	$r^2=0,932$	$f_{cj}=1,1.10^{-2} * E_{ci}^{2,1708}$	$r^2=0,964$
25M :	$f_{cj}=9.10^{-6} * E_{ci}^{4,3125}$	$r^2=0,880$	$f_{cj}=8.10^{-4} * E_{ci}^{2,8609}$	$r^2=0,880$
15N :	$f_{cj}=E_{ci}^{1,0522}$	$r^2=0,779$	$f_{cj}=2.10^{-7} * E_{ci}^{5,173}$	$r^2=0,779$
25N :	$f_{cj}=2,2.10^{-1} * E_{ci}^{1,3846}$	$r^2=0,992$	$f_{cj}=4,6.10^{-2} * E_{ci}^{1,8352}$	$r^2=0,992$

Com as equações acima, é possível estimar o módulo de elasticidade para as resistências de 30 MPa e 40 MPa, para 28 dias e 91 dias (ver Tabela 28).

Tabela 28: Módulo de elasticidade para resistências de 30MPa e 40 MPa

Traço	Módulo de Elasticidade - Eci (GPa)			
	28 dias		91 dias	
	30 MPa	40 MPa	30 MPa	40 MPa
R	33,29	38,03	45,51	51,86
15M	34,59	35,96	37,94	43,41
25M	32,55	35,03	39,70	44,20
15N	25,26	31,85	38,07	42,29
25N	*	*	34,37	*

(*) valores em branco estão fora da área de estudo, ou seja, relação a/ag 0,45 > x > 0,65).

Observa-se que aos 28 dias para resistências de 30 MPa, o traço com 15% de CCAM apresenta um módulo de elasticidade superior ao referência, e o 25% de CCAM levemente inferior. Já para 40 MPa todos os traços tem módulo inferiores ao concreto base, porém essa diferença não é muito expressiva.

Para as resistência de 30 MPa e 40 MPa aos 91 dias, o concreto de referência desenvolveu um módulo de elasticidade superior aos demais, porém entre os concretos com adição esses valores são bastante próximos. Os menores módulos de elasticidade com cinza de casca de arroz são devidos aos maiores teores de pasta cimentícia, desde que a substituição de cimento seja realizada em massa. Os módulos dos traços com cinza natural são inferiores aos da cinza moída tendo em vista a sua menor finura e rigidez da pasta cimentícia.

5.4 Retração

Os valores de retração, realizados de acordo com a ASTM C490/1996, estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29: Valores de Retração em porcentagem.

TRAÇO	Retração - L (%)		
	28 DIAS	91 DIAS	300 DIAS
R	0,45	0,034	0,061
	0,55	0,047	0,085
	0,65	0,057	0,092
15M	0,45	0,027	0,046
	0,55	0,033	0,051
	0,65	0,038	0,054
25M	0,45	0,031	0,049
	0,55	0,042	0,056
	0,65	0,058	0,075
15N	0,45	0,038	0,046
	0,55	0,034	0,044
	0,65	0,033	0,039
25N	0,45	0,026	0,056
	0,55	0,017	0,053
	0,65	0,009	0,041

É possível verificar que com o aumento da relação água/aglomerante, aumenta também a retração dos corpos de prova. Isso é atestado por Neville (1997) que afirma que quanto maior for a relação água/cimento, maior será a retração, pois esta determina a quantidade de água evaporável da pasta de cimento e a velocidade na qual a água pode se deslocar para a superfície do concreto. Com a evolução dos valores de retração dos corpos de prova ensaiados, em igualdade de relação água/aglomerante, é possível obter os gráficos das Figuras 52, 53 e 54, apresentados abaixo.

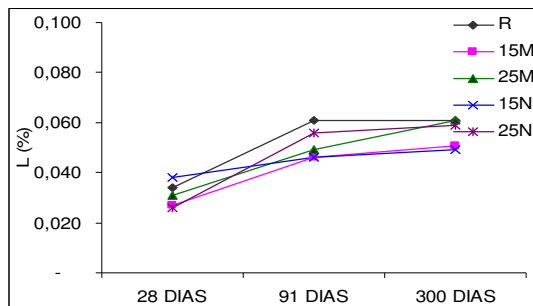


Figura 52: Evolução da retração para uma relação a/ag de 0,45.

