



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO
E CINZA DE CASCA DE ARROZ, COM ÊNFASE NA
RETRAÇÃO**

VINÍCIO CECCONELLO

São Leopoldo, Julho de 2013.

Ficha catalográfica

C387a Ceconello, Vinício

Avaliação de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto e cinza de casca de arroz, com ênfase na retração / por Vinício Ceconello. – 2013.

110 f. : il., 30cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

Orientação: Prof^ª Dr^ª Marlova Piva Kulakowski.

1. Agregado reciclado de concreto. 2. Cinza de casa de arroz.
3. Retração. I. Título.

CDU 666.972.12

Catálogo na Fonte:
Bibliotecária Vanessa Borges Nunes - CRB 10/1556

VINÍCIO CECCONELLO

**AVALIAÇÃO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO E
CINZA DE CASCA DE ARROZ, COM ÊNFASE NA
RETRAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Banca examinadora: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral

Prof. Dra. Fernanda Macedo Pereira

São Leopoldo, Julho de 2013.

VINÍCIO CECCONELLO

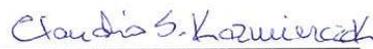
**“AVALIAÇÃO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO E
CINZA DE CASCA DE ARROZ, COM ÊNFASE NA
RETRAÇÃO”**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 16 de agosto de 2013.

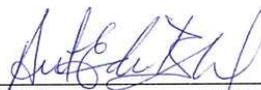


Profª. Dra. Marlova Piva Kulakowski
Orientadora - UNISINOS



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Coordenador do PPGEC/UNISINOS

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral - UFC



Profª. Dra. Fernanda Macedo Pereira - ULBRA

Dedico este trabalho ao meu avô Darcy Luiz Farinon (*in memoriam*) e a meus pais Irineo José Ceconelle e Alair S. Farinon Ceconello.

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meus agradecimentos para os que de alguma forma participaram desta conquista:

À Deus, por me dar a vida e saúde.

Aos meus pais Irineo José Ceconello e Alair S. Farinon Ceconello, que me ensinaram a viver e a nessa vida nunca desistir.

A minha orientadora, Professora Marlova Piva Kulakowski, que me auxiliou, me conduziu e acompanhou por todas as etapas deste trabalho de forma conjunta e esclarecedora.

Ao Professor Claudio de Souza Kazmierczak, por suas sábias palavras.

As professoras Luciana e Andrea pelo apoio no custeio da bolsa de mestrado e aos demais professores do Programa do Mestrado em Engenharia Civil da UNISINOS.

Aos colegas do GMAT, Leandro, Rafaela, Mateus, em especial aos meus colegas de moldagem, e de inúmeras viagens, Mariana e Bruno. Muito obrigado por tudo.

Ao pessoal do LMC – Daiana, Felipe, Ingrid, Maurício e Rodrigo.

Aos meus queridos e valiosos amigos por todo o incentivo ao longo deste período.

A minha namorada Cintia Franken, pelo apoio e compreensão.

Aos colaboradores da Static Engenharia pelos inúmeros momentos de ausência, Adriana, Rafael e em especial ao Eng. Civil Deivid Argenta, o qual considero um irmão.

Ao Fábio Vieceli, representante da Pilecco Nobre pelo fornecimento da cinza de casca de arroz utilizada nesta pesquisa.

À Coneresart pela doação do cimento, da areia e brita utilizada na pesquisa.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, pela concessão da bolsa de estudos e FAPERGS e FINEP, pelo financiamento da pesquisa.

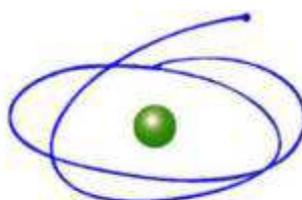
FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –
CAPES/PROSUP.

Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS.



C A P E S

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior



FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA



FAPERGS

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	25
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	25
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	VIDA ÚTIL E DURABILIDADE	29
2.2	RETRAÇÃO.....	31
2.2.1	<i>O fenômeno da retração.....</i>	32
2.2.2	<i>Retração por secagem ou retração hidráulica</i>	35
2.2.3	<i>Métodos de Previsão da Retração por Secagem</i>	39
2.3	AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC).....	44
2.4	CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)	47
2.5	CONCRETO COM INCORPORAÇÃO.....	51
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
3.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	53
3.1.1	<i>Fatores de controle.....</i>	53
3.1.2	<i>Variáveis de resposta.....</i>	54
3.2	MATERIAIS.....	55
3.2.1	<i>Cimento.....</i>	55
3.2.2	<i>Cinza de casca de arroz (CCA).....</i>	56
3.2.3	<i>Agregado miúdo natural.....</i>	60
3.2.4	<i>Agregado graúdo natural</i>	61
3.2.5	<i>Agregado graúdo reciclado.....</i>	62
3.2.6	<i>Compensação da absorção do ARC</i>	63
3.2.7	<i>Aditivo</i>	65
3.2.8	<i>Água.....</i>	65
3.3	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	65
3.4	MÉTODOS DE ENSAIO	67
3.4.1	<i>Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.....</i>	68
3.4.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral.....</i>	68
3.4.3	<i>Taxa de absorção, porosidade capilar e porosidade total</i>	69
3.4.4	<i>Retração por Secagem.....</i>	70
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	73
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	73
4.2	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	80
4.3	TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	84
4.4	POROSIDADE CAPILAR	85
4.5	POROSIDADE TOTAL.....	86
4.6	RETRAÇÃO POR SECAGEM	89
4.6.1	<i>Comparativos entre retração e a porosidade total.....</i>	96
5	CONCLUSÃO.....	99
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	APÊNDICES	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dos métodos de previsão da retração por secagem.	40
Tabela 2 – Valores característicos superiores da deformação específica da retração.	41
Tabela 3 – Valores característicos superiores da deformação específica da retração.	42
Tabela 4 – Programa fatorial de experimentos - fatores e níveis de controle.	53
Tabela 5 – Programa fatorial de experimentos - fatores e níveis de controle (retração, taxa de absorção, porosidade capilar e porosidade total).....	54
Tabela 6 – Caracterização química, física e mecânica do cimento.	55
Tabela 7 – Caracterização química da cinza de casca de arroz.	56
Tabela 8 – Caracterização da atividade pozolânica da CCA.....	58
Tabela 9 - Valores de massa unitária e específica do agregado miúdo natural utilizada na pesquisa	60
Tabela 10 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural utilizado na pesquisa	61
Tabela 11 - Valores de massa unitária e específica do agregado graúdo natural utilizada na pesquisa.	62
Tabela 12 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural utilizado na pesquisa.	62
Tabela 13 – Granulometria do ARC.....	62
Tabela 14 – Dados Técnicos e características do aditivo	65
Tabela 15 – Consumo de materiais para os traços estudados.....	67
Tabela 16 – Média dos resultados de resistência à compressão.	73
Tabela 17 – ANOVA para resistência a compressão.	74
Tabela 18 – Os resultados de resistência a tração por compressão diametral.	80
Tabela 19 – ANOVA da resistência à tração.....	81
Tabela 22 – Taxa de absorção.	84
Tabela 23 – Porosidade capilar.....	85
Tabela 24 – Porosidade total.	87
Tabela 25 – ANOVA.....	87
Tabela 26 – Leituras de retração por secagem para cada idade.....	89
Tabela 27 – ANOVA do modelo.....	91
Tabela 28 – Parâmetro das variáveis analisadas para retração.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma do GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção.	24
Figura 2 – Fissuras produzidas por retração.	32
Figura 3 – Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados.	36
Figura 4 – Perda de água em função da umidade relativa.	38
Figura 5 – Retração de uma argamassa em função da perda de água.	39
Figura 6 – Variação de $\beta_s(t)$ em relação ao tempo em dias.	43
Figura 7 – Difratoograma de Raios X da Cinza de casca de arroz.	57
Figura 8 – Distribuição granulométrica da Cinza de casca de Arroz.	58
Figura 9 – Micrografia da cinza de casca de arroz (aumento de 4500x).	59
Figura 10 – Micrografia de pasta de cimento (48 horas), com aumento de (4500 X).	59
Figura 11 – Micrografia de pasta de cimento com CCA (48 horas), aumento de (4500X).	60
Figura 12 – Granulometria do agregado miúdo natural, conforme NBR NM 248:2003.	61
Figura 13 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural (AGN) e do agregado reciclado de concreto (ARC) utilizados na pesquisa.	63
Figura 14 – Curva de Absorção de água do ARC.	64
Figura 15 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmica.	69
Figura 16 – Esquema experimental do método RILEM TC 116 PCD (1999)	69
Figura 17 – Exemplo do gráfico com retas de sucção e saturação para os concretos de referência (0% CCA e 0% ARC).	70
Figura 18 – Vista superior do corpo de prova para ensaio de retração.	71
Figura 20 – Equipamento de ϵ com c_p	72
Figura 21 – Efeito isolado do fator “CCA” no comportamento de resistência à compressão axial.	75
Figura 22 – Efeito isolado do fator “ARC” no comportamento de resistência à compressão axial.	76
Figura 23 – Efeito isolado do fator “água/aglomerante” no comportamento de resistência à compressão axial.	76
Figura 24 – Efeito isolado do fator “idade” no comportamento de resistência à compressão axial.	77
Figura 25 – Interação dos fatores “CCA” e “ARC” no comportamento de resistência à compressão axial.	78
Figura 24 – Interação dos fatores “CCA”, “ARC” e “A/AGL” em relação à resistência à compressão.	79
Figura 25 – Efeito isolado da variável “CCA” no comportamento da resistência a tração por compressão diametral.	81
Figura 26 – Efeito isolado da variável “ARC” no comportamento da resistência a tração por compressão diametral.	82
Figura 27 – Efeito isolado da variável “relação água/aglomerante” no comportamento da resistência a tração por compressão diametral.	83
Figura 28 – Interação da variável “CCA” e “ARC” no comportamento da resistência a tração por compressão diametral.	83
Figura 30 – Taxa de absorção aos 28 dias.	84
Figura 38 – Porosidade capilar aos 28 dias.	86
Figura 40 – Porosidade total aos 28 dias.	87
Figura 41 – Efeito isolado do teor de cinza de casca de arroz.	88
Figura 43 – Ensaio de retração ao longo do tempo.	90

Figura 44 – Relação entre os valores calculados e os valores observados para o ensaio de retração.....	92
Figura 36 – Ensaio de retração, substituição por CCA com 0% de ARC para diferentes idades.	93
Figura 37 – Ensaio de retração, substituição por CCA com 25% de ARC para diferentes idades.	94
Figura 38 – Ensaio de retração, substituição por CCA com 50% de ARC para diferentes idades.	95
Figura 39 – Valores médios de retração aos 112 dias versus valores médios da porosidade total aos 28 dias.....	96

RESUMO

CECCONELLO, V. **Avaliação de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto e cinza de casca de arroz, com ênfase na retração.** São Leopoldo, 2013. 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2013.

A incorporação de agregados reciclados de concreto, em novos concretos é uma alternativa de reduzir os impactos ambientais relacionados a este material. No entanto, seu emprego pode aumentar a porosidade do concreto e alterar suas propriedades. Neste contexto a de cinza de casca de arroz pode trazer melhorias nas propriedades dos concretos, e principalmente quanto às propriedades mecânicas e a retração. O presente trabalho tem como objetivo a análise da retração, propondo um modelo matemático para este fenômeno, em concreto com associação de agregados reciclados de concreto e cinza da casca de arroz. Foram produzidos concretos com: 25% e 50% de agregado reciclado em substituição ao agregado natural; 0%, 10% e 20% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz; e relações água/aglomerante iguais a 0,42, 0,53 e 0,64. A resistência à compressão foi analisada aos 7, 28, 63, 91 e 112 dias, os ensaios de resistência à tração, taxa de absorção, porosidade capilar e porosidade total foram analisadas aos 28 dias já os ensaios de retração foram analisados ao 1, 4, 7, 14, 28, 63, 91 e 112 dias. Os resultados obtidos indicam grande interação entre a cinza de casca de arroz e o agregado reciclado de concreto, esta interação fica ainda mais evidenciada no momento em que é introduzido junto à mistura 20% de cinza de casca de arroz, tanto no modelo apresentado para análise da retração como nas demais propriedades analisadas.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto; cinza de casca de arroz; retração.

ABSTRACT

CECCONELLO, V. Evaluation of concretes produced with recycled aggregate concrete and rice husk ash, emphasizing the retraction. São Leopoldo, 2013. 135p. Dissertação (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

The incorporation of recycled concrete aggregate in new concrete is an alternative to reduce the environmental impacts related to this material. However, their use may increase concrete porosity and change their properties. In this context the rice husk ash can improve the properties of concrete, mainly mechanical properties and shrinkage. This work aims to analyze the concrete shrinkage, proposing a mathematical model for this phenomenon for concretes with the association of recycled concrete aggregates and rice husk ash. Concretes were produced with 25% and 50% of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate; 0%, 10% and 20% replacement of cement by rice husk ash, and 0.42, 0.53 and 0.64 water/binder ratios. The compressive strength was analyzed at 7, 28, 63, 91 and 112 days. Tensile tests, absorption rate, capillary porosity and total porosity were analyzed at 28 days of age; shrinkage was analyzed at 1, 4, 7, 14, 28, 63, 91 and 112 days of age. The obtained data indicate strong interaction between rice husk ash and recycled concrete aggregate, this interaction is even more evident when it is used 20% rice husk ash, for all properties studied.

Key-words: recycled concrete aggregate; rice husk ash; shrinkage.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais à base de cimento, entre eles o concreto, são materiais que devido às suas características e propriedades suprem com desempenho elevado grande parte das necessidades impostas às edificações e às obras de infraestrutura, sendo-os, os materiais de maior importância em boa parte da história da civilização humana, que vão desde a civilização grega e romana até os dias de hoje (ISAIA, 2005). O que pode afetar a utilização destes materiais é a falta de recursos naturais para obtenção de matéria-prima.

Apesar de o concreto de cimento Portland apresenta-se mais sustentável que alguns materiais utilizados na construção civil, como por exemplo, o aço e a madeira. Porém, o cimento Portland apresenta a maior parte do impacto relacionada ao concreto. Em média uma tonelada de cimento consome aproximadamente 100-120 KWh de energia e emite em torno de 800 kg de CO_{2eq}, o que representa entre 5% e 6% das emissões totais do planeta. No ano de 2010 a produção mundial de cimento foi de aproximadamente 3 bilhões de toneladas o que representa uma carga média de emissões de 2,4 bilhões de toneladas de CO_{2eq}, seguido de um consumo de energia de 330.000GWh (ISAIA, 2011).

Damineli et al. (2010) complementa que em um futuro próximo e sem a introdução de inovações tecnológicas, as crescentes exigências de materiais à base de cimento nos países em desenvolvimento certamente irão provocar um significativo aumento de emissões de CO₂ no que diz respeito à indústria cimentícia no mundo.

Na indústria da construção civil tem-se uma gama muito grande de produto sendo que alguns deles podem ter boa viabilidade quando reutilizados como agregados em novos concretos. Conforme dito por Zega e Di Maio (2011), a reciclagem de resíduos de construção é muito atraente em comparação ao uso de recursos não renováveis naturais, pois, promovem a proteção ambiental, permitindo o desenvolvimento de uma nova matéria-prima.

As principais dificuldades na utilização de resíduo de construção e demolição (RCD¹) como agregado em peças de concreto são o custo da britagem, a graduação, o controle do pó e a devida separação de alguns constituintes indesejáveis junto ao agregado. Porém, pode vir a ser uma alternativa viável frente à falta de agregados naturais de boa qualidade e ao elevado custo de disposição final de resíduos, além, claro, do contexto ambiental. Estudos

¹ RCD é o termo utilizado nesta pesquisa para tratar dos Resíduos de Construção e Demolição indo ao encontro do utilizado na bibliografia internacional. Apesar desta consideração o COMAN trata estes resíduo como RCC, ou seja, Resíduo de Construção Civil.

relacionados apresentam que concretos com a utilização de agregado reciclado de concreto (ARC), a partir da britagem de estruturas maciças, não indicam perda de qualidade, desde que o concreto seja reciclado de forma adequada (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Já em relação as agroindústrias, estas se caracterizam por serem geradoras de resíduo e entre elas se destaca a indústria do arroz. Conforme MAPA (2013), o Brasil é o nono produtor mundial de arroz, sendo a produção distribuída nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Mato Grosso. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, a produção nacional esperada para o ano de 2013 é de aproximadamente 11,9 milhões de toneladas, com crescimento em comparação ao ano de 2012 de 4,6%. Partindo deste expressivo número correspondente a produção brasileira, e sabendo da grande quantidade de resíduo gerado na colheita e processamento do grão, neste caso a casca de arroz, o tratamento dado a este resíduo é igualmente relevante. Na maioria dos casos este resíduo é empregado na geração de energia a partir da queima como biomassa, isto devido a sua considerável propriedade calorífica. O que aparentemente se entende como solução de destinação do resíduo agrícola, na realidade remete a um novo resíduo, este sim foco desta pesquisa, a cinza da casca de arroz, aqui tratada como CCA.

A CCA é composta em sua maior parte por silicatos, e sua estrutura é classificada como não-cristalina. Ao passar por um processo de beneficiamento devido à forma de suas partículas, pode ser utilizada como pozolana. Siddique e Khan (2011) destacaram algumas vantagens do uso de cinza de casca de arroz como pozolana no concreto e no cimento, entre elas: melhora na resistência e durabilidade, benefícios ambientais relacionados à eliminação de resíduos e a redução das emissões de dióxido de carbono devido a redução de cimento.

Frente a isto, a utilização de resíduos de diferentes indústrias de forma associada vem revendo os conceitos clássicos sobre os materiais de matriz cimentícia, entre os quais o concreto se enquadra. Com a intenção de melhorar os conhecimentos da associação de materiais alternativos e mitigar futuras manifestações patológicas em concretos com adição de cinza de casca de arroz e agregado graúdo reciclado de concreto, essa pesquisa procura contribuir para analisar a durabilidade, frente à retração total, absorção de água e as propriedades mecânicas de concretos com essas características.

1.1 JUSTIFICATIVA

Entre os materiais mais utilizados na construção civil de todo o mundo, está o concreto a base de cimento Portland (Mehta e Monteiro, 2008). Estima-se que no mundo sejam utilizados 11 bilhões de toneladas ao ano. Este alto consumo ocorre devido às suas características de resistência à compressão e à tração, e ainda, devido ao baixo custo deste material.

Contrapondo as suas características consagradas como material largamente utilizado tem-se a questão ambiental relacionada à sua produção, que é basicamente oriunda da extração de matérias primas não renováveis associada a uma produção com grande quantidade de emissão de gases que desencadeiam o efeito estufa. Boa parte desses impactos ao meio ambiente são relacionados ao seu aglomerante, o cimento Portland, o qual é obtido a partir da mistura e do aquecimento de calcário, argila e outros materiais de semelhante composição. Com a fusão parcial dos componentes são produzidos nódulos de clínquer, que posteriormente são finamente moídos e misturados com uma pequena porcentagem de sulfato de cálcio.

Outra parcela não menos importante envolve os agregados utilizados na produção de concreto, que em sua maioria são oriundos de processos de extração em jazidas naturais e sofrem algum tipo de beneficiamento, britagem, peneiramento, entre outros.

A fim de reduzir os impactos ambientais relacionados ao concreto, uma alternativa é a utilização de adições minerais junto ao cimento Portland, e a substituição dos agregados naturais. Este novo arranjo de materiais que englobam a prática tecnológica do concreto, na maioria das vezes, contempla materiais tidos como subprodutos em sua indústria primária e vem se tornando um alternativa viável neste meio, isto porque a sua utilização controlada remete a produtos com propriedades próximas, além de conseguir empregar materiais que muitas vezes estariam destinados em locais incorretos e também reduzindo a extração de recursos naturais não renováveis.

Tendo em vista os benefícios nas questões ambientais, mas também as propriedades relacionadas a estes compósitos, Senisse, Dal Molin e Abitante (2010) salientam que a interação inadequada entre parâmetros podem gerar diversos tipos de manifestações patológicas, as quais prejudicam severamente a durabilidade das estruturas, e destacam ainda que uma de suas propriedades de grande preocupação relacionada com a deterioração prematura das estruturas e que está diretamente ligada, além de outros fatores, ao proporcionamento dos materiais constituintes do traço de concreto é o fenômeno da retração.

Esta pesquisa foi conduzida dentro dos temas de utilização de resíduos em concretos, análise de propriedades mecânicas e durabilidade sob o ponto de vista da retração. Estes temas estão vinculados duas linhas de pesquisa do PPGECC, conforme Figura 01.



Figura 1 – Organograma do GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção.

Fonte: Adaptado de Kulakowski (2011).

Esta proposta insere-se dentro de dois projetos em desenvolvimento no PPGECC – Unisinos coordenados pelo GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem. O primeiro deles foi contemplado na Chamada Pública MCT/MCIDADES/FINEP/Ação Transversal, Saneamento Ambiental e Habitação - 7/2009, no Tema 2.3 (Avaliação de desempenho de tecnologias inovadoras), cujo objetivo geral é “Definição de critérios e métodos para avaliação de desempenho de produtos e sistemas construtivos inovadores”. Neste tema insere-se o Subprojeto 2 - Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e elementos construtivos inovadores – componentes que incorporam resíduos de concreto, com o objetivo geral “Definir uma metodologia para a avaliação da durabilidade de sistemas inovadores que incorporem agregados reciclados em matrizes de concreto e argamassas”.

O segundo projeto do qual a proposta de dissertação faz parte, foi contemplado no Edital PRONEM/FAPERGS/CNPQ n. 003/2011, Programa de Apoio a Núcleos Emergentes, sob o título “Associação de agregado reciclado de concreto com cinza de casca de arroz na produção de concretos”, onde são previstos o estudo do desempenho mecânico e de durabilidade destes concretos.

Outras duas dissertações com enfoque na durabilidade dos materiais com a incorporação de resíduos estão sendo finalizadas; um dos trabalhos estuda a penetração de íons cloretos nestes concretos (FEDUMENTI; 2013) e o outro a carbonatação (SARTORI, 2013).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a análise da retração em concretos produzidos com agregados reciclados de concreto (ARC) e cinza da casca de arroz (CCA).

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Modelar matematicamente o comportamento dos concretos com ARC e CCA frente à retração;
- Analisar o comportamento dos concretos com ARC e CCA frente à taxa de absorção;
- Analisar o comportamento dos concretos com ARC e CCA frente à porosidade capilar;
- Analisar o comportamento dos concretos com ARC e CCA frente à porosidade total;
- Analisar o comportamento dos concretos com ARC e CCA frente à resistência a compressão;
- Analisar o comportamento dos concretos com ARC e CCA frente à resistência à tração por compressão diametral;

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa é estruturada em cinco capítulos, sendo:

No presente capítulo é apresentada a introdução ao tema, justificativa, objetivos propostos pelo estudo, estrutura da pesquisa e delimitações do trabalho.

O segundo capítulo, apresenta a revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes ao tema, como: concretos com agregado reciclado de concreto (ARC) e cinza de casca de arroz (CCA), bem como o uso de forma associada de ARC e pozolanas, além dos fenômenos relacionados à retração em concretos.

O terceiro capítulo traz a programa experimental, bem como os materiais e métodos adotados na pesquisa.

O quarto capítulo, apresenta os resultados e análises.

No quinto capítulo é apresentada a conclusão do trabalho e sugestão para trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Os fatores que podem interferir nas características físicas e mecânicas do concreto, alterando seu desempenho, são: o tipo de cimento, relação água/cimento, seus agregados, condições de ensaio, metodologia aplicada, entre outros. Devido à presença destas variáveis, surge a necessidade de se limitar o programa experimental desenvolvido, com os seguintes itens em destaque:

- Tipo de cimento: como o objetivo da pesquisa é verificar a influência da utilização de agregados reciclados de concreto (ARC) e a substituição de parte do cimento por cinza de casca de arroz frente à retração, optou-se em trabalhar com o cimento o CII-F-32, pelo fácil acesso deste produto no mercado e por sua composição sem a presença de adições pozolânicas;
- Percentual de substituição de cimento: os percentuais de substituição do cimento pela cinza de casca de arroz que serão adotados nessa pesquisa se embasam em outros estudos sobre esse assunto, como por exemplo, o estudo feito por Krug (2011);
- Percentual de substituição do agregado graúdo: os percentuais de substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto são definidos conforme pesquisas realizadas sobre os assuntos, como o estudo de Troian (2010), Werle (2010) e Gonçalves (2011);
- Tipo de agregado graúdo: o agregado graúdo reciclado utilizado no estudo foi proveniente da demolição de estrutura maciça, mais especificamente de

lajes pré-fabricadas do tipo Rott, curadas convencionalmente e fck de 35 MPa, britada em um britador de mandíbulas com abertura de 20 mm. Todos os agregados são de mesma procedência e britados da mesma forma;

- Tipo de cinza de casca de arroz: a cinza utilizada foi obtida na empresa Pilecco Nobre Alimentos Ltda., que é parceira da Unisinos. A cinza é originada do mesmo lote de produção para que não haja variabilidade;
- A relação água / aglomerante abrangeu um traço pobre, um traço rico e um intermediário, sendo delimitada com as seguintes relações: 0,42; 0,53 e 0,64.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica é voltada para temas de relevância ao tema proposto como, a utilização de agregados reciclados de concreto (ARC) e a utilização da cinza de casca de arroz (CCA) como pozolana em concretos. Analisando a durabilidade destes concretos com ênfase ao fenômeno da retração.

2.1 VIDA ÚTIL E DURABILIDADE

Os conceitos de durabilidade e vida útil estão ganhando espaço dia a dia no âmbito da construção civil, e em todos os materiais vinculados. Dentre estes materiais destaca-se o concreto, devido à sua diversidade de produtos, mas também por sua função estrutural. Conforme Meddah, Suzuki e Sato (2011), a extensão dos conceitos de durabilidade em estruturas de concreto armado e sua vida útil está se tornando uma questão-chave neste século para limitar as operações de manutenção e os custos adicionais.

Conforme Roman et al. (2010), de maneira geral, quando se trata de um processo de padronização destinado a estabelecer e aplicar regras com o intuito de ordenar uma atividade para o benefício dos interessados, levando em conta condições de funcionamento e de segurança, tem-se a normalização de um produto.

Desta forma a construção civil vem se adaptando a novas normalizações vigentes, como a ABNT NBR 6118:2007 e mais recentemente com a ABNT NBR 15575: 2013.

