



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

**ESTUDO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS COM
AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO E
CINZA DE CASCA DE ARROZ**

BRUNO ROMMEL CATTANI SARTORI

São Leopoldo, julho de 2013.

BRUNO ROMMEL CATTANI SARTORI

**ESTUDO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS COM
AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO E
CINZA DE CASCA DE ARROZ**

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.

Orientador: Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Banca examinadora: Prof. Antônio Eduardo B. Cabral –
Universidade Federal Ceará
Prof. Claudio de Souza
Kazmierczak – Universidade
Federal do Rio dos Sinos

São Leopoldo, julho de 2013.

S251e Sartori, Bruno Rommel Cattani
Estudo da carbonatação em concretos com agregado graúdo reciclado de concreto e cinza de casca de arroz / por Bruno Rommel Cattani Sartori. -- São Leopoldo, 2013.

118 f. : il. color. ; 30 cm.

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

Orientação: Prof^ª Dr^ª Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski, Escola Politécnica.

1.Concreto. 2.Agregados (Materiais de construção). 3.Concreto – Mistura. 4.Agregado reciclado de concreto. 5.Cinza de casca de arroz. 6.Carbonatação. I.Kulakowski, Marlova Piva. II.Título.

CDU 666.972
666.972.12
666.972.123

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

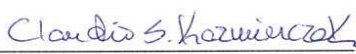
BRUNO ROMMEL CATTANI SARTORI

**“ESTUDO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS COM
AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO E
CINZA DE CASCA DE ARROZ”**


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


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak - UNISINOS

“Transportai um punhado de terra todos os dias e fareis uma montanha” (Confúcio).

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA



FAPERGS

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

Edital 03/2011 - PRONEM
Programa de Núcleos Emergentes



*Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico*

BOLSA DE ESTUDOS PE. MILTON VALENTE

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família, que me apoiou de várias maneiras para que eu conseguisse concluir este árduo trabalho, meus pais, o Engº Cirlei, minha mãe Ione e meus irmãos Marluci e Igor. Sem o apoio deles nada seria possível.

Agradeço a todos os meus amigos que fazem com que um dia pacato se passe como um dia mais interessante, apenas com algumas palavras ou com a presença.

Agradeço aos colegas de mestrado e aos laboratoristas do LMC, em especial aos colegas que trabalharam juntamente comigo neste projeto, o Vínicio Cecconello e a Mariana Fedumenti.

Agradeço à minha orientadora Marlova, por me orientar e por dispor de seu tempo para que eu pudesse terminar esta dissertação.

Agradeço aos bolsistas (Vagner , Jean, Tatiane e a Jéssica), que me auxiliaram na obtenção dos dados.

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

Obrigado à Coneresart, pela doação do cimento, areia e agregado basáltico utilizada no projeto.

Aos órgãos de fomento à pesquisa a FAPERGS e FINEP, pelo financiamento da pesquisa, e ao Pe. Milton Valente, pela concessão da bolsa de estudos.

Agradeço à minha namorada Marina, por ser muito compreensiva comigo e me acompanhar por tanto tempo. O amor nada é senão duas pessoas que são apaixonadas e que compartilham uma grande amizade entre si.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA	25
1.2	HIPÓTESES DE PESQUISA	25
1.3	OBJETIVOS	26
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	26
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	26
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	DURABILIDADE DE CONCRETOS.....	29
2.1.1	<i>Carbonatação em concretos</i>	29
2.1.2	<i>Fatores que influenciam na carbonatação de concretos</i>	30
2.1.3	<i>Carbonatação em concretos com agregados reciclados e adições minerais</i>	35
2.2	PROPRIEDADES DO AGRC E DA CCA.....	36
2.2.1	<i>Características e propriedades dos agregados graúdos provenientes de concreto reciclado</i>	37
2.2.2	<i>Características e propriedades da cinza de casca de arroz</i>	40
2.3	CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO E DE POZOLANAS.....	41
2.3.1	<i>Propriedades de concretos produzidos com cinza de casca de arroz</i>	41
2.3.2	<i>Propriedades de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto e de pozolanas</i>	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	51
3.1.1	<i>Fatores de controle</i>	51
3.1.2	<i>Variáveis de resposta</i>	52
3.2	MATERIAIS.....	52
3.2.1	<i>Cimento</i>	52
3.2.2	<i>Cinza de casca de arroz</i>	53
3.2.3	<i>Agregado Miúdo Natural (AMN)</i>	57
3.2.4	<i>Agregado Graúdo Natural (AGN)</i>	58
3.2.5	<i>Agregado Graúdo Reciclado de Concreto (AGRC)</i>	59
3.2.6	<i>Água</i>	61
3.3	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	61
3.3.1	<i>Produção dos concretos</i>	61
3.3.2	<i>Moldagem e cura dos corpos de prova</i>	62
3.3.3	<i>Sazonamento</i>	63
3.4	MÉTODOS	66
3.4.1	<i>Ensaio de Resistência à Compressão</i>	66
3.4.2	<i>Ensaio de Resistência à Tração</i>	66
3.4.3	<i>Ensaio de absorção d'água</i>	66
3.4.4	<i>Ensaio Acelerados de Carbonatação</i>	66
3.4.5	<i>Medidas para Verificar a Profundidade de Carbonatação</i>	68
3.4.6	<i>Análise Estatística</i>	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	71
4.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	74
4.3	CARBONATAÇÃO ACELERADA	77
4.4	TAXA DE ABSORÇÃO CAPILAR	82
4.5	RELAÇÃO ENTRE TAXA DE ABSORÇÃO CAPILAR COM CARBONATAÇÃO ACELERADA	85
4.6	POROSIDADE TOTAL.....	87
4.7	RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	90

5 CONCLUSÃO	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICES.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração de CO ₂ típicas em alguns ambientes.	31
Tabela 2 – Teor de CO ₂ utilizado por alguns autores em ensaios carbonatação acelerada.	32
Tabela 3 - Resultados de massa específica e unitária.	38
Tabela 4 – Fatores de controle e fatores de controle com apenas um nível.	52
Tabela 5 – Caracterização física, química e mecânica do cimento utilizado.	53
Tabela 6 – Caracterização química da cinza de casca de arroz.	54
Tabela 7 – Caracterização da atividade pozolânica da CCA.	55
Tabela 8 - Valores de massa unitária e específica do agregado miúdo natural utilizada na pesquisa.	58
Tabela 9 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural utilizado na pesquisa.	58
Tabela 10 - Valores de massa unitária e específica do agregado graúdo natural utilizada na pesquisa.	59
Tabela 11 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural utilizado na pesquisa.	59
Tabela 12 – Granulometria do AGRC.	60
Tabela 13 – Consumo dos materiais empregados para cada traço.	62
Tabela 14- Média de resistência à compressão axial nas idades estudadas.	71
Tabela 15- Equações das curvas de Abrams.	73
Tabela 16- Resistência à tração aos 28 dias.	74
Tabela 17 – ANOVA para resistência à tração.	75
Tabela 18 - ANOVA do modelo para profundidade de carbonatação.	77
Tabela 19 - Parâmetro das variáveis analisadas para profundidade de carbonatação.	78
Tabela 20 - ANOVA do modelo para taxa de absorção por capilaridade.	83
Tabela 21 - Parâmetro das variáveis analisadas para taxa de absorção por capilaridade.	83
Tabela 22 - ANOVA do modelo para porosidade total.	87
Tabela 23 - Parâmetro das variáveis analisadas para porosidade total.	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma do GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem.	24
Figura 2 - Reação de carbonatação.	30
Figura 3 - Fatores intervenientes na carbonatação de concretos.	31
Figura 4 - Influência da cura e da relação água/cimento na carbonatação do concreto obtida por procedimento acelerado, com cimento CII F 32.	35
Figura 5 - Interface do agregado reciclado com a nova pasta.	44
Figura 6- Etapas resumidas do programa experimental.	51
Figura 7 - Etapas do programa experimental pela linha do tempo.	51
Figura 8 – Difractograma de Raios X da Cinza de casca de arroz.	54
Figura 9 – Distribuição granulométrica da cinza de casca de arroz.	55
Figura 10 – Micrografia da cinza de casca de arroz (aumento de 4500x).	56
Figura 11 – Micrografia de pasta de cimento (48 horas), com aumento de (4500 X).	56
Figura 12 – Micrografia de pasta de cimento com CCA (48 horas), aumento de (4500X).	57
Figura 13 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural utilizada na pesquisa. ..	58
Figura 14 – Curva de Absorção de água do AGRC.	60
Figura 15 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural (AGN) e do agregado reciclado de concreto (AGRC) utilizado na pesquisa.	60
Figura 16 – Corpos de prova selados em embalagens impermeáveis.	65
Figura 17 – Corpo de prova selado em embalagens impermeáveis com sua devida caracterização e peso.	65
Figura 18 – Câmara de carbonatação utilizada para a carbonatação acelerada dos corpos de prova.	67
Figura 19 - Sistema explicativo dos aparelhos para realização do ensaio acelerado de carbonatação.	67
Figura 20 – Fragmento de corpo de prova aos 28 dias de carbonatação acelerada submetido à aspersão de fenolftaleína.	68
Figura 21 – Limitação da área de medição do fragmento de corpo de prova aos 28 dias de carbonatação acelerada submetido à aspersão de fenolftaleína inserida no Software AutoCad.	69
Figura 22 – Médias das 15 medições equidistantes do corpo de prova da Figura 21.	69
Figura 23 – Resistência à compressão aos 28 dias para concretos sem AGRC.	72
Figura 24 – Resistência à compressão aos 28 dias para concretos com 25% de AGRC.	72
Figura 25 – Resistência à compressão aos 28 dias para concretos com 50% de AGRC.	72
Figura 26 – Efeito isolado da variável CCA no comportamento da resistência à tração.	75
Figura 27 – Efeito isolado da variável AAgI no comportamento da resistência à tração.	76
Figura 28 – Efeito isolado da variável AGRC no comportamento da resistência à tração.	76
Figura 29 – Relação entre a profundidade de carbonatação acelerada calculada e observada.	78
Figura 30 – Valores de profundidade de carbonatação observados e calculados aos 64 dias de exposição com 0% de substituição de AGN por AGRC.	79
Figura 31 – Valores de profundidade de carbonatação observados e calculados aos 64 dias de exposição com 25% de substituição de AGN por AGRC.	79
Figura 32 – Valores de profundidade de carbonatação observados e calculados aos 64 dias de exposição com 50% de substituição de AGN por AGRC.	80
Figura 33 – Corpo de prova submetido a fenolftaleína após três dias de carbonatação acelerada.	82
Figura 34 – Relação entre a taxa de absorção capilar calculada e observada.	83

Figura 35 – Valores de taxa de absorção capilar observados e calculados sem substituição de AGN por AGRC.....	84
Figura 36 – Valores de taxa de absorção capilar observados e calculados com 25% de substituição de AGN por AGRC.....	84
Figura 37 – Valores de taxa de absorção capilar observados e calculados com 50% de substituição de AGN por AGRC.....	84
Figura 38 – Relação entre taxa de absorção capilar e coeficiente de carbonatação em concretos sem substituição de AGN por AGRC.....	86
Figura 39 – Relação entre taxa de absorção capilar e coeficiente de carbonatação em concretos com 25% de substituição de AGN por AGRC.	86
Figura 40 – Relação entre taxa de absorção capilar e coeficiente de carbonatação em concretos com 50% de substituição de AGN por AGRC.	86
Figura 41 – Relação entre a porosidade total calculada e observada.....	88
Figura 42 – Valores de porosidade total observados e calculados sem substituição de AGN por AGRC.	88
Figura 43 – Valores de porosidade total observados e calculados com 25% de substituição de AGN por AGRC.....	89
Figura 44 – Valores de porosidade total observados e calculados com 50% de substituição de AGN por AGRC.....	89
Figura 45 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e o coeficiente de carbonatação aos 64 dias.....	90
Figura 46 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e o consumo de cimento. .	92

LISTA DE ABREVIATURAS

A/AGL - água/aglomerante

AGN - agregado graúdo natural

ARC - agregado reciclado de concreto

AGRC - agregado graúdo reciclado de concreto

CCA - cinza de casca de arroz

RSU - resíduo sólido urbano

PPGEC - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

RESUMO

SARTORI, B. R. C. **Estudo da carbonatação em concretos com agregado graúdo reciclado de concreto e cinza de casca de arroz.** 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. 2013.

Este trabalho tem por finalidade contribuir para os estudos de durabilidade de concretos com a inserção de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) e de cinza de casca de arroz (CCA) em concretos frente à carbonatação. Trabalhando com a hipótese de que o emprego de CCA possa mitigar o efeito da alta porosidade do AGRC nas propriedades do concreto, foram produzidos concretos com 0, 25 e 50% de AGRC; 0, 10 e 20% de CCA e relações água/aglomerante iguais a 0,42, 0,53 e 0,64. Para o ensaio de carbonatação acelerada, utilizou-se uma câmara de carbonatação com alimentação contínua de solução gasosa a 3% de CO₂ e umidade relativa controlada, na qual os concretos permaneceram durante 63 dias. Os resultados apontaram para um efeito positivo do emprego de CCA nos concretos produzidos com AGRC. A substituição de cimento por CCA em média pode aumentar a resistência à compressão e à tração. Os concretos com relação a/agl 0,42, para a grande parte dos concretos ensaiados, retornaram resistências à compressão de 40 MPa à 55 MPa, com coeficiente de carbonatação de 1,0mm/dia^{1/2} a 1,5 mm/dia^{1/2}, independente do teor de CCA. No entanto, concretos com relação a/agl mais alta (0,64), apresentaram resistência entre 15 MPa e 30 MPa, sendo que para grande parte destes o coeficiente de carbonatação se apresenta na faixa abaixo dos 3,0 mm/dia^{1/2} e acima do 2,0 mm/dia^{1/2}.

Palavras-chave: agregado reciclado de concreto; cinza de casca de arroz; carbonatação.

ABSTRACT

SARTORI, B. R. C. **Study of carbonation in concrete with recycled coarse aggregate concrete and rice husk ash.** 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. 2013.

This research contributes to the study of concrete carbonation using recycled concrete coarse aggregates (RCA) and rice husk ash (RHA). The use of RHA may contribute to reduce the effects of RCA's high porosity on the properties of the concrete. It was used 0, 25 and 50% of RCA in replacement of natural aggregate; 0, 10 and 20% of RHA as cement replacement; and water/binder 0.42, 0.53 and 0.64. For the accelerated carbonation test it was used a carbonation chamber with continuous feeding gaseous solution at 3% CO₂ and controlled relative humidity, where the concrete samples remained for 63 days. The results point to a positive effect of the use of RHA in concrete produced with RCA. Concretes with water/binder 0.42, for the most of the concrete tested, resulted in a compressive strength of 40 MPa to 55 MPa, with carbonation coefficient of 1.0mm/day^{1/2} to 1.5 mm/day^{1/2}, independent of the amount of the RHA. However, concretes with higher water/binder (0.64) showed resistance between 15 MPa and 30 MPa, and for most of these the carbonation coefficient is below 3.0 mm/day^{1/2} and above 2.0 mm/day^{1/2}.

Key-words: recycled concrete coarse aggregate, rice husk ash, concrete carbonation.

1 INTRODUÇÃO

Com a grande quantidade de solicitações submetidas ao setor da construção civil, no país nos últimos anos pelo crescimento econômico e pelos programas de financiamento, há um grande aumento de resíduos gerados, e surgem preocupações quanto à sua destinação. Segundo Amadei et al. (2011), no Brasil, os resíduos gerados na construção civil, denominados resíduos de construção e demolição – (RCD)¹, ocupam em torno de 50% em volume do resíduo sólido urbano (RSU).

Uma das alternativas para diminuir o impacto ambiental e os volumes dos RSU que o RCD causa. Pode ser possivelmente uma alternativa viável, é incorporar em concretos o agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC). Dentre a variedade de componentes que fazem parte do RCD, a fração de concreto é ligeiramente significativa e por ser um material com propriedades mecânicas consideravelmente adequadas e com propriedades similares a matriz. Entre outros fatores, o AGRC vem sendo aplicado como agregado graúdo ou miúdo em produção de novos concretos.

O agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) já vem sendo utilizado em matrizes cimentícias por algumas empresas, mas, mesmo assim, necessita de uma gama de estudos para averiguar a sua influência real, pois o AGRC é muito variável e necessita de limitadores para que se possa prever melhor seu comportamento. Um dos problemas do uso do AGRC em concreto é o aumento da porosidade, pois contem argamassa aderida ao agregado natural (BUTTLER, 2003).

A cinza proveniente da queima da casca de arroz ainda é, em grande parte, um resíduo do ciclo do arroz e é chamada de cinza residual. No entanto, com a queima controlada, essa cinza já está virando um coproduto de valor agregado. No Rio Grande do Sul, já existem centrais termoelétricas de pequeno porte gerando energia a partir da queima da casca do arroz, o que origina uma cinza homogênea que já é comercializada como super pozolana.

Neste trabalho, parte-se da hipótese de que, ao aplicar o AGRC juntamente com as cinzas de casca de arroz (CCA), em particular a CCA comercial, pode-se melhorar as condições de porosidade desses concretos, e, conseqüentemente, diminuir a perda de durabilidade quando se substitui o agregado convencional por agregado reciclado.

¹ Ao contrário do CONAMA 307, que abrevia esse tipo de resíduo por RCC, em publicações técnicas o mais comum é a utilização de RCD.

Dessa forma, o tema da presente proposta se refere à reciclagem de resíduos e à durabilidade de materiais com ênfase na carbonatação, inserindo-se em ambas as linhas de pesquisa do PPGEC, conforme Figura 1.