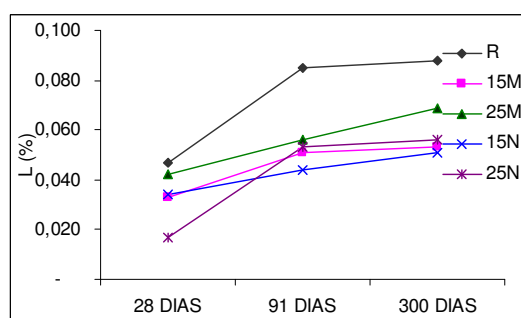


Figura 53: Evolução da retração para uma relação a/ag de 0,55.

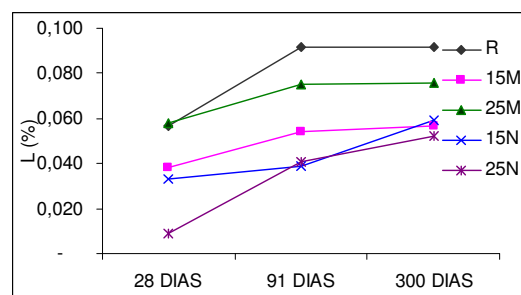


Figura 54: Evolução da retração para uma relação a/ag de 0,65.

Verifica-se pelo gráfico da Figura 52, que para a relação água/aglomerante 0,45, os concretos com adição mineral apresentaram retrações inferiores ao concreto de referência, com exceção apenas do traço 15% natural que aos 28 dias foi superior e do traço 25% moída aos 300 dias que foi igual. Observa-se que aos 300 dias, os corpos de prova com as maiores adições minerais (25%) apresentaram retrações maiores que os concretos com menores porcentagens de adição (15%).

A menor retração apresentada pelos traços com cinza natural pode ser consequência da redução da atividade pozolânica (grãos mais grossos) e, logo, da formação de menor quantidade de C-S-H, especialmente à medida que aumenta o teor de CCAN. Esta explicação é plausível porque, como mostrado anteriormente, houve redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade à medida que o teor de cinza natural passou de 15% para 25%.

Com uma relação água/aglomerante de 0,55, Figura 53, observa-se uma redução na retração dos corpos de prova com a adição mineral, para todas as idades, ou seja, todos os traços com adição de cinza em substituição de parte do cimento apresentaram variações dimensionais menores que o concreto de referência.

Pela Figura 54, é possível verificar que praticamente todos os concretos estudados tiveram retrações inferiores ao de referência, para todas as idades, com exceção apenas do 25M, aos 28 dias. Aos 300 dias de ensaio, observa-se que a maior retração entre os concretos com adição mineral, foi de 25M e que a menor retração foi do 25N, porém todos com variações dimensionais inferiores ao concreto sem adição mineral.

Pelos gráficos acima, observa-se que para quase todas as relações a/ag, aos 300 dias, as maiores retrações são dos maiores teores de cinza. Isso pode ser explicado pelo aumento do volume de pasta da mistura.

Os resultados de retração dos corpos de prova com adição mineral, inferiores aos do concreto de referência, podem ser explicados por Gastaldini et al (1996) em pesquisa constatou-se que com o uso de vários tipos de adições, houve um aumento no volume dos poros de gel e diminuição no volume de poros capilares, com uma redução na porosidade total contribuindo para uma menor permeabilidade, reduzindo assim, a retração do concreto. Esse refinamento dos poros decorrente do emprego de certas adições minerais é verificado por outros pesquisadores como Mehta e Monteiro (1994), Allan (1996).

Com os valores de resistência à compressão axial em relação à retração, chega-se às equações de potência e suas respectivas regressões (ver Tabela 30).

Tabela 30: Equações de resistência em função da retração.

300 dias		
R :	$f_{cj}=3,5909*L^{-0,9648}$	$r^2=0,935$
15M :	$f_{cj}=0,0053*L^{-3,1322}$	$r^2=0,832$
25M :	$f_{cj}=0,1758*L^{-2,0452}$	$r^2=0,976$
15N :	$f_{cj}=0,1857*L^{-1,8298}$	$r^2=0,564$
25N :	$f_{cj}=702957*L^{3,4019}$	$r^2=0,992$

Através das equações de potência da Tabela 30, pode-se determinar a variação de tamanho (L), estimada para o concreto com resistências de 30 MPa e 40 MPa, aos 300 dias, ver Tabela 31.

Tabela 31: Retração para resistências de 30 MPa e 40 MPa, aos 300 dias.