Em relação à durabilidade das estruturas de concreto armado a ABNT NBR 6118:2007 conceitua da seguinte forma:

“Consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.”

Vida útil é uma medida de tempo que a edificação como um todo ou algum sistema que a compõem, mantém o desempenho esperado, ou seja, medida de tempo da durabilidade de um edifício ou de suas partes visto à edificação como um todo ou elementos e componentes individuais. Dentro deste entendimento é relevante apresentar o conceito de vida útil de projeto, que é uma manifestação do desejo do usuário de quanto ele acha razoável que deva durar o bem que irá usufruir, assim que o seja adquirido. Há ainda o conceito de vida útil estimada, conforme NBR 15575 (ABNT, 2013), como sendo a durabilidade prevista para um

dado produto inferida a partir de dados históricos de desempenho do produto ou de testes de envelhecimento acelerado.

Desta maneira os conhecimentos de vida útil e durabilidade devem ser utilizados como ferramentas para os profissionais da construção civil de forma a dimensionar e especificar os materiais, de uma maneira geral, associando estes conceitos ao meio em que será inserido assim como o seu desempenho neste meio, previamente reconhecido. Conforme Mitidieri Filho (2010) as condições de exposição de um edifício são, nada mais que, o conjunto de influências ou, ainda, ações atuantes sob este edifício durante a sua vida útil.

Segundo Sideris e Anagnostopoulos (2013), nos últimos 15 anos a durabilidade das estruturas de concreto tornaram-se foco de grande interesse, justamente por perceber que o custo real da estrutura não está ligado somente com o custo inicial da obra, mas sim com o custo total do ciclo de vida.

Dentre os fatores a serem analisados, perante os conceitos de vida útil e durabilidade, destaca-se os materiais que constituem o concreto. No momento em que se utilizam materiais alternativos ou subprodutos de outras indústrias nestes mesmos concretos, a preocupação em atingir os requisitos de durabilidade deve ser elevada.

Conforme recente pesquisa desenvolvida por Kou e Poon (2013), o uso de agregados reciclados de concreto em novos concretos ainda é limitado, isto provavelmente, pelo pouco conhecimento do seu desempenho em longo prazo, ou seja, vida útil e durabilidades desses concretos.

Entretanto quando é apresentada a substituição de cimento por pozolana, a bibliografia remete a resultados que indicam concretos com elevada vida útil. Principalmente pela redução da porosidade e o transporte de fluidos para o interior da peça, conforme Rukzon, Chindaprasirt e Mahachai (2009), Givi et. al. (2010) e Siddique e Khan (2011).

Conforme NBR 6118 (ABNT, 2007), os mecanismos de deterioração e envelhecimento do concreto, podem ocorrer por meio de *Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto* (lixiviação, expansão por ação de água e solos contaminados, etc.), *Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura* (despassivação por carbonatação e íons cloreto) e *Mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita* (movimentações de origem térmica, retração, fluência, etc.)

Kage e Ohno (2011) relatam que a fissuração nas estruturas de concreto provoca degradação do seu desempenho em longo prazo e conseqüentemente prejudicam sua

durabilidade, vinculado a isso esta a perda de estanqueidade e resistência. Essas fissurações ocorrem frequentemente devido a retração por secagem. Ainda, Güneyisi et al. (2012) complementam dizendo que, a durabilidade de concretos está diretamente ligada a suas propriedades de permeabilidade e a retração, e que essas propriedades podem ser aprimoradas em concretos com substituição de cimento por adições minerais.

A substituição de cimento por materiais pozolânicos alternativos está se tornando cada vez mais frequente. O que deve ser analisado é que a microestrutura e as propriedades dos concretos podem ser modificadas pelo emprego destes materiais. Com isso existe uma necessidade de melhor compreensão dos efeitos das pozolanas na durabilidade dos concretos, principalmente sobre os efeitos da retração (KAR et.al. 2013).

2.2 RETRAÇÃO

A retração é um fenômeno que ocorre a partir do processo de hidratação da pasta e se estende até avançadas idades do concreto e está parcialmente relacionada à perda de água do compósito para o meio externo (os tipos de retração serão tratados em 2.5.1.). Conforme mencionado por Beaudoin (2001), para um mesmo traço de concreto, quanto maior a relação água / cimento, maior a retração.

Devido às peculiaridades de análise deste requisito da durabilidade de concretos, cabe uma maior explanação sobre o fenômeno.

No ano de 1905, Le Chatelier publicou pela primeira vez um estudo sobre concreto que tratava dos fenômenos de fluência e retração. Desde então, várias pesquisas e ensaios vem se desenvolvendo sobre esses temas, que em muitos casos, são tratados de maneira associada (DINIZ, FERNANDES e KUPERMAN, 2011).

O fenômeno de retração ocorre ao longo da vida útil do concreto estando ele no estado fresco ou endurecido. Ele está relacionado basicamente com a perda de água que é adicionada ao compósito no momento da mistura (MARQUES E BITTENCOURT, 2011). A retração, diferentemente da fluência, ocorre sem que a peça de concreto esteja carregada, portanto, se trata de uma deformação característica do material e do meio em que está inserido.

Conforme Cánovas (1988), a retração gera tensões nos elementos estruturais que gerarão fissuras se estes elementos forem impedidos de se deformar, como no exemplo apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Fissuras produzidas por retração.

Cortesia: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral

Segundo Aïtcin (1998), a fim de compreender a origem e as principais causas da retração, é essencial compreender as reações de hidratação do concreto e suas consequências físicas, termodinâmicas e mecânicas. Esta reação química resulta na libertação de calor e uma contração da volumetria do sólido. Portanto, o ganho de resistência de qualquer pasta de cimento hidratado está sempre associado à liberação de calor e a contração do volume do sólido, e vice-versa.

No próximo item serão explanados parâmetros que estão relacionados à retração em concretos, parâmetros estes relevantes para a análise da retração em concretos com CCA e substituição de agregado graúdo natural por ARC.

2.2.1 O fenômeno da retração

Conforme Hasparyk et. al. (2005), o fenômeno da retração está associado à deformação da pasta de concretos e argamassas, sem que estas peças estejam submetidas a qualquer tipo de solicitação de carga.

Essas deformações creditadas à perda de água podem ser divididas em quatro tipos de retração, sendo elas: retração plástica, retração autógena, retração por carbonatação e retração por secagem ou retração hidráulica.

A perda de água, seguida de contração do concreto ainda no estado plástico, decorrente da evaporação da água da superfície, ou ainda devido a perda de água por sucção do solo ou do concreto adjacente, acarreta na **Retração Plástica**. A sua intensidade pode ser influenciada pela temperatura, pela umidade relativa do ambiente e pela velocidade do vento e também é diretamente influenciada pelo teor de cimento na mistura, quanto maior o teor maior será a retração (NEVILLE, 1997).

Segundo Diniz, Fernandez e Kuperman (2011), se a velocidade de evaporação da água for maior do que a taxa de água que chega à superfície por efeito da exsudação, ou se não for executado um procedimento de cura adequada no concreto, haverá fissuração por retração. O fenômeno é associado a deficiências na execução e não por se tratar de um problema intrínseco do compósito.

Segundo Cánovas (1988), a retração plástica é formada em poucas horas após o lançamento. Seu quadro de fissuração se dá na forma de pele de crocodilo e largas em lajes concretadas em tempo seco. As fissuras podem variar de 3 a 4 mm na superfície.

A **retração autógena**, conforme Diniz, Fernandes e Kuperman (2011), ou retração devido à contração química, ocorre devido à reação química no processo de hidratação do cimento, onde o consumo de água leva à uma redução de volume, de maneira que a água quimicamente combinada, na ordem de 22% de cimento em massa, pode gerar uma redução equivalente de volume na ordem de 25% em relação ao original.

Neville (1997) complementa que a retração autógena é citada como uma deformação linear crescente ao longo dos primeiros anos e tende a aumentar em temperaturas mais altas, com maiores teores de cimento e com cimentos mais finos, bem como cimentos constituídos por maiores teores de C3A e C4AF. Já em cimentos com maiores teores de pozolana a retração autógena é reduzida.

Foi constatado na pesquisa desenvolvida por Neto, Repette e Cincotto (2006), quando foi analisado o comportamento da retração autógena do cimento de escória ativada com silicato de sódio, que o aumento do teor de ativador resultou no aumento da retração autógena, pois causou a diminuição da porosidade total e o aumento da quantidade de mesoporos, que estão relacionados diretamente com o efeito físico da auto-secagem.

Boa parte da preocupação relacionada à retração autógena está vinculada aos concretos de alto desempenho, que utilizam pequenas quantidades de água, ou seja, baixas relações água/cimento. Segundo Yoo, Kwon e Jung (2012) uma alternativa em concretos de alto desempenho é a utilização de aditivos químicos, pois reduzem significativamente a retração autógena, mantendo a pequena quantidade de água.

Quanto maior a retração autógena desenvolvida, maiores são as tensões de tração interna, e quando as essas tensões são reduzidas a durabilidade dos concretos aumenta significativamente (MEDDAH, SUZUKI E SATO, 2011).

Apesar da retração autógena no concreto ter sido descoberta no início dos anos 20, sua devida importância foi-lhe atribuída com o advento do concreto de alto desempenho, CAD, na década de 90 (HASPARYK, et al., 2005), já que anteriormente com concretos de alta porosidade ela era praticamente desprezada.

A **Retração por carbonatação** ocorre como produto de interação química entre o dióxido de carbono atmosférico (CO_2) e os produtos de hidratação do cimento (MEHTA, 1994).

A reação de carbonatação gera água que evapora e aumenta a retração por secagem. Caso a umidade do ambiente estiver inferior a 25% não ocorrerá a reação química de carbonatação devido à ausência de água nos poros da pasta de cimento. Por outro lado, quando os poros estiverem cheios de água ocorrerá a reação de carbonatação, porém de forma lenta por decorrer da difusão do CO_2 , que acontece lentamente (DINIZ, FERNANDES e KUPERMAN, 2011).

Segundo Neville (1997), quando o concreto é submetido a ciclos de molhagem e secagem com ar contendo CO_2 , poderá se tornar mais evidente a retração ocasionada pela carbonatação, durante a secagem. A retração total em qualquer estágio é maior do que com secagem ao ar sem CO_2 , de modo que a carbonatação aumenta a retração irreversível, o que de maneira geral pode contribuir para fissuração generalizada da superfície de concreto. A fissuração generalizada característica por fissuras de pequenas profundidades e induzida pela retração restringida pelas partes mais profundas que não estão submetidas ao esforço.

A **retração por secagem**, por se tratar da ação de maior influência sob as peças de concreto, será tratada de forma separada, relacionando as diversas formas que a água é associada às estruturas internas do corpo.

2.2.2 Retração por secagem ou retração hidráulica

Com a finalidade de um melhor entendimento sobre o fenômeno da retração por secagem, estão indicadas as formas em que a água se apresenta junto concreto endurecido.

Água quimicamente combinada ou de cristalização, é a que integra as moléculas dos produtos de hidratação da pasta de cimento, a qual não é perdida na secagem, ela é liberada a partir da decomposição dos hidratos, o que ocorre por aquecimento (HASPARYK et al., 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2008; ISAIA, 2011).

Água interlamelar ou água de gel, está inserida junto à estrutura do C-S-H e entre as lamelas formadas durante a cristalização dos silicatos, mediante ao avanço do grau de hidratação. O espaçamento entre as lamelas é muito pequeno, onde provavelmente exista somente uma camada monomolecular de água entre elas, tornando as lamelas fortemente ligadas por meio de forças de Van der Waals (ISAIA, 2011).

Água adsorvida se apresenta aderida junto à superfície das paredes moleculares dos produtos de hidratação. Em proporções maiores de água adsorvida, esta pode ser perdida por secagem em umidade relativa na ordem de 30%. Esta perda de água é responsável pela retração na pasta de cimento hidratada (HASPARYK et al., 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Água capilar, Segundo Hasparyk et al. (2005) pode ser dividida em duas categorias: água livre, que é localizada em vazios de diâmetro maior que 50 nm e sua remoção não causa retração, e a água retirada por tensão que, conforme Isaia (2011), é localizada nos espaços vazios entre 5 e 50 nm. Esta última, em alguns casos, é descrita como o volume de água livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida, sendo este o principal agente ocasionador da retração na pasta do cimento hidratado, que será maior tanto quanto forem menores os poros da pasta, visto que as forças de tensão superficial são inversamente proporcionais.

A Figura 33 apresenta os tipos de água presentes na pasta de cimento de forma associada.

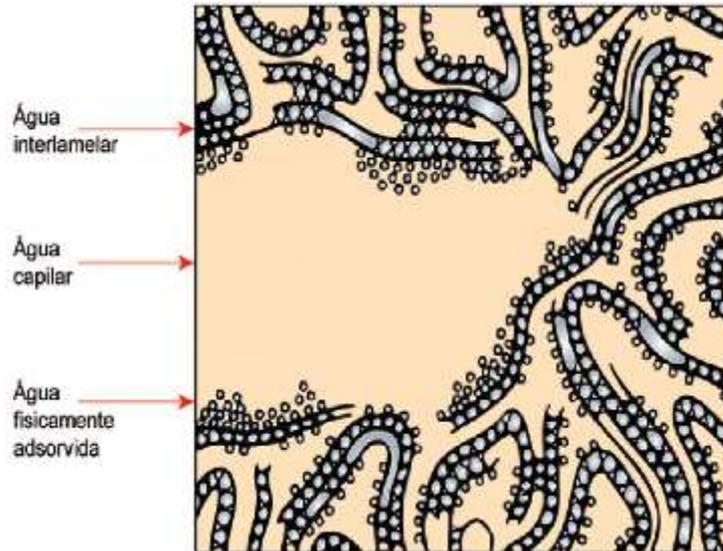


Figura 3 – Modelo esquemático dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados.

Fonte: adaptada de Feldman e Sereda, 1970 apud Mehta e Monteiro (2008).

Conforme esses conceitos pode-se dizer que o fenômeno da retração dificilmente não ocorrerá. Cabral et al. (2010) mencionam que a retração por secagem é um fenômeno que inevitavelmente o concreto estará sujeito quando exposto a ambientes com graus de saturação inferiores a 100% de umidade relativa, entendendo que a retração por secagem é uma peculiaridade intrínseca do material. Por outro lado quando um concreto que está em ambiente seco é introduzido em água ocorre efeito contrário à retração, ou seja, a expansão dimensional (CÁNOVAS, 1988).

Para Cánovas (1988), a retração por secagem em concretos é um fenômeno natural podendo ser acentuada ou não devido à exposição em um ambiente mais ou menos seco, ou seja, conforme citado por Aïtcin (1998) retração de secagem e o que resulta da perda de água devido à evaporação da sua umidade interna causando o endurecimento do concreto.

Segundo Dellinghausen et al. (2009) o concreto é um material sólido poroso em seu estado endurecido, cuja magnitude e interconexões de seus poros dependem das propriedades físicas dos seus constituintes, de maneira que a água que não foi envolvida no processo químico de hidratação, presente na estrutura da pasta de cimento endurecida tende a evaporar do interior do material devido a intervenções do ambiente exposto. Essa água ao sair do corpo do material através de seus poros tende a causar retração, na qual sua magnitude depende diretamente dos diâmetros e intensidade dos poros. Podendo ser associado à permeabilidade dos concretos, conforme descrito por Wong et al. (2009), uma maior

permeabilidade é atribuída a um maior número de microfissuras que se formam devido às condições de secagem.

Conforme Lopes (2011), a intensidade ou magnitude da retração por secagem está diretamente vinculada à relação água/aglomerante, de forma que quanto maior a relação maior será a retração decorrente.

A retração pode ser agravada dependendo do tipo de agregado. Conforme mencionado por Polivka e Mehta (1975), o tipo de agregado utilizado no concreto tem influência significativa sobre as sua retração características, e sendo pouco influenciada pelo tipo de cura, com exceção da cura saturada. Conforme pesquisa realizada por Yazdani et al. (2010) onde se analisou o efeito de cura a vapor e a adição de sílica ativa sob o aspecto da retração de concreto, concluiu-se que a taxa de retração não teve um efeito significativo em inspeções visuais, não mostraram fissuras de retração. Confirmando, Ohno, Masuda e Kage (2011) relatam que as diferentes condições de umidade relativa e diferentes tipos de agregado graúdos tem efeito significativo na retração por secagem de concretos. Ainda, Grassl, Wong e Buenfeld (2010) e Wong et al. (2009) concluem que a dimensão do agregado tem influência na formação de microfissuras provocadas pela retração.

A retração hidráulica nas idades iniciais ocorre principalmente devido à tensão superficial gerada pela saída de água através dos poros capilares da pasta hidratada. Já em idades avançadas, considera-se que é causada pela perda de água adsorvida nas superfícies da pasta de cimento hidratada (PERENCHIO, 1997). Complementando com Metha e Monteiro (2008), a água capilar responsável pela retração é a retida em pequenos capilares, na ordem de 5 a 50nm, uma vez que, há água capilar locada em vazios maiores que 50nm, também chamada de água livre, não gera retração.

E conforme Aldred e Lee (2004), apud Dellinghausen et al. (2009) a retração hidráulica é explicada a partir dos mecanismos de tensão capilar.

O que ocorre em material poroso e com processo de hidratação como o concreto é que, conforme Mehta e Monteiro (2008), quando mantida a umidade relativa (UR) em 100% praticamente não haverá variação e será mantida a estabilidade dimensional da peça. De maneira geral, a umidade na qual é exposta a peça de concreto é muito menor, com isso, o material tende a perder água e retrai.

Segundo a teoria de Hansen (1969) a retração por secagem em concretos é dada devido à ação capilar. Isso ocorre, conforme Bazant (2001), quando a pasta de cimento seca, e

a água tende a deixar os vazios capilares maiores, a tensão capilar se acumula no restante da água, devido à ação capilar. Isto dá origem a uma compressão elástica da estrutura de gel sólida e uma alteração do volume total da pasta.

Para Ferraris e Wittmann (1987), a pasta endurecida de cimento pode ser tratada como um sistema coloidal. Isto significa que a retração devido à mudança na umidade relativa deve estar relacionada à interação entre as superfícies de partículas coloidais e a água adsorvida.

L’Hermite (1960), apud Mehta e Monteiro (2008), descreve que a perda de água da pasta de cimento hidratada saturada está relacionada à umidade relativa, conforme apresentado na Figura 4, e à retração por secagem, conforme Figura 5.

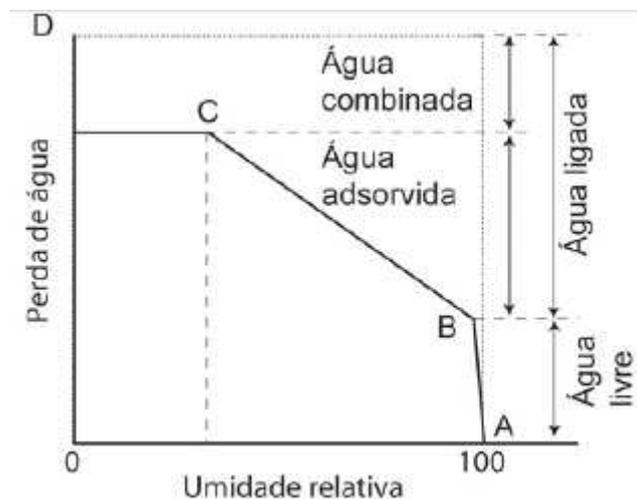


Figura 4 – Perda de água em função da umidade relativa.

Fonte: adaptada de Hermite, 1960 apud Mehta e Monteiro (2008).

No momento em que a umidade relativa é reduzida de 100% a água livre retida nas cavidades, >50 nm, começa a evaporar. Devido a esta água livre não estar associada aos produtos de hidratação por qualquer ligação físico-química sua perda não é acompanhada por retração considerável, (Figura 54, trecho, A-B). Porém, no momento em que a maior parte da água livre tiver sido perdida no processo de secagem, verifica-se que esta perda de água adicional resulta em uma retração considerável, (Figura 54, trecho, B-C) (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Conforme o que foi mencionado por Neville (1997), o volume de água retida em um corpo de concreto não é igual a sua variação de volume e a perda da água livre causa pouca ou nenhuma retração.

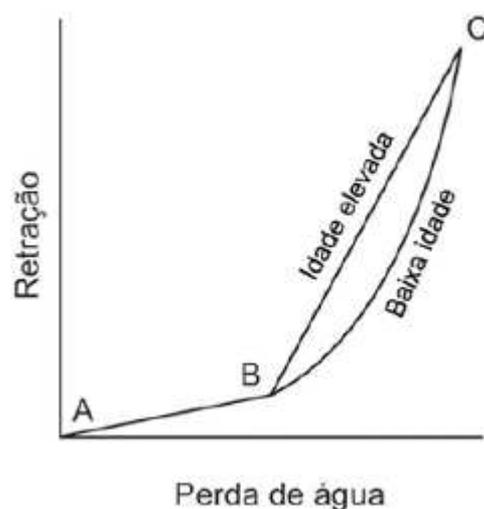


Figura 5 – Retração de uma argamassa em função da perda de água.

Fonte: adaptada de Hermite, 1960 apud Mehta e Monteiro (2008).

Na figura 5 é apresentada a relação entre a retração e a perda de água ao longo do tempo. Conforme Mehta e Monteiro (2008) a perda de água adsorvida é a principal causadora da retração, em pasta de cimento saturada.

A partir destes conceitos explanados, cabe ressaltar e fazer uma breve explicação sobre as diversas formas com que a água pode se apresentar na microestrutura da pasta de cimento hidratada.

O que vem se tornando alternativa para reduzir a retração é a utilização de materiais pozolânicos na mistura do concreto, conforme resultados obtidos por Güneyisi (2012), Duan et al. (2013) e Mermerdas et al. (2013).

2.2.3 Métodos de Previsão da Retração por Secagem

Conforme Diniz, Fernandes e Kuperman (2011), desde 1982 foram propostos diversos modelos de previsão da retração. Em alguns estudos da bibliografia mundial, com esta finalidade, encontram-se diferentes fatores a serem analisados para esta previsão. Nunes e Figueiredo (2007), Kataoka (2010), Amaral (2011) e Diniz, Fernandes e Kuperman (2011), com pequenas variações, destacam os seguintes modelos:

- ACI 209R-92 (2008);
- EUROCÓDIGO 2 (2003);
- BAZANT e BAWEJA (2000);
- GARDENER e LOCKMAN (2001);
- ABNT NBR 6118 (2007);

Na tabela 1, são apresentados os parâmetros que devem ser inseridos nos modelos para obtenção das previsões.

Tabela 1 – Parâmetros dos métodos de previsão da retração por secagem.

Parâmetros	ACI 209	Eurocódigo 2	Bazant e Baweja	Gardner e Lockman	NBR 6118
Tipo de cimento		X	X	X	
Umidade relativa (%)	X	X	X	X	X
Idade final de cura (dias)	X	X	X	X	X
Método de cura	X		X		
Volume/superfície	X		X	X	
Dimensões do CP (cm)	X	X	X	X	X
Secagem antes carregamento (dias)		X		X	
fck (MPa)		X			
fcm28 (MPa)		X	X	X	
Ecm28 (MPa)			X		
Consumo de cimento (Kg/m ³)	X				
Quantidade água (Kg/m ³)			X		
Agregado miúdo (%)	X				
Abatimento (mm)	X				X
Temperatura (oC)		X			X
Volume de ar (%)	X				

Fonte: Adaptado de Kataoka (2010).

O processo de previsão da retração proposto pela ABNT NBR 6118:2003², pode ser dividido em duas maneiras, a primeira de forma a obter as deformações por retração onde não é necessária grande precisão, e a segunda de maneira a especificar deformações mais precisas.

² A NBR 6118 está passando por processo de revisão, o que poderá alterar os procedimentos de previsão da retração.

Na opção de menor precisão a retração é obtida em função de dois fatores: da umidade do ambiente e da espessura fictícia da peça, conforme indicado na tabela 2. De forma que entra-se com as duas condições conhecida e localiza-se a retração esperada para determinada peça.

Tabela 2 – Valores característicos superiores da deformação específica da retração.

Umidade ambiente %		40		55		75		90	
Espessura fictícia - 2Ac/u (cm)		20 - 60		20 - 60		20 - 60		20 - 60	
$\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ ‰	5	-0,44	-0,39	-0,37	-0,33	-0,23	-0,21	-0,1	-0,09
	t0 dias 30	-0,37	-0,38	-0,31	-0,31	-0,2	-0,2	-0,09	-0,09
	60	-0,32	-0,36	-0,27	-0,3	-0,17	-0,19	-0,08	-0,09

Ac, área da seção transversal; u, perímetro da seção em contato com a atmosfera.

Fonte: Adaptado de NBR 6118(ABNT, 2007).

Já a forma de maior precisão, baseado no anexo A da mesma norma brasileira, prescreve que a retração depende das seguintes hipóteses básicas:

- Umidade relativa do ambiente;
- Consistência do concreto
- Espessura fictícia;
- Ainda quando o concreto é endurecido à uma temperatura ambiente de 20°C e nos demais casos, quando não houver cura a vapor, deve ser considerada a idade fictícia.

A partir desses fatores, podendo se obter valores para a retração (ϵ) nos instantes t_0 e t pelos critério da norma a partir da equação 1:

$$\bullet \epsilon_{cs}(t_0, t) = \epsilon_{cs\infty} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad \text{Equação 1}$$

De forma que, para aplicarmos a equação 1, deve-se primeiramente encontrar o valor para a retração total que ocorre posterior ao endurecimento do concreto até a idade estipulada, a partir da equação 2:

$$\bullet \epsilon_{cs\infty} = \epsilon_{1s} \cdot \epsilon_{2s} \quad \text{Equação 2}$$

$\epsilon_{cs\infty}$ é o valor da retração total que ocorre posterior ao endurecimento do concreto até a idade infinita.

O termo ϵ_{1s} depende da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Valores característicos superiores da deformação específica da retração.

Ambiente	Umidade U%	Retração ($10^4\epsilon_{1s}$)			y3)
		Abatimento conf. ABNT NBR NM 67			
		0 - 4	5 - 9	10 - 15	
Na água	-	1	1	1	30
Em ambiente muito úmido imediatamente acima da água	90	-1	-1,3	-1,6	5
Ao ar livre, em geral	70	-2,5	-3,2	-4	1,5
Em ambiente seco	40	-4	-5,2	-6,5	1

1) $(10^4)\epsilon_{1s} = -6,16 - (U/484) + (U^2)/(1590)$ para abatimentos de 5 a 9 cm e $U \leq 90\%$.