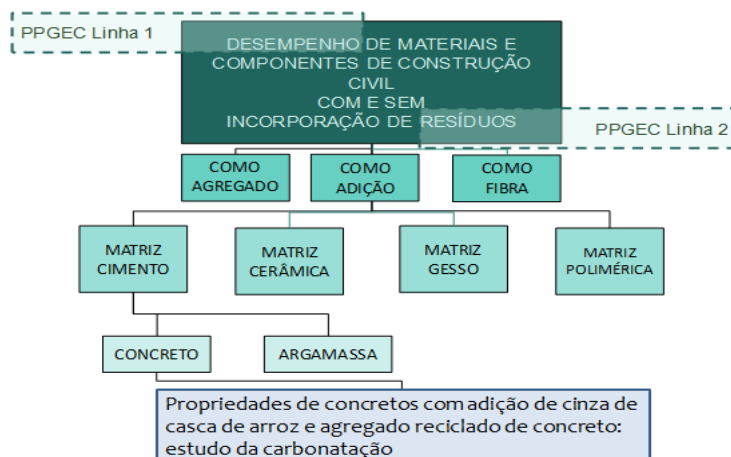


Figura 1 – Organograma do GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem.

Fonte: Adaptado de Kulakowski (2011).

Esta proposta está vinculada a dois projetos em desenvolvimento no PPGEC – 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”. Nesse tema se insere o Subprojeto 2 - *Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e elementos construtivos inovadores – componentes que incorporam resíduos de concreto*, cujo objetivo geral é “Definir uma metodologia para a avaliação da durabilidade de sistemas inovadores que incorporem agregados reciclados em matrizes de concreto e de 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*. Nele o estudo do desempenho mecânico e de durabilidade desses concretos é previsto.

1.1 JUSTIFICATIVA

Como os recursos naturais são uma fonte limitada e de ampla necessidade para o desenvolvimento socioeconômico, é inadiável a necessidade de gerenciar e de reduzir os impactos ocasionados pelo homem ao ambiente.

Um aspecto importante que deve ser ressaltado são as emissões ocasionadas pela fabricação dos materiais na construção, gerando um nível alto de liberação de CO₂ na atmosfera. Por exemplo, desde 1751, cerca de 347 milhões de toneladas de gás carbônico foram liberadas na atmosfera. As emissões geradas pela queima de combustíveis fósseis para a produção de cimento (386 milhões de toneladas métricas de carbono em 2008) duplicaram desde meados dos anos 1970 e agora representam 4,4% de liberação mundial de CO₂ (CDIAC, 2013).

Além dessa problemática, os materiais na construção civil têm uma alta taxa de descarte. Entre os resíduos de construção e demolição (RCD), para aplicação em concretos com agregado reciclado o resíduo de concreto é o que se destaca, pois possui o maior potencial de uso, é mais homogêneo e apresenta menor grau de contaminação se comparado aos RCD mistos. A geração desses resíduos pode ser proveniente de demolições de edificações, da produção de elementos de concreto pré-moldados, bem como de usinas de concreto. Um olhar especial vem sendo dado para os resíduos de concreto na produção de agregados reciclados, pois vários autores (Torgal et al. 2012; Corinaldesi et al., 2009, Werle, 2011 e Troian, 2011), entre outros, vêm tentando compreender essa nova variável se inserida em concretos.

1.2 HIPÓTESES DE PESQUISA

O desenvolvimento de uma pesquisa deve ser fundamentado em hipóteses de pesquisa que podem ser confirmadas ou derrubadas ao concluir a mesma. Esta proposta de dissertação se baseia nas seguintes hipóteses:

- O emprego de cinza de casca de arroz a 10% e 20% em substituição do cimento diminui a porosidade do concreto;
- A cinza de casca de arroz nos teores de 10% e 20% na substituição do cimento diminui a velocidade de penetração da frente de carbonatação em concretos produzidos com AGRC.

1.3 OBJETIVOS

Com base nas hipóteses de pesquisa apresentadas, são estabelecidos os objetivos desta pesquisa, conforme segue.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar concretos substituindo agregados naturais graúdos (AGN) por agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), e substituição de cimento por cinza de casca de arroz (CCA), frente à carbonatação.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar o emprego de AGRC em concretos convencionais na profundidade carbonatada, na resistência à compressão e na resistência à tração;
- Analisar o emprego de CCA em concretos convencionais na profundidade carbonatada, na resistência à compressão e na resistência à tração;
- Avaliar a taxa de absorção e a porosidade dos concretos analisados;
- Verificar a ação conjunta da inserção de AGRC e CCA, durante o processo de carbonatação acelerada, e sua relação com a resistência à compressão.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro há a introdução, a justificativa e os objetivos, os quais apresentam a problemática, os fundamentos do estudo e o propósito do mesmo.

O segundo capítulo compreende a revisão bibliográfica acerca dos temas de propriedades dos materiais de AGRC, massa específica e unitária, distribuição granulométrica, forma e textura dos grãos, porosidade e absorção d'água, propriedades da CCA, concretos produzidos com AGRC e CCA, fatores que influenciam na carbonatação, concentração de CO₂, temperatura e umidade relativa, influência da relação a/agl, cimento e suas adições, condições de cura.

No capítulo três, apresentam-se os materiais e métodos, e compreende-se nele o programa experimental, especificando os tipos de materiais utilizados, e as quantidades, também os métodos empregados para a obtenção dos resultados.

No quarto capítulo, há os resultados obtidos durante a pesquisa e sua análise estatística. No quinto, são apresentadas as conclusões a cerca dos resultados analisados. Após, são apresentadas as referências bibliográficas e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a revisão bibliográfica, buscou-se um embasamento teórico para os temas abordados no trabalho, bem como para a organização e condução do programa experimental e análise dos resultados.

2.1 DURABILIDADE DE CONCRETOS

O conhecimento sobre durabilidade de estruturas de concreto é fundamental para auxiliar na previsão do comportamento do concreto a longo prazo, prevenir manifestações patológicas precoces nas estruturas, contribuir para a sustentabilidade, economia e durabilidade das mesmas (MEDEIROS et. al. 2011).

São vários os parâmetros que interferem na durabilidade das estruturas de concreto, podem-se citar alguns: temperatura, amplitude térmica, chuva, umidade relativa e tempo de superfície úmida; chuva ácida, vento, chuva dirigida e poluentes (LIMA, 2011).

A presença de poluentes, tais como o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera, é um dos principais fatores desencadeantes do processo de carbonatação do concreto e da consequente corrosão das armaduras (LIMA, 2011).

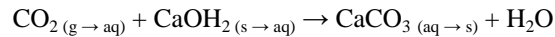
2.1.1 Carbonatação em concretos

A carbonatação consiste em transformar íons alcalinos como os cátions de sódio, potássio e cálcio, em sais de carbonatos desses elementos, pela ação ácida do dióxido de carbono presente no ar (CASCUDO; CARASEK, 2011).

Segundo Peter et. al. (2008), as barras de aço do concreto armado estão protegidas da corrosão, pois o pH do mesmo é em torno de treze. Essa alta alcalinidade da solução dos poros contidas na pasta de cimento pode ser reduzida com o tempo em função da ação do CO_2 e outros gases como SO_3 e H_2S , os quais atuam na superfície exposta das estruturas de concreto (CASCUDO; CARASEK, 2011).

A reação da carbonatação, segundo Juvekar (1972), envolve reações gasosas, líquidas e sólidas; hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tem solubilidade finita em água e a reação ocorre entre o dióxido de carbono (CO_2) dissolvido e íons hidróxido (OH^-). Segundo o autor, o processo físico-químico envolve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sólido que, em meio aquoso, dissocia-se em íons de cálcio (Ca^{2+}) e OH^- . O CO_2 gasoso é difundido pelos poros do concreto e entra em contato com um meio aquoso onde reage com os íons OH^- , formando o íon bicarbonato (HCO_3^-), sendo que o último reage com o excesso de íons OH^- resultando em água (H_2O) e íons

carbonato (CO_3^{2-}), os quais reagem com o Ca^{2+} presente no meio aquoso, formando carbonato de cálcio (CaCO_3) sólido. Autores como Peter (2008) e Thiery (2007), resumem esse processo, conforme Equação 1 e Figura 2



Equação 1

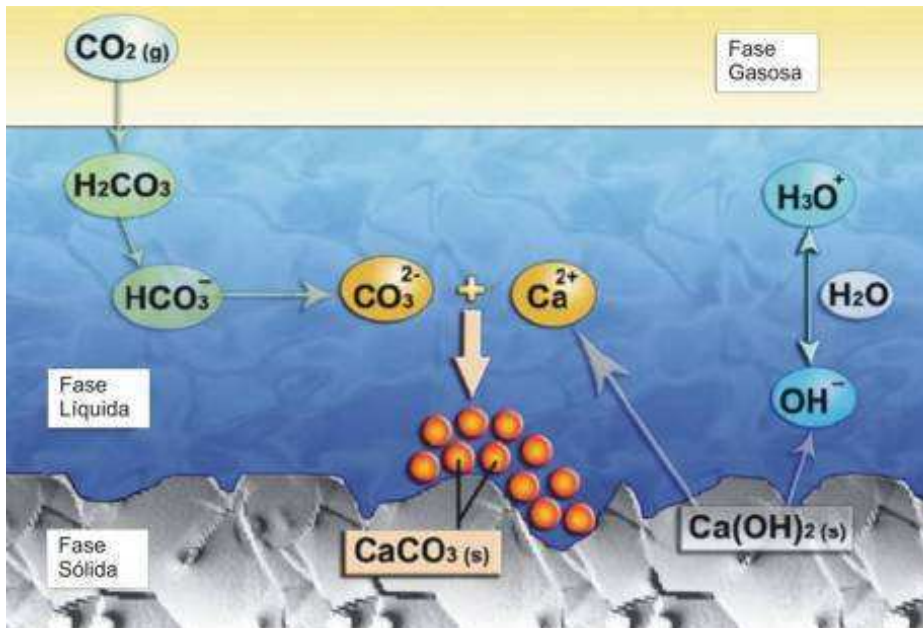


Figura 2 - Reação de carbonatação.

Fonte: Thiery *apud* Werle (2010)

Peter (2008) e Cascudo e Carasek (2011) afirmam que outros constituintes do concreto podem vir a carbonatar, particularmente o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), as fases aluminato, silicato dicálcico (C_2S) e silicato tricálcico (C_3S). Esses autores concordam que a carbonatação mais relevante é a do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, uma vez que esse é mais solúvel dentre os produtos de hidratação do cimento, e o que reage mais rapidamente com o CO_2 , excetuando-se os álcalis de sódio e potássio, que não produzem carbonatos estáveis.

2.1.2 Fatores que influenciam na carbonatação de concretos

Tendo em vista que a carbonatação se processa por meio de um mecanismo de difusão, a profundidade e a velocidade de carbonatação dependem de vários fatores, geralmente vinculados ao sistema de poros do concreto, ao pH do mesmo, e às condições adequadas para a difusão do CO_2 dadas essencialmente pelas características do ambiente no qual se insere (CASCUDO; CARASEK 2011). Na Figura 3, a seguir, há a sistematização dos principais fatores intervenientes da carbonatação.

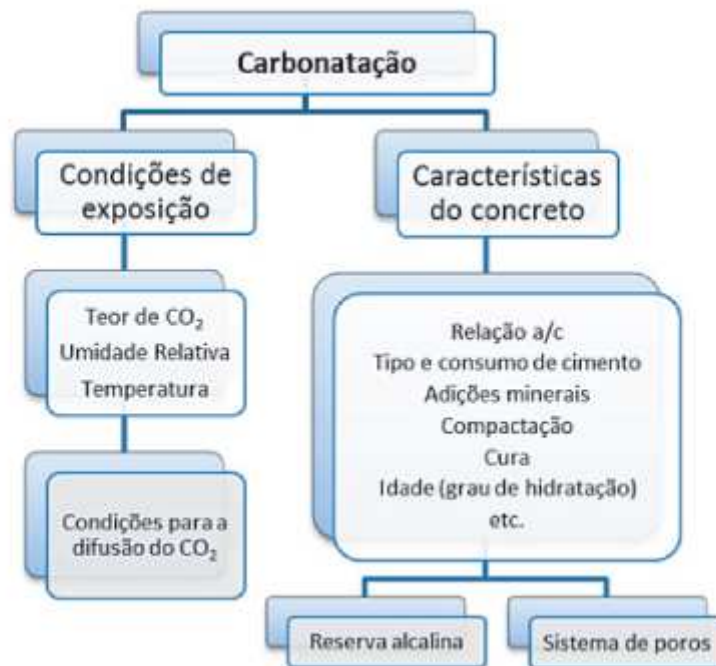


Figura 3 - Fatores intervenientes na carbonatação de concretos.

Fonte: Cascudo; Carasek (2011).

São vários os fatores que influenciam na carbonatação de concretos. Alguns dos fatores que têm maior influência sobre esse assunto serão discutidos dentro do contexto das características do concreto e das condições de exposição do mesmo.

a) Influência da concentração de CO₂, da temperatura e da umidade relativa

A concentração de CO₂ varia conforme o ambiente em que está inserido. Na Tabela 1, relacionam-se os ambientes com a concentração de CO₂.

Tabela 1 - Concentração de CO₂ típicas em alguns ambientes.

Concentração de CO₂ no ar (em volume)	Tipo de Ambiente
0,03%	Ambiente rural
0,1%	Ambiente de laboratório (não ventilado)
0,3%	Ambiente urbano
1,0%	Ambiente urbano-industrial

Fonte: Cascudo; Carasek (2011).

Quando se trata de carbonatação acelerada, não há um consenso entre autores, sendo que, na tabela 2, a seguir, mostram-se os percentuais de carbonatação acelerada utilizada por alguns autores.

Tabela 2 – Teor de CO₂ utilizado por alguns autores em ensaios carbonatação acelerada.

Autores	Percentual de CO ₂ na câmara
Sato (1988)	5 %
Cunha; Helene (2001)	100 %
Battagin et. al. (2002)	5 %
Kulakowski (2002)	5 %
Kirchheim (2003)	5 %
Vieira (2003)	≥50%
Moura (2004)	5%
Possan (2004)	5%
Silva (2007)	50%
Thiery (2007)	50%
Hoppe Filho (2008)	5%
Hoppe (2008)	5%
Peter (2008)	50%
Castellote et al.(2009)	3%; 10% e 100%
Pauletti (2009)	6% e 100%
Ba et. al. (2010)	17% - 23%
Ji et. al. (2010)	0 % - 50%
Werle (2010)	1%
Chiao (2011)	20%
Limbachiya (2012)	3,5%
Lovato (2012)	6%

Cascudo e Carasek (2011) afirmam que ambientes de alta agressividade se situam na faixa de concentração de CO₂ a 1%.

Não há consenso sobre o percentual de CO₂ entre os autores, e não há meio de comparação com outros autores, pois não se adota uma metodologia comum.

Pauletti et. al. (2009) salientam a escassez de pesquisas que abordem mais de um teor de CO₂ em um mesmo experimento, o que dificulta a comparação entre os dados relatados. A autora recomenda um percentual de 6% na concentração de CO₂, visto que nesse teor há uma aceleração do fenômeno sem maiores interferências da quantidade de água e carbonatos gerados a partir da reação da carbonatação. A discussão que Torgal (2012) propõe a respeito do percentual de CO₂ usualmente utilizado mostra que vários autores indicam valores mais baixos de concentração desse gás, porque essa, em excesso, poder afetar a microestrutura dos poros, colmatando os mesmos e impedindo a penetração de CO₂. Castellote et al. (2009), no seu estudo que procurou uma concentração de carbonatação acelerada que se correlacione com a carbonatação natural, verificaram que, com alimentação constante de 3% de CO₂, a relação é de dez vezes a condição natural. Não havendo tal meio de comparação, busca-se uma concentração de gás que não prejudique o próprio estudo e que possa ter uma correlação com as condições naturais.

Segundo Cascudo e Carasek (2011), a temperatura é uma variável catalizadora de reações químicas. Ocorre um aumento das velocidades de reações à medida que as temperaturas aumentam, sendo que a mobilidade das espécies iônicas em solução é aumentada com o acréscimo de temperatura, o que favorece mais rapidamente a ocorrência de reações químicas. Kulakowski (2002) diz que, em ensaios de carbonatação acelerada realizada em temperaturas ambientes habituais, a temperatura influencia pouco na carbonatação do concreto.

Quando se trata de umidade, Ahmad (2003) afirma que o aumento dessa ocasiona o decréscimo da carbonatação em concretos; Papadakis et al. (1992) *apud* Cascudo; Carasek (2011) afirmam que o avanço da carbonatação em concretos sob diversas condições de umidade ambiente (entre 40% e 80%), e observa que as maiores profundidades de carbonatação ocorrem para umidades do ambiente entre 50% e 65%. Cunha e Helene (2001) afirmam que a umidade relativa do ambiente exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros de concreto, o que condiciona a velocidade de propagação de CO₂ no mesmo. E inferem que a presença de água é fundamental para ocorrer a carbonatação.

b) Influência na relação água/cimento

Segundo Hoppe (2008), um aumento na relação água aglomerante (a/agl) provoca um aumento dos coeficientes de carbonatação. Cascudo e Carasek (2011) afirmam que a relação água/cimento (a/c) influencia significativamente na porosidade do concreto, na quantidade, na dimensão e na conectividade dos poros, facilitando ou não a penetração de CO₂. Os autores Cunha e Helene (2001), Kulakowski (2002) e Pauletti (2009) confirmam a ação negativa do aumento da relação a/c frente à profundidade carbonatada.

c) Tipos de cimento e adições

O tipo de cimento influencia na profundidade de carbonatação. Cunha; Helene (2001) utilizaram, em seus ensaios, diferentes tipos de cimento, sendo eles CP I-S, CP IV e CP III. O cimento CP III apresentou o pior desempenho frente à carbonatação em relação aos outros tipos de cimento estudados. Agregando ainda o estudo de Pauletti (2009), a qual analisou dois tipos de cimento, CP I e CP IV, e o último teve maior profundidade de carbonatação. Pode-se verificar a influência que diferentes componentes presentes no cimento afetam a profundidade de carbonatação.