Traço	Retração - L(%)	
	30 MPa	40MPa
R	0,111	0,082
15M	0,063	0,058
25M	0,081	0,070
15N	0,062	0,053
25N	0,052	0,057

Pela Tabela 31, pode-se verificar que em igualdade de resistências que tanto para 30 MPa de resistência à compressão, quanto para 40 MPa, as retrações encontradas são inferiores às apresentadas pelos corpos de prova de referência.

Da relação entre resistência por compressão axial versus retração, chega-se ao gráfico representado na Figura 55.

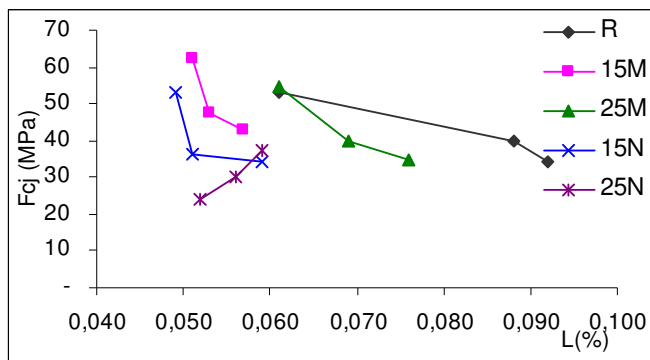


Figura 55: Gráfico de resistência por retração aos 300 dias.

O gráfico da Figura 55 apresenta os dados obtidos para as relações água/aglomerante de 0,45, 0,55 e 0,65, sendo que o ponto mais alto das curvas (maior resistência) é o das relações a/ag 0,45, e o ponto mais baixo (menor resistência) é o das relações a/ag 0,65. Observa-se que quanto menor a relação a/ag, maior a resistência e menor é a retração, com exceção do concreto com 25% de adição de CCA natural, onde com o aumento da relação a/ag ocorreu uma diminuição na retração.

5.5 Resumo

Devido às especificações de projeto, que definem uma determinada resistência para o concreto numa idade pré-definida, realizaram-se para todas as propriedades estudadas a estimativa de valores quando se requer resistências de 30 MPa e 40 MPa aos 28 e 91 dias. Porém a retração, por ser uma propriedade que continua a evoluir numa idade mais avançada, pesquisou-se sua taxa de redução aos 300 dias. Abaixo é apresentado um resumo de todas as propriedades mecânicas e de retração do concreto de referência e dos concretos com adição de cinza de casca de arroz moída e natural, para resistências de projeto de 30 MPa e 40 MPa, aos 91 dias para resistência por compressão diametral e módulo de elasticidade; e 300 dias para retração (Tabela 32).

Tabela 32: Propriedades mecânicas e de retração estimadas para resistências de 30 MPa e 40 MPa, nas idades finais.

Variáveis	Un	REF.	CCA M		CCA N		REF.	CCA M		CCA N	
			15%	25%	15%	25%		15%	25%		
Resist. axial	MPa	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
	a/ag	0,61	0,69	0,64	0,65	0,46	0,48	0,57	0,53	0,53	0,34*
Resist. Diametral	MPa	3,34	2,71	3,23	2,46	3,17	3,72	4,00	3,44	3,08	*
	(R/CCA)%		123%	103%	136%	106%		93%	108%	121%	*
Módulo elastic.	GPa	45,51	37,94	39,70	38,07	34,37	51,86	43,41	44,20	42,29	*
	(R/CCA)%		120%	115%	120%	132%		119%	117%	123%	*
Retração total 300 dias	m/m	0,111	0,063	0,081	0,062	0,052	0,082	0,058	0,070	0,053	0,057
	(R/CCA)%		175%	137%	178%	213%		142%	117%	155%	*

(*) rel. água/aglomerante fora da zona de estudo, obtidas por extrapolação ($\Delta > 10\%$).

Observa-se que para as amostras com adição mineral (com exceção do traço com 25% de CCAN), por desenvolverem resistências superiores aos de referência, é necessário aumentarmos a relação água aglomerante para chegarmos às resistências de projeto. Esse fato pode ser explicado devido à elevada quantidade de sílica da cinza, quando comparada ao cimento empregado (em torno de 95% da cinza contra 19% do cimento) e esta, quando moída, apresentar grande pozolanicidade e finura, resultando quando empregado no concreto, em ganho de resistência tanto axial quanto diametral. Porém devido a uma maior compacidade da pasta, diminuição do C_3S , e aumento da formação de C-S-H, esse ganho de resistência ocorre num prazo mais dilatado que o concreto de cimento Portland e ascendente mesmo após os 91 dias.