2) Os valores de ϵ_{1s} para $U \leq 90\%$ e abatimento entre 0 e 4 cm são 25% menores e para abatimentos entre 10 e 15 cm são 25% maiores.

3) $y = 1 + \exp(-7,8 + 0,1U)$ para $U \leq 90\%$.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6118:2007

Enquanto o termo ϵ_{2s} é dados pela equação 3, e depende do termo espessura fictícia (h_{fic}) dada em centímetros.

$$\bullet \epsilon_{2s} = \frac{33 + 2h_{fic}}{20,8 + 3h_{fic}} \quad \text{Equação 3}$$

A h_{fic} é dada da seguinte forma:

$$\bullet h_{fic} = y \frac{2Ac}{U_{ar}} \quad \text{Equação 4}$$

y – é o coeficiente obtido na tabela 5, variável conforme umidade do ambiente;

Ac – área da seção transversal, em cm;

U_{ar} – perímetro externo da seção transversal da peça em contato com ar, em cm;

Com isso se obtém as variáveis correspondentes à umidade relativa do ambiente, consistência do concreto e espessura fictícia, restando os termos que variam em função da sua idade e são descritos abaixo:

$\beta_s(t)$ ou $\beta_s(t_0)$ é o coeficiente relativo a retração no instante de tempo t ou t_0 , dado pela Figura 7 ou pela equação 5.

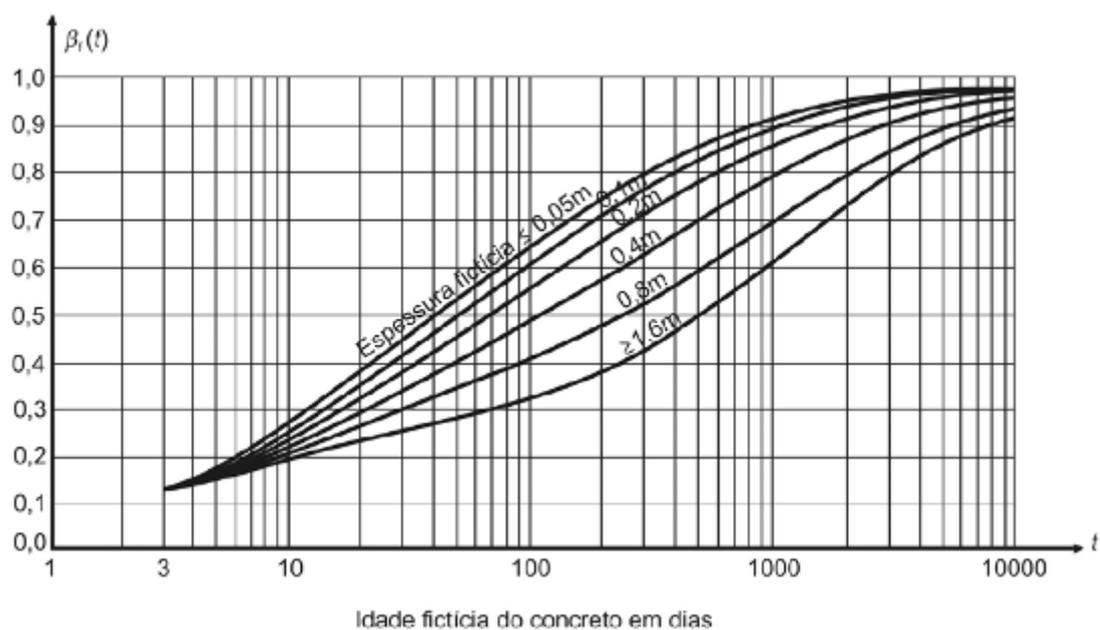


Figura 6 – Variação de $\beta_s(t)$ em relação ao tempo em dias.

Fonte: ABNT NBR 6118:2007.

$$\bullet \beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^B + A\left(\frac{t}{100}\right)^D + E\left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^B + C\left(\frac{t}{100}\right)^D + D\left(\frac{t}{100}\right) + E} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

A=40;

B=116h³-228h²+220h-4,8;

C=2,5h³-8,8h+40,7;

D=-75h³+585h²+496h-6,8;

E=-169h⁴+88h³+584h²-39h+0,8; e

h é a espessura fictícia, em metros, para os valores de h fora do intervalo de $0,05 \leq h \leq 1,6$, adotam-se os extremos correspondentes;

t é idade fictícia em dias corresponde à equação 6:

$$\bullet t = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \Delta t_{ef,i} \quad \text{Equação 6}$$

Onde α é o coeficiente dependente da velocidade do endurecimento do cimento, para retração considera-se 1, independente do tipo de cimento;

T_i é a temperatura média, em °C;

$\Delta t_{ef,i}$ é o período, em dias, que a temperatura média diária do ambiente se manteve constante;

Desta forma a norma brasileira possibilita a previsão da retração em idades avançadas, com maior precisão, a partir do conhecimento de algumas variáveis em uma idade fictícia estipulada.

2.3 AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC)

A utilização de agregados naturais não renováveis no âmbito da construção civil está sendo amplamente discutida a cada dia, observando o nível de rigor da legislação ambiental vigente direcionada às áreas de extração, isso decorrente dos grandes desastres ambientais envolvendo este tipo de empresa. Uma parcela destes acontecidos diz respeito às jazidas de extração de agregados para a utilização em concretos. Em época de aquecimento no setor da construção civil e superaquecimento imobiliário, torna-se extremamente relevante a preocupação com esses recursos, sendo necessário buscar alternativas para minimizar ou até mesmo sanar a extração.

Uma maneira de mitigar as ações de extração é a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD), resíduo este que se apresenta em grande volume nas cidades e em sua maioria, depositados em locais inapropriados. A utilização de resíduos sólidos industriais associados ao emprego de aditivos tem sido cada vez mais frequentes na construção civil (SANTOS et. al., 2007).

Porém, esta utilização de resíduos deve gerar atenção redobrada quanto a qualidade dos agregados que serão empregados na produção de concretos. Como já foi ressaltado por Neville (1997) e Sbrighi Neto (2011), os agregados ocupam pelo menos 75% do volume do concreto, portanto não surpreende que a sua qualidade seja de considerável importância para o melhor desempenho de peças constituídas em concreto.

Sbrighi Neto (2011), indica a classificação dos agregados quanto a sua origem, podendo ser: agregados naturais, britados, artificiais, ou ainda, reciclados. Reciclados podendo ser provenientes de resíduos industriais granulares ou provenientes de beneficiamento quando envolvem resíduos de construção e demolição.

A Resolução 307, de 5 julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece a seguinte classificação para RCD, no qual inclui-se o ARC:

[...] Resíduos da construção civil: são os provenientes de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (CONAMA, 2002), podendo ser classificado ainda, conforme ABNT NBR 15112:2004 e ABNT NBR 15116:2004, como resíduo da construção civil – classe A, ou seja, resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras.

Já a Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010 que Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos, classifica ARC da seguinte forma:

I - quanto à origem:

h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;

II - quanto à periculosidade:

b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

O uso desses resíduos de construção e demolição como agregado para a produção de concretos está em ampla discussão, especialmente àqueles obtidos a partir da britagem de peças de concreto, uma vez que, a busca de alternativas renováveis é uma das questões de grande relevância.

O objetivo da pesquisa desenvolvida na Espanha por Agrela et al. (2011) foi caracterizar resíduos oriundos da construção e demolição e dar a destinação mais apropriada para cada fração de resíduo. A pesquisa teve como conclusão, após análise de absorção, densidade e quantidades de sulfatos, que a fração de agregado constituída entre 90,5% a 97,7% de concreto reciclado poderia ser utilizada no concreto estrutural, segundo os requisitos em análise, confirmando o estudo o que foi mencionado por Mehta (1999), que o destino final do agregado reciclado de concreto depende da sua pureza e integridade, que são controladas a partir da fonte geradora do entulho e da tecnologia do processamento.

Reforça-se que uma alternativa viável é a utilização de agregados reciclados de concreto, com a britagem de peças maciças (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Isso devido ao elevado custo de disposição final e claro, além do contexto ambiental que envolve a utilização de um resíduo em novos materiais. Etxeberria et al., (2007), relata que em relação às propriedades dos agregados reciclados de concreto, se cominuído por um britador de impacto alcançam alta porcentagem de agregados graúdos reciclados sem argamassa aderida, o que é benéfico para a produção de novos concretos.

A utilização de concreto reciclado já não é novidade no mundo atual. Conforme Mehta (1999), no ano de 1983 nos Estados Unidos, houve deterioração de aproximadamente 9 km de uma pavimentação em concreto, esses escombros foram britados e utilizados como agregado para concreto e empregados na nova pavimentação. Este assunto ainda se é atual, justamente pela dimensão de propriedades que o envolvem. Kovler e Roussel (2011) indicam considerável crescimento de pesquisas e publicações que utilizam agregados reciclados, graúdo e miúdo, na confecção de novos concretos. Estima-se que este número gira em torno de 20% de acréscimo em comparação há quatro anos anteriores, sendo ultrapassado apenas por estudos sobre o concreto auto-adensável.

Já em relação à pesquisa desenvolvida por Cabo et al. (2009), onde foram analisadas a retração em concretos com substituição do agregado graúdo por ARC, constatou-se que a retração começou a ser medida após 7 dias de cura, registrando valores que mostraram claramente a influência da porcentagem de agregados reciclados. Houve maior deformação por retração com o aumento da porcentagem de substituição de agregados

reciclados. A retração com percentagem de substituição de 50% foi em torno de 20% superior ao concreto de referência, enquanto que com um percentual de substituição de 100% a retração chegou a 70% após o período de 180 dias. Porém em pesquisa realizada por Fathifazl et al (2011), o tipo de agregado teve pouca influência na retração por secagem em comparação ao concreto de referência, isto se tratando da substituição de agregados naturais por agregado graúdo de concreto.

Parte do desempenho adquirido por esses concretos está vinculada à interface entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento, conforme visto por Tabsh e Abdelfatah (2009). Ensaios têm mostrado que o concreto feito com agregado reciclado de concreto tem grande aderência entre o agregado e a pasta de cimento circundante, isto é devido à angularidade do agregado graúdo e a cimentação na superfície do agregado reciclado. Porém a angularidade dos agregados pode trazer alguns prejuízos na hidratação. Conforme visto, por Erdem, Dawson e Thom (2012), os agregados angulares levam a uma distribuição mais aleatória da hidratação devido à distribuição das partículas de cimento, que por sua vez podem aumentar a porosidade capilar em alguns locais, e ainda, gerar uma matriz de argamassa de menor porosidade, maior densidade e interação na interface.

Para Mehta e Monteiro (2008), a fração correspondente ao agregado graúdo tem sido utilizada com grande sucesso em vários estudos de laboratório e de campo, já a fração correspondente aos agregados miúdos contém grande quantidade de cimento hidratado e gipsita o que o torna inadequado para a produção de misturas de concreto.

O que deve ser observado ao longo desta pesquisa é o desempenho de concretos com substituição de agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto (ARC) para utilização em peças estruturais, seguindo a linha de pesquisas desenvolvidas por Werle (2010), Troian (2010), Gonçalves (2011) e Fedumenti (2013).

2.4 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)

Levando em conta a eficiência, economia e o aspecto ambiental; o emprego de adições minerais ao concreto vem se modificando. Embora em algumas partes do mundo ainda sejam utilizadas adições minerais naturais, ou seja, pozolanas naturais, muitos subprodutos têm se tornado fonte primária dessas pozolanas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Historicamente o emprego de pozolanas como material cimentício remete a antiguidade. Há cerca de 2.000 anos os romanos utilizavam cinza de origem vulcânica em suas construções.

Essa cinza era proveniente da localidade de Pozzuoli, antiga Puteoli do Império Romano, o que lhe conferiu o nome de Pozzolana (MASSAZZA, 1988).

Materiais pozolânicos são definidos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para assim poder formar compostos com propriedades cimentícias (ABNT NBR 5736:1999).

Estes podem ser classificados conforme ABNT NBR 12653:2012 como materiais pozolânicos naturais e artificiais. Pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica ou sedimentar com aproximadamente 65% de SiO₂ na sua composição. Pozolanas artificiais são materiais que necessitam de algum tipo de beneficiamento para atingir a sua pozolanicidade, como argilas calcinadas, cinza volante, escórias siderúrgicas, cinzas de resíduos vegetais entre outras.

Conforme Duarte et al. (2011), o efeito pozolânico complementa as reações entre o hidróxido de cálcio resultante da hidratação dos silicatos presentes no cimento e a sílica presente na cinza de casca de arroz, produzindo silicatos de cálcio hidratado, C-S-H, conhecido também como C-S-H secundário, com características químicas e microestrutura muito próxima ao C-S-H resultante da hidratação do cimento. Esta reação é positiva, pois contribui para aumentar a resistência dos concretos e reduz a quantidade de hidróxido de cálcio que é um cristal de grande dimensão que ocupa espaço e contribui para o aumento da porosidade do concreto.

Concretos com adições minerais apresentam uma estrutura mais densa, com melhor ligação entre a matriz cimentícia e o agregado, poros menores e melhor distribuídos, além de ter baixa energia livre resultando em um composto termicamente mais estável (DUAN ET AL. 2013), confirmando o que foi mencionado por Stoitchkov et al. (1996), ou seja, cimentos com misturas pozolanas exibem poros de menor diâmetro. Dentre as diversas adições minerais ativas, este trabalho destaca a Cinza de Casca de Arroz (CCA).

Conforme a Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010 que Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos, a CCA pode ser classificada da seguinte forma:

I - quanto à origem:

i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;

II - quanto à periculosidade:

b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea "a".

A cinza de casca de arroz contém elevada quantidade de SiO_2 amorfa. No entanto, a cinza de casca de arroz, normalmente produzida a partir da queima a céu-aberto ou em condições de combustão não controlada, pode conter uma quantidade considerável de minerais de sílica cristalina, menos reativa, como cristobalita e tridimita. Ao passar por beneficiamentos, ou seja, processo de moagem diminuindo o tamanho de suas partículas e aumentando a área específica superficial, favorece-se o desenvolvimento de atividade pozolânica. De maneira geral, pode-se gerar ou produzir cinzas altamente pozolânicas desde que seja controlada a queima, mantendo a sílica na forma não-cristalina e em uma microestrutura celular (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Ou seja, a CCA pode ser uma pozolana com alto teor de material reativo e com elevada superfície específica.

Em relação às propriedades que a CCA apresenta, Givi et al. (2010) demonstram que as CCA podem ser utilizadas como pozolana de forma eficaz, contribuindo com as propriedades mecânicas do concreto. Já Zhang e Malhotra (2000) apud Mehta e Monterio (2008), complementam que em relação à atividade pozolânica a CCA é comparável à sílica ativa.

Segundo Duarte et al. (2011), as propriedades mecânicas dos concretos com utilização de CCA como adição mineral em substituição parcial do cimento, resulta em concretos mais resistentes devido à diminuição da porosidade total e pela diminuição do tamanho dos poros e uma distribuição mais equilibrada entre as faixas de tamanhos, quando comparados com concretos sem adição da CCA. Refletindo os resultados atingidos por Givi et al. (2010) que complementam, as melhorias de suas propriedades mecânicas em idades iniciais e ao longo do tempo. Segundo Rukzon, Chindaprasirt e Mahachai (2009), a porosidade das argamassas diminui com idades mais elevadas e aos 28 dias as argamassas contendo CCA reduzem ligeiramente os valores de porosidade em relação à referência, isto devido à reação pozolânica.

Em relação à durabilidade de concretos com substituição parcial de cimento por CCA, Givi et al. (2010) relatam a redução na penetração de água por ação capilar e melhorias quanto à resistência do concreto ao ataque de sulfatos que é proporcional ao índice de substituição até o nível de 40%. Além disso, conforme Duarte et al. (2011), o índice de benefícios da CCA está relacionado à relação água/aglomerante e que é inversamente proporcional as características mecânicas e de durabilidades, levando a concluir que o uso da cinza de casca de arroz é indicado para concretos onde se deseja alto desempenho quanto as suas propriedades mecânicas e durabilidade.

Já Isaia et al. (2010) utilizaram CCA natural, ou seja, sem a moagem, e constataram que houve patamares de resistência inferiores com adição de 25%, e consumo de cimento elevado, o que inviabiliza a utilização. Em relação à resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade dos traços, a CCA moída apresentou valores similares, aos 28 dias, com o concreto de referência, enquanto os traços de CCA sem moagem apresentaram redução considerável nesta idade, chegando a 30% de redução, porém aos 91 dias se igualaram aos valores de referência.

Na revisão bibliográfica realizada por Givi et al. (2010) é demonstrado claramente que a CCA pode diminuir o efeito da temperatura que ocorre durante a hidratação do cimento, diminuir a porosidade total do concreto, modificar a estrutura dos poros de cimento e reduzir significativamente a permeabilidade, além de reduzir significativamente o efeito de retração.

Conclusões semelhantes foram citadas por Duart et al. (2011), ao quais verificaram que os concretos com CCA apresentaram aspecto de melhor empacotamento em análise com a microscopia eletrônica de varredura, quando comparados com o concreto de referência com mesma relação a/ag. Este resultado é compatível com os resultados da intrusão de mercúrio, como também do ensaio de resistência à compressão axial que apresentou o concreto com CCA como sendo o mais resistente, superando o concreto de referência em 30% para a relação a/agl. 0,45.

Uma das vantagens que foram associadas ao emprego de CCA em concretos foi a redução da retração, devido à partícula de CCA que o tornam mais denso (HABEEB et al., 2009 apud GIVI et al., 2011).

Inclusive em pesquisa realizada por Isaia et al. (2010), que trata de CCA natural, o ensaio de retração teve redução para todos os traços. Em conclusão aos resultados da pesquisa, os autores verificaram que há viabilidade de utilização de 15% de CCA sem moagem, em substituição ao cimento, apesar do desempenho desses concretos ficarem abaixo do referência.

O que não deve ser levado como regra, pois para Chatveera e Lertwattanaruk (2011), em concretos com substituição de cimento por CCA verificou-se maiores valores de retração de secagem do que nos concretos de referência. Isso tudo devido à associação da presença de água capilar e o refinamento dos poros ocasionados pela pozolana. Adições minerais tendem a dar maior refinamento aos poros, ou seja, diminuem seus diâmetros, porém aumentam o volume dos mesmos. A presença de pequenos poros, normalmente, apresentam

maiores valores para retração (MEHTA E MONTEIRO, 2008 E DINIZ, FERNANDES E KUPERMAN, 2011).

Por fim destaca-se a utilização do CCA como alternativa viável e sustentável, dependendo da quantidade, não alterando as características dos materiais de matriz cimentícia, podendo ser utilizada com sucesso na produção de concretos e argamassas, tanto por sua característica pozolânica como por seu efeito fíler, podendo destacar as melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade de peças moldadas com CCA. Além disso, sob o ponto de vista ambiental ocorre uma utilização nobre de um resíduo de expressiva quantidade gerada.

2.5 CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO E POZOLANA

A partir dessas considerações será abordada a utilização de concretos com agregado reciclados de concreto (ARC) e pozolanas, isto pelo numero reduzido de bibliografias que tratam ARC com a cinza de casca de arroz (CCA).

Segundo Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) concretos com ate 30% de substituição dos agregados convencionais por ARC e 30% de substituição de cimento por cinza volante não apresentaram efeitos negativos referentes às propriedades mecânicas e de durabilidade.

Já Berndt (2009) em análise de concretos com ARC e elevados níveis de substituição de cimento por cinzas volantes e escorias de alto-forno, verificou que o concreto com 50% de substituição do cimento por escoria de alto-forno apresentou os melhores resultados em relação as suas propriedades mecânicas e durabilidade. Além disso, o agregado de concreto reciclado não foi significativamente prejudicial para a resistência, particularmente naquelas observadas para concreto com escórias.

Em pesquisa realizada por Tangchirapat et. al. (2008) foram testadas dosagens com agregados reciclado de concreto, e substituição do cimento por cinza de casca de arroz, e concluíram que o uso da cinza de casca de arroz em substituição de 20 e 35% do cimento Portland pode conferir uma maior resistência à compressão em concretos com agregados reciclados de concreto do que aqueles concretos que empregam estes agregados mas não usam pozolanas.

Os resultados do estudo de Kou e Poon (2013) sugerem que a substituição de agregado natural ideal seja de 50% enquanto que a substituição do cimento por cinzas volantes pode chegar a 25%.

Em pesquisa envolvendo concretos de alto desempenho com variação dos agregados e adição de algumas pozolanas como cinzas volantes, escórias de alto forno, sílica ativa e metacaulim, Ray et. al. (2012) constatou que dentre estas, devido à alta reatividade pozolânica do metacaulin utilizado, os concretos analisados tiveram aumento significativo nas propriedades mecânicas e menor retração aos 90 dias.

O principal requisito para que seja garantida a qualidade e durabilidade em ambientes agressivos dos concretos é a melhoria de sua resistência à permeabilidade, melhorando assim sua resistência à penetração de materiais prejudiciais e ataques químicos. Concretos com subprodutos industriais e agregados reciclados de concreto que utilizem um cimento adequado e efetiva relação a/c podem promover significativamente a durabilidade e sustentabilidade deste material além de melhorar a indústria cimentícia (LIMBACHIYA, MEDDAH E OUCHAGOUR, 2012).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Relacionando os objetivos propostos do presente estudo, foi organizado e desenvolvido o programa experimental, sendo estabelecidas as variáveis de resposta, materiais e métodos de experimento. Para a execução deste programa experimental, foram considerados a disponibilidade dos recursos e o cronograma proposto, conforme explanado a seguir.

3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Ao se tratar de experimentos com materiais de construção, na maioria dos casos se envolvem inúmeros fatores. Assim, se faz necessário estudar o efeito interligado desses fatores ou variáveis sobre a resposta do experimento (DAL MOLIN, KULAKOWSKI e RIBEIRO, 2005). Com o intuito de atingir os objetivos propostos com materiais de considerável variabilidade em suas propriedades, optou-se por conduzir a pesquisa com matrizes completas, mas de menor tamanho. O estudo se desenvolveu a partir de três matrizes cimentícias com diferentes relações água/aglomerante para os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração, enquanto que para os ensaios de retração, taxa de absorção capilar de água, porosidade capilar e porosidade total se optou por trabalhar com apenas a maior relação a/agl.

Este programa experimental contempla um projeto fatorial n^k , onde n são os níveis de estudo e k é o número de fatores contemplados. Sendo assim, são apresentados na sequência, os níveis de estudo, os fatores de controle e as variáveis de resposta.

3.1.1 Fatores de controle

Na Tabela 4 são indicados os fatores de controle estudados e seus respectivos níveis, contemplados nos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração.

Tabela 4 – Programa fatorial de experimentos - fatores e níveis de controle.

Fatores de controle	Níveis de estudo		
Relação água/aglomerante - a/agl	0,42	0,53	0,64
Teor de cinza de casca de arroz - CCA (%)	0	10	20
Teor de agregado reciclado de concreto ARC - (%)	0	25	50

Sendo k igual a três e n igual a três, chegou-se ao programa fatorial de experimentos 3^3 , de onde se obtém 27 traços de concreto. Como fator de controle para a variável de resposta “resistência à compressão” foi considerado ainda a idade com cinco níveis de controle (7, 28, 63, 91 e 112 dias). Para cada combinação de variáveis foram produzidos três corpos de prova para resistência à compressão, e 3 corpos para resistência à tração, produzindo-se 48 corpos de prova cilíndricos por traço.

Para os ensaios de retração, taxa de absorção, porosidade capilar e porosidade total, foi delimitado que o nível de estudo para o fator relação a/agl, fosse fixado em 0,64. Concretos com maiores níveis de água em sua mistura geram concretos mais porosos e com uma tendência maior a apresentar retrações significativas. Com isso a Tabela 5 indica os níveis de estudo e seus respectivos níveis contemplados para os ensaios.

Tabela 5 – Programa fatorial de experimentos - fatores e níveis de controle (retração, taxa de absorção, porosidade capilar e porosidade total).

Fatores de controle	Níveis de estudo		
Teor de CCA (%)	0	10	20
Teor de ARC (%)	0	25	50

Sendo k igual a dois e n igual a três, chegou-se ao programa fatorial de experimentos 3^2 , de onde se obtém 9 traços de concreto. No ensaio de retração e absorção de água, para cada combinação de variáveis foram produzidos, respectivamente, três corpos de prova prismáticos e três corpos de prova cilíndricos.

Neste programa experimental foram produzidos Resultando na produção de 540 corpos de prova para a realização desta pesquisa, sendo destes 513 cilíndricos e 27 prismáticos.

Os fatores fixados, com apenas um nível de estudo foram:

- Tipo de cimento – CP-II-F-32;
- Tipo de ARC – resíduo de concreto pré-fabricado de cura convencional;
- Tipo de adição mineral: cinza de casca de arroz, proveniente de um único lote.

3.1.2 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta estudadas foram:

- Resistência à compressão, aos 7, 28, 63, 91 e 112 dias;
- Resistência à tração, aos 28 dias;

- Taxa de absorção, aos 28 dias;
- Porosidade capilar, aos 28 dias;
- Porosidade total, aos 28 dias;
- Retração, aos 4, 7, 14, 28, 63, 91 e 112 dias.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Cimento

O cimento eleito para a realização desta pesquisa foi o CP II-F-32, pois possui adições sem reatividade conforme NBR 11578 (ABNT, 1991), o que facilita a compreensão da ação da cinza de casca de arroz.

Na Tabela 6 é apresentada a caracterização física, química e mecânica do cimento. Por motivos de disponibilidade do material, foi necessário empregar cimento de dois lotes distintos. No entanto, as caracterizações indicam não haver diferenças significativas entre eles.

Tabela 6 – Caracterização química, física e mecânica do cimento.