Kirchheim (2003) utiliza diferentes cimentos e infere que, ao moldar concretos e ao analisá-los frente à área carbonatada, a relação a/c e o tipo de cimento têm influência sobre

a profundidade carbonatada. A autora ainda constata que, analisando física e quimicamente os cimentos, que, quanto maior a perda ao fogo, o resíduo insolúvel, o anidro carbônico e à superfície específica do cimento, maior é a área carbonatada do concreto com ele confeccionado. Ainda diz que o C_3S parece ter alguma correlação direta com a área carbonatada, em função das quantidades e das proporções entre os cimentos, e segue a mesma tendência da carbonatação.

Não só o tipo de cimento pode agregar à carbonatação, as adições incorporadas a ele também podem. Hoppe Filho (2008) analisa concretos com alto teor de cinza volante com adição de cal hidratada, esses concretos com 55 MPa de resistência à compressão, aos 91 dias, apresentaram a profundidade carbonatada de praticamente metade de quando comparados ao concreto referência.

Kulakowski (2002), ao analisar a carbonatação para concretos com água/aglomerante acima de 0,50, indica que, quanto maior a adição de sílica ativa, maior a profundidade carbonatada. Mas, ao contrário, concretos com relação água/aglomerante abaixo do ponto crítico localizado entre 0,45 e 0,50, as adições pozolânicas pouco interferem na carbonatação.

O emprego de adições minerais no concreto pode levar a um efeito negativo, pois reduz a alcalinidade. Devido às reações pozolânicas, ocorre uma redução da quantidade de $Ca(OH)_2$ precipitado na pasta de cimento, havendo uma redução da capacidade de proteção da mesma quanto ao avanço da frente de carbonatação (CASCUDO e CARASEK, 2011).

Também pode ocorrer um efeito positivo, afirmam Cascudo e Carasek (2011), pela alteração física da estrutura da pasta de cimento pelo efeito fíler e pozolânico. Isso produz um sistema de poros refinados, menos conectados, com maior grau de tortuosidade e menor volume total, o que implica em uma redução da difusividade do CO_2 na matriz cimentícia e um retardo no avanço da carbonatação. Os autores ainda inferem que a carbonatação depende da presença de adição mineral, ou seja, se provocará susceptibilidade ou não, do tipo de adição, teor de adição empregado, a relação a/agl, e a eficiência da cura úmida efetuada.

d) Condições de cura

Um adequado procedimento de cura impede a rápida evaporação da água de amassamento do concreto nas primeiras idades. Isso evita ou minimiza o fenômeno da retração plástica no concreto, evita também as fissuras decorrentes desse fenômeno,

aumentando o grau de hidratação da pasta de cimento na superfície do concreto e consequentemente diminuindo sua porosidade. A carbonatação é um fenômeno que se dá mediante a difusão de CO_2 de fora para dentro do concreto, e a cura efetiva passa a ser uma ferramenta realmente importante para garantir a durabilidade dos concretos. Na Figura 4, apresenta-se a influência da cura na carbonatação, evidenciando coeficientes de carbonatação mais baixos para uma cura efetiva (CASCUDO e CARASEK, 2011)

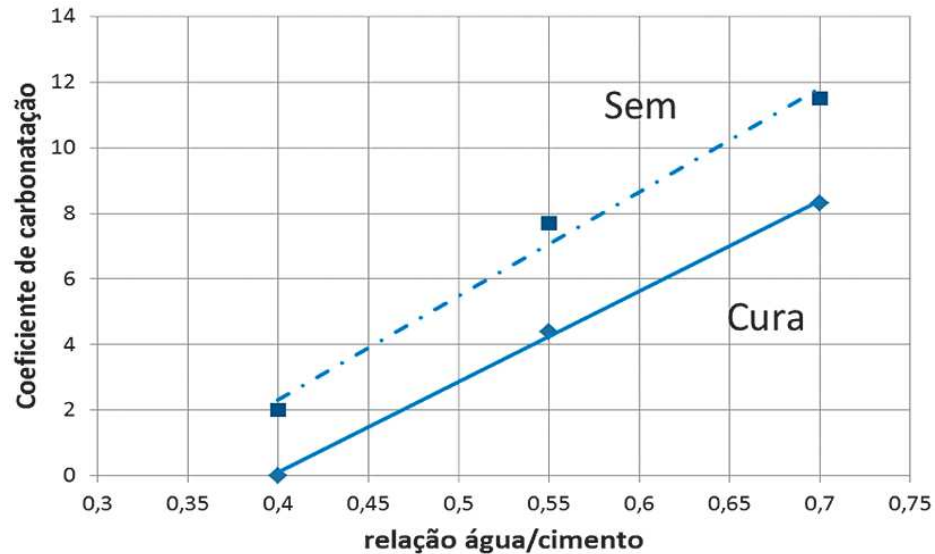


Figura 4 - Influência da cura e da relação água/cimento na carbonatação do concreto obtida por procedimento acelerado, com cimento CII F 32.

Fonte: Cascudo e Carasek (2011)

A influência das condições de cura foi analisada no estudo de Battagin et al. (2002). Os autores evidenciaram que, para concretos produzidos com relação a/c de 0,45 e 0,65, quanto maior o período que o mesmo permanece em câmara úmida, menor é a profundidade carbonatada.

Pauletti (2009) infere que o aumento do tempo de cura é inversamente proporcional à profundidade carbonatada, pois, com maior tempo de hidratação, há uma diminuição na porosidade do concreto. Diz ainda que em amostras com pouco tempo de cura (7 dias), quando submetidas à carbonatação, haverá disputa entre as reações de hidratação e de carbonatação para consumir o hidróxido de cálcio, o que acelera a neutralização da solução dos poros do material que é indicada para maiores profundidades de carbonatação.

2.1.3 Carbonatação em concretos com agregados reciclados e adições minerais

Ao analisarem concretos com a/agl 0,55, substituição de cimento por cinza volante (CV) de 25%, 35% e 55%, e substituição de AGN por AGRC em 50% e 100%, Kou

e Poon (2013) verificaram que, quanto maior a substituição de cimento por CV, maior é a profundidade carbonatada, e atribuíram esse comportamento à menor quantidade de CH contida no concreto.

Sim e Park (2011) utilizaram 100% de ARC substituindo agregados graúdos naturais com diferentes percentuais de agregado miúdo reciclado e de cinzas volante na substituição de areia natural e cimento respectivamente, observando que a profundidade de carbonatação foi satisfatória na maioria dos casos, pois foi menor que 10mm aos 28 dias. Os testes foram feitos a uma temperatura de 30°C com 60% UR e com concentração de 10% de CO₂.

Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) produziram concretos com substituição de AGN por AGRC em 30%, 50% e 100%, também fizeram a substituição do cimento por cinza volante em 30%. Tais concretos com relação a/agl que variaram de 0,66 a 0,34, foram curados, em cura submersa, durante 28 dias, e expostos ao ar por 14 dias. Após essa etapa, foram encaminhados à câmara de carbonatação com temperatura de 20°C com 60% UR e concentração de 3,5 % CO₂. Os autores concluíram que a profundidade à carbonatação aumenta conforme aumenta o teor de AGRC, a/agl e o período de exposição. Os resultados indicam que as cinzas combinadas com o AGRC podem potencializar à carbonatação a longo prazo. É observado que, quanto maior a resistência do concreto, menor é o coeficiente de carbonatação.

2.2 PROPRIEDADES DO AGRC E DA CCA

Para melhor se compreender os materiais que serão empregados na pesquisa, há a necessidade de entender suas características. Neto (2011) explana que muitas das propriedades do concreto são influenciadas pelas características de seus agregados, tais como porosidade, composição granulométrica, absorção d'água, forma e textura dos grãos.

Além disso, as adições minerais também mudam algumas das características do concreto, o que resulta na produção de compósitos cimentícios com melhores características técnicas, essas adições são responsáveis por modificar a estrutura interna da pasta de cimento hidratada e da zona de transição agregado/matriz que reduzem a porosidade capilar, a troca de íons e de gases com o meio, além de diminuir o calor de hidratação e as fissuras de origem térmica. Essas vantagens ainda dependem de uma série de parâmetros, como da finura e forma das partículas, da área superficial específica, da relação água/aglomerante, da composição química e mineralógica e da quantidade de adição (DAL MOLIN, 2011).

2.2.1 Características e propriedades dos agregados graúdos provenientes de concreto reciclado

A compreensão das características dos materiais, sendo elas a massa específica e unitária, a distribuição granulométrica, a forma e textura do grão, a porosidade e a absorção de água, é importante para uma melhor análise.

a) Massa específica e unitária

Werle (2010) e Troian (2010) trabalharam com três diferentes resistências de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), e obtiveram três diferentes massas específicas e unitárias. Para Werle (2010), os resultados da massa específica tiveram uma ligeira diferença, nas três, e foi interferida pela argamassa aderida aos grãos. Na tabela 3, pode-se verificar a média dos resultados obtidos pelos dois autores.

Gonçalves (2011) utilizou a NM 53 (ABNT, 2002) e NM 45 (ABNT, 2006) – Método “B”, utilizando AGRC de cura térmica e de cura convencional, optou-se por relacionar os de cura convencional, cuja massa específica foi calculada no tempo de 7, 28 e 63 de cura submersa, e aos 28 dias de cura submersa para massa unitária. A média é apresentada na tabela 3.

Os agregados reciclados de concreto, em geral, apresentam menores massas específicas e unitárias em relação aos naturais. Isso se explica, em parte, por que resíduos são compostos por materiais mais porosos como a argamassa (LIMA, 1999). Buttler (2003) diz que a massa específica do agregado graúdo influencia na massa específica do concreto, o que é diretamente proporcional à resistência do mesmo. Isso significa que, quanto maior a porosidade do agregado, menor será sua resistência, o que torna-se o elo fraco da mistura. Isso se aplica quando se trata de agregado graúdo natural, em concretos comuns. Mehta e Monteiro (2008) definem concreto estrutural leve como concretos contendo agregados leve celular, a massa específica do concreto é de aproximadamente dois terços da massa específica do concreto feito com agregado natural comum, e a resistências pode chegar a 70 MPa, com agregados leves com microporosidade controlada e com alto consumo de cimento.

Tabela 3 - Resultados de massa específica e unitária.

Autor	Massa Específica (g/cm³)	Massa Unitária (g/cm³)	Norma Técnica	Resistência do AGRC (MPa)
WERLE (2010)	2,50	1,21	NM 52/2002; NM	18
	2,47	1,20	53/2002	37
	2,49	1,21	NM 45/1995	50
GONÇALV ES (2011)	2,30	1,07	NM 53/2002	45
			NM 45/2006	
BUTTLER (2003)	Seca – 2,42	Solta – 1,28	NBR 9937/1997	52,1
			NBR 7251/82	
	Saturada – 2,56	Compactada – 1,43	NBR 9937/1997 NBR 7810/83	

b) Distribuição Granulométrica

Para agregados naturais, uma granulometria bem distribuída conforme as zonas ótimas produzem misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas, além de proporcionar em uma estrutura mais fechada de massa de concreto, o que diminui o volume de vazios (NETO, 2011). Quando se trata de agregados reciclados, deve-se ter o cuidado de selecionar granulometrias a serem utilizadas e tipos de britador, sendo esses dois fatores responsáveis pela qualidade do concreto.

Buttler (2003), ao analisar a granulometria do agregado reciclado graúdo, nota uma redução na dimensão máxima do agregado reciclado em relação ao natural, apontando a influência do britador de mandíbulas sobre a dimensão das partículas. O autor observa também que a idade de reciclagem não influencia na granulometria do agregado, e diz que agregados de diâmetros menores aumentam a superfície de contato entre pasta/agregado, o que eleva a resistência do concreto.

Já Werle (2010) utilizou valores da granulometria dos agregados graúdos entre 12,5mm e 25mm, sendo que o percentual mais significativo de material ficou retido na peneira 12,5 mm, pois se utilizou um britador de mandíbulas. Gonçalves (2011), por sua vez, usou o material retido nas peneiras entre 19mm e 4,75mm.

c) Forma e Textura

A forma e a textura podem aumentar a quantidade de pasta de cimento, a qual influencia nas propriedades do concreto no estado fresco. A textura muito lisa nos agregados graúdos pode induzir uma aderência menor entre a pasta de cimento e a superfície dos

agregados, podendo prejudicar a resistência à tração do concreto nas primeiras idades (NETO, 2011).

Geralmente, a textura do agregado reciclado é mais rugosa e porosa do que os agregados naturais, e tende a apresentar formas mais angulares com taxas de superfície/volume maiores que os agregados naturais, os quais possuem superfícies mais lisas e arredondadas (LEITE, 2001).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a dimensão e a forma do agregado graúdo podem afetar a resistência do concreto de forma indireta, ou seja, quanto maior o tamanho do agregado no concreto e a proporção de partículas alongadas e achatadas, maior será a tendência de acúmulo de filme de água junto à superfície do agregado, o que enfraquece a zona de transição na interface pasta-agregado. A forma lamelar dos agregados interfere na mistura, especificamente no empacotamento das partículas, e gera um maior número de vazios, que resulta em uma menor resistência mecânica do material (BUEST NETO, 2006).

Para Lima (1999), dependendo dos equipamentos utilizado para o processamento do concreto, o agregado pode apresentar forma mais lamelar e textura mais áspera que os agregados convencionais, podendo exigir um aumento na relação água/cimento (a/c) por ser necessário um maior teor de aglomerante por causa da perda de trabalhabilidade.

Concretos contendo agregados lamelares tendem a apresentar menor trabalhabilidade, o que não acontece com agregados, mais arredondados, cujos grãos tem melhor empacotamento, e conseqüentemente, apresentam menor volume de vazios no concreto (BUEST NETO, 2006).

d) Porosidade

A qualidade do AGRC é fundamental para determinação das propriedades mecânicas do novo concreto. A argamassa aderida ao mesmo pode representar o elo mais fraco da mistura, apresentando uma maior porosidade (BUTTLER, 2003).

Segundo Troian (2010) e Werle (2010), o AGRC, por apresentar maior porosidade, influencia na absorção de água do concreto e pode alterar a demanda de água na mistura do mesmo.

Leite (2001) infere que, pela maior porosidade do AGRC, os concretos produzidos com esses serão mais deformáveis, pois a porosidade do agregado controla a restrição de deformação da matriz.

A porosidade dos agregados pode influenciar nas propriedades interligadas de resistência à compressão, à abrasão e ao módulo de deformação, pois os agregados utilizados na confecção de concretos são habitualmente de resistência superior aos concretos produzidos (NETO, 2011).

e) **Absorção d' água**

Werle (2010), Troian (2010), Etxeberria (2007) e Leite (2001), expressam a necessidade de estudar a absorção de água dos agregados reciclados de concreto. Os autores afirmam que, quanto maior a porosidade desse agregado e menor a taxa de saturação do mesmo, maior será a quantidade de água absorvida da matriz de concreto novo no qual está inserido.

A densidade e a capacidade de absorção dos agregados reciclados são afetadas pela argamassa aderida e devem ser conhecidas para a produção e para o controle de novos concretos, pois afetam o mesmo, tanto no estado fresco, quanto no endurecido. A capacidade de absorção é um dos fatores mais significativos dos agregados reciclados, fator que distingue estes agregados dos demais (ETXEBERRIA, 2007).

2.2.2 Características e propriedades da cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) é originada da combustão de casca de arroz em fornalhas de caldeiras ou na queima da casca a céu aberto. Quando disposto irregularmente, esse resíduo causa poluição e contaminação de solos e de cursos d'água. No entanto, em função de suas características, podem vir a ser incorporados em concretos, gerando vários benefícios aos mesmos (HOPPE, 2008).

A CCA é rica em sílica amorfa com elevada superfície específica, o que a torna uma pozolana altamente reativa. No concreto, as reações pozolânicas da CCA com os produtos de hidratação do cimento provocam alterações positivas na microestrutura do mesmo, as quais normalmente acarretam um aumento na resistência à compressão, uma diminuição da porosidade e um refinamento dos poros, um aumento da durabilidade e um aumento da coesão do concreto no estado fresco (DUART, 2008). Essas reações podem ainda ocasionar um efeito negativo à carbonatação. Segundo Cascudo e Casarek (2011), as reações pozolânicas podem reduzir as reservas alcalinas, pois ocorre uma redução na quantidade de hidróxido de cálcio precipitado na pasta de cimento. Isso é afirmado também pelos autores Khunthongkeaw (2006) e Tasca (2012).

O processo de queima e moagem controladas é determinante para se obter um grau de pozolanidade aceitável, assim como o tempo e temperatura de queima e o tempo de moagem (DUART, 2008). O mesmo autor afirma que não há consenso entre autores sobre a temperatura de queima da CCA, porém alguns autores apresentam valores de temperatura de queima entre 500°C e 1100°C. A maioria dos autores concorda que a quantidade de fases cristalinas na sílica deve ser a menor possível e que temperaturas mais elevadas tendem a produzir CCA mais cristalina. Quando a casca não é queimada sob condições controladas, a perda ao fogo, em função do teor de carbono, pode ser mais elevada. Sendo o carbono muito higroscópico, a demanda por água na dosagem de concreto pode aumentar em relação às pozolanas com menor teor deste elemento.