Em concretos com adições de cinza natural (sem moagem) ocorre um aumento de grãos de material cimentício mais grossos e aumento do número de vazios na pasta o que torna o concreto menos resistente.

Verificou-se que devido ao maior teor de pasta cimentícia, os concretos com adição de cinza obtiveram menores resultados de módulo de elasticidade. Os traços com cinza natural apresentaram módulos inferiores aos da cinza moída, devido a sua menor finura e rigidez da pasta cimentícia.

Com o uso da cinza de casca de arroz ocorreu uma diminuição da retração do concreto quando comparado ao referência, esse fato se deve ao aumento no volume dos poros de gel e diminuição no volume de poros capilares, aumentando o refinamento e contribuindo para uma menor permeabilidade. Observou-se também,

que para maiores teores de adição, a retração foi maior, isso devido ao maior volume de pasta na mistura.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi verificar a viabilidade técnica na utilização da cinza de casca de arroz na forma natural, sem beneficiamento e produzida sem queima controlada, em adição por substituição de parte do cimento em concretos estruturais.

Para tanto se realizaram ensaios mecânicos de resistência por compressão axial e diametral, e ensaios de deformação de módulo de elasticidade e retração.

Foram definidas resistências de projeto e estimadas as propriedades em igualdade de resistência.

6.1 Quanto à ordem de colocação dos materiais na betoneira e tempo de mistura

Foram realizados ensaios para definir qual a melhor ordem de colocação dos materiais na betoneira, propiciando melhor mistura com menor teor de aditivo superplastificante e maior moagem da cinza natural.

Chegou-se a conclusão que a mistura que propiciava a melhor moagem da cinza natural era em primeiro lugar misturar a CCAN com o agregado graúdo, por 2 minutos, acrescentava-se os líquidos e misturava-os por mais 2 min, em seguida o cimento (tempo de mistura 2min) e por fim a areia onde se deixava bater por mais 9 minutos. O estudo do concreto fresco revelou que essa ordem de colocação dos materiais na betoneira e o tempo total de mistura adotado propiciaram auto-moagem dos grãos de CCA natural no tambor, o que a qualificou para apresentar desempenho praticamente semelhante ao da cinza moída previamente moída em moinho de bolas, por uma hora, levando-se em conta o teor de substituição de cimento por CCA em 15%.

Os concretos com CCA moída seguiram a mesma ordem dos referências, sendo que a cinza era adicionada junto ao cimento, onde seguiu-se a seguinte

sequência: pedra+água (2 min), cimento+CCA (2 min), aditivo (2 min) e por fim a areia (4 min).

6.2 Quanto à resistência por compressão axial

Observou-se que a adição de cinza moída elevou as resistências axiais nas idades finais (91 dias) para todos os traços pesquisados, indo de 43 MPa do R45, a 53,1 MPa nos traços 15M45 e 50,9 MPa para o 25M45. A amostra com 15% de cinza natural apresentou desempenho adequado, com valores de 50,5 MPa para o traço 15N45, superando as resistências do concreto de referência aos 91 dias, enquanto que, o teor de 25% de CCAN, diminuiu sensivelmente os valores para 30,5 MPa para a amostra 25N45, ficando cerca de 29% inferior ao referência. Com isso, observou-se que a cinza natural apresentou uma sensível redução no desempenho na medida em que se aumentou o teor de adição

O ganho de resistência de cerca de 21% para o traço com 15% de CCAM e aproximadamente 12% para o 25% de CCAM, em relação ao referência, já era esperado, devido a sua elevada quantidade de sílica quando comparada ao cimento empregado, que por apresentar grande pozolanicidade e finura, resulta em ganhos de resistência, em prazos mais dilatados, devido a uma maior compacidade da pasta e aumento da formação de C-S-H.

Porém nas amostras com adição de 25% de cinza natural a pozolanicidade da cinza ficou prejudicada pela falta de moagem que gerou um aumento de grãos de material cimentício mais grossos, tornando o concreto menos resistente.

6.2.1 Para resistências de 30 MPa e 40 MPa

Em igualdade de resistência, aos 91 dias, observou-se que o traço com 25% de CCA natural apresentou relação água/aglomerante fora da zona de estudo para a 40 MPa, ou seja diferiu em mais de 10% da zona $0,45 < a/ag < 0,65$.