Parâmetro	Lote Abril 2012	Lote Maio 2012
Al ₂ O ₃ (%)	4,12	4,12
SiO ₂ (%)	19,42	19,39
Fe ₂ O ₃ (%)	2,60	2,59
CaO (%)	60,76	60,78
MgO (%)	4,85	4,93
SO ₃ (%)	3,03	3,08
Perda ao Fogo (%)	6,04	6,08
CaO Livre (%)	2,89	2,24
Resíduo Insolúvel (%)	2	2
Equivalente Alcalino (%)	0,63	0,62
Expansão à Quente (mm)	0,50	1,00
Início de Pega (h:min)	03:20	3:30
Fim de Pega (h:min)	04:30	4:30
Água Cons.Normal (%)	26,20	26,30
Blaine (cm ² /g)	3.850	3.720
#200 (%)	3,4	4,2
#325 (%)	16,3	15,5
fc 1 dia (MPa)	16,3	16,9
fc 3 dias (MPa)	29,0	29,3
fc 7 dias (MPa)	36,9	36,6
fc 28 dias (MPa)	41,9	41,9
Massa específica (g/cm ³)	3,11	3,11

Fonte: Fabricante

3.2.2 Cinza de casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz empregada neste trabalho é uma pozolana resultante da queima de biomassa em forno de leito fluidizado para a geração de energia. A empresa geradora de energia localiza-se na cidade de Alegrete, RS, e comercializa a cinza para a construção civil como “sílica da casca de arroz”.

A caracterização química da pozolana foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVM) da Unisinos, aplicado a técnica de Fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) no equipamento EDX-720 SHIMADZU. Empregou-se um padrão secundário e o resultado desta caracterização está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Caracterização química da cinza de casca de arroz.

Parâmetro	Teor (%)
SiO ₂	94,99
K ₂ O	1,01
SO ₃	0,57
Cl	0,43
CaO	0,33
MnO	0,20
Al ₂ O ₃	0,18
P ₂ O ₅	0,10
Fe ₂ O ₃	0,06
TiO ₂	0,01
MgO	0,01
ZnO	0,00
P.F.	2,12

A cinza empregada apresenta um elevado teor de sílica, e a soma de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ perfaz um total de 95,23% , além de apresentar perda ao fogo igual a 2,12%, que é inferior ao limite máximo de 6%, para pozolanas Classe E, atendendo plenamente aos requisitos químicos da NBR 12653 (ABNT, 2012).

A caracterização mineralógica da CCA foi realizada no difratômetro Siemens D5000 do Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Física da UFRGS.

Na Figura 7 é apresenta o difratograma obtido. A análise mineralógica por DRX retornou picos de sílica cristalina bem definidos de quartzo e cristobalita, apresentando um halo de baixa intensidade, este efeito também é descrito por Angel et al. (2009). Estes minerais podem ter se formado durante o processo de combustão da casca de arroz, uma vez

que é rica em sílica. Ainda conforme Angel et al. (2009), os picos que são vinculados aos cristais de quartzo são atribuição da contaminação do material inerte utilizado, no caso a areia, ou seja, sílica cristalina na forma de quartzo, este, necessário para o desenvolvimento do processo de fluidização da casca de arroz. A presença de cristobalita é atribuída à presença de íons K^+ na casca de arroz que faz acelerar a fusão de partículas e a cristalização da SiO_2 amorfa na forma de β – cristobalita, com estrutura Cúbica que é formada acima de $270^\circ C$, que é facilmente alcançada nas temperaturas que são executadas na combustão da casca de arroz.

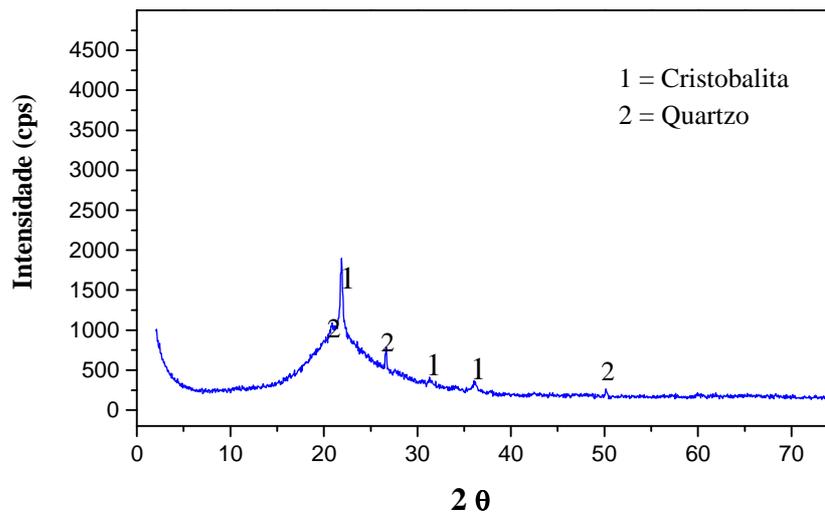


Figura 7 – Difratograma de Raios X da Cinza de casca de arroz.

O tamanho médio de partícula da CCA foi obtido por granulometria de difração laser, realizada no LCVM da Unisinos, com o equipamento Microtac S3500. A preparação da amostra constou em dispersar o material em água com aditivo superplastificante, submetendo ao ultrassom na potência de 40 W por 60 segundos. Obteve-se a dimensão média de partícula de **6,22 μm** e a distribuição granulométrica está representada no gráfico da Figura 8. Ao analisar-se a distribuição granulométrica verificou-se que aproximadamente 99% dos grãos apresentam dimensão inferior a 44 μm , o que também faz com que esta pozolana atenda aos requisitos físicos da ABNT NBR 12653:2012. A massa específica da cinza é de **2,12 g/cm^3** .

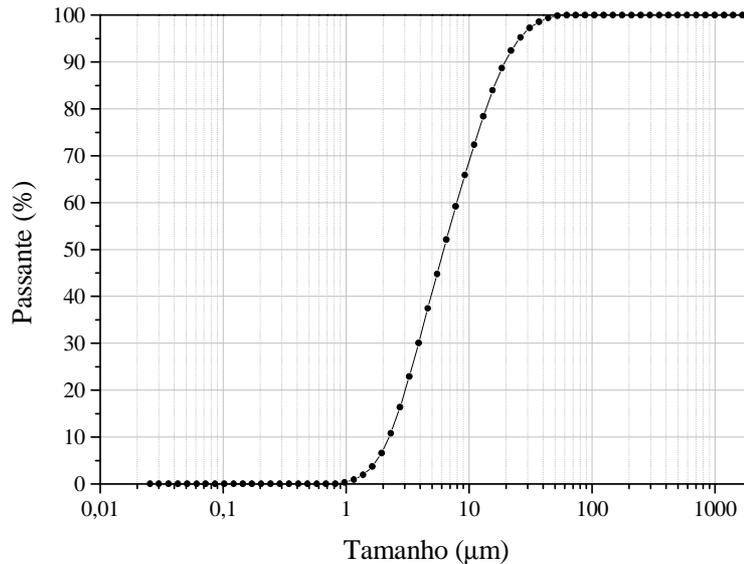


Figura 8 – Distribuição granulométrica da Cinza de casca de Arroz.

A atividade pozolânica da CCA foi testada pela NBR 5752 (ABNT, 2012). Também se caracterizou a pozolanicidade por condutividade elétrica conforme prescrito por Luxán, Madruga e Saavedra (1989). Os valores obtidos para índice de atividade pozolânica, apresentados na Tabela 8. Pelo método convencional se obteve um índice de atividade pozolânica de aproximadamente 105%, bem maior do que o mínimo de norma de 75%. Pelo método de “Luxán” obteve-se uma condutividade elétrica de 1,3 mS/cm, sendo classificada como um material com alta atividade pozolânica, pois o valor foi acima de 1,2 mS/cm. Ambos resultados indicam que a CCA empregada possui elevada atividade pozolânica. Assim, a utilização desta cinza de casca de arroz pode contribuir significativamente para o aumento de resistência nos concretos.

Tabela 8 – Caracterização da atividade pozolânica da CCA.

Material	Água (g)	Aditivo (g)	Água requerida (%)	Consistência (mm)	fc (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)	Condutividade (mS/cm)
Referência	155	---	100	223	25,8	-----	
CCA ^a	165	----	106,5	226	27,0	104,7 ^a	1,3

^a Índice de atividade pozolânica pela ABNT NBR 5752:1192;

A Figura 9 apresenta a micrografia da cinza de casca de arroz obtida em microscópio eletrônico de varredura. A Figura 10 apresenta a micrografia de pasta de cimento e a Figura 11 apresenta a micrografia da pasta de cimento com CCA, ambas com idade de 48 horas.

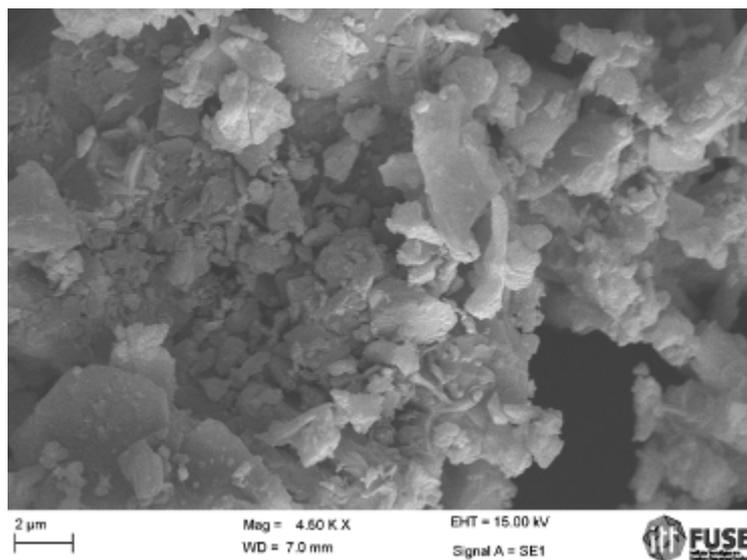


Figura 9 – Micrografia da cinza de casca de arroz (aumento de 4500x).

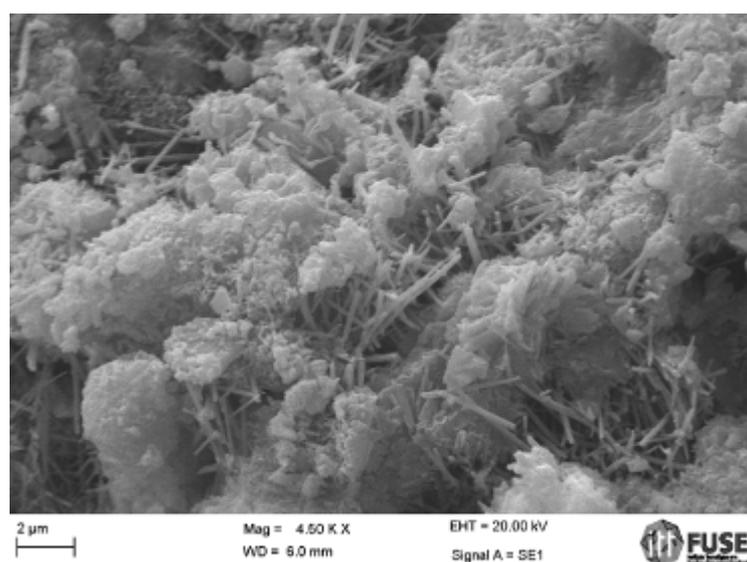


Figura 10 – Micrografia de pasta de cimento (48 horas), com aumento de (4500 X).

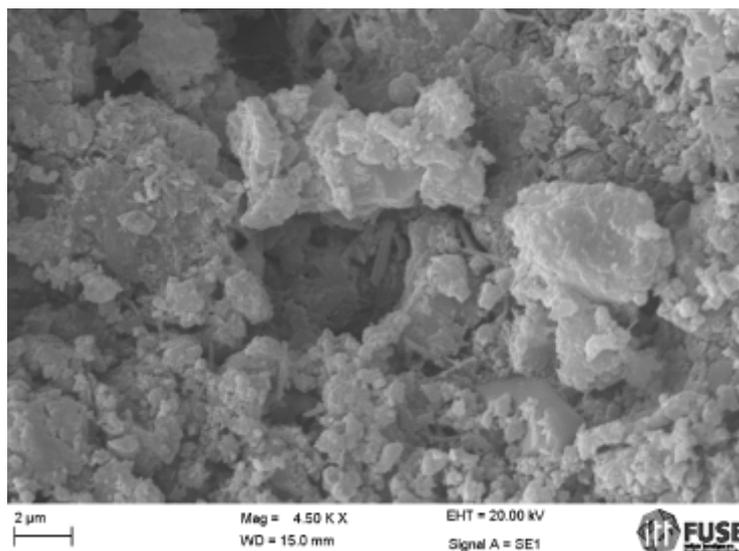


Figura 11 – Micrografia de pasta de cimento com CCA (48 horas), aumento de (4500X).

Na Figura 99 é possível observar a forma e tamanho das partículas de CCA. Comparando-se a Figura 1010, pasta de cimento, com a Figura 111, pasta de cimento com CCA, pode-se perceber diferenças entre os produtos de hidratação formados em 48 horas, provavelmente em função da presença de CCA.

3.2.3 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo natural empregado foi uma areia quartzosa, proveniente do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul.

A caracterização do agregado foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, onde foram feitas as curvas granulométricas, massa específica e massa unitária que seguiram a NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente. A areia foi seca ao ar em local abrigado para a realização da caracterização, bem como para a utilização para esta pesquisa. Após este processo a areia foi armazenada em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento de anel metálico zincado. Os dados são apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10, bem como na curva granulométrica da Figura 12.

Tabela 9 - Valores de massa unitária e específica do agregado miúdo natural

Ensaio/Norma	Resultado (g/cm ³)
Massa unitária/ NBR NM 45 - 2006	1,52
Massa específica/ NBR NM 52 - 2009	2,55

Tabela 10 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural

Abertura da Peneira	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
6,3mm	1	1
4,8mm	2	3
2,4mm	5	8
1,2mm	6	14
0,6mm	11	25
0,3mm	38	63
0,15mm	35	98
<0,15mm	2	100
Dimensão máxima característica (mm)		4,8 mm
Módulo de Finura		2,12

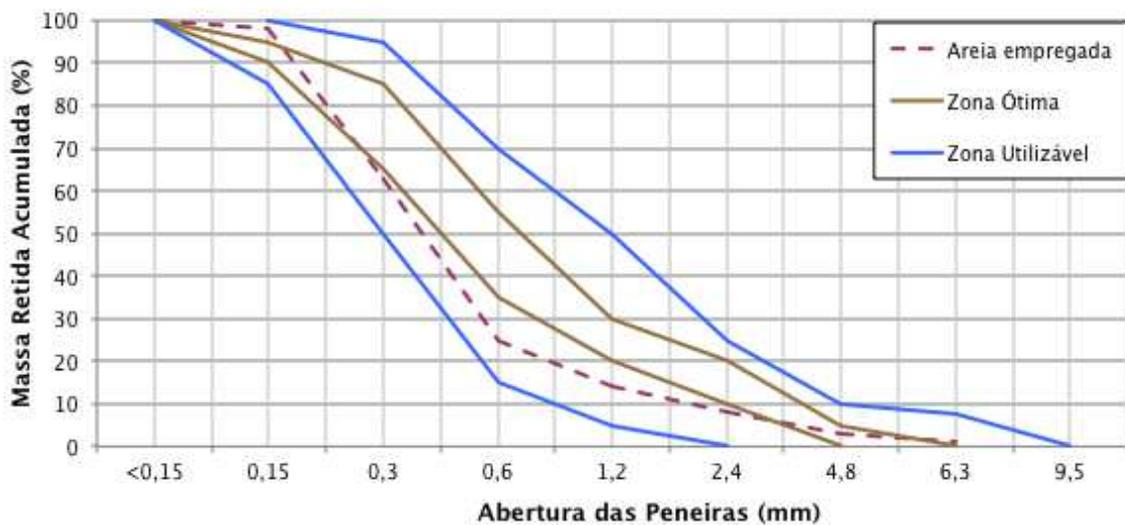


Figura 12 – Granulometria do agregado miúdo natural, conforme NBR NM 248:2003.

3.2.4 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural empregado na pesquisa é proveniente de rocha basáltica fragmentada e britada, da Linha São Jorge, distrito de Garibaldi, Rio Grande do Sul.

A caracterização do agregado foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, onde foram feitas as curvas granulométricas, massa específica e massa unitária que seguiram a NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 53 (ABNT, 2006) e NBR NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente. Antes da realização dos testes para utilização na pesquisa, a brita teve que ser lavada e deixada secar ao ar, numa temperatura ambiente e em local protegido para reduzir os finos aderidos no grão. Após este processo a brita foi armazenada em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento de anel metálico zincado. Os dados obtidos são apresentados abaixo, na Tabela 11 e na Tabela 12, e na curva granulométrica da Figura 133 (ao final da caracterização do ARC).

Tabela 11 - Valores de massa unitária e específica do agregado graúdo natural utilizada na pesquisa.

Ensaio/NBR	Brita (g/cm ³)
Massa unitária/ NM 45 - 2006	1,40
Massa específica/ NM 53 - 2009	2,67

Tabela 12 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural utilizado na pesquisa.

Abertura da Peneira	% Massa Retida	% Massa Retida Acumulado
19 mm	0	0
12,5 mm	39	39
9,5 mm	39	78
6,3 mm	22	100
4,8 mm	0	100
< 4,8 mm	0	100
Diâmetro máximo (mm)		19
Módulo de Finura		6,78

3.2.5 Agregado graúdo reciclado

O agregado utilizado na pesquisa é proveniente de resíduo da produção de laje pré-fabricada tipo Roth, submetida a cura convencional, com fck 35MPa, britada em um britador de mandíbulas com abertura de 20 mm. O ARC utilizado na pesquisa foi o passante na peneira de malha de abertura 19 mm e retido na 4,8 mm, sendo que o mesmo foi seco em estufa por 24 horas na temperatura de 105°C. Após este processo o ARC foi armazenado em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento com anel metálico zincado.

A distribuição granulométrica do ARC é apresentada na Tabela 13. Observa-se que o diâmetro máximo característico do ARC é inferior ao AN.

Tabela 13 – Granulometria do ARC

Abertura de peneira # (mm)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
25	0	0
19	36	36
12,5	43	79
9,5	10	89
6,3	10	99
<6,3	1	100,0
Dimensão máxima característica (mm)		12,5
Módulo de finura		7,25

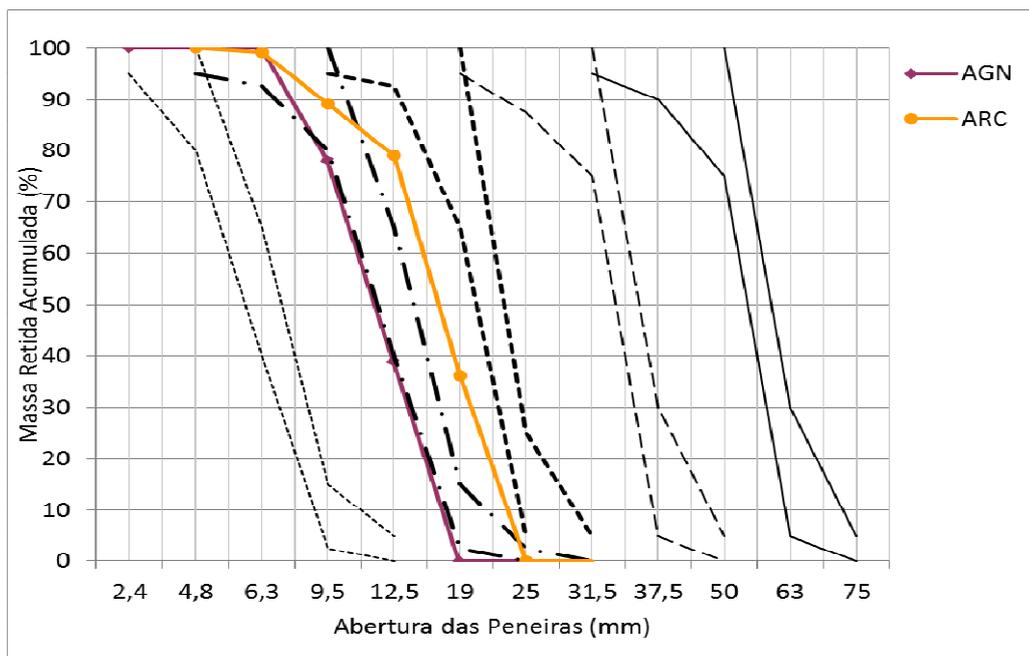


Figura 13 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural (AGN) e do agregado reciclado de concreto (ARC).

Na Figura 13 é apresentada a distribuição granulométrica dos agregados graúdos utilizados, natural e reciclado, bem como os patamares de utilização para cada agregado, observando que o diâmetro máximo característico do ARC é inferior ao AN.

3.2.6 Compensação da absorção do ARC

A realização do ensaio de absorção de água do ARC ocorreu conforme o método adotado por Gonçalves (2011), descritas a seguir:

Etapa 1 - Registro de absorção nos primeiros 3 minutos:

A amostra seca, previamente pesada e resfriada em dessecador, é colocada dentro de um recipiente vazado submerso em água, ao alcançar o primeiro minuto este material foi retirado da água, seco superficialmente com um pano úmido, e sua massa foi determinada.

Esta sequência foi realizada com 3 amostras de 500g;

Utilizaram-se mais duas amostras de 500g para realização do ensaio, secas da mesma forma descrita anteriormente, e resfriadas em dessecador, sendo uma ensaiada para o segundo minuto e outra para o terceiro, sempre dispondo as amostras dentro de recipiente vazado e submergindo-as em água. Após alcançar os 2 minutos o material foi retirado da água, seco superficialmente com um pano úmido, e a massa foi determinada em balança,

sendo o mesmo procedimento utilizado para a determinação do acréscimo de massa até os 3 minutos;

Etapa 2 – Registro da absorção de água ao longo do tempo:

Após a conclusão da etapa 1, uma sexta amostra foi seca em estufa, a temperatura de $105^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, até a garantia de que a mesma se encontrava completamente seca, após resfriada em dessecador até estabilização da temperatura, colocada em um recipiente vazado, apoiada em uma balança hidrostática, e submersa em água;

Após 2 minutos, houve registro da massa determinada na balança hidrostática, sendo que esta medição foi repetida nos seguintes intervalos de tempo: 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos; 2, 4, e 6 horas, 1, 2, 7, 14, 21, 28 dias, até determinação de constância de massa.

A curva de absorção de água é apresentada na Figura 14. Obteve-se aos 10 minutos uma absorção de 6,29% e às 24 horas 10,34%. Pela regressão do conjunto de dados a absorção aos 10 minutos é aproximadamente 6%, e este foi o valor adotado para taxa de compensação de água. O ponto de saturação deste conjunto de dados ocorre aos 31,6 minutos com uma absorção de 8,96%. A massa unitária do ARC é de $1,13 \text{ g/cm}^3$ e a massa específica é de $2,21 \text{ g/cm}^3$.

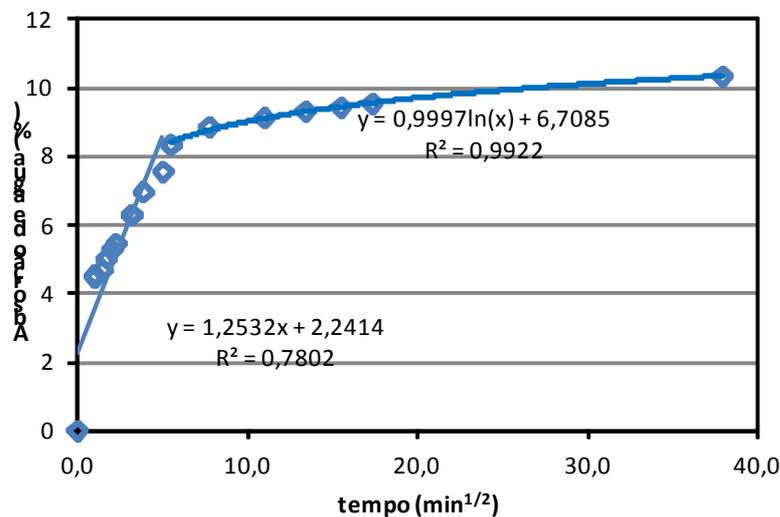


Figura 14 – Curva de Absorção de água do ARC.

A partir destes dados foi adotada a taxa de compensação de água empregada, com 50% da absorção aos 10 minutos, adotada como 6,0% e o cálculo da quantidade de água para tal fim foi calculada pela Equação 7.

$$M_{H_2O} = 0,50 \times ABS_{10min} \times M_{ARC}$$

Equação 7

Onde:

M_{H_2O} – massa de água de compensação;

ABS – absorção aos 10 minutos;

M_{ARC} – massa de agregado reciclado.

3.2.7 Aditivo

O aditivo utilizado na pesquisa foi do tipo superplastificante de alto desempenho a base de policarboxilato. O máximo de aditivo aplicado em alguns traços foi de 0,28%, próximo ao mínimo recomendado pelo fabricante, que é de 0,2%. Na Tabela 14, encontram-se os dados técnicos do aditivo.

Tabela 14 – Dados Técnicos e características do aditivo

Característica	Valor
Densidade	1,07(g/cm ³)
Dosagem Recomenda em relação à massa de cimento	0,2 a 5,0 (%)
Teor de Cloretos	< 0,1 (%)
Teor de Álcalis	< 1,0 (%)

Fonte: Dados do fabricante - MC-BAUCHEMIE (2013).

3.2.8 Água

Foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento local de São Leopoldo/RS, onde o órgão responsável pela sua potabilidade é o SEMAE.

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

O traço partiu da fixação do teor de argamassa em 55% com consistência de 100 ± 20 mm a partir do ensaio de abatimento de tronco de cone, com três níveis de relação água/aglomerante que se mantiveram fixos nos traços com as substituições de CCA e ARC. A consistência de cada mistura foi ajustada, quando necessário, com aditivo superplastificante. Essas condições foram previamente testadas por produção de concreto e moldagem piloto.

As misturas e homogeneização aconteceram em uma betoneira de eixo vertical, com aproximadamente 70 litros de capacidade.

A ordem dos materiais estipulada, conforme os estudos já realizados por Werle (2010), Troian (2010) e Krug (2011), sendo:

1. Colocação do agregado graúdo natural, e a %ARC conforme o traço;
2. Colocação de 50% de água;
3. Colocação do cimento, e de CCA, quando fosse o caso;
4. Colocação do agregado miúdo;
5. E por fim, os outros 50% de água.

Nos traços que eram compostos por ARC, ocorria a mistura entre este, o agregado natural e a água de pré-molhagem. A água de pré-molhagem foi calculada a partir de uma taxa de compensação do ARC, definida em 50% da absorção em 10 min. Feito à homogeneização na betoneira destes materiais a mesma era protegida, para evitar evaporações da água, e se aguardava 10 minutos para proceder as demais etapas, indicadas acima.