Krug (2011), que beneficiou a CCA por peneiramento e moagem, concluiu que o peneiramento não influenciou significativamente no comportamento da CCA como pozolana. Esses dados contrariam os encontrados por Kieling (2009), que afirma que o peneiramento melhorou as condições de pozolanidade da CCA, uma vez que a cinza apresentou muitas partículas não queimadas ou queimadas parcialmente.

2.3 CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO E DE POZOLANAS

Para uma análise dos concretos produzidos com agregado reciclado de concreto e pozolanas, cabe um estudo sobre as propriedades que o concreto adquire ou perde com essas inserções.

2.3.1 Propriedades de concretos produzidos com cinza de casca de arroz

a) Estado Fresco

Concretos com adições minerais tendem a ser mais coesos com a redução considerável da tendência à segregação e à exsudação, quando comparados a um concreto sem adição; também se pode dizer que a água necessária em concretos com essas adições normalmente se eleva com o aumento da porcentagem adicionada (DAL MOLIN, 2011).

Tiboni (2007), ao moldar concretos contendo 15% de CCA, obteve uma diferença de 1,15 horas de atraso, em relação ao concreto referência. Comportamento similar foi visto por Krug (2011). É possível verificar que a relação a/agl tem influência no início de pega do concreto, em geral, o acréscimo de água faz com que se aumente o tempo de pega.

A mudança no calor de hidratação é outro aspecto físico que ocorre no concreto. Quando ocorre a adição da CCA, segundo Dal Molin (2011), normalmente o calor de

hidratação por unidade de tempo é reduzido com a substituição do cimento pelas adições minerais. A autora ainda explica que, conforme a quantidade de clínquer diminuí, ocorre a menor liberação de calor durante as reações químicas de hidratação. Krug (2011) nota uma diminuição do calor de hidratação em concretos com CCA quando comparados com o referência. As superpozolanas², como a CCA, acarretam a redução do calor de hidratação do clínquer, a qual pode ser equilibrada pela capacidade das pequenas partículas de adição em atuar como pontos de nucleação, acelerando a hidratação inicial (DAL MOLIN, 2011).

b) Propriedades mecânicas

Em se tratando de concreto no estado endurecido, quando submetido a ensaio de compressão, os autores Krug (2011), Duarte (2011) e Salas (2009) encontram valores superiores ao adicionar CCA em relação ao concreto referência. Dal Molin (2011) diz que a melhora se dá por conta do processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento. Tem um papel fundamental no aumento das resistências mecânicas, à medida que aumenta a resistência matriz na zona de transição. Desse modo a adição de superplastificantes é importante, pois as partículas das superpozolanas tendem a se aglomerar, pois a adição dos mesmos faz com que haja uma dispersão eficiente, ampliando o potencial das superpozolanas (DAL MOLIN, 2011).

Krug (2011) observou um aumento de 20% na resistência à tração de concretos com CCA. Dal Molin (2011) diz que o aumento da resistência à compressão decorrente dos efeitos micro fíler não correspondem a um aumento proporcional à tração. Um aumento significativo à tração se dará somente quando ocorrerem as reações pozolânicas das adições minerais, com conseqüente redução do tamanho e da concentração dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição.

c) Durabilidade

A absorção capilar de concretos com adição de CCA é relativamente mais baixa que a de concretos comuns por haver um melhor empacotamento. Krug (2011) achou valores de absorção menores que a mistura referência, bem como Salas et. al. (2009), encontram valores menores de absorção para concretos com substituição de cimento por cinza de casca de arroz.

² A classificação como superpozolanas é feita pelo autor, contudo para a NBR 5752 não há diferença entre pozolanas. Mehta e Monteiro (2008) classificam a CCA como pozolana altamente reativa, com área superficial específica de 40 a 60 m²/g.

Ao substituir cimento CP II F-32 por CCA residual, Hoppe (2008) observa um acréscimo nos micro e meso poros e uma diminuição dos macro poros, em comparação com o referência, ainda para teores de substituição de 15% e 25%, os quais resultam em uma frente de carbonatação mais veloz quando comparada ao concreto referência. O autor ainda diz que no teor de 15% de CCA, para as relações a/agl 0,45, 0,55, 0,65, e teor de 25% de CCA “in natura” com relação a/ag 0,45, assim como a CCA moída com relação a/ag de 0,45 e 0,55, podem ser considerados concretos duráveis frente à carbonatação, pois apresentam coeficientes de carbonatação abaixo de 4,00 mm/semana^{0,5}, tais concretos submetidos à carbonatação acelerada a 5 por cento.

Martinelli (2010) diz que nas misturas de cimento Portland com adições pozolânicas ocorre decréscimo gradual ao longo do tempo do teor de hidróxido de cálcio livre, em função do avanço da reação pozolânica. Esse fato aumenta à medida que o teor de substituição do cimento pela pozolana se eleva. Comparando a pasta de cimento Portland hidratada à pasta contendo adição de pozolana, neste existe menos hidróxido de cálcio e mais C-S-H. O autor citado produziu concretos com substituição de cimento por CCA, natural e moída, nos teores de 15% e 25% e nas relações a/agl. 0,45, 0,55, 0,65. Relata que as amostras contendo CCA, quando comparadas às amostras de referência, apresentaram um aumento na quantidade de micro poros, acarretando o refinamento e a tortuosidade dos vazios dos protótipos em que as profundidades de carbonatação foram maiores que as amostras de referência. Concluiu que, apesar dessa diminuição nos tamanhos dos poros que dificulta a penetrabilidade, o efeito dominante é a diminuição da reserva alcalina, devido à menor quantidade de CH oriundo do processo de hidratação do cimento que é consumido pelas reações pozolânicas provocadas pela adição de cinza de casca de arroz.

Segundo Isaia; Vagheti; Gastaldini (2001), apesar dos cimentos com pozolanas apresentarem refinamento dos poros dos grãos dotando as pastas com maior tortuosidade dos canais capilares e menor permeabilidade, predomina o efeito da menor reserva alcalina, resultando em frente de carbonatação mais veloz do que nos traços com cimento comum. Martenelli (2010) completa dizendo que o avanço da carbonatação é proporcional à alcalinidade total, a reserva alcalina disponível na matriz da pasta de cimento, sendo função da composição química do cimento, teor de cálcio, e dos compostos cálcicos hidratados o avanço da mesma.

Resumidamente, quanto mais CH remanescente na pasta do aglomerante, menor será o coeficiente de carbonatação e vice-versa.

2.3.2 Propriedades de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto e de pozolanas

As propriedades de concretos com AGRC devem ser estudadas. Verificando as diferentes constatações dos autores, para melhor compreender, o agregado tanto no estado fresco, quanto em seu estado endurecido.

a) Estado fresco

Quando se trata de propriedades do concreto fresco, Buttler (2003) afirma que o AGRC influencia na trabalhabilidade do concreto, pois o mesmo continua absorvendo água mesmo depois da mistura. Dessa forma, Angulo (2005), ao analisar o abatimento de concretos produzidos com RCD, verifica que o abatimento não corresponde à trabalhabilidade, especialmente para aqueles produzidos com agregados menos densos, e seria necessário considerar parâmetros não estáticos de medida reológica do concreto. Leite (2001) afirma que as características físicas do agregado reciclado promovem um travamento entre os grãos da mistura, o que dificulta o abatimento.

A inserção de AGRC em novos concretos cria mais tipos de interfaces, de modo que há a zona de transição na interface do agregado antigo com a argamassa aderida, e a nova zona de transição na interface entre a argamassa aderida e a nova argamassa, sendo que essa microestrutura torna o concreto com AGRC complexa para estudos de durabilidade (CHIAO et. al. 2011). Na Figura 5, exemplifica-se a interface entre agregado reciclado e o novo concreto.

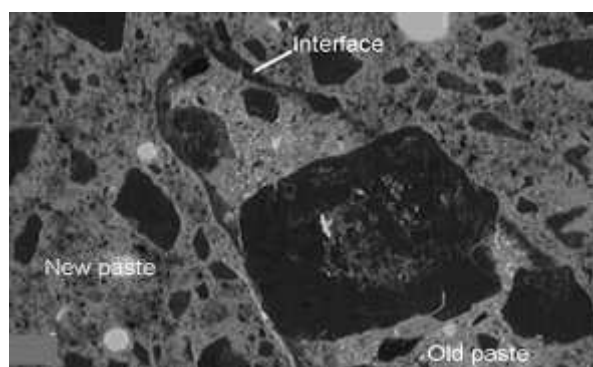


Figura 5 - Interface do agregado reciclado com a nova pasta.

Fonte: Etxeberria (2006)

b) Propriedades mecânicas

Propriedades mecânicas de concretos com AGRC sofrem influência das características da argamassa aderida ao agregado e da nova zona de transição formada,

podendo sofrer alterações na resistência à compressão. Buttler (2003) obteve resultados de resistência à compressão e à tração, e verificou um ligeiro aumento na resistência à compressão do concreto com AGRC. Isso pode ser justificado pela cura úmida e pelas partículas não hidratadas de cimento presentes no agregado reciclado, os quais produziram um maior empacotamento e preenchimento dos vazios na matriz e na interface, proporcionando uma maior compacidade localizada. O autor citado utilizou concreto reciclado aos 28 dias. A ocorrência de partículas não hidratadas de cimento podem se dar pelo fato de que o mesmo foi utilizado um concreto muito novo como AGRC.

O empacotamento das partículas depende de fatores como a quantidade de cimento anidro presente no agregado reciclado utilizado, a idade da reciclagem, o tipo de cura pelo qual o AGRC passou e a pré-molhagem do agregado.

Concretos com até 25% de substituição de AGRC tem as mesmas características mecânicas que concretos convencionais aos 28 dias, e acima desse percentual, podem apresentar efeito inferior aos convencionais (ETXEBERRIA, 2007).

Chiao (2004), o qual substituiu 30%, 50%, 70% e 100% do agregado natural pelo AGRC, concluiu que, quanto maior a substituição de AGRC, menor será a resistência à compressão axial. Também expõe que o módulo de elasticidade diminui conforme é aumentada a substituição de AGRC.

Troian (2010) infere que, em até 50% de substituição, não há diferenças significativas, quando se trata de resistência à compressão, sendo que, quanto menor a resistência à compressão do AGRC, menor será a resistência à compressão do novo concreto. Fato que ocorre quando a resistência do AGRC é menor ou igual a do novo concreto.

Ao se tratar de resistência à tração, Troian (2010) concluiu que, quanto maior o teor de substituição de AGRC, menor a resistência à tração, e que a diferença de resistência do AGRC não modifica essa variável.

A longo prazo, concretos em cura úmida contendo 100% de AGRC apresentam melhor desenvolvimento que concretos convencionais. Foi o que observaram Kou; Poon; Etxeberria (2011), os quais mantiveram cp's de concreto em cura úmida por 28 dias, um ano e cinco anos. Os resultados mostram que, dos 28 dias para os cinco anos, concretos contendo 100% de AGRC obtiveram um aumento na resistência à compressão e à tração superior aos concretos convencionais, submetidos ao mesmo tempo de ensaio. O mesmo apresentou 45% de redução da porosidade dos 28 dias para os cinco anos, os autores atribuem essas melhoras

pela hidratação do cimento antigo e pela interação entre a nova pasta de cimento e a argamassa do agregado.

O tipo de cura pelo qual o AGRC passa também apresenta influências. Segundo Gonçalves (2011), quando o AGRC é utilizado em uma nova matriz de concreto, em se tratando de resistência à compressão, o de cura convencional ao ar apresenta até 50% de acréscimo, enquanto que o de com cura térmica a vapor d'água apresenta um decréscimo de 32%, resultados observados quando comparados ao concreto referência. A autora atribui esse comportamento, o tipo de cura, ao concreto que deu origem ao resíduo, o qual afeta o comportamento das novas matrizes de concreto, à porosidade do AGRC.

O grau de hidratação dos resíduos de concretos, ou seja, a idade que fora reciclado o concreto para produção de agregados, tem influência sobre as propriedades do concreto endurecido, tanto na compressão, na tração e no módulo de elasticidade. As propriedades mecânicas são maximizadas com a utilização de agregados com pequeno grau de hidratação (BUTTLER 2003).

A inserção limitada de novas substâncias, como adições minerais no concreto com AGRC, é fonte de estudo de pesquisadores. Procuram prover melhoras substanciais na hidratação do concreto, como a diminuição da quantidade de macro poros, fazendo com que esse obtenha igual desempenho ou melhor que concretos com apenas agregados naturais.

A substituição parcial do cimento por cinzas, ou a adição das mesmas no cimento, aumentam a resistência à compressão em concretos contendo AGRC (KOU; POON, 2012).

Kou; Poon; Agrela (2011) substituíram 50% e 100% de agregado natural por AGRC, com substituições minerais de sílica ativa (SA), metacaulin (MC), cinza volante (CV) e escória com diferentes percentagens. Os concretos com AGRC submetidos a ensaios à compressão obtiveram resultados inferiores ao referência, mas ao substituir 10% de SA e 15% de MC, obtiveram um aumento na resistência à compressão, bem como um aumento na resistência à tração.

Somna; Jaturapitakkul; Ambea (2012) inseriram 100% de AGRC com diferentes substituições de cimento por cinza volante (CV) e cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). Ao substituir 20% do cimento por CV ou CBCA em concretos com 100% de AGRC, verificaram que a resistência à compressão são similares ao concreto com apenas 100% de AGRC, e estes são 10% inferiores ao concreto referência.

Kong et. al. (2010) aplica três tipos de misturas ao concreto, mistura normal, dupla e tripla. O mesmo verifica que a mistura tripla melhora a resistência à compressão de concretos contendo AGRC e escórias, e AGRC e cinza volante.

Segundo Corinaldesi; Moriconi (2009), os testes de compressão mostram que os concretos com 100% de AGRC, tanto agregados graúdos quanto miúdos, podem se igualar ou até superar os concretos com agregados naturais se forem adicionados superplastificante e cinza volante ou sílica ativa nas misturas como substituto parcial dos agregados miúdos.

c) Durabilidade

Os resultados obtidos por Troian (2010), ao analisar absorção de água por capilaridade, indicam que, quanto maior a substituição de AGRC, maior a absorção de água ao longo do tempo. No entanto, para algumas substituições com 25% e 50% do mesmo, ocorre absorção menor que o referência, podendo haver um teor ideal de substituição. Segundo Buttler (2003), a propriedade dos concretos feitos com AGRC foram influenciadas pela camada de argamassa aderida à superfície do agregado, sendo tal camada responsável pela alta porosidade do agregado, pela alta absorção e pela redução da massa específica. Ensaio de retração por secagem foram feitos pelo autor citado anteriormente, o qual constatou que concretos com AGRC têm maior retração quando comparados a concretos com agregados naturais.

Troian (2010) estudou a penetração acelerada de íons cloreto e concluiu que, quanto menor a resistência do AGRC, maior a carga passante. Contudo, agregados de maior resistência, com 37 MPa, não resultam em diferenças significativas quando comparadas ao referência. O mesmo comportamento é visto no ensaio de absorção de água por capilaridade realizado pela autora.

Concretos contendo substituição de 50% e 100% de AGRC e substituições de 15% de metacaulin e 10% de sílica ativa, obtiveram resultados de retração mais altos que o concreto referência. Já concretos contendo substituições de 35% de cinza volante e 55% de escória obtiveram resultados mais baixos que o concreto referência (KOU; POON; AGRELA, 2011)

Kou; Poon (2012) concluíram que a baixa durabilidade que o AGRC confere ao concreto podem ser compensadas pelo uso de cinza volante. Quando estudada a retração por secagem, nota-se um aumento da mesma com a elevação da quantidade de AGRC. Contudo, o uso de cinzas volantes como substituição ou como adição no cimento possibilitaram a

diminuição da retração por secagem nos concretos com AGRC, como resultado de maior resistência a longo prazo conferidas pela reação pozolânica das cinzas volantes.

A penetração de íons cloreto diminui conforme é aumentada a quantidade de AGRC, mas esta propriedade foi melhorada com a incorporação de cinza volante. A adição da mesma no cimento reduz a relação a/c, o que pode melhorar a resistência à penetração de íons cloreto. Quanto menor a resistência dos concretos com AGRC, maior é a porosidade, sendo que esta é diminuída pela substituição ou pela adição de cinza volante no cimento (KOU; POON, 2012).

Em concretos contendo 100% de AGRC, a substituição de CV e de CBCA reduz a permeabilidade deles, sendo esta menor que a do referênciA. Ainda com maior percentagem de substituição dessas duas cinzas pelo cimento, a resistência à penetração de íons cloreto é aumentada. Contudo, quando esses concretos foram submetidos a ataques de sulfato, notou-se que, com maior substituição de cimento por cinzas, os mesmos sofreram maior deterioração. O desempenho com 20% de substituição de cimento por CV ou por CBCA com AGRC é o melhor para se obter alta resistência à compressão, baixa permeabilidade d'água, alta resistência a íons cloreto e alta resistência ao ataque de sulfatos (SOMNA; JATURAPITAKKUL; AMBEA, 2012).

Kong et. al. (2010) moldou “sanduíches” de concreto em três camadas, ou seja, concreto novo, com AGRC e concreto novo, este “sanduíche” com escórias e com cinza volante. Verificar a zona de transição pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) possibilitou a observação do revestimento das partículas pozolânicas, que consomem hidróxido de cálcio acumulado nos poros e nas superfícies da argamassa e formam novos produtos de hidratação que não só melhoram a microestrutura da zona de transição, como também fazem com que a durabilidade de concretos com AGRC seja melhorada.

Werle (2010) analisou a carbonatação em concretos com diferentes percentuais e resistências do concreto que gerou o AGRC. Ao analisar o teor do mesmo, conclui que, quanto maior o teor de substituição, maior é a profundidade carbonatada, comportamento também observado por Kou; Poon (2012).