Para os traços com 15% e 25% de CCA moída e 15% de CCA natural, as relações a/ag foram, respectivamente, 0,69; 0,64 e 0,65 para 30 MPa, e 0,57; 0,53 e 0,53 para 40 MPa, aos 91 dias, superando o referência com 0,61 e 0,48 para 30 MPa e 40 MPa, respectivamente, ou seja, em igualdade de resistências deve-se aumentar o teor de água na mistura para os traços com adição mineral descritos, o que aumenta a trabalhabilidade e diminui a necessidade de aditivos plastificantes. Enquanto que para o traço com 25% de CCA natural, alcançar uma resistência de projeto de 30 MPa aos 91 dias, é necessário uma relação a/ag de 0,34, tornando indispensável o uso de aditivos plastificantes.

6.2.2. Consumo de cimento

A utilização de adições minerais diminui sensivelmente o consumo de cimento nas misturas de concreto. Foi verificado que para alcançar as resistências de projeto de 30 MPa aos 91 dias, foram necessários para os traços com CCA moída cerca de 202 Kg de cimento por metro cúbico de concreto, e para o traço com adição de 15% de CCA natural 221 Kg/m³, enquanto que para o referência foram necessários 283 Kg/m³ de cimento. Porém para o traço com 25% de CCA natural, foram consumidos 298 Kg/m³ de cimento, representando um aumento de 5% em relação ao concreto de referência com uma relação água /aglomerante 34% menor, o que diminui a trabalhabilidade

Para 40 MPa aos 91 dias, as diferenças se mantiveram, sendo que para os traços 15% CCAM, 25% de CCAM e 15% de CCAN os consumos de cimentos foram 266 Kg/m³, 253 Kg/m³, e 290 Kg/m³, enquanto que para o referência foi de 379 Kg/m³, representando uma economia de cimento de cerca de 30% para as cinzas moídas, e 23% para o traço com 15% de CCAN.

Essa redução no consumo de cimento para os traços 15M, 25M e 15N, trazem como consequência ganhos financeiros e ambientais, especialmente pelo menor consumo de energia e de emissão de CO₂.

6.3 Quanto à resistência à compressão diametral do concreto

Verificou-se após os ensaios de compressão diametral que na idade final de 91 dias, apenas o traço com 15% de CCA moída, nas relações a/ag 0,45 e 0,55, superaram o concreto de referência. Com resistência média de 3,57 MPa para o traço com 15% de CCAM, e 3,52 MPa para o R. Sendo que os concretos com adição de CCA natural apresentaram maiores diferenças em relação às amostras de referência, com resistências médias de 2,99 MPa e 2,63MPa, para os traços 15N e 25N, respectivamente. Essa queda nas resistências por compressão diametral pode ser resultado da inclusão de grãos mais grossos e porosos, além do incremento do teor de vazios.

Foi possível observar que com o aumento da idade de 28 para 91 dias, diminuíram as diferenças entre os concretos com adição mineral e o referência, provavelmente devido ao incremento da rigidez da pasta e o crescimento não linear de f_{cd} com o módulo de elasticidade.

Entre os concretos com adições minerais, constatou-se que as diferenças entre as resistências diametrais das amostras com CCA moída e CCA natural diminuem com o aumento da idade. Esse efeito é provavelmente provocado, porque nas primeiras idades a cinza moída por ser um material mais fino reage mais rapidamente, porém com o tempo a cinza natural reage, paulatinamente, e essa diferença diminui.

6.3.1 Em igualdade de resistência

Os valores de resistência por compressão diametral, em igualdade de resistência, foram quase que em sua totalidade inferiores aos do concreto de referência, sendo que para 30 / 40 MPa a resistência do 15% CCAN e do 25% CCAN foram 2,46 / 3,08 MPa e 3,17 / - ¹ MPa, respectivamente, enquanto que o R

¹ Não foi possível determinar, pois a relação água/aglomerante para tal resistência extrapolou em mais de 10% da zona de estudo ($0.45 < \Delta < 0.65$).

desenvolveu resistência de 3,34 / 3,72 MPa. A exceção foi a amostra com 15% de CCAM onde se obteve 4,00 MPa, para 40 MPa aos 91 dias.