Tanto a substituição do cimento por CCA quanto do agregado graúdo convencional por ARC foram realizadas em massa com compensação de volume, em função da diferença significativa entre as massas específicas dos materiais. Desta forma é possível manter constante o volume de pasta de aglomerante, bem como a relação entre o volume de argamassa e o volume de agregado graúdo.

Após 8 minutos da incorporação de cimento a mistura era verificado a consistência do concreto através do ensaio do abatimento de tronco de cone. Quando necessário, adicionava-se o aditivo misturando-se por mais dois minutos e se repetia a medida de abatimento, conforme NBR NM 67 (ABNT, 1996).

Cada um dos traços foi rodado em duas vezes, logo, as quantidades empregadas foram duplicadas. Empregou-se a água determinada no ajuste da relação água/aglomerante do traço referência. A Tabela 15 apresenta a relação dos traços estudados e consumos por metro cúbico de materiais para cada uma das misturas.

Tabela 15 – Consumo de materiais para os traços estudados.

Traço unitário (kg)	CCA (%)	ARC (%)	a/agl	Cimento (kg/m ³)	CCA ¹ (kg/m ³)	Agreg. miúdo (kg/m ³)	Agreg. ² . graúdo (kg/m ³)	ARC (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (%)	T (°C)	U.R. (%)
1:1,75:2,25	0	0	0,42	437	0	764	982	0,00	183	0	15,8	70
1:2,36:2,74	0	0	0,53	354	0	834	972	0,00	188	0	15,4	66
1:2,96:3,24	0	0	0,64	298	0	882	965	0,00	191	0,12	16,4	68
1:1,75:2,25	10	0	0,42	393	30	764	982	0,00	195	0,2	17,2	84
1:2,36:2,74	10	0	0,53	319	24	834	972	0,00	199	0,04	18,7	69
1:2,96:3,24	10	0	0,64	268	20	882	965	0,00	203	0,14	17,5	83
1:1,75:2,25	20	0	0,42	349	59	764	982	0,00	206	0,18	16,4	69
1:2,36:2,74	20	0	0,53	283	48	834	972	0,00	211	0,08	17,7	64
1:2,96:3,24	20	0	0,64	238	40	882	965	0,00	215	0,23	15,7	74
1:1,75:2,25	0	25	0,42	437	0	764	737	203	183	0,13	28,9	61
1:2,36:2,74	0	25	0,53	354	0	834	729	201	207	0,08	28,5	65
1:2,96:3,24	0	25	0,64	298	0	882	724	200	210	0	27,6	66
1:1,75:2,25	0	50	0,42	393	33	764	737	203	214	0,28	16,5	78
1:2,36:2,74	0	50	0,53	319	26	834	729	201	219	0	16,3	80
1:2,96:3,24	0	50	0,64	268	22	882	724	200	223	0,09	16,1	83
1:1,75:2,25	10	25	0,42	349	65	764	737	203	226	0	14	94
1:2,36:2,74	10	25	0,53	283	53	834	729	201	232	0	13,7	91
1:2,96:3,24	10	25	0,64	238	44	882	724	200	236	0	13,8	96
1:1,75:2,25	10	50	0,42	437	0	764	491	407	225	0,09	18,7	69
1:2,36:2,74	10	50	0,53	354	0	834	486	402	230	0,11	20	85
1:2,96:3,24	10	50	0,64	298	0	882	483	400	233	0,09	19,5	83
1:1,75:2,25	20	25	0,42	393	36	764	491	407	238	0,17	15,3	83
1:2,36:2,74	20	25	0,53	319	29	834	486	402	244	0,17	17,9	70
1:2,96:3,24	20	25	0,64	268	25	882	483	400	247	0,15	15,4	88
1:1,75:2,25	20	50	0,42	349	72	764	491	407	251	0,21	18,3	61
1:2,36:2,74	20	50	0,53	283	58	834	486	402	257	0,22	19,3	55
1:2,96:3,24	20	50	0,64	238	49	882	483	400	262	0,23	17,3	65

¹Massa do volume de CCA equivalente ao volume da massa de cimento substituído; ²Massa do volume de ARC equivalente ao volume da massa de cimento substituído.

O adensamento dos corpos de prova foi realizada por meio de vibrador de imersão, sendo que os corpos de prova cilíndricos, 100x200mm, foram preenchidos em uma única camada e adensados durante 10 segundos, contados desde a introdução até a retirada da agulha do vibrador de imersão. Já os corpos de prova prismáticos, 75x75x285mm, foram preenchidos em duas camadas iguais e adensados de mesma forma seguida pela regularização da superfície, a dimensão da forma foi determinada em função da dimensão máxima do agregado graúdo.

3.4 MÉTODOS DE ENSAIO

A seguir serão explanados os métodos de ensaio realizados no decorrer desta pesquisa.

3.4.1 Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos

Os ensaios foram realizados conforme NBR 5738 (ABNT, 2003) e NBR 5739 (ABNT, 2003). As moldagens foram realizadas em formas metálicas cilíndricas de 10x20cm, depositadas em local protegido com vidro junto ao topo da forma.

O A desforma foi realizado após vinte e quatro horas de cura em temperatura ambiente, protegidos na sua superfície. Os corpos de prova foram desformados, identificados e prontamente submetidos à cura submersa em tanques com água saturada de cal, em sala com temperatura controlada de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

No dia de realização dos ensaios era realizado o nivelamento dos corpos de prova, ou seja, capeamentos nas suas faces. Este capeamento foi realizado com enxofre para todos os corpos-de-prova, independentemente de suas idades. Após o capeamento aguardava-se o tempo suficiente para o enxofre adquirir resistência e em seguida dava-se início ao ensaio de resistência a compressão.

Este ensaio se procedeu com a prensa hidráulica disponível no laboratório, com área de aplicação de carga nos corpos-de-prova de 7854 mm^2 devido à fôrma utilizada e com velocidade de aplicação de carga de $0,15 \text{ MPa/s}$ para todas as amostras, conforme prescrição em norma. Para o mesmo foram ensaiados corpos de prova em idades de 7, 28, 63, 91 e 112 dias.

3.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado conforme NBR 5738 (ABNT, 2003) e NBR 7229 (ABNT, 2010). As moldagens foram realizadas em formas metálicas cilíndricas de 10x20cm, depositadas em local protegido com vidro junto ao topo da forma.

A desforma foi realizada conforme descrito para o ensaio de resistência a compressão.

Este ensaio se procedeu com a prensa hidráulica disponível no laboratório, com aplicação de carga sobre dispositivos de madeira com velocidade de aplicação de carga de $0,05 \text{ MPa/s}$, igual para todas as amostras, conforme prescrição em norma. Para o mesmo foram ensaiados corpos de prova na idade de 28 dias. Conforme apresentado na Figura 15.



Figura 15 – Ensaio de tração.

3.4.3 Taxa de absorção, porosidade capilar e porosidade total

O ensaio de absorção de água seguiu o procedimento da RILEM TC 116 PCD (1999), que foi modificado por Troian (2010) e Werle (2010), para os ensaios com concretos com a incorporação de resíduos, isso para os corpos de prova com relação água/aglomerante de 0,64 na idade de 28 dias.

As fatias de ensaio de absorção de água por capilaridade foram retiradas dos tambores, onde estavam armazenadas, conforme o procedimento citado anteriormente. A amostra ainda recebe uma cobertura impermeável na face superior, que não fica aderida à superfície, de maneira que não tenha interferência da umidade externa. Neste trabalho empregou-se látex de balões, por apresentar certa elasticidade. O ensaio se inicia com a colocação da amostra em uma bandeja com uma lâmina de água, imergindo três milímetros da amostra, sendo que este nível deve permanecer constante, conforme mostra a Figura 16.

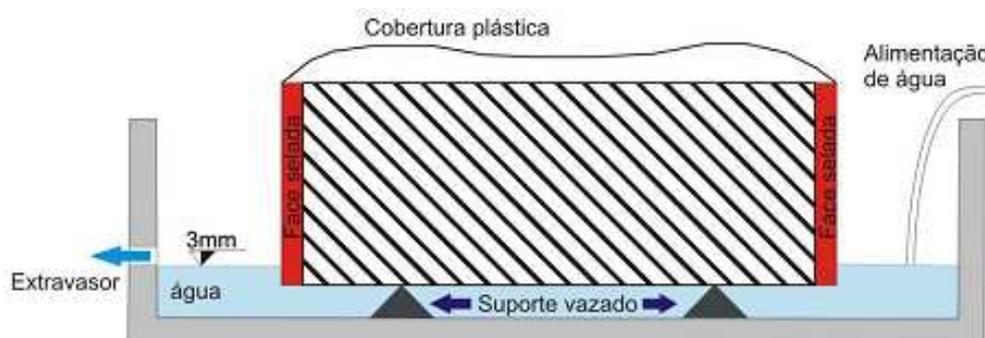


Figura 16 – Esquema experimental do método RILEM TC 116 PCD (1999)

Fonte: RILEM (1999) apud Troian (2010) e Werle (2010).

A partir destes resultados foram calculados taxa de absorção, porosidade capilar e porosidade total, para isso foram plotados gráficos com retas de sucção e saturação, individualmente para todos os traços, conforme apresentado exemplo do traço de referência na Figura 17.

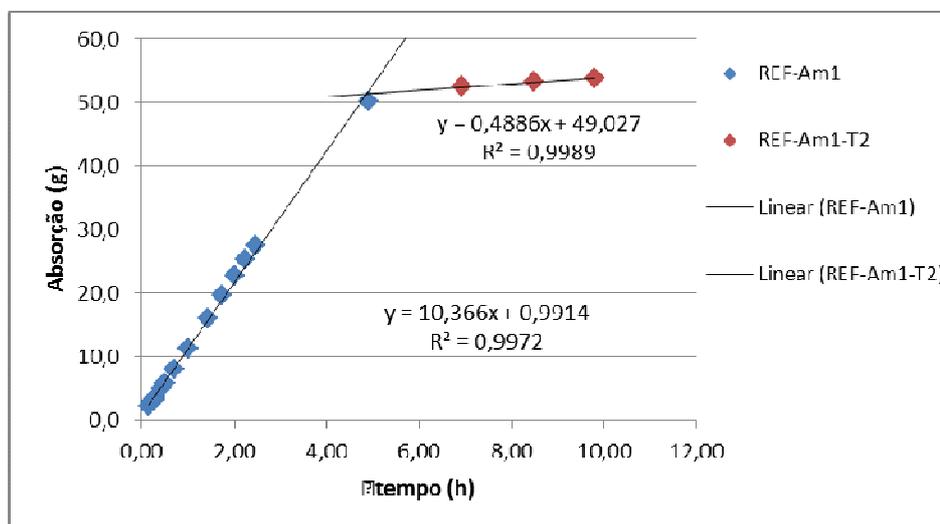


Figura 17 – Exemplo do gráfico com retas de sucção e saturação para os concretos de referência (0% CCA e 0% ARC).

A taxa de absorção foi calculada a partir da razão da divisão da inclinação da reta obtida na fase de sucção capilar pelo volume do corpo de prova (KELHAM, 1988). A porosidade total foi calculada a partir das diferenças de massas e o volume do corpo de prova. Já a porosidade capilar foi obtida com a massa do corpo de prova após 72 horas do início do ensaio e o volume do mesmo corpo de prova.

3.4.4 Retração por Secagem

O ensaio de retração seguiu as recomendações dadas pela ASTM C157:2011 e ASTM C490:2012. No seu interior é inserido um pino com 22,5mm de comprimento, sendo destes, 5 mm ficaram no exterior e 17,5 mm no interior do corpo de prova, resultando em uma distância livre, ou seja, distância entre pinos, de 250 mm.

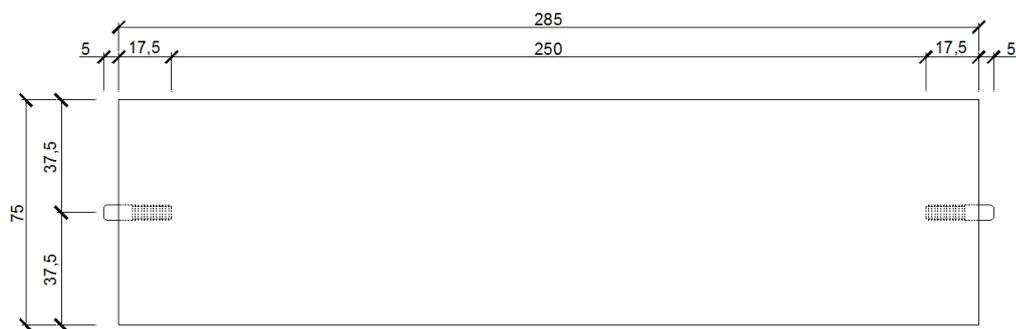


Figura 18 – Vista superior do corpo de prova para ensaio de retração.

Foram moldados três corpos de prova de cada mistura para a realização do ensaio. Após a moldagem os corpos de prova eram depositados em sala climatizada com vidro junto ao topo da forma com objetivo de proteção superficial, mas também a fim de evitar excessivas evaporações, apesar de estarem em ambiente controlado, temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 10\%$.

Posteriormente as primeiras vinte e quatro horas foi realizada a desforma, onde permaneciam até o sétimo dia de cura. Na sequência os corpos-de-prova retornaram à sala climatizada ($T=21^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$; $Ur=60\pm 10\%$).

As leituras foram realizadas nas idades de 1, 4, 7, 14, 28, 63, 91 e 112 dias sendo:

- 1ª leitura, os corpos-de-prova eram submersos na solução de cal saturada por 30 minutos, retirados e secados superficialmente com pano úmido, realizado a leitura de referência e submersos novamente. Esta primeira leitura serviu de parâmetro para todas as demais idades.
- 2ª leitura, no quarto dia posterior a moldagem, sendo 1 dia de cura em sala climatizada e 3 dias em cura úmida, são retirados os corpos-de-prova da solução, secados superficialmente com pano úmido, realizado a leitura e novamente é submerso;
- 3ª leitura, no sétimo dia posterior a moldagem, retirado os corpos-de-prova da solução, secados superficialmente com pano úmido, realizado a leitura e depositados na sala climatizada;
- Demais leituras, os corpos-de-prova permaneceram na sala climatizada em local protegido e sobre lastro vazado.

Na figura 19 é apresentado o equipamento onde foram realizados as medidas de deformação para os ensaios de retração.



Figura 19 – Equipamento para medidas de deformação com cp.

Cabe ressaltar que as etapas de cura, desforma, cura submersa e cura final ocorreram no mesmo ambiente de temperatura e umidade controlada. E os ensaios foram realizados com aparelho aferido disposto no mesmo local para todas as leituras. Para cada traço foram medidos três corpos de prova, e três leituras para cada, sempre no mesmo posicionamento, e sendo o equipamento zerado com a barra padrão em cada troca de corpos de prova.

3.4.5 Análise dos resultados

Como ferramenta da análise estatística foi empregado um modelo matemático múltiplo não lineares e análises de variância (ANOVA), desenvolvidos através dos softwares *Statgraphics Centurion XVI.I* e *Statistica 10* versão de demonstração.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados e as análises estatísticas empregadas no tratamento dos dados. Anteriormente aos tratamentos estatísticos os dados foram refinados, eliminando os valores expúrios.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial foram analisados através da ANOVA sendo avaliado o efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas e das interações entre eles. As médias dos resultados obtidos nos ensaios de resistência a compressão para cada traço analisado são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Média dos resultados de resistência à compressão.

CCA (%)	ARC (%)	a/agl	fc _m 7 dias (MPa)	fc _m 28 dias (MPa)	fc _m 63 dias (MPa)	fc _m 91 dias (MPa)	fc _m 112 dias (MPa)
0	0	0,42	36,9	39,4	47,9	47,9	46,3
		0,53	35,3	41,2	43,3	47,2	47,0
		0,64	20,6	24,4	26,3	26,8	27,0
10	0	0,42	41,9	47,0	50,3	50,9	52,0
		0,53	25,7	33,3	36,5	40,3	33,4
		0,64	18,1	26,6	31,4	30,4	31,4
20	0	0,42	40,6	49,0	42,7	52,3	36,6
		0,53	27,9	36,9	33,5	42,4	30,4
		0,64	19,9	29,1	29,3	32,0	31,5
0	25	0,42	34,5	37,5	44,8	39,0	41,6
		0,53	24,3	31,6	33,9	33,6	34,0
		0,64	24,9	20,4	19,4	23,9	22,6
0	50	0,42	37,2	44,2	50,2	44,3	43,2
		0,53	25,4	33,5	38,0	34,5	33,3
		0,64	21,6	25,0	30,6	24,3	30,2
10	25	0,42	35,0	51,3	49,2	43,8	55,2
		0,53	22,0	35,2	37,7	36,5	42,5
		0,64	17,2	22,9	28,8	27,1	34,3
10	50	0,42	34,0	42,5	38,4	53,6	43,6
		0,53	23,8	33,4	41,4	41,4	40,9
		0,64	20,0	27,1	31,4	30,5	30,1
20	25	0,42	40,0	54,5	43,6	42,4	53,2
		0,53	28,6	33,9	43,0	43,0	45,5
		0,64	20,7	23,3	32,7	33,3	36,9
20	50	0,42	40,9	50,5	49,8	47,7	35,5
		0,53	27,0	41,8	39,3	48,7	46,6
		0,64	20,7	30,5	32,4	39,4	35,5

Todos os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão nas idades de 7, 28, 63, 91 e 112 dias são apresentados na Tabela A.1 (apêndice). Na Tabela 17 é apresentada a ANOVA para resistência a compressão.

Tabela 17 – ANOVA para resistência a compressão.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
CCA	2	545,9221	272,9610	52,3772	0,0000
ARC	2	101,2023	50,6011	9,7096	0,0001
A/AGL	2	13544,7825	6772,3913	1299,5229	0,0000
IDD	4	4278,9043	1069,7261	205,2648	0,0000
CCA*ARC	4	675,1064	168,7766	32,3858	0,0000
CCA*A/AGL	4	240,6355	60,1589	11,5436	0,0000
ARC*A/AGL	4	122,5139	30,6285	5,8772	0,0002
CCA*IDD	8	453,9613	56,7452	10,8886	0,0000
ARC*IDD	8	451,4410	56,4301	10,8281	0,0000
A/AG*IDD	8	362,7697	45,3462	8,7013	0,0000
CCA*ARC*A/AGL	8	619,8447	77,4806	14,8674	0,0000
CCA*ARC*IDD	16	491,0114	30,6882	5,8886	0,0000
CCA*A/AGL*IDD	16	549,7034	34,3565	6,5925	0,0000
ARC*A/AGL*IDD	16	383,8516	23,9907	4,6035	0,0000
CCA*ARC*A/AGL*IDD	32	479,8753	14,9961	2,8775	0,0000
Erro	135	703,5450	5,2114		

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; CCA = cinza de casca de arroz; ARC = agregado reciclado de concreto; A/AGL= relação água/aglomerante; IDD= idade.

A partir dos resultados da análise apresentados na Tabela 17 é possível visualizar estatisticamente a significância do efeito dos fatores estudados sobre a variável resistência à compressão. Todos os fatores isolados, as interações de primeira ordem e as interações de segunda, terceira e quarta ordem apresentaram, a um nível de 95% de confiança, efeito significativo sobre a variável ‘resistência à compressão’, pois apresentam valores de “p” menores que 0,05.

A Figura 20 apresenta o gráfico de médias para o efeito isolado do fator ‘cinza de casca de arroz’ em relação a resistência à compressão, considerando todos os teores de ARC, todas as relações água/aglomerante e todas as idades.

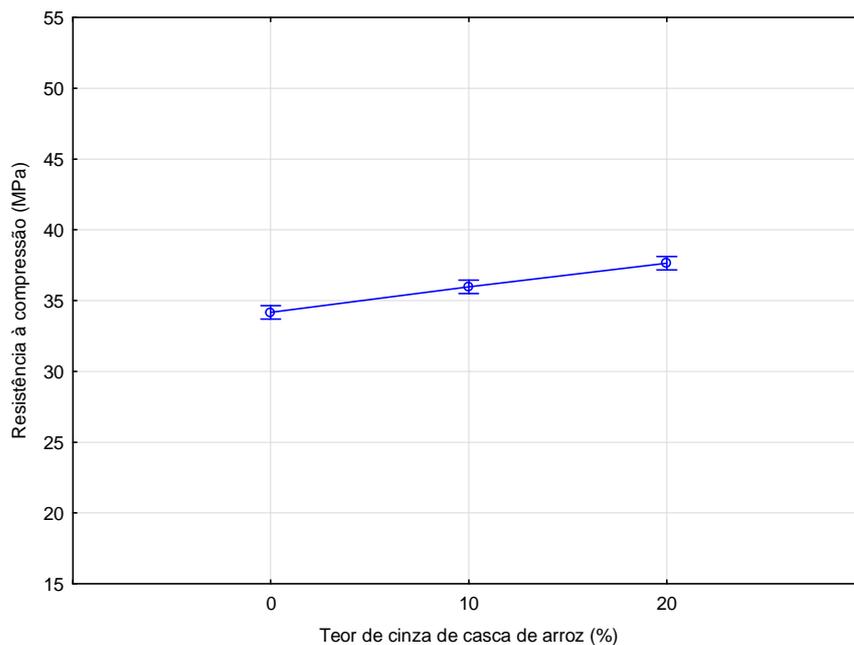


Figura 20 – Efeito isolado do fator “CCA” no comportamento de resistência à compressão axial.

Considerando os resultados obtidos, em todas as idades e relações água/aglomerante estudados a introdução de CCA nas misturas com substituição de 10% de cimento gerou um acréscimo de resistência à compressão na ordem de 5% quando comparados aos concretos sem CCA. Para as substituições de 20% de CCA, este valor chega próximo a 9% superior aos concretos sem cinza. Perante aos resultados obtidos, quando verificado os concretos com maiores índices de CCA, estes apresentam maiores resistências à compressão axial, o que pode confirmar a classificação de Mehta e Monteiro (2008) para a CCA como uma pozolana altamente reativa e também indicando um melhor fechamento da estrutura interna de poros destes concretos a partir do teor de CCA introduzido a mistura. Efeito comum à pesquisa realizada por Tashima et. al. (2012), onde foram estudados teores de CCA na ordem de 5%, 10% e 15%, obtendo aumentos da resistência à medida que foram empregados teores mais elevados de CCA.

Na Figura 21 é apresentado o gráfico de médias para o efeito isolado do fator ‘agregado reciclado de concreto’ em relação à resistência à compressão. Em análise do efeito isolado do ARC considerando os resultados obtidos, em todas as idades, teores de CCA e relações água/aglomerante estudados, os concretos com 50% de ARC obtiveram resistência maior do que os concretos com 25% de ARC. Obteve-se para os teores de 0, 25 e 50%, respectivamente, médias de 36,5; 35,1 e 36,3, com diferenças médias de 2,6%. Desta forma, apesar de estas diferenças apresentadas serem estatisticamente significativas, analisadas sob

ponto de vista técnico estas diferenças fazem com que os concretos sejam classificados em mesmo nível de resistência.

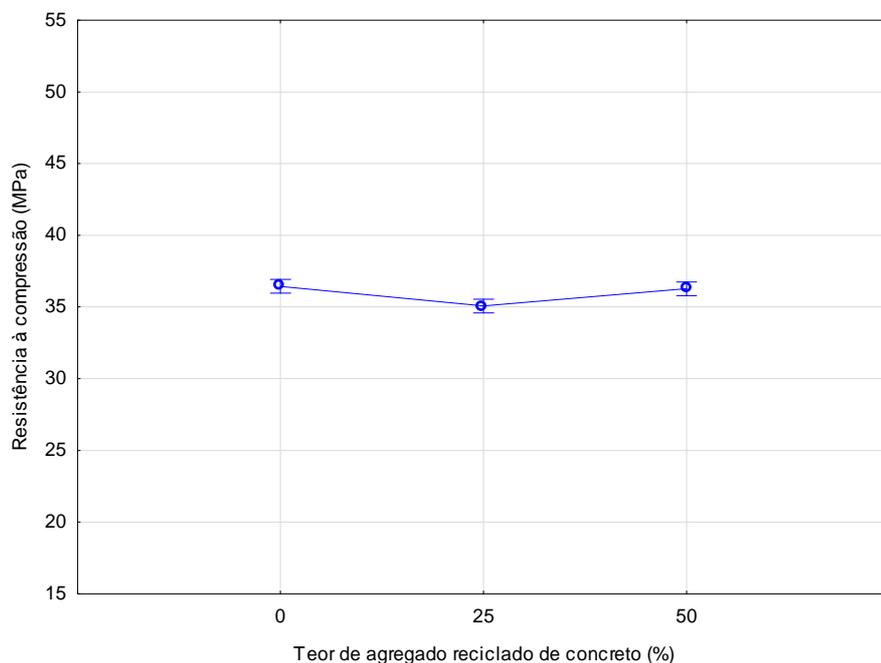


Figura 21 – Efeito isolado do fator “ARC” no comportamento de resistência à compressão axial.

O efeito isolado do fator ‘relação água/aglomerante’, em relação ao comportamento da resistência, apresentado no gráfico de médias da Figura 22.

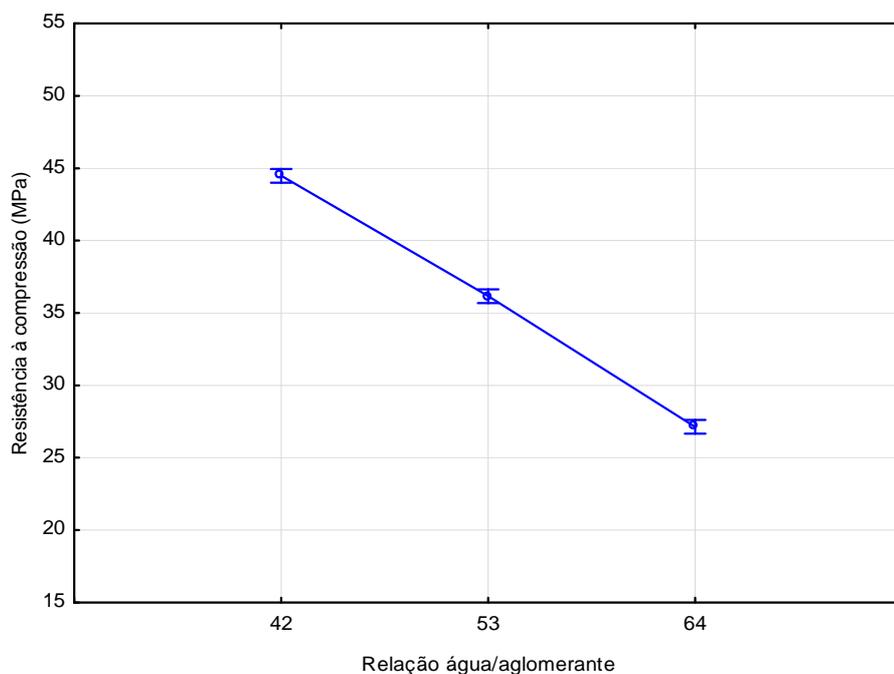


Figura 22 – Efeito isolado do fator “água/aglomerante” no comportamento de resistência à compressão axial.