Werle (2010) estuda três diferentes resistências de AGRC, com diferentes percentuais de substituição por AGN, inseridos em novas matrizes de concreto. A mesma verifica que, quanto menor a resistência do AGRC inserido na nova matriz de concreto, maior é a porosidade e a carbonatação. Quanto maior a resistência do AGRC inserida em novas

matrizes de concreto, produzidas com menor resistência que o concreto oriundo do AGRC, mais lenta é a carbonatação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. O programa experimental foi executado conforme Figura 6 e Figura 7.

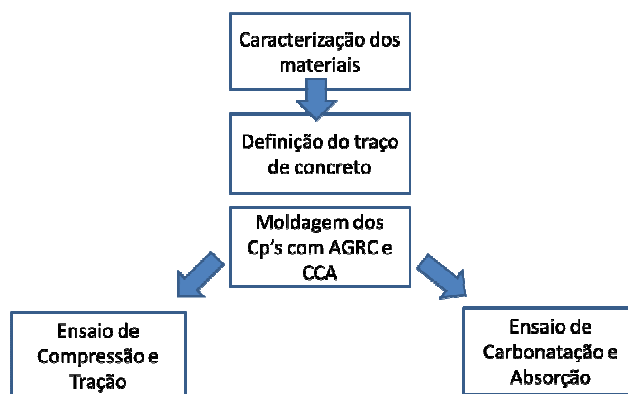


Figura 6- Etapas resumidas do programa experimental.

Caracterização dos agregados	Granulometria Massa específica Massa unitária Absorção de água Porosimetria
Definição dos traços a serem utilizados	
Moldagem dos Cp's	Cura Submersa
Ensaio mecânicos	Compressão (7, 28, 63, 91, 112) dias; Tração (28) dias
Ensaio de durabilidade	Preparação das amostras para sazonalidade Distribuição de umidade interna (106) dias
Absorção d'água	
Carbonatação acelerada 3% de CO ₂	Medidas de carbonatação à 1, 3, 7, 28, 63, 91, 147

Figura 7 - Etapas do programa experimental pela linha do tempo.

3.1 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

No planejamento de experimentos foi adotado um projeto fatorial n^k , em que k é o número de fatores contemplados no planejamento, e n são os níveis de estudo. Os fatores de controle com os níveis estudados, bem como as variáveis de resposta são apresentados na sequência.

3.1.1 Fatores de controle

Os fatores de controle estão relacionados na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de controle e fatores de controle com apenas um nível.

Fatores de Controle	
Relação A/Agl.	0,42; 0,53; 0,64
Teor de CCA	0%; 10%; 20%
Teor de AGRC	0%; 25%; 50%
Idades – Resistência à compressão	7, 28, 91, 112
Idades – Profundidade de carbonatação	1, 3, 7, 28, 64, 92, 147
Fatores com apenas um nível de estudo	
Tipo de cimento, tipo de AGRC, concentração de CO ₂ , idade da resistência à tração	

Adotando-se k igual a três e n igual a três, obtêm-se 27 traços de concreto para cada um dos ensaios de resistência nas diversas idades de ensaio, e para cada leitura de profundidade de carbonatação nos diversos tempos de exposição.

3.1.2 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta estudadas propostas são:

- I. Resistência à compressão;
- II. Resistência à tração;
- III. Profundidade da frente de carbonatação;
- IV. Absorção d'água;
- V. Porosidade.

3.2 MATERIAIS

Parte dos materiais utilizados no projeto, cimento, agregado miúdo e agregado graúdo é doado de uma empresa de serviços de concretagem da Serra Gaúcha.

3.2.1 Cimento

O cimento escolhido foi o CP II-F-32 Itambé, pois não possui teores elevados de adições reativas, o que facilita a compreensão da ação da cinza de casca de arroz. Na Tabela 5, é apresentada a caracterização física, química e mecânica do cimento. Foi produzido nos meses de abril e maio de 2012. Foram utilizados dois lotes durante a moldagem, pois se viu necessário utilizar uma maior quantidade de cimento para a conclusão dos traços. Verificou-se que a diferença da caracterização entre os dois lotes era pequena, pode-se destacar o blaine (cm²/g) do lote de abril foi de 3.850 e do lote de maio 3.720.

Tabela 5 – Caracterização física, química e mecânica do cimento utilizado.

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)	3:20	3:30
Fim de Pega (h:min)	4:30	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	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: Cimento Itambé

3.2.2 Cinza de casca de arroz

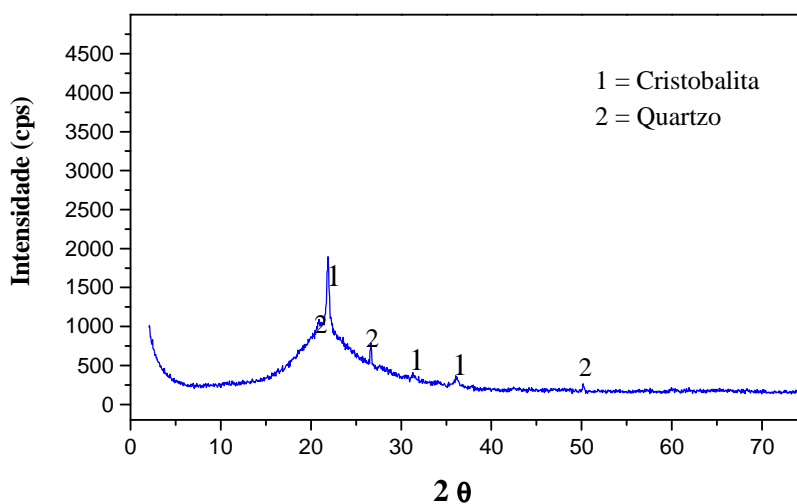
A cinza de casca de arroz utilizada é uma pozolana que comercialmente é denominada de sílica da casca de arroz. Ela é oriunda da cidade de Alegrete, RS, e é produzida a partir da geração de energia pela combustão da casca de arroz em forno de leito fluidizado. A massa específica desse cinza é de 2,12 g/cm³. Os demais parâmetros caracterizados são apresentados na sequência.

A caracterização química da pozolana foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVM) da UNISINOS, empregando 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 dessa caracterização é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – 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 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 8, apresenta-se o difratograma obtido.

**Figura 8 – Difratograma de Raios X da Cinza de casca de arroz.**

A análise mineralógica por DRX retornou um material predominantemente amorfo com picos de sílica cristalina bem definidos de quartzo e cristobalita. Esses minerais podem ter se formado durante o processo de combustão da casca de arroz, que é rica em sílica. Contudo, os cristais de quartzo também podem ter origem na areia quartzosa presente no processo de fluidificação do forno, a qual passa a “contaminar” a cinza (ANGEL, 2009).

O tamanho médio de partícula da CCA foi obtido por granulometria de difração laser, realizada no LCVM da UNISINOS, com o equipamento Microtac S3500. No preparo da

amostra, dispersou-se o material em água com aditivo superplastificante, submetendo-o ao ultrassom na potência de 40 W por 60 s. Obteve-se a dimensão média de partícula de 6,22 μm . A distribuição granulométrica é apresentada no gráfico da Figura 9.

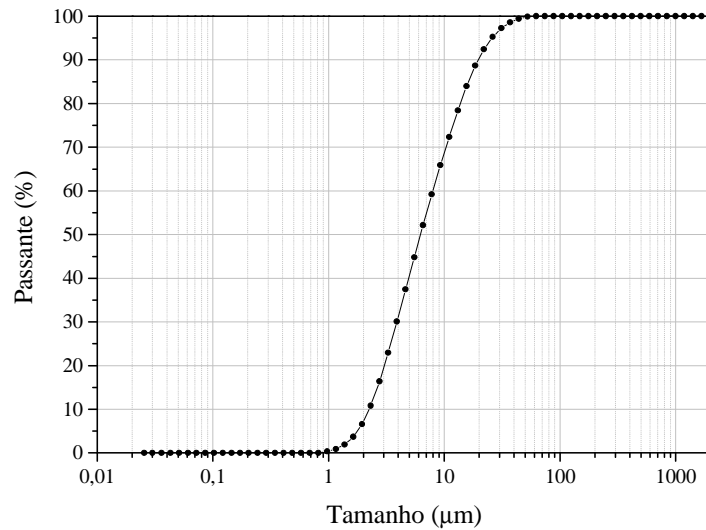


Figura 9 – Distribuição granulométrica da cinza de casca de arroz.

A atividade pozolânica da CCA foi testada pela NBR 5752 (ABNT, 1992), adaptada ao empregar teores de 10% e 20% no lugar de 30% de pozolana conforme prescrito, e, num segundo momento, adaptada ao ajustar a consistência por aditivo. Também se calculou a atividade pozolânica empregando-se condutividade elétrica (Luxán, 1989). Os resultados estão na Tabela 7.

Tabela 7 – Caracterização da atividade pozolânica da CCA.

Material	Água (g)	Aditivo (g)	Água requerida (%)	Consistência (mm)	fc (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)	Condutividade ($\mu\text{s/cm}$)
Referência	155	---	100,0	223	25,8	----	
CCA-C1	165	----	106,5	226	27,0	104,7	1,3

Na Figura 10, é apresentada a micrografia da cinza de casca de arroz obtida em microscópio eletrônico de varredura (MEV), na qual pode ser observada a forma irregular das partículas.

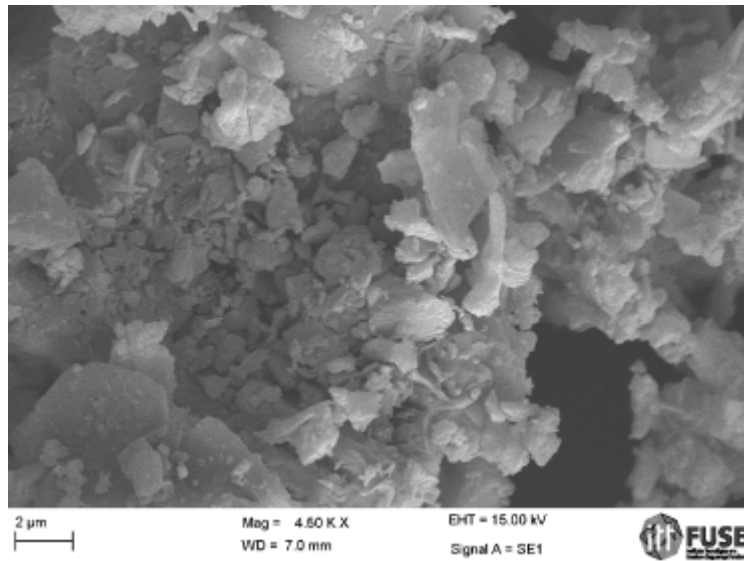


Figura 10 – Micrografia da cinza de casca de arroz (aumento de 4500x).

Na Figura 11 e na Figura 12, apresenta-se a micrografia da pasta de cimento e da pasta de cimento com CCA, na idade de 48 horas e aumento de 4500 vezes. Na imagem da Figura 11, micrografia da pasta de cimento, indica-se a presença de hidróxido de cálcio (placas) e, em sua maioria, C-S-H e cristais de etringita. Já na Figura 12, os cristais que podem ser observados, em grande parte, referem-se aos cristais de C-S-H e, em menor quantidade, hidróxido de cálcio e etringita. Estas diferenças indicam a interferência da CCA, já nas primeiras idades das pastas, na hidratação do cimento.

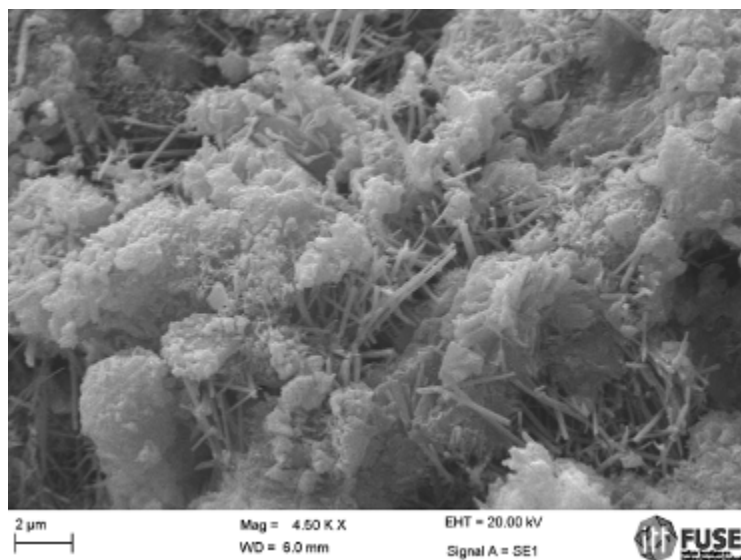


Figura 11 – Micrografia de pasta de cimento (48 horas), com aumento de (4500 X).

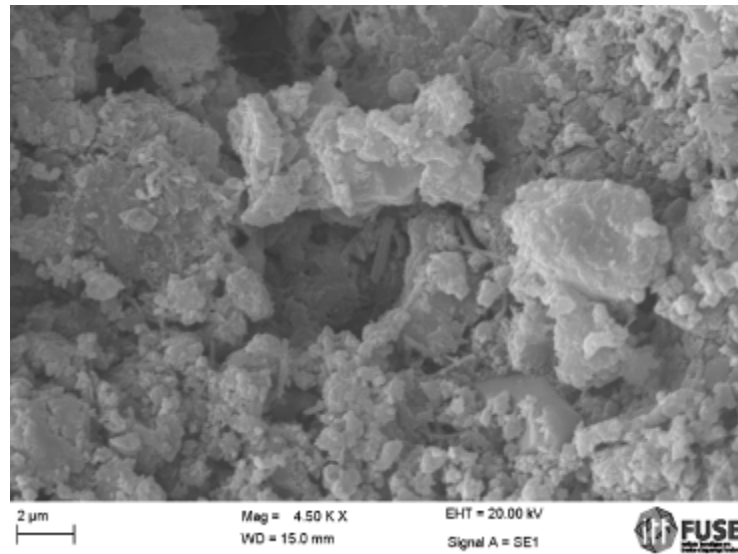


Figura 12 – Micrografia de pasta de cimento com CCA (48 horas), aumento de (4500X).

3.2.3 Agregado Miúdo Natural (AMN)

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

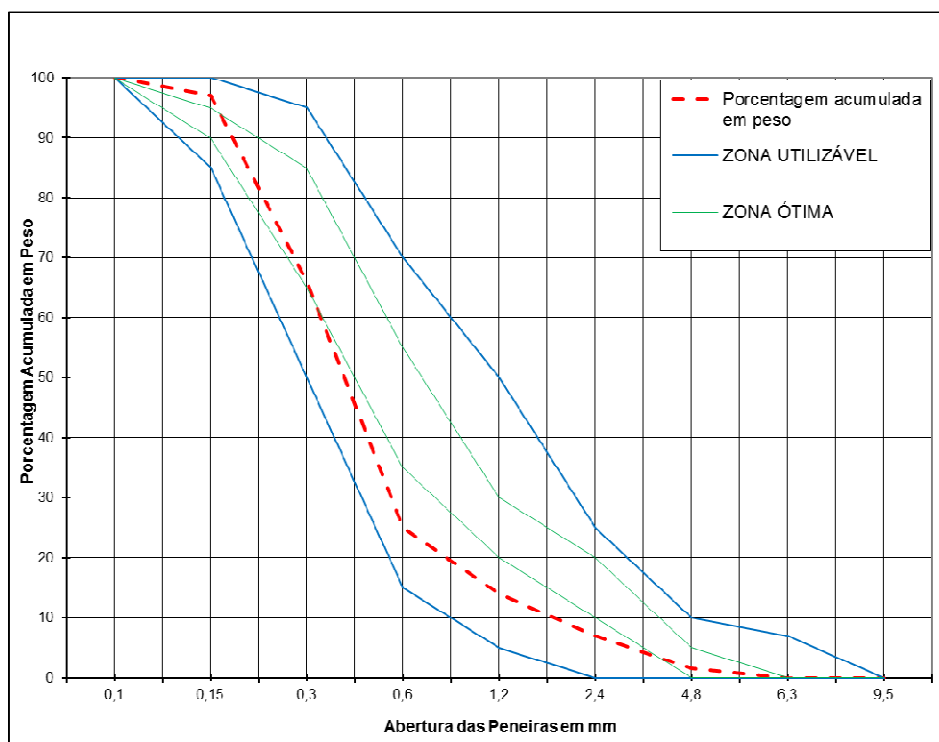
A caracterização da areia quartzosa foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da UNISINOS, onde foram feitas as curvas granulométricas, massa específica e massa unitária, que seguiram a NM 248 (ABNT, 2003), NM 52 (ABNT, 2002) e NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente. A areia foi seca ao ar em local abrigado para a realização da caracterização, bem como para a utilização para esta pesquisa. Após esse processo, a areia foi armazenada em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento com anel metálico zincado. Os dados de massa específica e unitária são apresentados abaixo, na Tabela 8 e Tabela 9, bem como a curva granulométrica na Figura 13.

Tabela 8 - Valores de massa unitária e específica do agregado miúdo natural utilizada na pesquisa.

Ensaio/NBR	Resultado (g/cm ³)
Massa unitária/ NM 45	1,52
Massa específica/ NM 52	2,60

Tabela 9 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural utilizado na pesquisa.

Abertura da Peneira	Massa Retida (%)	Massa 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 13 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural utilizada na pesquisa.**

3.2.4 Agregado Graúdo Natural (AGN)

O agregado graúdo natural empregado na pesquisa foi brita basáltica proveniente da Linha São Jorge, distrito de Garibaldi, Rio Grande do Sul.