6.3.2 Resistência por compressão diametral estimados

Os valores de compressão diametral estimados pela norma NBR 6118/2003, diferiram dos ensaios laboratoriais subestimando (exemplo do traço 25% CCAM65 aos 28 dias, onde o valor ensaiado foi de 3,11 MPa e o estimado foi 2,39 MPa, um erro de 23%) e superestimando (exemplo do traços 15% CCAN65 aos 28 dias, onde o valor ensaiado foi de 1,89 MPa e o estimado foi 2,47 MPa, um erro de 23%) valores. Deve-se levar em conta que a norma refere-se a concretos sem adições minerais.

6.4 Quanto ao Módulo de Elasticidade

Os valores de módulo de elasticidade, ensaiados aos 91 dias foram satisfatórios, pois os traços com 15% e 25% de CCA moída e 15% de CCA natural tiveram queda pouco significativa, cerca de 10% (ficando entre 39,95 e 49,61 GPa), em relação ao concreto de referência, que apresentou valores de módulo entre 45,35 e 53,75 GPa. Foi observado que para o traço com 15% de cinza de casca de arroz natural houve uma recuperação no desempenho do módulo de elasticidade dos 28 para os 91 dias, indo de uma média de 24,8 GPa para 41,8GPa, que pode ser explicado devido ao aumento da atividade pozolânica e da resistência mecânica.

O concreto com 25% de adição de CCA natural desenvolveu o menor valor de módulo de elasticidade, com uma média de cerca de 30,7 GPa (40% menor que o de referência), esse fato pode ser explicado pela maior porosidade decorrente dos grãos maiores da cinza não moída.

6.4.1 Módulo de elasticidade estimado

Com a comparação entre os valores de módulo de elasticidade estimados por norma e os ensaiados em laboratório, verificou-se que existem variações entre eles. Os módulos calculados pela recomendação do CEB superestimou todos os valores aos 28 dias (exemplo do traço com 15% CCAN e relação a/ag 0,65, onde o valor estimado pelo CEB é 56% maior), enquanto que aos 91 dias para os traços com adição mineral, os valores foram semelhantes aos ensaiados em laboratório (com variações menores que 10%). Os valores obtidos de acordo com a NBR 6118 diferiram maximizando e minimizando algumas grandezas como o traço com 15% de CCAN e relação a/ag de 0,65, onde para aos 28 dias o valor foi 29% maior que o ensaiado e aos 91 dias o valor foi 35% menor que o obtido em laboratório. Para os 91 dias, o método do ACI subestimou todos os valores de módulo de elasticidade, chegando a 54% para o traço de R65. Com isso verifica-se a necessidade de ensaios laboratoriais para a determinação dos valores de módulo de elasticidade, quando se trata de concretos com adição mineral.

Deve-se levar em conta que as normas e recomendações citadas apresentam modelos relacionados a concretos convencionais e não com adições minerais, que é o presente caso.

6.4.2 Em igualdade de resistência

Em igualdade de resistência de 30 MPa e 40 MPa aos 91 dias, o concreto de referência desenvolveu valores de módulo de elasticidade de 45,51 e 51,86 GPa, respectivamente, superando os traços com adição mineral, com média de 38,8 / 43,8 GPa para 30 / 40 MPa, respectivamente, para as amostras com CCA moída. E média de 36,2 GPa para 30 MPa nos traços com CCA natural. Para 40 MPa, aos 91 dias o concreto com 15% de CCA natural apresentou 42,29 GPa de módulo de elasticidade.

Os menores módulos de elasticidade com cinza de casca de arroz são devidos aos maiores teores de pasta cimentícia, desde que a substituição de

cimento seja realizada em massa. Os módulos dos traços com cinza natural foram inferiores aos da cinza moída tendo em vista a sua menor finura e rigidez da pasta cimentícia.

6.5 Quanto à retração

Observou-se que todos os concretos com adição mineral desenvolveram retrações inferiores ao referência na idade final de 300 dias. O traço de referência apresentou taxas de retração entre 0,061 e 0,092%, enquanto que para os concretos com adição de CCA moída a retração máxima foi de 0,076% (para o 25M65) e entre os traços com CCA natural a retração máxima foi de 0,059% (para as amostras 15N65 e 25N45). Essa redução na retração de concretos com adição de cinza de casca de arroz pode ser devido ao aumento no volume dos poros de gel e diminuição no volume de poros capilares, aumentando o refinamento e contribuindo para uma menor permeabilidade.