A análise das médias do fator de controle ‘relação água/aglomerante’ indica que o seu efeito isolado reduz a resistência à compressão em torno de 18% com o aumento da relação de 0,42 para 0,53. Este efeito fica ainda mais evidente quando analisado a relação 0,42 com 0,64, ou seja, a resistência a compressão reduz cerca de 38%. Representando o comportamento esperado, quanto menor a relação água/aglomerante maior será a resistência à compressão axial.

As médias do fator ‘idade’, apresentadas no gráfico da Figura 23, condizem com o comportamento esperado, ou seja, o aumento da resistência à compressão ao longo da idade analisada, ainda, observando-se uma tendência de estabilização a partir 63 dias.

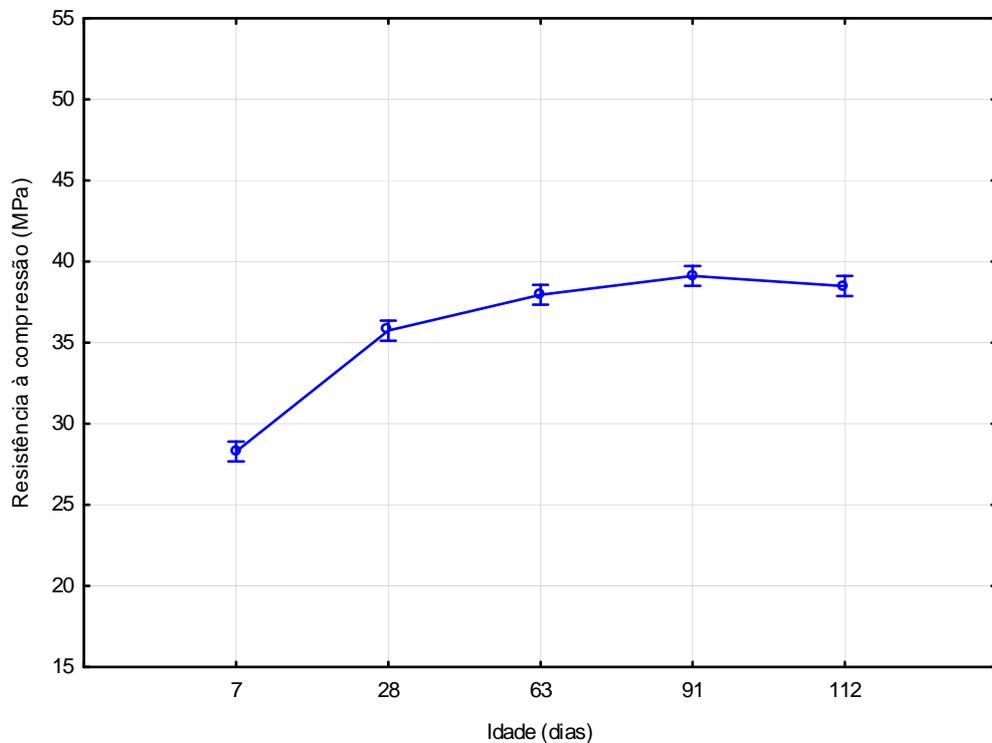


Figura 23 – Efeito isolado do fator “idade” no comportamento de resistência à compressão axial.

A interação entre o efeito da CCA e do ARC na resistência à compressão pode ser visualizada na Figura 24.

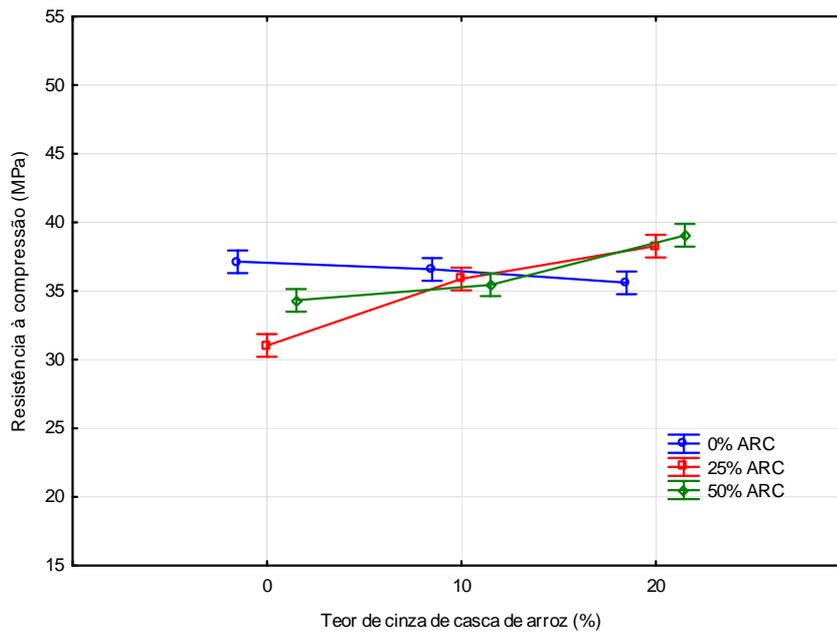


Figura 24 – Interação dos fatores “CCA” e “ARC” no comportamento de resistência à compressão axial.

Considerando todas as idades de estudo, nos traço sem ARC foi verificada redução da resistência à compressão nos concretos com substituição de cimento por CCA, na ordem de 1% e 4% para os teores 10% e 20% de substituição, respectivamente, se comparado com o referênciã. Este comportamento contradiz o resultado esperado, pois é comprovado, conforme Stoitchkov et al. (1996), Mehta e Monteiro (2008), Duart et al. (2011), Tashima et. al. (2012) e Duan et al. (2013), que a CCA aumenta a resistência em concretos convencionais. Foi observada uma grande variabilidade nos resultados dos concretos a partir de 91 dias, o que leva a necessidade de novos estudos destes concretos em idades avançadas, associado a estudos de microestrutura ao longo do tempo, confirmando ou não se o comportamento observado pode ser atribuído a CCA. No entanto a diferença entre as médias foi de 1,5 a 4,2%, o que pode ser considerado uma diferença, em termos técnicos, não significativa, pois estas médias situaram-se entre 35,6 a 37,2 MPa.

Já nos concretos que possuem ARC, o comportamento seguiu o esperado, ou seja, obteve-se um aumentando da resistência com o aumento da incorporação de CCA. O traço com 25% de ARC retornou uma resistência na ordem de 15% e 23% com 10% e 20% de CCA, respectivamente, em relação ao concreto com ARC e sem CCA. Com 50% de ARC o acréscimo de resistência, em relação aos traços com 0% de CCA, foi de aproximadamente 3% e 13% para os concretos com 10% e 20% de CCA, respectivamente. Ou seja, o emprego da pozolana em estudo pode viabilizar o emprego do ARC em concretos.

Apesar do acréscimo relativo de resistência ter sido maior para os concretos com 25% de ARC, os concretos com 50% de ARC atingiram as maiores médias de resistências à compressão do conjunto de dados em análise, para os níveis de CCA estudados.

Na Figura 25 são apresentadas as médias para o efeito das interações de segunda ordem entre a CCA, ARC e relação água/aglomerante, sobre a resistência à compressão.

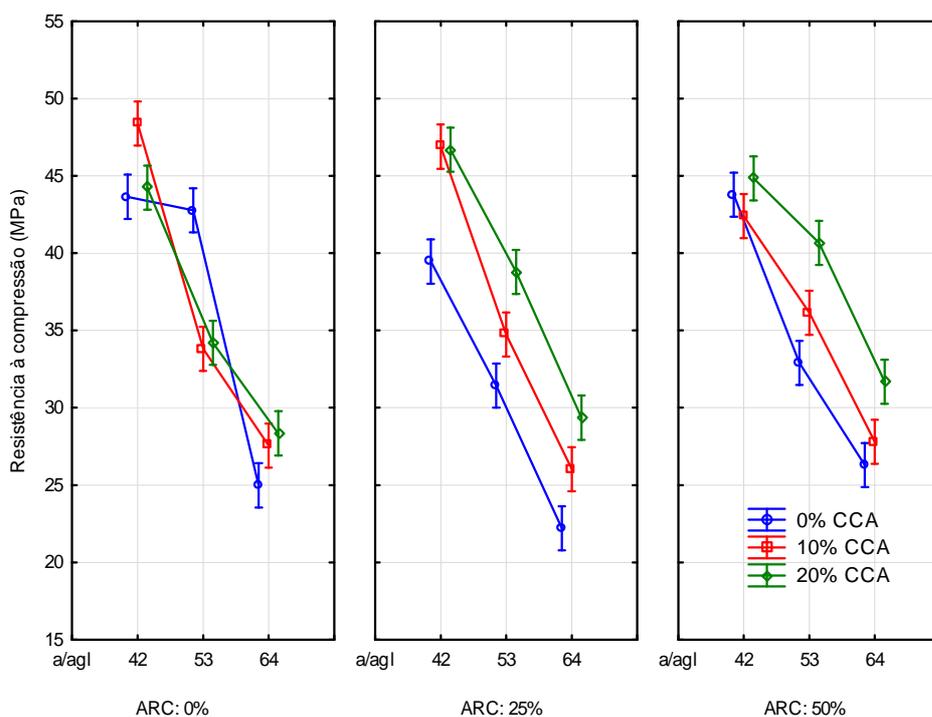


Figura 25 – Interação dos fatores “CCA”, “ARC” e “A/AGL” em relação à resistência à compressão.

Pela análise dos gráficos de médias da Figura 24 percebe-se, conforme esperado e já mencionado, que, quanto maior a relação água/aglomerante menor são os valores obtidos para os ensaios de compressão axial, isto para todos os níveis de substituição. Em concretos sem ARC, as diferenças entre o percentual de CCA não são tecnicamente significativas, para os níveis de água/aglomerante 0,42; 0,53 e 0,64, observando que a análise refere-se a todas as idades. No entanto, Sartori et al. (2013) ao ajustar as curvas de Abrams para estes mesmos concretos na idade de 28 dias observaram que o mesmo seguiu o comportamento esperado para a CCA.

Como se observa nos gráficos de efeito isolado e interações apresentadas, a resistência à compressão tende a aumentar ao longo do tempo e os traços com maior percentual de substituição do cimento Portland por CCA apresentaram os melhores resultados, tanto para os traços de menor como de maior relação água/aglomerante. Isto pode

ser atribuído ao efeito pozolânico da CCA, que, comprovadamente, conforme Chatveera e Lertwattanaruk (2011), refina a estrutura de poros ao reagir com os produtos de hidratação.

Este mesmo comportamento pode ser visto para os concretos com 25% e 50% de ARC, pois se presume que estes concretos sejam mais porosos e com menor resistência, porém o que pode se observar é que ao adicionar CCA estes concretos tiveram um ganho de resistência superior aos demais. Uma das hipóteses para tal comportamento é devido a introdução da CCA pode ter ocorrido um melhor refinamento dos poros e/ou até mesmo a redução do volume de poros da mistura, contribuído assim, de forma associada, para tais resultados. Comportamento próximo ao encontrado por Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) quando trabalhou com ARC e cinza volante e pesquisa realizada por Tangchirapat et. al. (2008), em misturas com CCA e ARC, concluindo que o uso da cinza de casca de arroz em substituição de 20 e 35% do cimento Portland pode conferir uma maior resistência à compressão em concretos com agregados reciclados de concreto.

4.2 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral foram analisados através da análise de variância (ANOVA) do efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas, e das interações entre eles, e apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados de resistência a tração por compressão diametral.

ARC (%)	a/agl	Resistência à compressão (MPa)		
		CCA (%)		
		0	10	20
0	0,42	4,1 - 4,0	5,0 - 5,4	5,1 - 4,9
	0,53	3,9 - 4,1	4,2 - 4,0	4,3 - 4,3
	0,64	3,6 - 3,5	2,9 - 2,7	4,0 - 4,6
25	0,42	4,1 - 4,3	4,5 - 4,3	4,8 - 4,9
	0,53	3,0 - 2,9	4,3 - 4,0	3,9 - 3,8
	0,64	2,3 - 2,3	2,5 - 2,8	4,0 - 3,9
50	0,42	3,7 - 3,9	5,1 - 4,8	3,9 - 3,9
	0,53	3,7 - 3,8	3,6 - 3,7	4,1 - 4,2
	0,64	3,2 - 3,2	3,2 - 3,3	3,7 - 3,7

Na Tabela 19 são apresentados os resultados da ANOVA.

Tabela 19 – ANOVA da resistência à tração.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
CCA	2	4,2803704	2,1401852	98,77777778	0,000000
ARC	2	1,9114815	0,9557407	44,11111111	0,000000
A/AGL	2	12,604815	6,3024074	290,8803419	0,000000
CCA*ARC	4	1,0807407	0,2701852	12,47008547	0,000007
CCA*A/AGL	4	3,0607407	0,7651852	35,31623932	0,000000
ARC*A/AGL	4	0,732963	0,1832407	8,457264957	0,000147
CCA*ARC*A/AGL	8	2,6648148	0,3331019	15,37393162	0,000000
Erro	27	0,585	0,0216667		

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; CCA = cinza de casca de arroz; ARC = agregado reciclado de concreto; A/AGL= relação água/aglomerante; IDD= idade.

A análise da ANOVA em todos os parâmetros, inclusive as interações, apresentou-se significativos, pois apresentam valores de “p” menores que 0,05, indicando que os fatores apresentam efeito significativo sobre a variável ‘resistência à tração na compressão diametral’ com nível de confiança de 95%.

A Figura 26 apresenta os valores isolados do fator ‘CCA’ em análise ao desenvolvimento de resistência à tração.

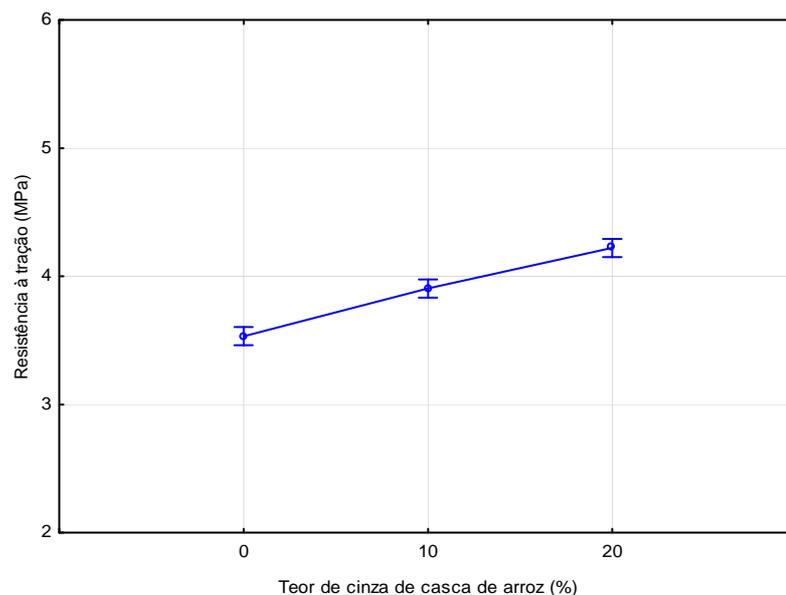


Figura 26 – Efeito isolado da variável “CCA” no comportamento da resistência a tração por compressão diametral.

A partir dos resultados obtidos, em todas as relações água/aglomerante o efeito isolado da CCA tende a aumentar a resistência à tração dos concretos com o aumento de percentual de CCA adicionado a mistura. Observando acréscimo para os concretos com 10% de CCA de aproximadamente 10% e os concretos com 20% CCA tiveram acréscimo de resistência por volta de 20%, em relação ao de referência.

Na Figura 27 é apresentado as médias para o fator isolado ‘ARC’.

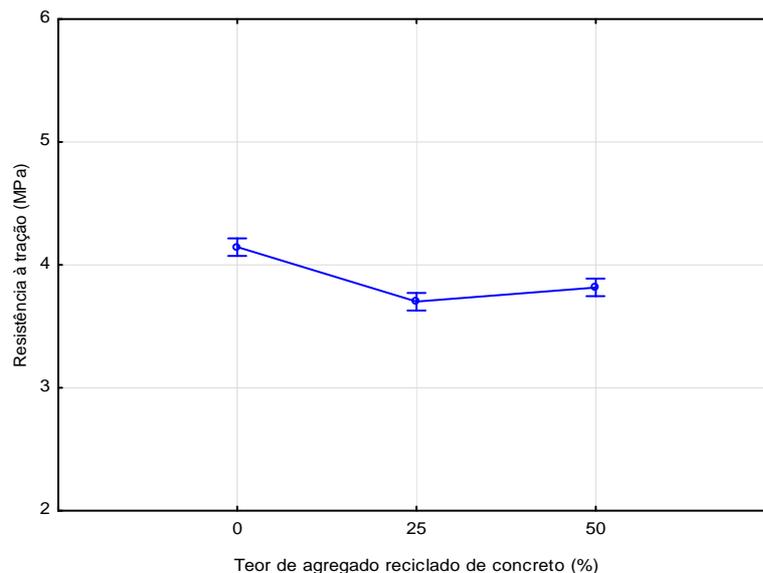


Figura 27 – Efeito isolado da variável “ARC” no comportamento da resistência a tração por compressão diametral.

Conforme indicado na Figura 27, a resistência à tração reduz com o acréscimo de incorporação de ARC, porém não proporcionalmente, isto porque o aumento de incorporação de ARC, com teores de 25% e 50%, não apresentar diferença significativa na resistência à tração por compressão diametral. Com a introdução de 25% de ARC tem-se uma redução na resistência de aproximadamente 10%, e, ao ser introduzido a mistura uma quantidade de 50% de ARC tem-se uma redução e aproximadamente 8%, em relação ao concreto com 0% de ARC.

A Figura 28 apresenta o feito isolado da relação água/aglomerante.

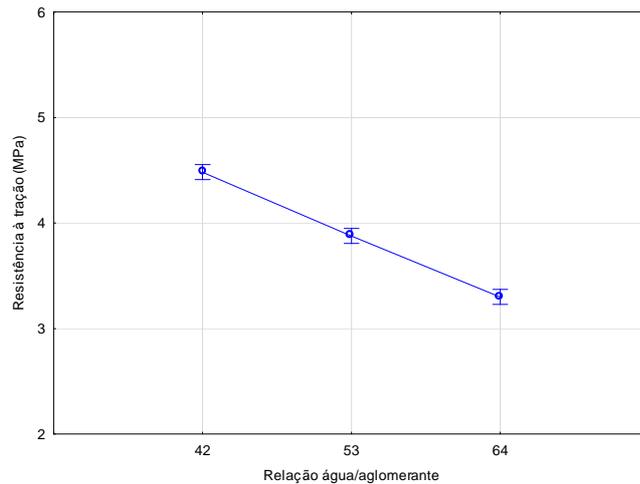


Figura 28 – Efeito isolado da variável “relação água/aglomerante” no comportamento da resistência a tração por compressão diametral.

A Figura 28 apresenta redução da resistência a tração à medida que se aumenta a relação água/aglomerante. A alteração da relação água/aglomerante de 0,42 para 0,53 gerou uma alteração da resistência por volta de 13% inferior a referência. Já a relação 0,64 teve uma redução de aproximadamente 26%, indicando a proporcionalidade em relação a alteração da relação, ou seja, quanto maior a relação água/aglomerante menor será a resistência a compressão apresentada.

Na Figura 29 são apresentadas as médias para o efeito das interações entre a CCA e ARC sobre a resistência à tração.

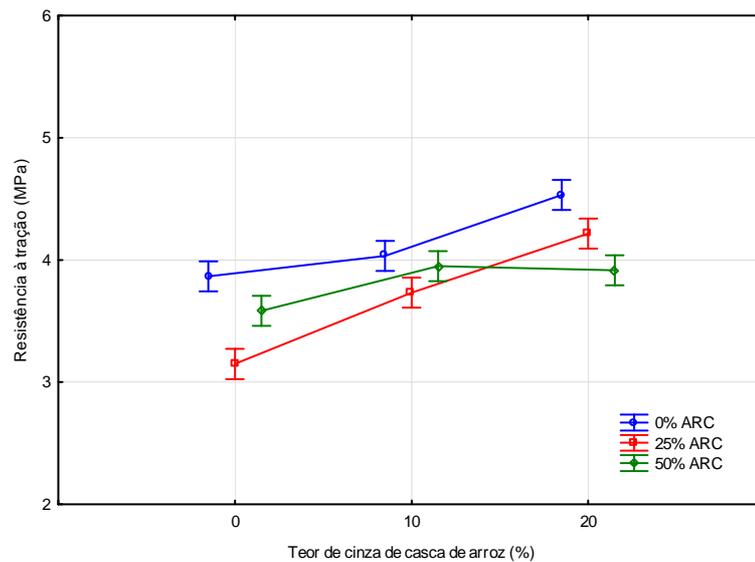


Figura 29 – Interação da variável “CCA” e “ARC” no comportamento da resistência a tração por compressão diametral.

Em análise à interação apresentada na Figura 29, verifica-se que os melhores resultados em relação à resistência à tração pertencem aos concretos sem incorporação de ARC, estes concretos apresentam acréscimo de resistência a tração na medida em que lhe é acrescentado CCA. De mesma forma, os concretos com ARC acompanham o acréscimo de resistência com a introdução de CCA a mistura. Chegando a valores próximos ao concreto referência, 0% ARC e 0% CCA.

A resistência à tração do traço 25% ARC e 20% CCA é em torno de 8% maior que a resistência à tração para o traço 0% ARC e 0% CCA. E em relação ao traço 50% ARC e 20% CCA é inferior a 1%.

4.3 TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados da taxa de absorção foram refinados após a sua coleta.

Na Tabela 20, são apresentados valores refinados obtidos no ensaio de taxa de absorção para a idade de 28 dias e relação água/aglomerante 0,64. Na Figura 30 são apresentados valores da taxa de absorção aos 28 dias para os traços propostos com relação água/aglomerante de 0,64.

Tabela 20 – Taxa de absorção.

ARC (%)	Taxa de absorção (mm/h ^{1/2})		
	CCA (%)		
	0	10	20
0	0,13	0,10	0,08
	0,13	0,10	0,08
25	0,11	0,30	0,17
	0,12	0,32	0,18
50	0,10	0,31	0,17
	0,10	0,31	0,15

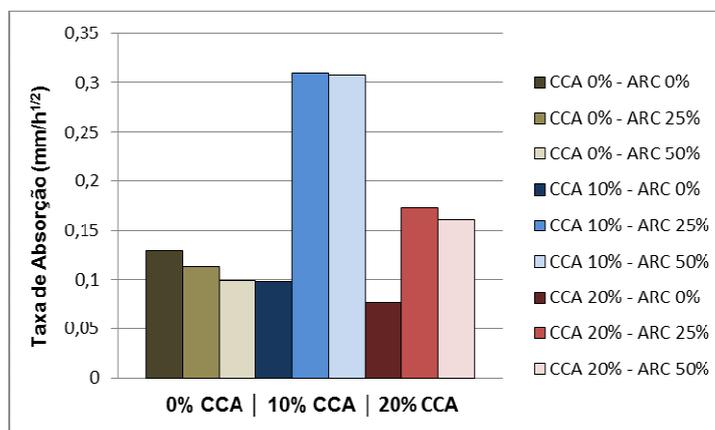


Figura 30 – Taxa de absorção aos 28 dias.

O observado na Figura 30 é a redução da taxa de absorção nos concreto sem CCA, verificando uma tendência de redução no momento em que é inserido ARC, na ordem de 11% com 25% de ARC e na ordem de 23% com 50% de ARC.

Nos concretos com 10% de CCA há um acréscimo acentuado na taxa de absorção no momento em que é associado a CCA com ARC indicando a grande interação entre os dois subprodutos. Este acréscimo foi de aproximadamente 58% para os traços com 10% de CCA e 25 e 50% de ARC, e 25% nos traços com 20% de CCA com ambos os teores de ARC. Neste quesito a interação entre o ARC e CCA não apresenta um efeito favorável.

A partir dos resultados apresentados para taxa de absorção verifica-se a interação entre ARC e CCA na formação, estruturação e comunicação entre os poros capilares, isto, nos variados índices de substituição.

4.4 POROSIDADE CAPILAR

A porosidade capilar é apresentada posterior ao refinamento de dados da amostra.

Para as amostras analisadas a porosidade capilar representou de 70% a 90% dos valores da porosidade total, variando conforme os índices de ARC, CCA e a relação água aglomerante.

Na Tabela 21, são apresentados valores refinados obtidos no ensaio de porosidade capilar para a idade de 28 dias e relação água/aglomerante 0,64.

Tabela 21 – Porosidade capilar – 28 dias.

ARC (%)	Porosidade capilar (%)		
	CCA (%)		
	0	10	20
0	13,1	11,8	5,7
	12,8	11,1	5,3
25	12,8	10,9	4,4
	12,9	9,0	4,3
50	12,4	6,8	4,5
	11,4	6,9	4,5

A Figura 31 apresenta valores refinados obtidos no ensaio de porosidade capilar para a idade de 28 dias e relação água/aglomerante 0,64.