A caracterização da brita basáltica 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 NM 248 (ABNT, 2003), NM 53 (ABNT, 2002) e NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente. Antes de se realizar tais testes e para sua utilização na pesquisa, a brita teve de ser lavada e secada ao ar à temperatura ambiente em local fechado para reduzir os finos aderidos no grão. Após esse processo, a brita foi armazenada em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento com anel metálico zincado. Os dados de massa unitária, específica e a caracterização granulométrica obtidos são apresentados na Tabela 10 e na Tabela 11, e a curva granulométrica na Figura 15.

Tabela 10 - Valores de massa unitária e específica do agregado graúdo natural utilizada na pesquisa.

Ensaio/NBR	Brita (g/cm ³)
Massa unitária/ NM 45	1,40
Massa específica/ NM 52	2,67

Tabela 11 - Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural utilizado na pesquisa.

Abertura da Peneira	% Retido	% 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 de Concreto (AGRC)

O agregado utilizado na pesquisa é proveniente de resíduos da produção de laje pré-fabricada tipo Roth, submetida à cura convencional com fck 35 MPa, britada em um britador de mandíbulas com abertura de 20mm. Todo o AGRC utilizado na pesquisa foi o passante na peneira de malha de abertura 19 mm e retido na 4,8 mm, e seco em estufa por 24 horas na temperatura de 105°C. Após esse processo, o AGRC foi armazenado em tonéis de plástico de 100 litros com fechamento com anel metálico zincado. O método de absorção de água dos AGRC foi feito segundo Werle (2010) adaptado de Leite (2001).

A curva de absorção de água desses agregados é apresentada na Figura 14. Obteve-se, aos 10 minutos, uma absorção de 6,29% e às 24 horas 10,34%. Deve-se salientar que a NBR 15116 (ABNT, 2004) estabelece que a absorção máxima de ARC deve ser de 7 por cento. No entanto, esta pesquisa considera que a absorção caracterizada para o material empregado não interfere significativamente nos resultados se comparados a outros índices. Pela regressão do conjunto de dados, a absorção aos 10 minutos é aproximadamente 6%, e foi o valor adotado para taxa de compensação de água. O ponto de saturação desse conjunto de

dados ocorre aos 31,6 minutos com uma absorção de 8,96%. A massa específica desse material é de 2,21 g/cm³.

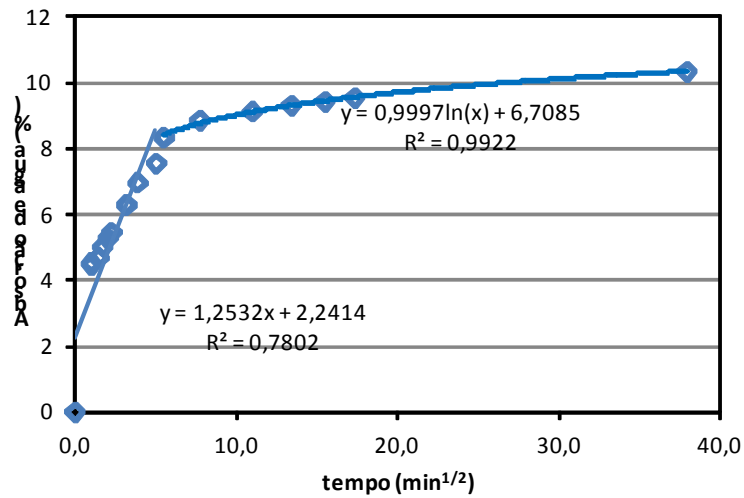


Figura 14 – Curva de Absorção de água do AGRC.

A destruição granulométrica do AGRC é apresentada na Tabela 12 e Figura 15.

Tabela 12 – Granulometria do AGRC.

Abertura de peneira # (mm)	Massa Retida (%)	Massa Acumulada (%)
38	0	0
25	0	0
19	36	36
12,5	43	79
9,5	10	89
6,3	10	99
4,8	1	100,0
Dimensão máxima característica (mm)		25
Módulo de finura		7,25

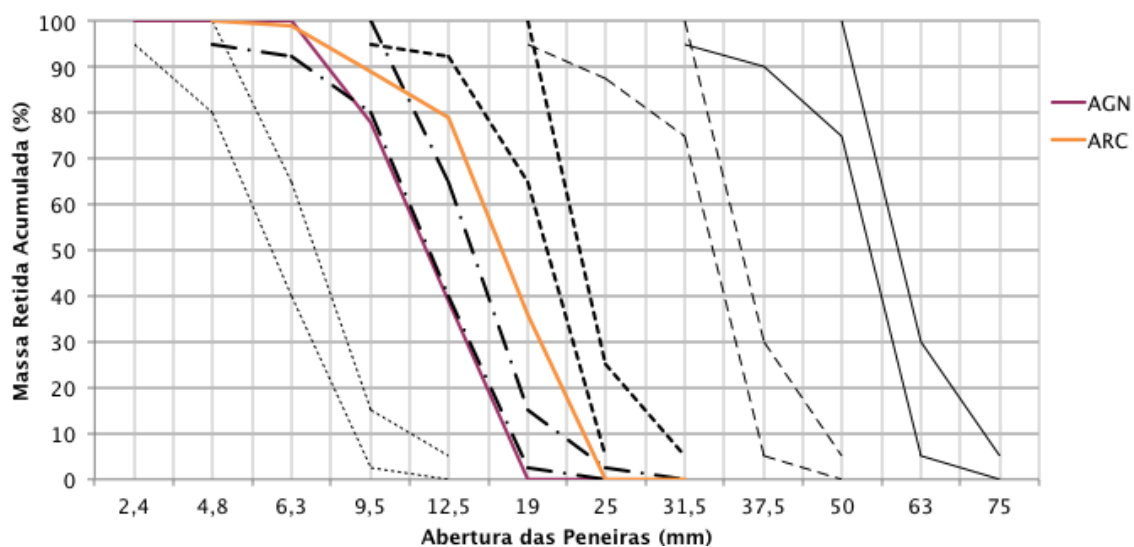


Figura 15 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural (AGN) e do agregado reciclado de concreto (AGRC) utilizado na pesquisa.

3.2.6 Água

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

3.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.3.1 Produção dos concretos

Antes do início da produção dos concretos, foi realizado um teste piloto para definir os ajustes necessários do programa experimental, e seguindo as tendências das concreteiras, foi fixado o teor de argamassa para a produção de concreto em 55%, e um abatimento de tronco-cone de 100 ± 20 mm.

Na tabela 13, apresenta-se a relação dos traços estudados e consumos de materiais para cada uma das misturas de 70 kg de material seco. 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. O abatimento de tronco-cone foi acertado com o auxílio de superplastificante a base de policarboxilato.

As substituições do cimento por CCA, e do agregado graúdo convencional por AGRC foram realizadas em massa com compensação de volume (Equação 2), em função da diferença significativa entre as massas específicas dos materiais.

$$M_{AGRC} = \frac{M_{AN}}{\gamma_{AN}} \times \gamma_{AGRC} \quad \text{Equação 2}$$

A taxa de compensação de água empregada foi de 50% da absorção aos 10 minutos, adotada como 6,0%, e o cálculo da quantidade de água para tal fim foi calculada pela Equação 3. A taxa de compensação de água foi empregada juntamente com 1/3 da água de amassamento, que foi aplicada juntamente com o AGRC.

$$M_{H_2O} = 0,50 \times ABS_{10\text{min}} \times M_{AGRC} \quad \text{Equação 3}$$

Tabela 13 – Consumo dos materiais empregados para cada traço.

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.

3.3.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova de cada relação água/aglomerante se deu em duas etapas, para haver a minimização de perda de material. As formas utilizadas foram cilíndricas de 100x200 mm e prismáticas de 60 x 60 x 180 mm. O adensamento dos corpos de prova cilíndricos ocorreu por 10 segundos, entre a entrada e a saída da agulha do vibrador de imersão, e a moldagem e a cura seguiram a NBR 5738 (ABNT, 2003). Já para os corpos de prova prismáticos foi utilizada a mesa vibratória durante 8 segundos.

Após 24 horas da moldagem, ocorreu a desforma e a identificação dos corpos de prova, tanto cilíndricos quanto prismáticos, de forma que, após essa etapa, os mesmos foram submetidos à cura submersa em tanques de água saturados com cal. Como a quantidade de corpos de prova era expressiva, pois mais duas dissertações Ceconello (2013) e Fedumenti (2013) os moldaram a partir desse concreto, não houve espaço físico para acondicionar todos na sala de cura, de forma que, após 42 dias, eles eram retirados e realocados em uma sala de

temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, mantendo-os em cura submersa dentro de tanques plásticos. Os corpos de prova prismáticos foram deixados por 28 dias na cura submersa e conduzidos a etapa de sazonalamento.

3.3.3 Sazonamento

Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios de compressão e de tração, já os prismáticos foram utilizados para o ensaio de carbonatação acelerada. Após a etapa de cura de 28 dias, foi retirado um corpo de prova por traço das três relações a/agl, e cada um dos três corpos de prova foi dividido em quatro segmentos, rompidos em prensa manual à compressão. Para não se perder nenhum fragmento, os corpos de prova foram rompidos dentro de sacos plásticos de polietileno de alta densidade. Mediu-se a massa das amostras, levando-as imediatamente para secagem em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até a obtenção de constância de massa de $\pm 0,5\text{g}$. No dia seguinte, aos 29 dias foram retirados os corpos de prova restantes do traço, pesados e acondicionados em estufa de $50^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. A metodologia se procedeu dessa forma, pois, após a realização do traço 0% de AGRC e 0% de CCA, 0% de AGRC e 10% de CCA, e 0% de AGRC e 20% de CCA, notou-se que os corpos de prova acondicionados na estufa de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ demoravam a chegar à constância de massa de $\pm 0,5\text{g}$. A diferença de peso do corpo de prova com 100% umidade interna e seco ($\pm 0,5\text{g}$) que se situa na estufa à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ é fundamental para a obtenção de valores para os outros corpos de prova acondicionados na estufa de $50^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, sendo assim a demora para que ocorra a constância de massa levou a essa medida.

Para o ensaio de carbonatação foi definido que a umidade interna aparente estaria em 70%, de modo a fixar essa variável.

Para a obtenção da água total evaporável, foram seguidos os seguintes passos:

- I. Aos 28 dias, coletou-se um corpo de prova de cada traço, o mesmo é seco superficialmente com pano absorvente e registrado sua massa;
- II. Colocou-se em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e se realizou leituras de massa em intervalos de 24 horas;
- III. Verificaram-se as diferenças de massa para cada leitura realizada a cada 24 horas;

IV. Interrompeu-se a secagem quando a diferença de massa observada entre duas leituras consecutivas, em um intervalo de 24 h, foi menor do que 0,5 g;

O cálculo da quantidade de água total evaporável (W_e) é feito com a Equação 4.

$$W_e = m_0 - m_d \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

W_e = quantidade de água evaporável (g);

m_0 = massa do corpo de prova ao final da cura (g);

m_d = massa do corpo de prova após a secagem em estufa (g).

V. Concentração de umidade evaporável (w_e) com a Equação 5

$$w_e = \frac{W_e}{m_d} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

w_e = teor água evaporável (%);

VI. A quantidade de água estimada a ser perdida, em gramas, para cada corpo de prova atingir 70% de umidade, é calculada com a Equação 6.

$$W_s = 0,30 \times w_e \times m_0 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

W_s = quantidade de água a ser perdida para cada corpo de prova (g);

Para os corpos de prova destinados à carbonatação, foram seguidos os passos:

- I. Colocou-se o corpo de prova em estufa à $50^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, e a pré-secagem deve ser interrompida quando o corpo de prova atingir a massa equivalente à perda de 30% da umidade evaporável em gramas, ou ainda, quando perde mais que 30%, é feita a aspersão de água no corpo de prova até que atinja o valor conforme obtido com a Equação 7.

$$m_s = m_0 - W_s \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

m_s = massa equivalente à perda de 30% de umidade evaporável (g);

m_0 = massa do corpo de prova ao final da cura (g);

W_s = quantidade de água a ser perdida (g).

- II. Cada corpo de prova, após atingir m_s , foi disposto em embalagens impermeáveis, pois não permitem a troca de gás com o meio externo, conforme Figura 16 e Figura 17.
- III. Foi feito o acondicionamento dos corpos de prova embalados em sala climatizada com temperatura e umidade relativa controlada ($T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 70\% \pm 5\%$);
- IV. Após um período de 106 dias, ocorreu a retirada dos corpos de prova da embalagem e a pesagem, sendo direcionados à câmara de carbonatação. Usualmente, utiliza-se o período de ± 60 dias para que ocorra a retirada da embalagem, porém houve a necessidade do ajuste de alguns parâmetros na câmara de carbonatação, que estava desativada, para adequação desta pesquisa, o que gerou tempo não previsto de espera.



Figura 16 – Corpos de prova selados em embalagens impermeáveis.



Figura 17 – Corpo de prova selado em embalagens impermeáveis com sua devida caracterização e peso.

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão

O ensaio de compressão axial ocorreu conforme NBR 5739 (ABNT, 2007), e os corpos de prova cilíndricos de 100x200mm foram utilizados para esse ensaio, a prensa é classe I, marca Controls com capacidade de 2000 KN.

3.4.2 Ensaio de Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado pelo método de compressão diametral de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 1994), e os corpos de prova cilíndricos de 100x200mm foram utilizados para esse ensaio, a prensa é classe I, marca Controls com capacidade de 2000 KN.

3.4.3 Ensaio de absorção d'água

Os dados obtidos pelos ensaios de absorção por capilaridade, Fedumenti (2013) explica, nos capítulos 3.3.3, como obtivemos os corpos de prova, e, em 3.4, como foi realizado o ensaio. Foram utilizados para o cálculo da taxa de absorção por capilaridade, que é obtida através do quociente da inclinação da reta referente à fase de absorção pela área efetiva do corpo de prova e a porosidade total foi calculada com a Equação 8.

$$\frac{M_{72} - M_s}{(e * 100 * a) * 100} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

M_{72} = Massa a 72 horas absorção (g);

M_s = Massa seca (g);

e = espessura do corpo de prova (m);

a = área efetiva do corpo de prova (cm²).

3.4.4 Ensaio Acelerados de Carbonatação

Conforme visto na bibliografia, há divergências de opiniões na realização desse ensaio. Mesmo assim, para este trabalho se optou em dar continuidade à pesquisa realizada por Werle (2010). Depois de transcorrido o sazonalamento, foi feito o ensaio acelerado de

carbonatação, para cuja realização foi utilizado o LMC/UNISINOS, na sala com temperatura e umidade controlada ($T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 70\% \pm 5\%$). A câmara de carbonatação é abastecida pela mistura de ar e CO_2 , sendo o ar capturado do meio externo e o CO_2 obtido por meio de cilindros, de forma que ocorre a mistura entre os mesmos para homogeneização e posterior passagem para as duas câmaras, como pode ser visto na Figura 18 e na Figura 18..

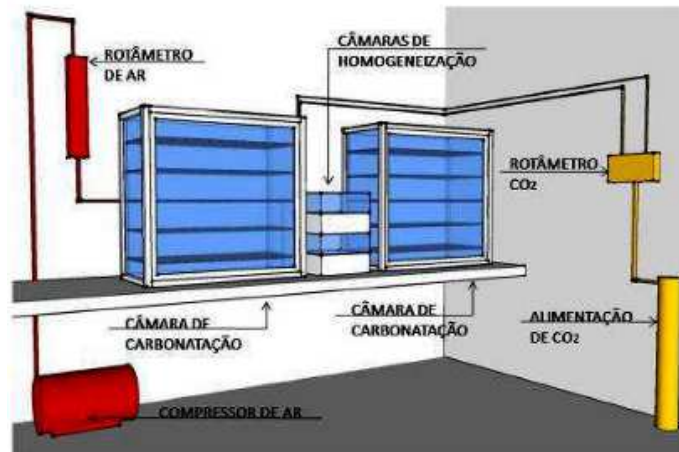


Figura 18 - Sistema explicativo dos aparelhos para realização do ensaio acelerado de carbonatação.

Fonte: Werle (2010).



Figura 19 – Câmara de carbonatação utilizada para a carbonatação acelerada dos corpos de prova.

A alimentação das câmaras é constante, o ramal de saída é fora da sala, promovendo dentro das câmaras uma homogeneidade, e há coolers instalados para aeração das mesmas.

Assim, a câmara foi ajustada para ter uma umidade interna de 70%, igual a dos corpos de prova, a fim de extinguir ou minimizar essa variável. A umidade interna é

controlada por sensor de umidade eletrônico. Foi realizada a aferição do percentual de CO₂ dentro da câmara com um medidor, e escolhido um valor de 3 por cento.

Após a retirada do corpo de prova da câmara, o mesmo é rompido em prensa manual resultando em um fragmento de aproximadamente ¼ da amostra. Esta é retirada e aspergida fenolftaleína sobre a mesma na concentração de 1%, para a determinação das zonas carbonatada. Na figura 20, apresenta-se um corpo de prova aos 28 dias do traço com 0% de AGRC e 0% de CCA. O restante do corpo de prova volta para a câmara para futuras medições.

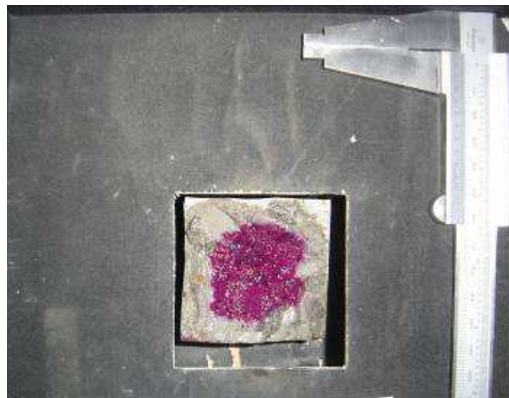


Figura 20 – Fragmento de corpo de prova aos 28 dias de carbonatação acelerada submetido à aspersão de fenolftaleína.