Ao se comparar, na idade de 300 dias, traços com mesmo tipo de adição de CCA, moída ou natural, verificou-se que as maiores retrações são dos maiores teores de cinza. É o caso do traço com CCA moída, onde para relação a/ag 0,45, as taxas de retração foram 0,051% e 0,061%, para os traços 15M e 25M, respectivamente. Esse fato esse que pode ser explicado pelo aumento do volume de pasta na mistura. A única exceção foi para os traços com adição de CCA natural e relação a/ag 0,65, onde a maior retração foi do traço com menor teor de adição (0,059% e 0,052% para os traços 15N65 e 25N65, respectivamente).

Foi observado que dentro de uma mesma porcentagem de adição mineral, os concretos com cinza natural apresentaram menor retração que as amostras com cinza moída. A menor retração apresentada pelos traços com CCA natural pode ser consequência da redução da atividade pozolânica (grãos mais grossos) e, logo, da formação de menor quantidade de C-S-H, especialmente à medida que aumenta o teor de CCAN.

6.5.1 Em igualdade de resistência

Verificou-se que para resistências de projeto de 30 MPa e 40 MPa aos 300 dias, as retrações dos concretos com adição mineral foram inferiores ao referência. Enquanto que o traço R apresentou retrações para 30 / 40 MPa de 0,111 / 0,082% e os traços com adição de CCA natural desenvolveram 0,062 / 0,053% para o 15N e 0,052 / 0,057% para o 25N. Essa variação representa uma diferença percentual de 44% / 35% a menos de retração para o traço com 15% de CCA natural, e 53% / 30% para o traço com 25% de CCA natural.

6.6 Conclusão geral

Como conclusão geral os resultados obtidos na presente pesquisa indicam que existe viabilidade técnica para o emprego de cinza de casca de arroz natural, sem moagem, para emprego em concreto estrutural. Com efeito, os valores obtidos nos ensaios corroboram com esta afirmação porque, nas variáveis estudadas, os resultados foram satisfatórios para cinza natural, para o teor de 15% de substituição, pois desenvolveram resistências axiais superiores ao referência, retrações inferiores, módulo de elasticidade e resistência por compressão diametral inferiores porém com quedas não significativas .

Para uso de teores acima de 15% de CCA natural é necessária investigação mais aprofundada com outros tipos de cinza, para averiguar se as quedas das propriedades mecânicas são realmente significativas como as do presente estudo.

6.7 Sugestões para pesquisas futuras

Como continuidade deste trabalho, sugere-se o estudo de protótipos curados a meio ambiente, em longo prazo, com análise das propriedades mecânicas e de deformação.

A presente pesquisa realizou ensaios de retração total, e sugere que se faça um estudo desmembrando a retração em autógena e hidráulica.

Seria adequada a investigação com CCA natural de outras fontes ou regiões para comparação de resultados, com a finalidade de abranger um espectro maior de variação da composição química e granulométrica das cinzas produzidas no Rio Grande do Sul.

7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ABRAMS, Duff Andrew. **Design of Concrete Mixtures**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, 1918. (Lewis Institute Bulletin, 1)

AMATO, Gilberto Wageck. “**CASCA: AGREGANDO VALOR AO ARROZ**” (*). Instituto Rio Grandense do Arroz, IRGA, www.irga.rs.gov.br/arquivos/20050815133443.pdf

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Ed. Pini. 667 pg. São Paulo. 2000.

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.

ALLAN, M. L.; KUKACKA, L. E. **Comparasion between slag and silica fume modified grouts**. ACI Materials Journal, v.93, n.6, Michigan, 1996.

ANDRADE, W. P. de, **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997. (varias paginações) ISBN 85-7266-069-0.

BARBOSA.M.B, et al.. **Estudo comparativo da propriedades mecânicas do CAD com resíduos de borracha de pneu e cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas.**, 48º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON 2006.

BOETENG, A. A.; SKEET, D. A. **Inceneration of rice hull for use as a cementitious material: the Guyana experience**. Cement and Concret Research, v.20, p. 795-802, 1990.

DAFICO, J. A. et al. **Argamassa pozolânica ou substituição do cimento portland comum por cinza de casca de arroz**. Textos para Discussão. MEC/SESu/PROED, Goiânia, 1981.

DAL MOLIN, DENISE C.C.; MONTEIRO, PAULO J M. **Contribuição ao Estudo do Módulo de Deformação de Concretos de Alta Resistência com e sem Adições de Microssílica**. São Paulo – 1996

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series**, vol. 9, Ed. E&FN SPON, London, 1992.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HORTZA, D. **Caracterização de cinza de casca de arroz para o uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica**. Revista Química Nova. Vol. 24, no. 06, 778-782, 2001.