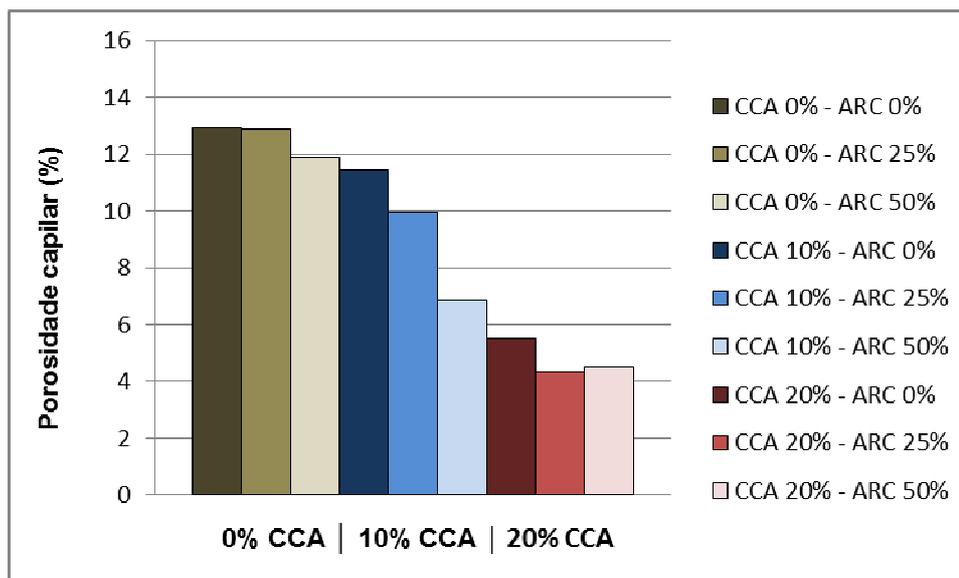


Figura 31 – Porosidade capilar aos 28 dias.

A Figura 31 indica os índices de porosidade capilar, de maneira geral a porosidade capilar tende a reduzir no momento em que o ARC e o CCA são adicionados a mistura. De modo que, os concretos com 0% de CCA e 0% e 25% de ARC mantiveram-se praticamente estáveis com a introdução de ARC, porém a introdução de 50% de ARC apresentou redução de 8% na porosidade capilar quando comparado com o traço 0% de ARC e CCA.

Os traços com 10% de CCA tiveram redução da porosidade capilar se comparados com os traços de 0% de CCA. E quando comparado o traço com 0% de CCA e 0% de ARC com o traço de 10% de CCA e 0% de ARC, observa-se redução de aproximadamente 12%, a introdução de ARC reduziu ainda mais esta propriedade, chegando a patamares aproximados de 12% e 40% para as substituições de 25% e 50%, respectivamente.

Para os traços com 20% de CCA a redução foi ainda maior, ao comparar os valores do traço CCA 0% e ARC 0% com CCA 20% e ARC 0%, a redução foi em torno de 57%. Com a introdução de ARC a redução se intensifica gerando uma redução de aproximadamente 21% ao comparar o traço 20% CCA e 0% ARC com 20% de CCA e 25 ou 50% ARC.

4.5 POROSIDADE TOTAL

Os dados da porosidade total seguiram os mesmos critérios de seleção indicados para taxa de absorção e porosidade capilar e estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Porosidade total.

ARC (%)	Porosidade capilar (%)		
	CCA (%)		
	0	10	20
0	13,6	12,2	7,8
	13,1	11,4	7,4
25	13,5	13,1	6,3
	13,6	11,3	6,2
50	13,2	10,3	6,4
	12,5	10,1	6,3

A Figura 32 apresenta valores refinados obtidos no ensaio de porosidade total para a idade de 28 dias e relação água/aglomerante 0,64.

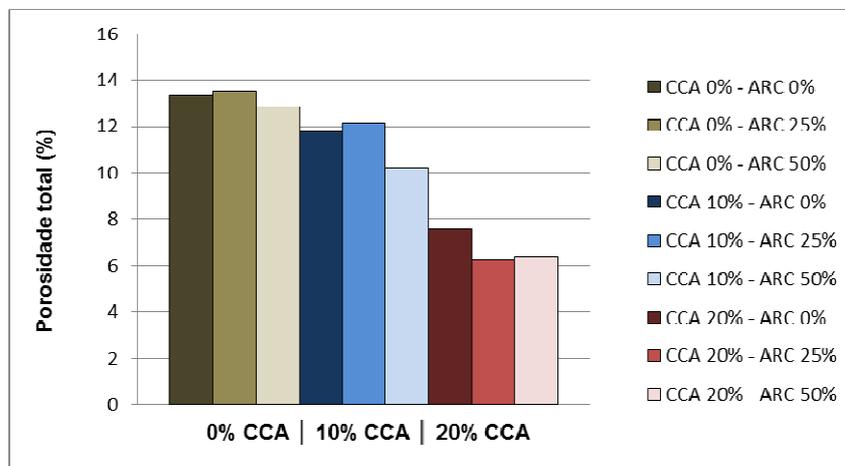


Figura 32 – Porosidade total aos 28 dias.

A porosidade total segue a tendência da porosidade capilar para todas as combinações apresentadas. Com isso e para um melhor entendimento deste efeito é apresentado à análise de variância ANOVA para os efeitos isolados de cada uma das variáveis estudadas e da interação entre eles, apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – ANOVA.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
CCA	2	135,11096	67,555479	253,32696	0,000000
ARC	2	3,8944163	1,9472082	7,301855	0,013052
CCA*ARC	4	2,9600472	0,7400118	2,7749775	0,093741
Erro	9	2,4000577	0,2666731		

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; CCA = cinza de casca de arroz; ARC = agregado reciclado de concreto; A/AGL= relação água/aglomerante; IDD= idade.

Em análise a ANOVA os parâmetros CCA e ARC de efeito isolado, apresentam valores de “p” menores que 0,05, indicando que os fatores apresentam efeito significativo sobre a variável ‘porosidade total’ com nível de confiança de 95%. A interação CCA x ARC apresentou uma significância de 0,093741, indicando que o efeito da interação entre os fatores de controle não é significativo para a porosidade total. A Figura 33 apresenta as médias do fator isolado ‘CCA’ para a porosidade total.

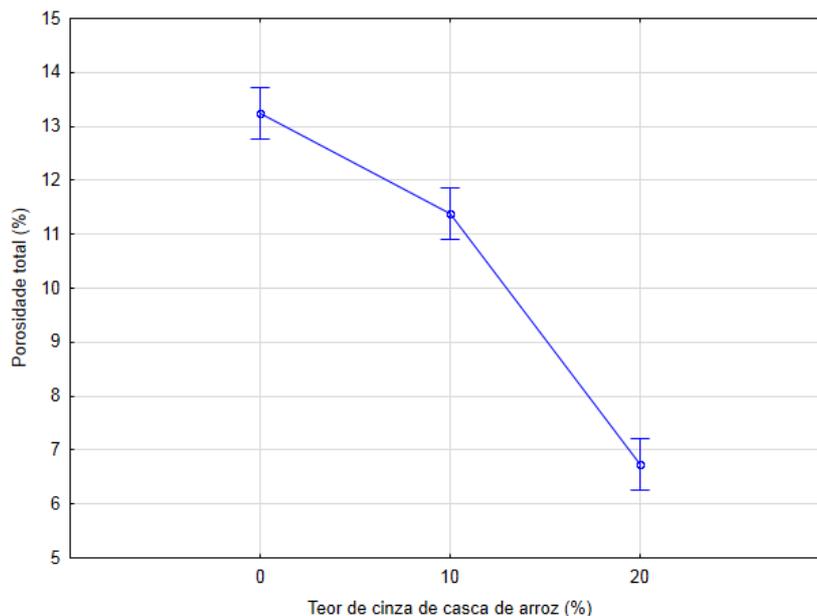


Figura 33 – Efeito isolado do teor de cinza de casca de arroz.

O efeito isolado da cinza de casca de arroz gera redução na porosidade total dos concretos, essa redução é proporcional à quantidade de substituição, ou seja, os maiores índices de CCA renderam concreto de menor porosidade total. Para concreto com 10% de CCA a redução da porosidade total é de aproximadamente 14% já para 20% de CCA a redução chegou a 49%, em relação aos concretos com 0% de CCA.

Efeito similar ao apresentado por Bezerra et. al (2011), os concretos com menor porosidade foram os traços com maior percentual de substituição de cimento por CCA. Ainda, conforme Neville (1997), em concretos com a adição de pozzolanas há redução da porosidade da pasta em idades avançadas.

4.6 RETRAÇÃO POR SECAGEM

Os resultados do ensaio de retração por secagem foram analisados a partir de uma análise de regressão múltipla não linear, testando todos os fatores e seus níveis de controle conforme a pesquisa é proposta. A seguir são apresentadas as médias das três leituras para cada corpo de prova ensaiado, na Tabela 24.

Tabela 24 – Leituras de retração por secagem para cada idade.

Traços		a/agl	Média 4	Média 7	Média	Média	Média	Média	Média
CCA (%)	ARC (%)		dias	dias	14 dias	28 dias	63 dias	91 dias	112 dias
			(μm)						
0	0	0,64	-35,33	-51,67	-25,00	-16,00	14,00	31,00	21,33
			-23,33	-60,33	-23,67	-12,67	20,33	24,33	38,33
			-68,00	-25,00	-12,33	20,67	50,00	56,33	80,67
10	0	0,64	-12,00	-51,67	-10,67	31,00	58,67	66,67	81,67
			-31,00	-53,33	-14,00	20,00	50,33	63,33	51,00
			-10,00	-45,00	44,00	42,67	74,33	93,67	86,00
20	0	0,64	-10,00	-21,00	21,00	63,67	74,00	89,67	122,33
			-5,67	-11,67	26,33	63,00	108,67	101,33	122,33
			45,00	38,33	23,67	98,00	113,00	124,33	136,33
0	25	0,64	-54,00	47,33	-65,67	-32,67	-13,67	14,00	28,33
			-69,33	-64,33	-24,00	-3,00	23,00	33,00	42,00
			-61,67	-48,67	5,33	15,67	37,33	56,00	67,67
0	50	0,64	-25,33	-16,67	-1,67	13,33	30,17	59,33	47,67
			-18,67	-12,33	-13,33	1,00	28,67	57,33	61,33
			-8,67	-12,00	-8,00	31,00	57,33	61,67	93,00
10	25	0,64	48,67	-2,67	47,00	79,67	104,67	117,00	119,67
			-0,67	-3,00	22,67	34,67	95,00	73,67	83,33
			-15,00	-38,67	-22,33	33,33	88,00	74,33	64,33
10	50	0,64	31,33	-50,00	38,00	65,33	105,00	114,67	120,00
			40,00	2,33	39,33	74,00	113,67	125,00	131,00
			-33,67	-79,00	-32,00	69,67	109,33	119,83	125,50
20	25	0,64	-15,33	-22,67	25,67	27,33	68,67	105,33	78,67
			-6,33	-13,67	23,00	45,00	73,33	85,67	76,67
			-12,67	-28,00	0,67	15,67	74,67	80,67	59,33
20	50	0,64	-47,67	-19,00	3,00	11,67	47,33	73,33	44,00
			-32,67	-57,33	-15,33	4,00	54,33	63,00	63,00
			-2,00	-26,33	48,00	44,33	67,00	101,00	112,33

Ao se observar a Tabela 24 é importante lembrar que as leituras até o sétimo dia não são relacionadas à retração por secagem, pois os exemplares estavam submetidos à cura submersa. Segundo Cánovas (1988), quando um concreto que está em ambiente seco é introduzido em água ocorre efeito contrário à retração, ou seja, a expansão dimensional. Esse efeito acaba sendo superado pela retração durante a secagem.

Na Figura 34, é apresentado o gráfico entre a retração (ϵ) e as idades de 28, 63, 91 e 112 dias.

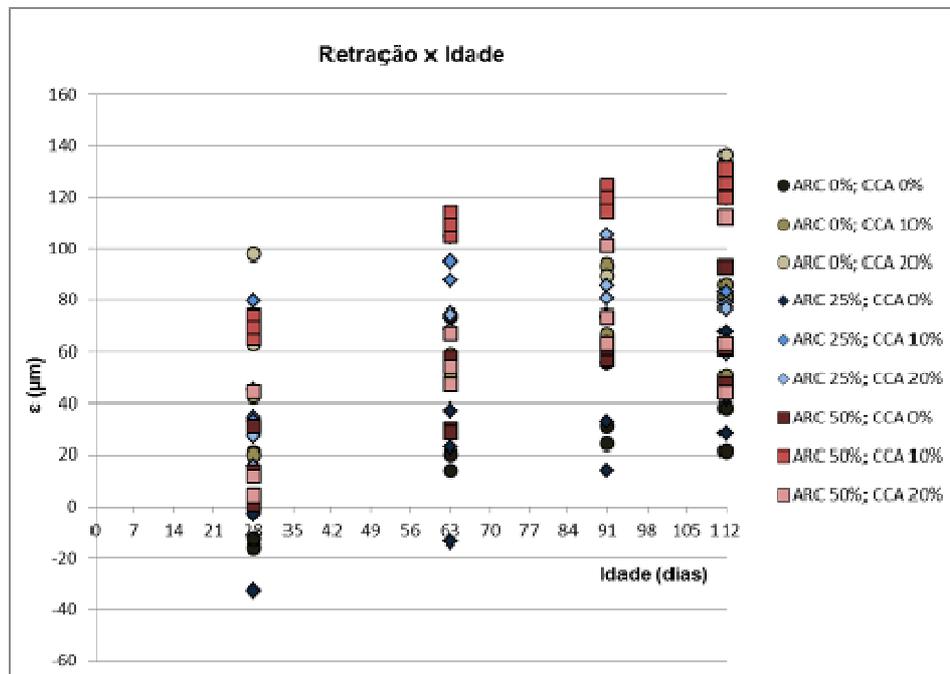


Figura 34 – Ensaio de retração ao longo do tempo.

A partir da Figura 34 verifica-se o desenvolvimento da retração ao longo do tempo para os concretos moldados com incorporação de CCA, ARC e teor de água/aglomerante de 0,64. Estes efeitos serão explanados com a validação do modelo proposto.

O modelo proposto para determinação da retração em concretos com substituição de agregado gráudo natural por ARC e cimento Portland por CCA é indicada por meio de regressão múltipla não linear, apresentado a seguir, na equação 8:

$$RT = b_0 + b_1 * CCA + b_2 * ARC + b_3 * IDD + b_{12} * ((ARC+1) / (CCA + 1000)) + b_{13} * ((IDD+1) / (CCA+0,1)) + b_{23} * ARC * CCA \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

RT é a retração (μm);

CCA é o teor de cinza de casca de arroz (0%, 10%, 20%);

ARC é o teor de agregado reciclado de concreto (0%, 25%, 50%);

IDD é a idade dos corpos de prova em dias (4, 7, 14, 28, 63, 91, 112).

Na Tabela 25 e na Tabela 26 são apresentados os resultados de regressão.

Tabela 25 – ANOVA do modelo.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	7	5,50E-01	7,86E-02	1,15E+02	0
Resíduos	182	1,24E-01	0,0006824		
Total	189	6,74E-01			
Total Corrigido	188	5,01E-01			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Tabela 26 – Parâmetro significativos para os fatores analisados para retração.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	p
CONSTANTE	bo	7,1793	1,36472	5,2606469	0,000000
CCA	b1	-0,0043	0,00132094	3,2596711	0,000000
ARC	b2	7,2241	1,36559	5,2900871	0,000000
IDD	b3	0,00103	5,72213E-05	18,038388	0,000000
CCA*ARC	b12	-7223,6	1365,63	5,2896026	0,000000
CCA*IDD	b13	-0,00002	9,52372E-06	1,9893382	0,023572
ARC*IDD	b23	-0,0071	0,0013389	5,3323923	0,000000

Onde: CCA= cinza de casca de arroz; ARC=agregado reciclado de concreto; IDD idade em dias.

O modelo estatístico resultou em uma análise de variância com coeficiente de correlação (r^2) de 0,752, indicando que o modelo ajusta 75,2% dos valores observados para os resultados de retração. O valor 'p' do modelo é menor que 0,05, indicando que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com nível de confiança de 95%.

A Figura 35 apresentada a correlação entre os valores obtidos por procedimentos de ensaio e os valores calculados, bem como a linha de tendência linear para a correlação dos mesmos dados.

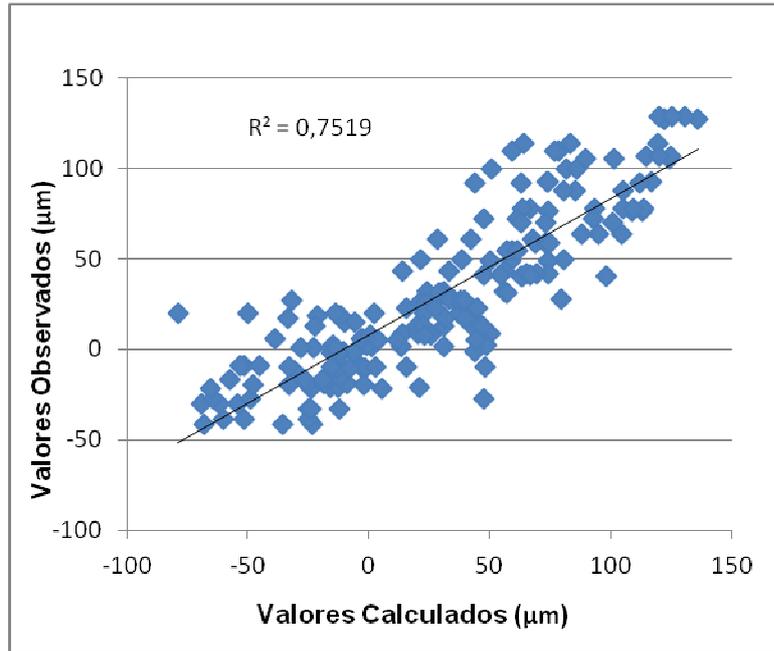


Figura 35 – Relação entre os valores calculados e os valores observados para o ensaio de retração.

O modelo adotado para a retração, que representa os resultados, é apresentado na equação 9:

$$RT = 7,1793 - 0,0043 * CCA + 7,2241 * ARC + 0,0010 * IDD - 7223,6 * ((ARC+1) / (CCA+1000)) - 0,00002 * ((IDD+1) / (CCA+0,1)) - 0,0071 * ARC * CCA \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

RT é a retração (μm);

CCA é o teor de cinza de casca de arroz (0%, 10%, 20%);

ARC é o teor de agregado reciclado de concreto (0%, 25%, 50%);

IDD é a idade dos corpos de prova em dias (4, 7, 14, 28, 63, 91, 112);

Levando em consideração a grande variabilidade do ARC e CCA, as suas interações que até então são pouco conhecidas, os coeficientes de correlação apresentados em pesquisas anteriores sobre retração e agregados reciclados e a sensibilidade deste ensaio decidiu-se validar o modelo proposto.

A partir do modelo adotado, foram construídos gráficos onde são relacionadas às curvas calculadas a partir do modelo e os valores observados.

Nas Figuras 36, 37 e 38 são comparados os efeitos da retração ao acréscimo das porcentagens de substituição do cimento Portland por CCA, nas idades de 28, 63, 91 e 112 dias e nos diferentes percentuais de ARC.

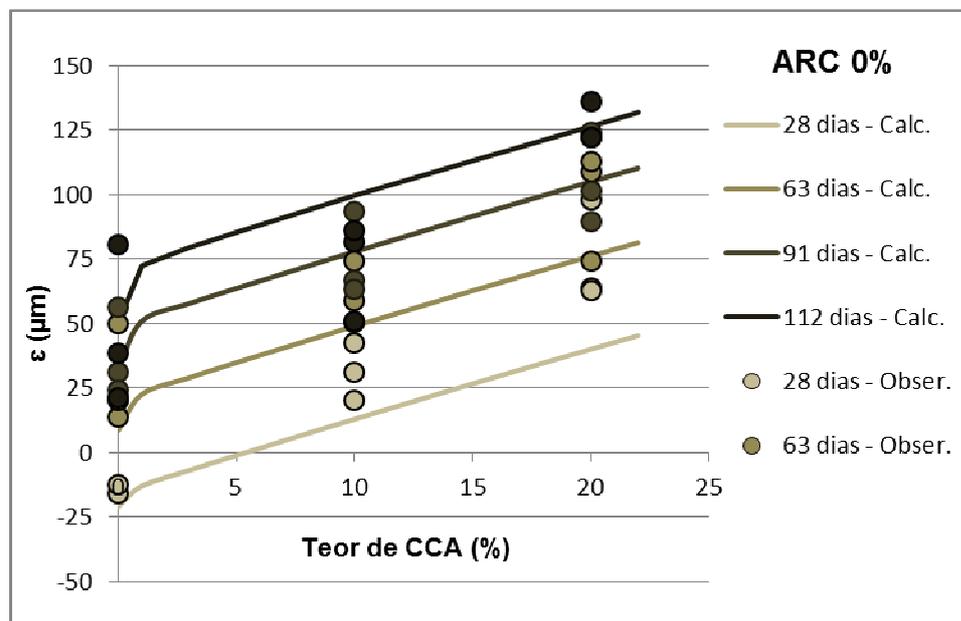


Figura 36 – Ensaio de retração, substituição por CCA com 0% de ARC para diferentes idades.

Na Figura 36 são apresentados os valores obtidos para concretos sem a introdução de ARC junto à mistura.

Concretos com incorporação de CCA, sem ARC, apresentaram mesmo comportamento em relação à retração ao longo do tempo, ou seja, há um acréscimo da retração no momento em que se aumenta o teor de CCA junto à mistura. Este aspecto pode estar vinculado ao refinamento da estrutura interna de poros devido à adição mineral, conforme efeito descrito por Mehta e Monteiro (2008), Diniz, Fernandes e Kuperman (2011), adições minerais tendem a dar maior refinamento aos poros, ou seja, diminuem seus diâmetros, porém aumentam o seu número, e a presença de pequenos poros normalmente apresenta maiores valores para retração.

Ao serem comparados os dados calculados para todas as idades, a retração para os traços com 10% CCA é de aproximadamente 40 μm maior que o traço de referência, já para os traços com 20% CCA, a retração é de aproximadamente 70 μm, superior ao referência.

Uma segunda hipótese para tal manifestação pode ser levada em conta, como, pela menor quantidade de água na mistura em concretos sem ARC, uma vez que, não é utilizado

água de compensação, e quando adicionamos partícula de pequena dimensão e elevada área superficial, que é o caso da CCA, estas misturas necessitam de uma maior quantidade de água.

A Figura 37 indica curvas paralelas que simulam o efeito da retração ao longo do tempo em concretos com 0% ARC e diferentes níveis de CCA.

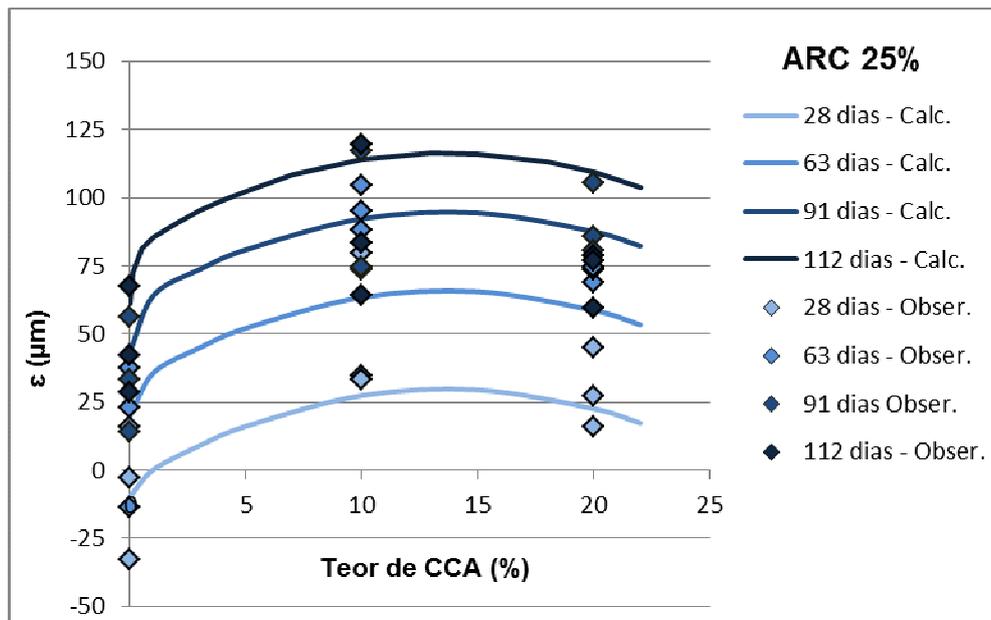


Figura 37 – Ensaio de retração, substituição por CCA com 25% de ARC para diferentes idades.

A Figura 37 apresenta os efeitos da CCA quando inseridos em uma matriz com 25% ARC.

De uma maneira geral os concretos continuam aumentando a retração ao longo do tempo, para os percentuais de 10% de CCA, e os valores de menor retração ainda são os obtidos pelos concretos sem CCA, seguindo o comportamento da hipótese para a Figura 36, e justificada conforme Mehta e Monteiro (2008), Diniz, Fernandes e Kuperman (2011).

O que pode ser destacado é o comportamento dos concretos com maiores percentuais de CCA, indicando redução na retração. O que pode ser justificado conforme pesquisa realizada por Givi et al. (2010).

Os valores de retração em média para todas as idades dos traços 25% de ARC e 10% CCA é aproximadamente 46 μm superior ao traço 25% de ARC e 0% de CCA. Enquanto para os traços 25% de ARC e 20% CCA a retração é de aproximadamente 42 μm superior ao

traço de referência com 25% de ARC, portanto reduzindo a retração em 8,7% em relação aos traços com 10 % de CCA.

A Figura 38, da mesma forma, apresenta curvas paralelas para todas as idades analisadas, para os diferentes teores de CCA analisados.

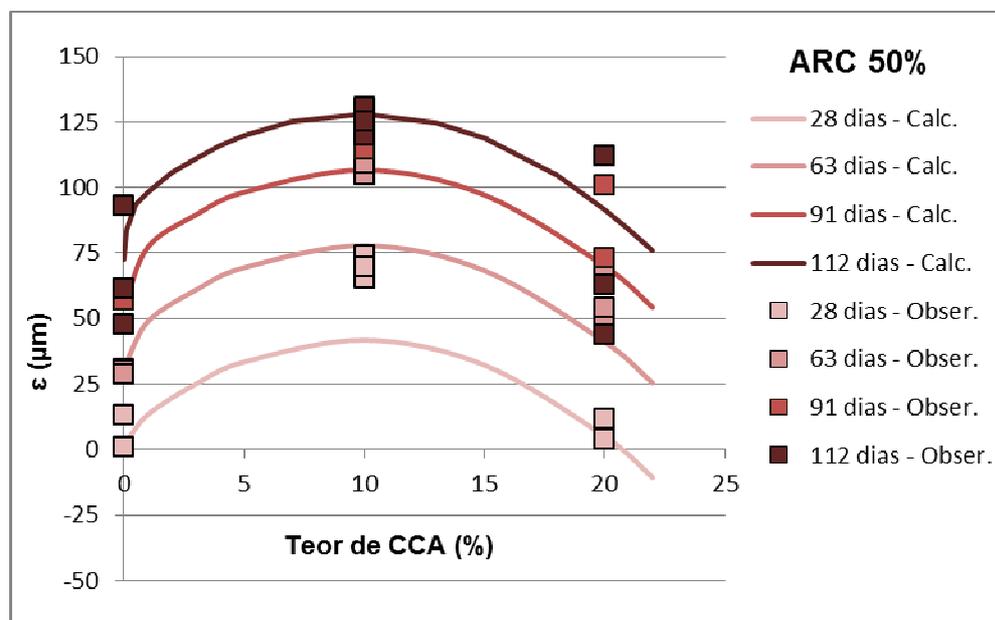


Figura 38 – Ensaio de retração, substituição por CCA com 50% de ARC para diferentes idades.