Sobre o indicador de fenolftaleína pode-se dizer que fica incolor abaixo de pH 8; cor de rosa com pH entre 8 e 10 e cor carmim ou roxa com pH entre 10 e 12. Sendo assim, fica fácil visualizar áreas carbonatadas abaixo de pH 8 e áreas com pH em torno de 13. O pH alcalino é comumente encontrado em quaisquer concretos que não sofreram ação da carbonatação. Para calcular o coeficiente de carbonatação foi utilizada a equação 9.

$$e_c = k\sqrt{t} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

e_c = profundidade carbonatada;

t = tempo de exposição;

k = constante.

3.4.5 Medidas para Verificar a Profundidade de Carbonatação

Pauletti (2009) produziu fotografias com máquina fotográfica digital e analisou pelo software KS 100 – Carl Zeiss Vision (realise 3.0). Werle (2010) utilizou o software

Image tool e AutoCad, bem como Hoppe (2008) e Hoppe Filho (2008) utilizaram o software AutoCad. Neste trabalho, as medidas foram analisadas pelo software AutoCad.

Conforme Figura 21 e Figura 22, foi verificado como foram realizadas as medidas de profundidade de carbonatação. Eliminou-se as partes superiores e inferiores, buscando uma maior homogeneidade, por essas apresentarem diferença de umidade e compacidade no momento que ocorre a moldagem dos corpos de prova, o que poderia resultar em uma distribuição diferente dos poros.

Primeiramente foi ajustada a escala da foto com auxílio da ferramenta “Scale” no software AutoCad e com o paquímetro, após o ajuste, são limitadas as áreas da medição, conforme Figura 21.



Figura 21 – Limitação da área de medição, no Software AutoCad, do fragmento de corpo após aspersão de fenolftaleína.

Após essa etapa, foram feitas 15 medidas equidistante entre si, conforme mostra na Figura 22, e, por fim, foi retirada a média de cada lado já dada em milímetros.

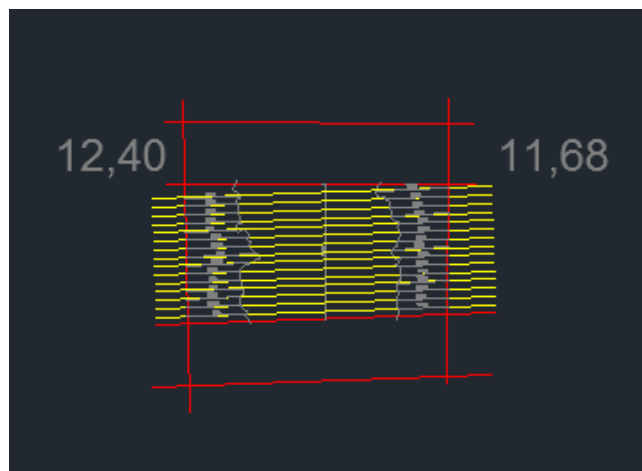


Figura 22 – Médias das 15 medições equidistantes do corpo de prova da Figura 21.

Esse procedimento se repete para cada fragmento, e, para cada medida, é feita a análise de dois corpos de prova, o que resulta em quatro médias.

3.4.6 Análise Estatística

Para a análise estatística foram aplicadas ferramentas de regressão e análise de variância (ANOVA), utilizando-se os programas Statistica e o Statgraphics. O objetivo é de correlacionar os resultados dos diferentes comportamentos por modelos matemáticos, e verificar os fatores que intervêm no comportamento de variáveis de resposta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentadas tabelas e figuras que relacionam os dados obtidos com os dados refinados, através de ferramentas estatísticas de análise de regressão múltipla não linear e análise de variância (ANOVA). Serão vistos e analisados dados referentes à compressão, à tração, à carbonatação, à taxa de absorção d'água e à porosidade total.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na tabela 14, são apresentados os dados obtidos através dos resultados médios à compressão ao longo dos dias, até 91 dias.

Tabela 14- Média de resistência à compressão axial nas idades estudadas.

CCA (%)	AGRC (%)	A/Agl	Média 7 dias (MPa)	Média 28 dias (MPa)	Média 63 dias (MPa)	Média 91 dias (MPa)
0	0	0,42	37,10	41,10	46,97	46,93
		0,53	35,63	39,27	41,80	44,80
		0,64	20,73	25,23	27,30	27,23
10	0	0,42	41,57	45,80	51,93	46,30
		0,53	24,97	33,97	32,83	39,70
		0,64	17,83	25,30	31,00	27,43
20	0	0,42	38,47	51,53	44,40	49,67
		0,53	27,23	38,57	37,27	41,03
		0,64	19,43	28,30	30,00	31,43
0	25	0,42	34,00	39,00	43,47	31,63
		0,53	24,80	28,43	33,80	32,53
		0,64	21,87	18,00	21,83	22,00
0	50	0,42	38,90	41,67	43,30	41,80
		0,53	25,00	32,03	37,10	32,67
		0,64	20,33	25,60	30,17	28,17
10	25	0,42	34,57	49,83	42,83	42,50
		0,53	22,23	33,97	32,70	35,90
		0,64	16,70	23,90	28,57	27,97
10	50	0,42	35,60	45,27	33,07	53,33
		0,53	24,87	34,17	40,37	41,00
		0,64	19,30	26,60	30,83	29,67
20	25	0,42	39,13	51,10	46,50	36,47
		0,53	28,80	36,13	40,50	42,30
		0,64	20,20	24,80	32,07	31,47
20	50	0,42	41,33	52,50	51,47	52,23
		0,53	27,60	41,63	33,87	46,07
		0,64	21,20	29,80	34,00	38,10

Como os corpos de prova que foram utilizados para o ensaio acelerado de carbonatação foram submetidos a uma cura úmida de 28 dias, optou-se por utilizar os dados de compressão aos 28 dias para uma melhor correlação com os dados obtidos para futuras discussões. Sendo essa a idade comumente utilizada por pesquisadores, pois há uma tendência

de estabilização após os 28 dias, comportamento esperado em concretos compostos com cimento. Nas figuras 23, 24 e 25, são apresentados os resultados à compressão aos 28 dias, e se observa os resultados obtidos no ensaio e as curvas ajustadas pela equação de Abrams.

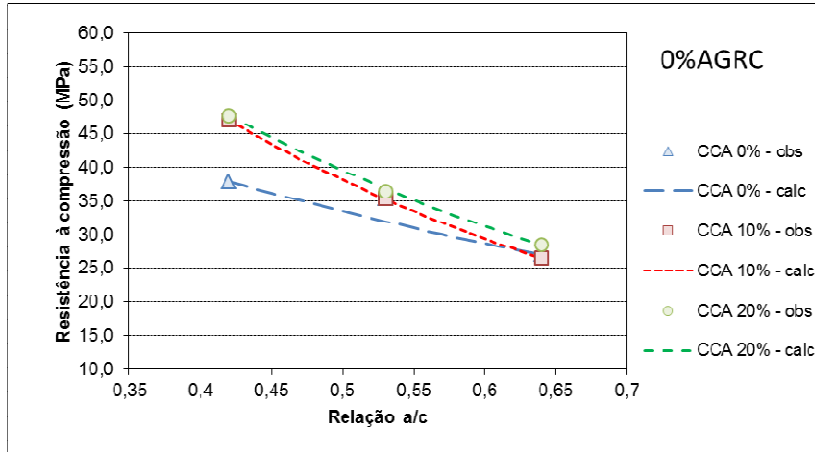


Figura 23 – Resistência à compressão aos 28 dias para concretos sem AGRC.

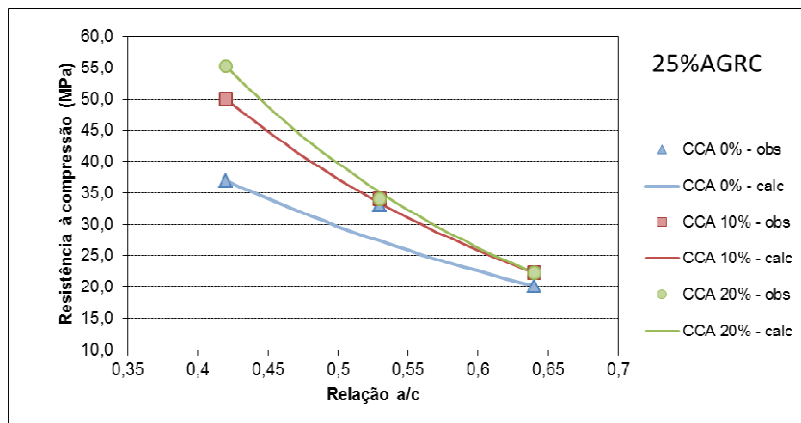


Figura 24 – Resistência à compressão aos 28 dias para concretos com 25% de AGRC.

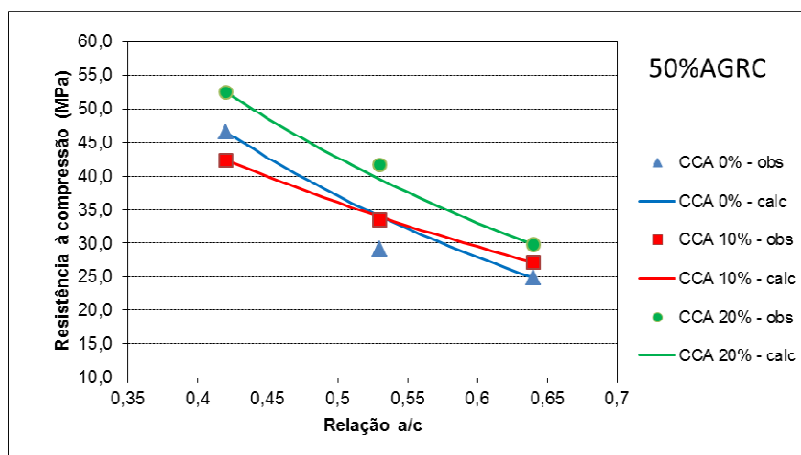


Figura 25 – Resistência à compressão aos 28 dias para concretos com 50% de AGRC.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a CCA contribui para compensar as eventuais perdas de resistência à compressão dos concretos que empregam AGRC. De modo geral, a substituição do cimento por CCA se mostra benéfica na incorporação de concretos com até 50% de substituição de AGN por AGRC, dentro dos limites estudados no trabalho. Para uma relação a/agl 0,42 e 0,64 com 25% AGRC, ao incorporar 20% CCA, a resistência à compressão passa de 39,0 MPa para 51,10 MPa e de 18,0 MPa para 24,80 MPa, respectivamente, o que se traduz em um aumento de 23,68% e 27,42%. Para uma relação a/agl 0,42 e 0,64 com 50% AGRC, ao incorporar 20% de CCA, a resistência à compressão também é aumentada em, respectivamente, 41,7 MPa para 52,50 MPa e de 25,60 MPa para 29,80 MPa, o que significa um aumento de 20,62% e de 14,09%. Na tabela 15, apresenta-se a equação de cada uma das curvas de Abrams aos 28 dias, ajustadas para os concretos estudados, bem como os coeficientes de determinação de cada uma. Observa-se pelo coeficiente de determinação que, em geral, o modelo de Abrams ajusta de forma satisfatória o comportamento dos concretos estudados.

Tabela 15- Equações das curvas de Abrams.

AGRC (%)	CCA (%)	Equação da curva	R ² (%)
0	0	LOG(fc) = 1,8598 - 0,6694a/c	88,13
0	10	LOG(fc) = 2,1472 - 1,1311a/c	100
0	20	LOG(fc) = 2,1055 - 1,0167a/c	99,95
25	0	LOG(fc) = 2,0700 - 1,1948a/c	85,35
25	10	LOG(fc) = 2,3684 - 1,5939a/c	99,91
25	20	LOG(fc) = 2,4934 - 1,7892a/c	99,89
50	0	LOG(fc) = 2,1880 - 1,2372a/c	93,85
50	10	LOG(fc) = 1,9954 - 0,8763a/c	99,88
50	20	LOG(fc) = 2,1897 - 1,1179a/c	98,89

Para os concretos de relação água aglomerante 0,42, ao se incorporar 25 e 50% de AGRC, a resistência passa de 41,1 MPa para 39 MPa e 41,7 MPa, respectivamente, o que se traduz em uma queda de 3% e um aumento de 1,5%. Tecnicamente, essas diferenças não são significativas. Já para a relação água/aglomerante 0,64, ao se substituir o AGN por 25 e 50% de AGRC, as resistências passam de 25,2 MPa para 18,0 MPa e 25,6 MPa respectivamente, o que equivale a uma perda de 29% e um aumento de 1,6%. Nesse caso, a matriz mais porosa parece sofrer mais a influência da incorporação de AGRC.

A substituição de cimento por CCA em média se mostra benéfica na resistência à compressão, tanto nos concretos sem AGRC, quanto nos concretos com teores estudados de AGRC. Provavelmente a CCA está melhorando a interface entre a pasta e os agregados, pode ainda estar ocorrendo uma melhora entre a nova pasta de cimento e a pasta do agregado

reciclado de concreto, em que a CCA pode estar interagindo com os produtos de hidratação presentes no cimento da pasta contida no AGRC. O comportamento similar é visto por alguns autores (Krug (2011), Duart (2011), Troian (2010), Salas et al.(2009), Etxeberria (2007), Buttler (2003)).

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Com os dados relacionados na tabela 16, foi possível obter uma ANOVA com 95% de confiança, a qual é apresentada na tabela 17 e em forma de gráficos dos efeitos isolados.

Tabela 16- Resistência à tração aos 28 dias.

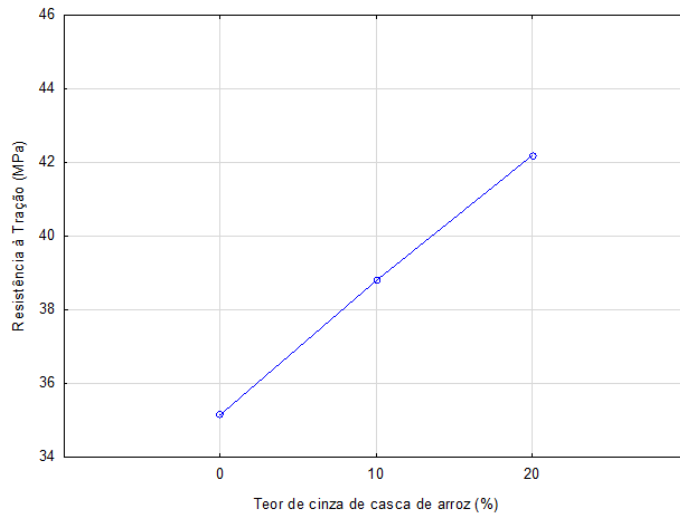
CCA (%)	AGRC (%)	A/AgI	Resistência à tração aos 28 dias (MPa)	
0	0	0,42	41,2	39,6
		0,53	41,4	39,1
		0,64	35,3	36,1
10	0	0,42	53,5	50
		0,53	41,4	41,1
		0,64	27,3	28,7
20	0	0,42	48,5	51,4
		0,53	43	43,5
		0,64	45,8	40,2
0	25	0,42	39,3	41,4
		0,53	29	29,5
		0,64	23,3	23,2
0	50	0,42	38,5	36,6
		0,53	37,5	37
		0,64	32,2	32,3
10	25	0,42	42,6	44,6
		0,53	40,3	38
		0,64	28,3	25,4
10	50	0,42	48,2	51,4
		0,53	36,5	36
		0,64	32,6	32,4
20	25	0,42	48,6	48,4
		0,53	38,3	38,6
		0,64	38,8	40,2
20	50	0,42	38,8	38,8
		0,53	42	40,8
		0,64	37	36,9

Tabela 17 – ANOVA para resistência à tração.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
CCA	2	224,46	112,23	7,94410	0,012578
AGRC	2	116,08	58,04	4,10820	0,059230
AAgl	2	586,56	293,28	20,75959	0,000681
CCA*AGRC	4	61,80	15,45	1,09362	0,421691
CCA*AAgl	4	152,50	38,13	2,69868	0,108240
AGRC*AAgl	4	32,06	8,02	0,56740	0,693789
CCA*AGRC*AAgl	8	113,02	14,13	1,00000	0,500000
Erro	27	0,585	0,0216667		

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; CCA = cinza de casca de arroz; AGRC = agregado graúdo reciclado de concreto; AAgl= relação água/aglomerante

Os resultados obtidos através da ANOVA demonstram que a CCA e a relação a/agl têm maior significância para a resistência à tração, e o AGRC apresenta pouca significância. Na figura 26, apresenta-se o efeito isolado da CCA na resistência à tração.

**Figura 26 – Efeito isolado da variável CCA no comportamento da resistência à tração.**

O efeito isolado da cinza de casca de arroz causa um aumento na resistência à tração. Conforme se aumenta o teor de substituição de cimento por CCA, verifica-se que a substituição de 10% e 20% de cimento por CCA causam um aumento de 10% e 17% na resistência à tração. O efeito isolado da relação a/agl é apresentado na figura 27.