DUART, Marcelo Adriano. **Estudo da Microestrutura do Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz Residual sem Beneficiamento**. Dissertação de mestrado, PPGEC/ Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2008.

FAGURY, S.C. e LIBORIO, J.B.L. (2004). **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.

GASTALDINI, A. L. G.; **Influência das adições minerais na porosidade de pastas de cimento Portland**. 4º CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 1996, São Paulo.

HASPARYK, N. P., et al.. **Estudo da influência da cinza de casca de arroz amorfa nas propriedades do concreto**. 45º Congresso Brasileiro do concreto. IBRACON, 2003, Espírito Santo.

HASPARYK, N. P. ; MONTEIRO, Paulo J. M. ; CARASEK, Helena . **O Efeito da Cinza de Casca de Arroz e Sílica Ativa na Reação Álcali-Agregado**. In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto, 1999, Salvador.

ISAIA, G. C. **Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento**. Relatório Técnico do Projeto PROSUL/CNPq. GEPECON, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008

ISAIA, G. C., GASTALDINI, A. L. G., MORAES, R. C. **The physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete**. In: SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM ENVIRONMENTALLY-FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa. Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction into the next millenium, João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2000.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI A. L. G. **Concreto “verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10º, 2004, São Paulo. Anais: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ISAIA, Geraldo C. **“Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura”**. Tese de doutorado, Escola Politécnica / USP, São Paulo, 1995.

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, Editor Geraldo C. Isaia, IBRACON, 2007

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

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

MISSAU, F. **Penetração de cloretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 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: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Fortaleza, 2000.

NASCIMENTO, W. N., et al.. **Adição de cinza de casca de arroz (CCA) no concreto, sob o aspecto da durabilidade**, 44º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo, IBRACON, 2002.

NETTO, R.F. **Materiais Pozolânicos**. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2006.

PECCHIO, M.; BATTAGIN, A. F. **Estudo do envelhecimento de escórias granuladas de alto-forno**. In: Congresso Brasileiro do Cimento, 5º, 1999, São Paulo.

POUEY M.T.; DAL MOLIN D. **Estudo comparativo da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas**. 44° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2002.

PRUDÊNCIO L. R.; SANTOS S.; DAFICO D. A. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Coletânea Habitare - vol. 4

REGO, J. H. S. **Estudo de Aglomerantes compostos por cimento portland comum (CPI) e as cinzas de CA amorfa e cristalina**, 46° Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis. IBRACON, 2004.

RÊGO, J. H. S.; FIGUEIREDO, E. P.; NEPOMUCENO, A. A.. **A utilização da cinza de casca de arroz residual (CCA residual) como adição mineral ao cimento em concretos**, 44° Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo, IBRACON, 2002.

ROVERE, E.L, et. al. (2003). **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.
http://www.centroclima.org.br/new2/ccpdf/FNMA_arroz.pdf, acesso 15/02/2009

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) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SANTOS, S. **Otimização da produção comercial de cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono**. Exame de qualificação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, a publicar (2003).

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C.. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz**. 43° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2001.

SILVA E.J, RICCI E.C, AKASAKI J.L, TASHIMA.MT. **Análise da variação da retração por secagem em argamassas com a adição da cinza de casca de arroz** - Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, Abril / 2006.

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.** 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. Workshop de Resíduos, 1996.

TASHIMA, M. M. ; SILVA, C. A. R. ; AKASAKI, J. L. ; BARBOSA, M. B. ; SILVA, E. J. **Avaliação do teor de cinza de casca de arroz no concreto.** In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto, 2004, Florianópolis. v. II. p. 378-388.

TIBONI R. **A utilização da cinza de casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento portland.** 2007. Dissertação (Mestrado). Departamento de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos -SP, 2007.

VAGHETTI, M.A. **Estudo da corrosão do aço, induzida pro carbonatação, em concretos com adições minerais,** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

WINSLOW, D. N.; COHEN, M. D. **Percolation and pore structure in mortars and concrete,** Cement and Concrete Research, v.24, pp25-37. 1994.

ZUCCO L.L e BERARDO A.L. **Efeito da adição de cinza de casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz.** Scientific Eletronic Library Online. <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v28n2/a02v28n2.pdf>, acessado em 27/02/2009.