O mesmo comportamento indicado na Figura 37 é apresentado na Figura 38, porém com maior intensidade, apresentando curvas paralelas para todas as idades analisadas, porém com reduções acentuadas no momento em que foram adicionados 20% de CCA a mistura.

Uma hipótese para tal comportamento se deve aos concretos, com 25% e 50% de ARC e, 20% CCA pode ter ocorrido redução do volume total de poros, devido ao acréscimo do percentual de substituição de cimento por CCA, fazendo com que o mesmo haja com maior intensidade junto à mistura, conforme já descrito Givi et al. (2010) a CCA é uma pozolana eficaz e pode contribuir para diminuir a porosidade total do concreto, modificar a estrutura dos poros e reduzir significativamente o efeito de retração.

A retração média para todas as idades dos traços 50% de ARC e 10% CCA é aproximadamente 48 μm superior à retração observada no traço 50% de ARC e 0% de CCA. Já para os traços 50% de ARC e 20% CCA a retração é aproximadamente 18 μm superior ao

traço de referência com 50% de ARC, reduzindo a retração em 37,5% em relação aos traços com 10 % de CCA e 50% de ARC.

O que pode ser observado nos concretos com incorporação de ARC e CCA é a interação entre estes subprodutos, ficando evidenciada para a retração no momento em que se adiciona 20% de CCA junto ao ARC. Porém mais estudos devem ser realizados, para melhor mensurar as interações entre ARC e CCA, em idades mais avançadas e maiores percentuais de CCA, e com isso comprovar as hipóteses explanadas.

4.6.1 Comparativos entre retração e a porosidade total

Neste item são apresentados os valores médios obtidos nos ensaios de retração aos 112 dias e porosidade total aos 28 dias.

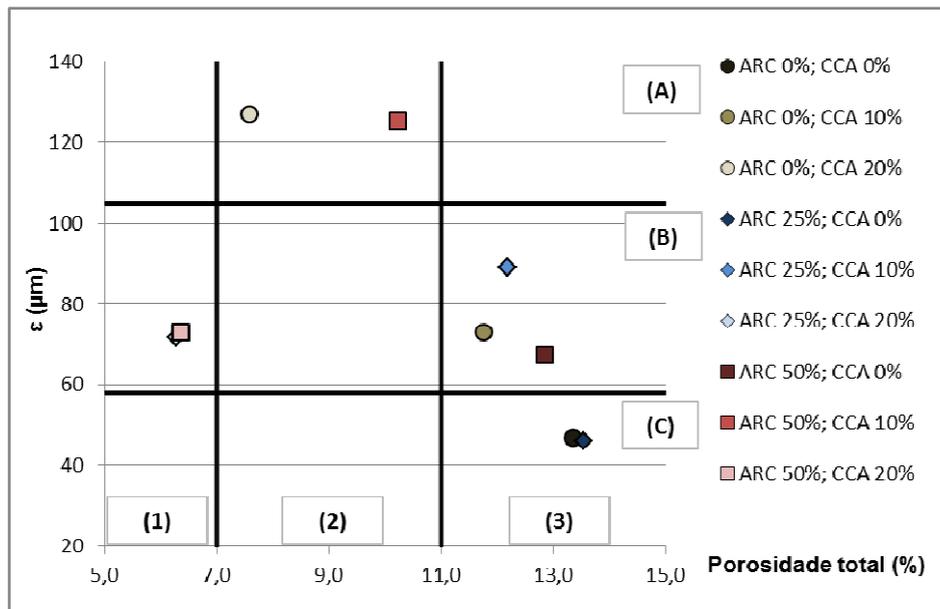


Figura 39 – Valores médios de retração aos 112 dias versus valores médios da porosidade total aos 28 dias.

Na Figura 39 é apresentada a interação entre os valores médios obtidos nos ensaios de retração e porosidade total.

No quadrante denominado 1B, estão localizados os traços de retração intermediária e baixa porosidade total. São os traços: ARC 50% - CCA 20% e ARC 25% - CCA 20%. Para estes traços verifica-se que tanto a retração como a porosidade total não é significativamente alterada.

Para o quadrante 2A, localizam-se os concretos de retração elevada e porosidade intermediária, como: ARC 0% - CCA 20% e ARC 50% - CCA 10%. Para estes traços a diferença entre os valores de retração é pouco significativo, porém os resultados de porosidade total indicam um acréscimo de 25% na porosidade total, considerando do menor para o maior valor apresentado neste quadrante.

No quadrante denominado como 3B, estão localizados os concretos com retração intermediária e maior porosidade, como: ARC 25% - CCA 0%, ARC 0% - CCA 10% e ARC 50% - CCA 0%. Os traços deste quadrante variaram em função da porosidade total de 5 a 9%, enquanto para retração a variação foi de 7 a 24%.

O quadrante 3C tem como característica destes concretos a alta porosidade e baixa retração, os traços locados são: ARC 0% - CCA 0% e ARC 25% - CCA 0%. Para estes traços verifica-se que tanto a retração como a porosidade total não é significativamente alterada.

5 CONCLUSÃO

A seguir serão apresentadas as considerações finais, que respondem os objetivos propostos. Posteriormente, são apresentadas sugestões para futuros trabalhos, onde são identificados alguns temas para pesquisas futuras.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o escopo deste trabalho, são tecidas as considerações finais, conforme segue.

No desenvolvimento da resistência à compressão nas idades de 7, 28, 63, 91 e 112 dias, se consideradas todas as relações água/aglomerante, verifica-se que à medida que é adicionada CCA na mistura, os concretos tendem a aumentar a resistência à compressão principalmente para os concretos com 50% de ARC, o que pode compensar as perdas devidas ao uso de ARC. Obteve-se um aumento de 5% da resistência nos concretos com 50% de ARC e 20% de CCA, quando comparado ao concreto sem ARC e sem CCA.

Para o **desenvolvimento da resistência à tração aos 28 dias a influência da interação entre ARC e CCA**, a análise dos dados indicou um comportamento favorável, uma vez que, a CCA tende a aumentar a resistências à tração com o aumento dos teores de substituição em todos os traços e relações água/aglomerante e para todos os traços com ARC.

Os traços com 50% de ARC e 20% de CCA e com 25% de ARC e 20% de CCA obtiveram resultados na ordem de 1 e 8% maiores, respectivamente, que o concreto de referência, o que torna o comportamento dos concretos com uso associado de ARC e CCA equivalente aos concretos sem CCA e sem ARC;

A **Taxa de Absorção dos concretos**, de maneira geral, é reduzida ao ser empregado tanto o ARC quanto a CCA. Porém, quando na associação entre ARC e CCA a taxa aumenta consideravelmente. Neste quesito a interação entre o ARC e CCA não apresenta um efeito favorável;

Em relação à **Porosidade Capilar o uso combinado de ARC e CCA**, remeteu a um efeito positivo. Foi observada uma redução de poros dos concretos tanto com emprego de CCA quanto com o emprego de ARC, e esta redução é maior ainda quando o uso destes produtos é associado.

A **Influência do ARC e CCA na Porosidade total** foi significativa. Para todos os traços testados o efeito isolado da CCA se apresentou comportamento favorável, reduzindo

significativamente a porosidade total destes concretos. Chegando a patamares de redução de aproximadamente 50% quando comparados traços com 20% de CCA e 0% de CCA.

Quanto à **influência do ARC e CCA no desenvolvimento da retração para as idades de 4,7, 14, 28, 63, 91 e 112 dias**, a associação de resíduos levou a resultados de grande relevância, observando-se uma alteração de comportamento significativo na medida em que se aumentaram os teores de ARC e CCA.

Em um primeiro momento, ao ser inserido 10% de CCA nas misturas com 25% e 50% de ARC, houve acréscimo nos valores de retração. Levantando a hipótese de que a CCA age como um refinador dos poros da mistura, sem, no entanto, reduzir o seu volume total, podendo se chegar à hipótese que, uma maior quantidade de poros com menor dimensão gera maiores retrações.

Num segundo momento, quando é testado o teor de 20% de CCA nos traços com ARC, os dados indicaram uma redução nos valores de retração. O que pode levar à hipótese que, devido ao aumento do percentual de CCA, houve melhor interação com a pozolana e os demais componentes da mistura, agindo então como redutor do volume total de poros e reduzindo assim a retração em maiores níveis de substituição de cimento.

De fato, o que pode ser comprovado, a partir destes ensaios é a grande interação entre ARC e CCA, ficando evidenciada no momento em que se adiciona 20% de CCA no concreto com ARC. Porém mais estudos devem ser realizados, para melhor mensurar esta interação e comprovação das hipóteses.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de melhor aprofundamento em relação aos fenômenos que envolvem a retração no concreto, a sugestão para trabalhos futuros giram em torno da:

- Análise da retração autógena e retração por carbonatação em concreto com ARC e CCA.
- Análise da fluência em concretos contendo ARC e demais tipos de pozolanas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRELA, F.; SÁNCHEZ DE JUAN, M.; AYUSO, J.; GERALDES, V. L.; JIMÉNEZ, J.R. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. **Construction and Building Materials**, v.25, p. 3950-3955, 2011.

AÏTCIN, P. C. **High-Performance Concrete**. London and New York, 1998. 591p;

AMARAL, J.C. **Tensões originadas pela retração em elementos de concreto com deformação restringida considerando-se o efeito da fluência**. 2011. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C157/C157M-08: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete**. Philadelphia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C490/C490M-97: Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete**. Philadelphia, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 597. Standard method for pulse velocity through concrete**. Philadelphia: 1983.

ANGEL, J. D. M.; VÁSQUEZ, T. G. P.; JUNKES, J.A.; HOTZA, D. Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado. **Química Nova**, v. 32, n. 5, p.1110-1114, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45: 2006**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52: 2009**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 53: 2006**. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 67: 1996**. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248: 2003**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5736:1991**. Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738: 2003.** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739: 2007.** Concreto – Ensaio de compressão com corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5752: 2012.** Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118: 2003.** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211: 2005.** Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9935: 1987.** Agregados. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11578: 1991.** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12653: 2012.** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12655: 2006.** Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15112: 2004.** Resíduos na construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15116: 2004.** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

BAZANT, Z. K.P. Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future. **Nuclear Engineering and Design**, v.203, p. 27-38, 2001.

BEAUDOIN, J. J. Miniaturized Techniques. In: RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, Principles, Techniques, and Applications.** New York, p. 403-440, 2001.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto.** 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2012.

BERNDT, M.L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, p.2606-2613, 2009.

BEZERRA, I.M.T.; SOUZA, J.; CARVALHO, J. B. Q.; NEVES, G.A.; Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.6, p.639–645, 2011.

CABRAL, A.E.B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN D.C.C.; RIBEIRO, J.L.D.; RAVINDRARAJAH, R.S.; Modelagem da retração por secagem de concretos produzidos com agregados reciclados. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.3, p.1–23, 2010.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: PINI, 1988. 522p;

CABO, A.D.; LÁZARO, C.; GAYARRE, F.L.; LÓPEZ, M.A.S.; SERNA, P.; TABARES, J.O.C. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v.23, p. 2545-2553, 2009.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 05 de Maio de 2013.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. Durability of conventional concretes containing black rice husk ash. **Journal of Environmental Management**, v.92, p.59-66, 2011.

DAL MOLIN, D. C. C.; KULAKOWISKI, M. P.; RIBEIRO, J. L. D. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil. **Ambiente Construído**, v.5, p.37-49, 2005.

DAMINELI, B.L.; KEMEID, F.M.; AGUIAR, P.S.; JOHN, V.M.; Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement & Concrete Composites**, v.32, p. 555-562, 2010.

DELLINGHAUSEN, M. L. **Retração Total e Penetração de Cloretos em Concretos com Cimento Portland Branco e Escória de Alto Forno**. 2009. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e Preservação Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

DELLINGHAUSEN, M. L.; GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; VEIGA, K. K. Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno. **Ambiente Construído**, v.9, n.4, p.49-65, 2009.

DINIZ, J.Z.F.; FERNANDES, J.F.; KUPERMAN, S.C. Retração e Fluência. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, v. 1, p. 673-704, 2011.

DUART, M.A.; TAGHI, M.K.; KOLLING, E.M.; FILLIPINI, G.; MALDANER, R.P.; Modificação da porosidade em concretos com adição mineral de cinza de casca de arroz. In: **Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis**, 2011.

DUAN, P.; SHUI, Z.; CHEN, W.; SHEN, C. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v.44, p.1-6, 2013.

ERDEM, S.; DAWSON, A.R.; THOM, N.H. Influence of the micro and nanoscale local mechanical properties of the interfacial transition zone on impact behavior of concrete made with different aggregates. **Cement and Concrete Research**, v.42, p. 447-458, 2012.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v.37, p.735-742, 2007.

FATHIFAZL, G.; RAZAQPUR, A.G.; ISGOR, O.B.; ABBAS, A.; FOURNIER, B.; FOO, S. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v.33, p.1026-1037, 2011.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz na penetração de íons cloreto em concretos com agregado reciclado de concreto**. 2013. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2013.

FERRARIS, C.F.; WITTMANN, F.H. Shrinkage Mechanisms of Hardened Cement Paste. **Cement and Concrete Research**, v.17, p.453-464, 1987.

GIVI, A. N. et al. Contribution of Rice Husk Ash to the Properties of Mortar and Concrete: A Review. **Journal of American Science**, v. 6, n.3, p. 157- 165, 2010.

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

GRASSL, P.; WONG, H.S.; BUENFELD, N.R. Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar. **Cement and Concrete Research**, v.40, p.85-93, 2010.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; KARAOGLU, S.; MERMERDAS, K. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. **Construction and Building Materials**, v.34, p.120-130, 2012.

HANSEN, T.C. Drying shrinkage of concrete due to capillary action. In: WEISS, J. **Materials and Structures**. Springer, v.2, p. 7-9, 1969.

HASPARYK, N.P.; LOPES, A.N.M.; ANDRADE, M.A.S.; SANTOS, S.B. Deformações por retração e fluência. In: ISAIA, G. C. **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo, IBRACON, v. 2, p.655-685, 2005.

ISAIA, G.C. A água no Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, v. 1, p.311-346, 2011.

ISAIA, G.C. O concreto: da era clássica à contemporânea. In: ISAIA, G. C. **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo, IBRACON, v.1, p. 1-43, 2005.

ISAIA, G.C. A Evolução do Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, v. 1, p.1-56, 2011.

ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G.; MEIRA, L.; DUART, M.; ZERBINO, R. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.10, n.1, p. 121-137, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Notícias**. Disponível em: <<http://saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias?view=noticia&id=1&busca=1&idnoticia=2304>>. Acesso em: 08 de Abr. 2013.

LOPES, A.N.M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura**. 2011. 278f. Tese (Doutor em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

MASSAZZA, F. Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: Hewlett, P. C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. New York, p. 471-635, 1988.

KAGE, T.; OHNO, Y. Evaluation on Drying Shrinkage of Concrete Using Shrinkage Reducing Admixtures. In: **International Conference on Durability of Building Materials and Components**, 2011, Porto, Portugal.

KAR, A.; RAY, I.; UNNIKRISHNAN, A.; DAVALOS, J. F. Composite modeling to predict shrinkage of concretes containing supplementary cementitious materials from paste volumes. **Construction and Building Materials**, v.43, p. 337-347, 2013.

KATAOKA, L.T. **Análise da deformabilidade por fluência e retração e sua utilização na monitoração de pilares de concreto**. 2010. 228f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

KELHAM, S. **A water absorption test for concret**. Magazine of Concrete Reserch, v.40, p.106-110, June 1988.

KOU, S.C.; POON, C.S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. **Cement & Concrete Composites**, v.37, p.12-19, 2013.

KOVLER, K.; ROUSSEL, N. Properties of fresh and hardened concrete. **Cement and Concrete Research**, v.41, p.775-792, 2011.

KRUG, L.F. **Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza de casca de arroz: estudo como adição pozolânica em concretos**. 2011. 126f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

KULAKOWSKI, M.P. **Associação de agregado reciclado de concreto com cinza de casca de arroz na produção de concretos**. 2011. 40f. Projeto de pesquisa aprovado no do Edital PRONEM/FAPERGS/CNPq n. 003/2011 - Programa de Apoio a Núcleos Emergentes.

LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, p. 439-449, 2012.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete research**. v. 19, p. 63-68, 1989.

MAPA – MINISTÉRIO DA CULTURA E DO ABASTECIMENTO. **Arroz**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz>>. Acesso em: 08 de Abr. 2013.

MARQUES, A. C.; BITTENCOURT, T. N. Comparação entre resultados experimentais de retração em concreto auto adensável e diferentes modelos de previsão. In: **Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2011**.

MC-BAUCHEMIE. **Fichas de Segurança**. Disponível em: <<http://www.mc-bauchemie.com.br/datasheets.aspx>>. Acesso em: 15 de Jan. 2013.

MEDDAH, M.S.; SUZUKI, M.; SATO, R. Influence of a combination of expansive and shrinkage-reducing admixture on autogenous deformation and self-stress of silica fume high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v.25, p.239-250, 2011.

MEHTA, P. K. Advancements in Concrete Technology. **Concrete International**, p.69-76, 1999.

MEHTA, P.K. Volume change. In: KLIEGER, P.; LAMOND, J.F. **Significance of Testing and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials**, ASTM STP169C, p.219 – 228, 1994.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 573p.

MERMERDAS, K., GÜNEYISI, E., GESOG, M., ÖZTURAN, T. Experimental evaluation and modeling of drying shrinkage behavior of metakaolin and calcined kaolin blended concretes. **Construction and Building Materials**, v.43, p.337-347, 2013.

MITIDIERI FILHO, C.V. Qualidade e Desempenho na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípio da Ciência dos Materiais**. São Paulo, IBRACON, v.1, p. 37-74, 2010.

NETO, A.A.M.; REPETTE, W.L; CINCOTTO, M.A.; Efeito do teor de ativador na retração autógena do cimento de escória ativada com silicato de sódio. **e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, v.3, n.1, p.13-26, 2006.

NEVILLE, A M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

NUNES, N.L.; FIGUEIREDO, A.D. Retração do concreto de cimento Portland. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil**, São Paulo, p.1-59, 2007.

OHNO, Y.; MASUDA, Y.; KAGE, Y. Experimental Study on Influence of Environmental Condition and Materials to Drying Shrinkage of Concrete. **In: International Conference on Durability of Building Materials and Components**, 2011, Porto, Portugal.

PERECHIO, W.F. The Drying Shrinkage Dilemma. **Concrete Construction**, v.42, n.4, p.379-383, 1997.

POLIVKA, M., AND MEHTA, P. K. Use of Aggregates Producing High Shrinkage with Shrinkage-Compensating Cements. **Living with Marginal Aggregates, ASTM STP 597**, p. 36–583, 1975.

RAY, I.; GONG, Z.; DAVALOS, J.F.; KAR, A. Shrinkage and cracking studies of high performance concrete for bridge decks. **Construction and Building Materials**, v.28, p.244-254, 2012.

ROMAN, L.M.F.; JOBIM, M.S.S.; ROMAN, H.R.; BATTAGIN, I.L.S. Normalização na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípio da Ciência dos Materiais**. São Paulo, IBRACON, v.1, p. 75-96, 2010.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P.; MAHACHAI, R. Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v.16, p. 242-247, 2009.

SANTOS, F. I. G.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Influência da cinza pesada empregada em substituição ao agregado natural nos mecanismos de transferência de umidade em argamassas. **Revista Matéria**, v. 12, p. 253-268, 2007.

SARTORI, B.R.C. **Propriedades de concretos com adição de cinza de casca de arroz e agregado reciclado de concreto, dando ênfase à carbonatação**. 2012. 55p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2013 – Em desenvolvimento.

SARTORI B. R. C.; FEDUMENTI M.B; KULAKOWSKI M.P; KAZMIERCZAK C.S. Estudo da carbonatação em concretos com adição de cinza de casca de arroz e agregado reciclado de concreto. **III Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil**, São Leopoldo, 2013.

SENISSE, J.A.L.; DAL MOLIN, D.C.C.; ABITANTE, A.L.R. Influência da adição de microfibras de polipropileno no fenômeno da retração por secagem em concretos empregados em pisos. In: **VI Congresso Internacional Sobre Patología y Recuperación de Estructuras, Córdoba**, 2010.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. Rice Husk Ash. **Supplementary Cementing Materials. Chemistry and Materials Science**. Engineering Materials. v. 37, p. 231-281, 2011.

SIDERIS, K. K.; ANAGNOSTOPOULOS, N.S. Durability of normal strength self-compacting concretes and their impact on service life of reinforced concrete structures.

Construction and Building Materials, v.41, p.491-497, 2013.

STOITCHKOV, V.; ABADJIEV, P.; LILKOV, V.; VASILEVA, V. Effect of the "Pozzolit" Active Mineral Admixture on the Properties of Cement Mortars and Concretes Part 1: Physical and Mechanical Properties. **Cement and Concrete Research**, v.26, p.1065-1071, 1996.

TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1163-1167, 2009.

TANGCHIRAPAT, W.; BURANASING, R.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 22, p.1812-1819, 2008.

TASHIMA, M. M.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; BERNABEU, J. P.; SOUSA, L. C.; MELGES, J. L. P.; Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambiente Construído**, v.12, n.2, p.151-163, 2012.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. London, 1997. 459p.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

WERLE, A.P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação**. 2010. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

WONG, H.S.; ZOBEL, M.; BUENFELD, N.R.; ZIMMERMAN, R.W. Influence of the interfacial transition zone and microcracking on the diffusivity, permeability and sorptivity of cement-based materials after drying. **Magazine of Concrete Research**, v.61, p.571-589, 2009.

YAZDANI, N.; FILSAIME, M.; MANZUR, M.; Effect of Steam Curing on Shrinkage of Concrete Piles with Silica Fume. **In: Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**, 2010, Ancona, Itália.

YOO, W.S.; KWON, S.; JUNG, S.H. Analysis technique for autogenous shrinkage in high performance concrete with mineral and chemical admixtures. **Construction and Building Materials**, v.34, p.1-10, 2012.

ZEGA, C. M.; DI MAIO, A. A. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. **Waste Management**, v. 31, p. 2336-2340, 2011.

APÊNDICE

Tabela A1 - Resultados de cada corpo de prova para ensaio de compressão.

CCA (%)	ARC (%)	a/agl	7 dias	28 dias	63 dias	91 dias	112 dias
0	0	0,42	36,9	37,9	47,8	47,1	46,1
		0,42	36,9	40,8	47,9	48,7	46,4
0	0	0,53	35,2	41,4	44,4	47,1	48,3
		0,53	35,3	41	42,2	47,2	45,6
0	0	0,64	20,2	24,3	26,3	26,9	26,8
		0,64	20,9	24,4	26,2	26,6	27,2
10	0	0,42	42,1	47	51,1	50,1	45,1
		0,42	41,6	47	49,4	51,7	58,8
10	0	0,53	25,7	33,1	36,4	40,3	34,4
		0,53	25,7	33,4	36,5	40,3	32,3
10	0	0,64	18,1	26,5	31,3	31,2	30
		0,64	18,1	26,6	31,5	29,5	32,8
20	0	0,42	40,2	47,7	43,9	49,2	43,4
		0,42	41	50,3	41,5	55,4	29,8
20	0	0,53	27,3	36,5	32,3	42,2	29,3
		0,53	28,5	37,3	34,6	42,6	31,5
20	0	0,64	20	28,5	29,1	31,8	33,1
		0,64	19,8	29,6	29,5	32,2	29,9
0	25	0,42	34,8	37	43,5	40,6	42,9
		0,42	34,2	37,9	46,1	37,3	40,3
0	25	0,53	24,1	33,2	33,9	34,8	33,4
		0,53	24,5	29,9	33,8	32,3	34,5
0	25	0,64	23,2	20,2	20,3	23,5	22,6
		0,64	26,5	20,5	18,4	24,3	22,6
0	50	0,42	38	46,6	56,4	42,4	44,1
		0,42	36,3	41,8	43,9	46,1	42,2
0	50	0,53	25,6	33,3	39,6	36,7	32,1
		0,53	25,1	33,7	36,3	32,2	34,5
0	50	0,64	22,9	24,9	30,6	25,4	28,9
		0,64	20,2	25	30,5	23,1	31,4
10	25	0,42	35,3	50	45,9	43,2	56,2
		0,42	34,7	52,6	52,4	44,4	54,2
10	25	0,53	22,1	34,1	40,7	35,3	43,8
		0,53	21,9	36,2	34,6	37,6	41,1
10	25	0,64	17	22,3	28,7	26,5	33,7
		0,64	17,3	23,4	28,9	27,6	34,8
10	50	0,42	34,5	42,4	32,1	53,4	49,5
		0,42	33,5	42,6	44,6	53,7	37,7
10	50	0,53	22,8	33,5	42,8	41,5	41,4
		0,53	24,7	33,2	39,9	41,3	40,3

10	50	0,64	20,4	27,2	32,2	30,2	28,5
		0,64	19,6	26,9	30,6	30,7	31,7
20	25	0,42	39,4	55,2	44,9	40,7	52,7
		0,42	40,5	53,7	42,2	44,1	53,6
20	25	0,53	28,6	34,1	42,7	42,4	45,3
		0,53	28,5	33,7	43,3	43,6	45,7
20	25	0,64	20,7	22,3	32,1	36,3	35,5
		0,64	20,6	24,3	33,2	30,3	38,3
20	50	0,42	40,3	50,7	50,3	49,2	32
		0,42	41,5	50,2	49,2	46,1	38,9
20	50	0,53	26,5	41,7	39,9	48,5	46,4
		0,53	27,5	41,9	38,6	48,9	46,7
20	50	0,64	20,9	29,1	33,4	40,5	36,9
		0,64	20,5	31,8	31,4	38,2	34,1