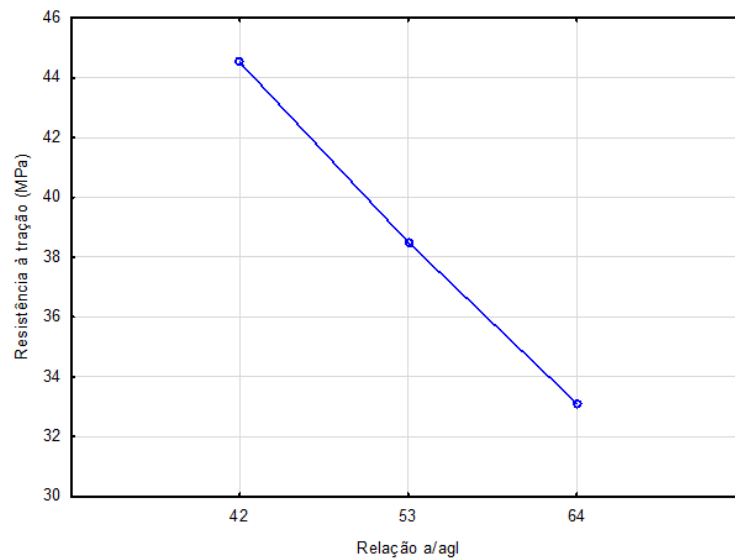


Figura 27 – Efeito isolado da variável AAgI no comportamento da resistência à tração.

Quanto maior a relação a/agl., menor é a resistência à tração para os concretos estudados, e ocorre uma queda gradual conforme se diminui o consumo de cimento. Da relação a/agl 0,42 para relação a/agl 0,53, ocorreu uma queda de aproximadamente 14%, como também ocorreu da relação a/agl 0,53 para a relação a/agl 0,64.

Na Figura 28, é apresentado o efeito isolado do AGRC na resistência à tração.

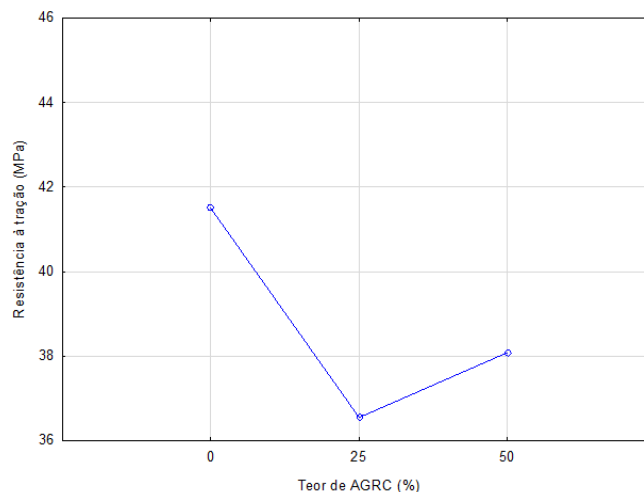


Figura 28 – Efeito isolado da variável AGRC no comportamento da resistência à tração.

O efeito isolado do AGRC na resistência à tração demonstra que a substituição do AGN pelo AGRC causa uma queda na resistência à tração que fica na ordem de 12% ao substituir 25% de AGN por AGRC, e ao substituir 50% AGN por AGRC, essa queda é de 8%,

ambas as quedas comparadas com o concreto referência. Essa variação, de 12% e 8%, na queda da resistência à tração, pode ser atribuída à variabilidade do AGRC.

É notável que o emprego de CCA é benéfico à resistência à tração tanto em concretos convencionais, quanto em concretos com agregado reciclado de concreto, e o comportamento visto no item 4.1 se repete.

4.3 CARBONATAÇÃO ACELERADA

Neste capítulo, são apresentados os resultados em formas de tabelas e figuras, onde nas tabelas são apresentados os dados de profundidade de carbonatação através da regressão múltipla não linear. Os dados obtidos estão no apêndice, em forma de tabela. Também as curvas das figuras são elaboradas em função do cálculo da regressão múltipla não linear, mostradas juntamente com os dados observados na pesquisa. Para a regressão múltipla não linear foi utilizada a variável resposta de profundidade de carbonatação, obtida através do tempo do ensaio, sendo o modelo apresentado na equação 10 .

$$ec = ((b1 + b2 * AGRC + b3 * CCA + b4 * AAgl + b34 * (CCA / AAgl) + b42 * ((AAgl * AGRC)^2) + b423 * ((AAgl^2) * (AGRC^{0,05}) * (CCA^{0,5})) + b2 * (1 / (1 - (AGRC^2))))^{(Tempo^{b5})} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

AGRC = agregado graúdo reciclado de concreto (0%;25%;50%)

CCA = cinza de casca de arroz (0%;10%;20%)

AAgl = relação água/aglomerante (0,42;0,53;0,64)

Tempo = tempo de exposição (dias)

Na tabela 18 e tabela 19, são apresentados os resultados para o modelo por regressão.

Tabela 18 - ANOVA do modelo para profundidade de carbonatação.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	8	4,56E+04	5,69E+03	1601,71	0,0000000
Resíduos	532	1,89E+03	3,55E+00		
Total	540	4,74E+04			
Total Corrigido	539	1,74E+04			

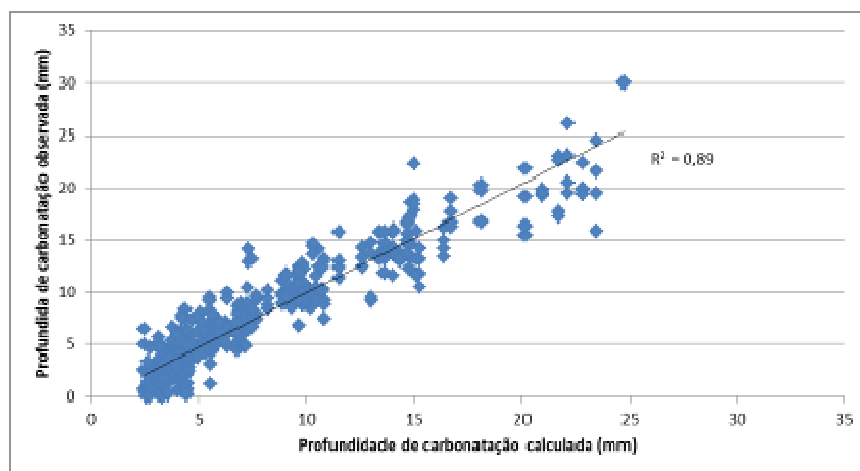
Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Tabela 19 - Parâmetro das variáveis analisadas para profundidade de carbonatação.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b1	-0,19975	0,177067	-1,12809	0,1298958
AGRC	b2	0,0113	0,00191302	5,906786	0,0000000
CCA	b3	-0,03035	0,0105796	-2,86846	0,0021442
AAgl	b4	6,26799	0,381753	16,41897	0,0000000
CCA/AAgl	b34	0,016449	0,00535349	3,072631	0,0011152
(AAgl*AGRC) ²	b42	-0,00072	8,52111E-05	-8,41068	0,0000000
(AAgl ²)*(AGRC ^{0,05})*(CCA ^{0,5})	b432	-0,10835	0,0307843	-3,51962	0,0002346
Tempo	b5	0,205751	0,00498387	41,28338	0,0000000

Onde: CCA= cinza de casca de arroz; AGRC=agregado graúdo reciclado de concreto; AAgl= relação água/aglomerante.

A ANOVA do modelo retornou com um valor de $r^2=0,89$, com os dados obtidos da profundidade de carbonatação, cujo valor de p é menor que 0,01, demonstram que há significância entre os fatores analisados com 99% de confiança. Uma confiabilidade de 89% nos dados calculados é considerada viável, visto que os agregados reciclados têm maior variabilidade em relação aos naturais e o experimento apresenta certa variabilidade, pois os dados calculados se mostraram coerentes com os observados. Para melhor visualizar os dados, eles são apresentados em função do coeficiente de carbonatação que foi realizado conforme a equação 9 relacionada com a equação 10. Na Figura 29, é mostrada a relação entre os dados obtidos e os observados.

**Figura 29 – Relação entre a profundidade de carbonatação acelerada calculada e observada.**

As curvas calculadas, segundo o modelo já apresentado, são relacionadas aos dados observados para o coeficiente de carbonatação (k) com 64 dias de exposição. As

leituras com esses dias foram as últimas contempladas por essa dissertação e apresentadas nas Figuras 30, 31 e 32.

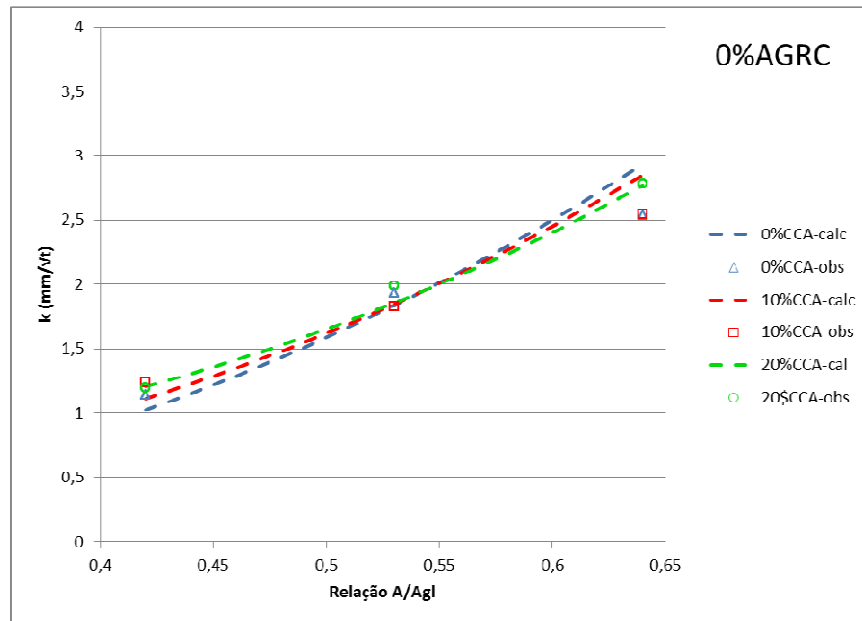


Figura 30 – Valores de profundidade de carbonatação observados e calculados aos 64 dias de exposição com 0% de substituição de AGN por AGRC.

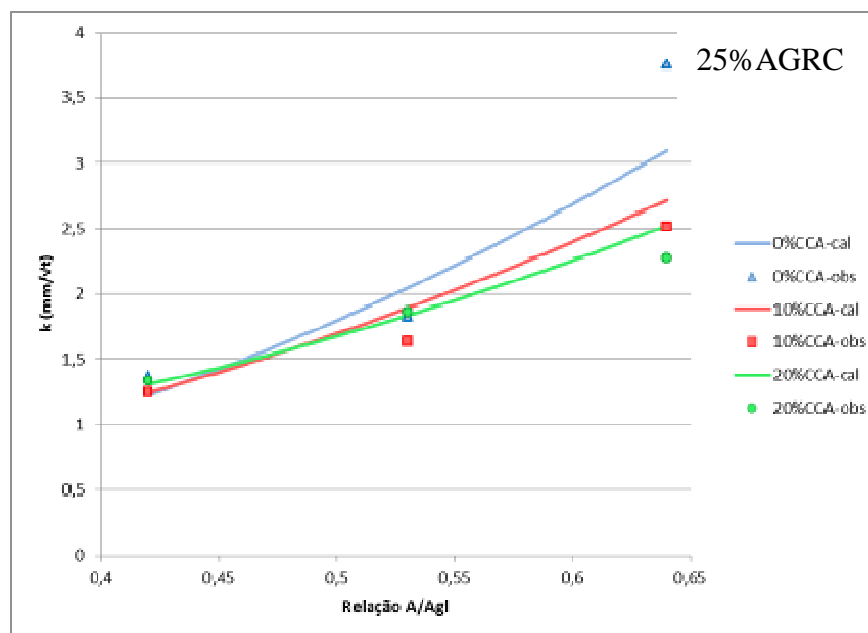


Figura 31 – Valores de profundidade de carbonatação observados e calculados aos 64 dias de exposição com 25% de substituição de AGN por AGRC.

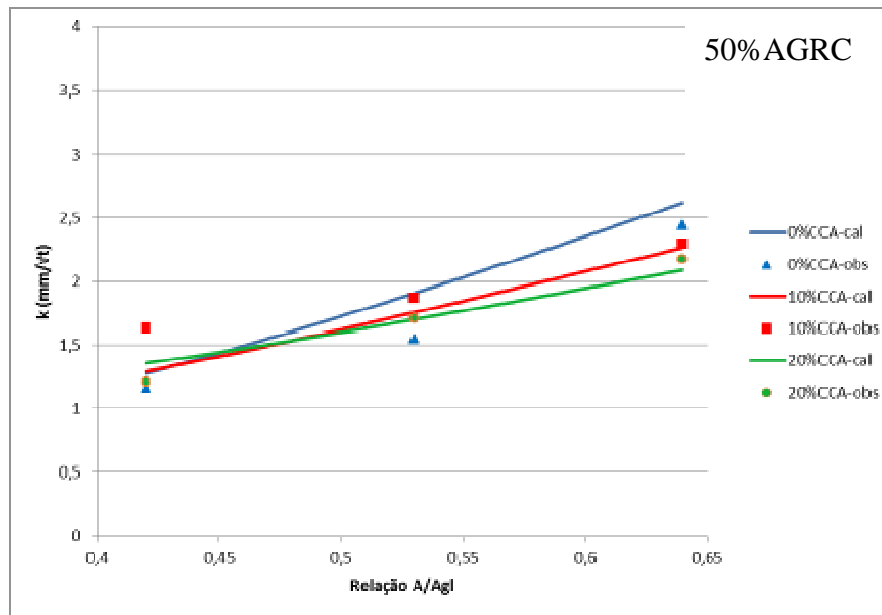


Figura 32 – Valores de profundidade de carbonatação observados e calculados aos 64 dias de exposição com 50% de substituição de AGN por AGRC.

Ao analisar as figuras 30, 31 e 32, que apresentam o coeficiente de carbonatação versus relação a/agl , verifica-se que, em geral, essa relação tem uma forte correlação com o coeficiente de carbonatação, e há uma ligação direta entre os dois fatores, pois, conforme se diminui a relação a/agl , o coeficiente de carbonatação também é reduzido. Verifica-se que em média, o coeficiente de carbonatação aumenta pouco ao se substituir 25% de AGN por AGRC, e o mesmo diminui quando o teor de AGRC passa de 25% para 50%.

Quando analisada a figura 30, que exhibe os concretos sem substituição de AGN por AGRC, nas relações a/agl mais baixas (0,42), percebe-se que o coeficiente de carbonatação é mais baixo para concretos sem CCA e aumenta conforme se eleva os teores de CCA. Em média, o coeficiente de carbonatação aumenta em 7,3% quando é feita a substituição de 10% do cimento por CCA, quando a mesma passa para 20% o aumento é de 4,5%, ou seja, a CCA eleva o coeficiente de carbonatação. Pode-se dizer que não houve grande diferença entre valores, assim como é visto nas relações a/agl intermediária (0,53) e mais alta (0,64). Porém, na relação a/agl mais alta (0,64), é visto um leve aumento que em média, quando é realizada a substituição de 20% de cimento por CCA, o coeficiente de carbonatação aumenta em 8,8%.

Na figura 31, concretos com relação a/agl 0,42 e 0,53, repetem o comportamento visto na figura 30. Entretanto, na relação a/agl 0,53, quando é feita a substituição de cimento por 10% de CCA, é visto um decréscimo de 11% no coeficiente de carbonatação. Ao analisar

o mesmo em concretos com relação a/agl 0,64, em média a substituição de cimento por 10% de CCA acarreta em um decréscimo de 32,9%, e quando a mesma passa para 20% de CCA, também ocorre um decréscimo de 39,5%.

Ao analisar a figura 32, concretos com 50% de substituição de AGN por AGRC com relação a/agl mais baixa (0,42), verifica-se que em média a substituição de cimento por 10% de CCA acarreta em um aumento de 29,2% no coeficiente de carbonatação. A substituição de 20% de cimento por CCA, não se mostrou significativa para essa relação a/agl . Para a relação a/agl 0,53, constata-se que em média a substituição de cimento por 10% e 20% de CCA ocasionam em um aumento de respectivamente 17% e 9,3%. Concretos com relação a/agl mais baixa (0,64), em uma substituição de cimento por CCA nos teores de 10% e 20%, em média demonstram um decréscimo de 6% e 11%, respectivamente, para o coeficiente de carbonatação. É visto que o comportamento é similar para concretos com 25% de AGRC.

A CCA se apresenta benéfica ao AGRC, podendo reduzir o coeficiente de carbonatação em até 39,5%, quando substituído 20% de cimento por CCA em uma relação a/agl 0,64 e contendo 25% de AGRC. O mesmo ocorre para concretos com 50% de AGRC e 20% de CCA, e é visto uma diminuição no coeficiente de carbonatação de 11%.

A influência da CCA na matriz de cimento pode estar gerando uma diminuição dos macro poros pela reação pozolânica, o que torna-os mais fechados e tortuosos e faz com que a difusão de CO_2 em concretos com maior quantidade de macro poros seja diminuída, ocorrendo o decréscimo da profundidade de carbonatação. Esse refinamento de poros gerado pela reação pozolânica pode estar ocorrendo também com os produtos de hidratação do cimento contido no AGRC.

Em concretos com uma matriz de poros mais refinada (0,42), a CCA pode estar agindo da mesma maneira, pois predomina o efeito da menor reserva alcalina, resultando em uma frente de carbonatação mais veloz. Isso significa que a CCA consome maior quantidade de $Ca(OH)_2$ e que resulta em uma menor quantidade de CH remanescente e faz com que haja um maior coeficiente de carbonatação. Esse comportamento também é visto por Martinelli (2010), Hoppe (2008) e Isaia; Vaghetti; Gastaldini (2001).

Partindo da hipótese de que o AGRC já poderia estar carbonatado e poderia estar prejudicando as medidas de carbonatação, foi feita uma análise visual das fotografias, onde não se constatou tal fato. É visto, na figura 33, o corpo de prova com três dias de carbonatação

acelerada e com resistência à compressão aos 28 dias de 39,3 MPa na relação a/agl 0,53. Cabe ressaltar que o f_c do AGRC é próximo dessa resistência, e o AGRC carbonata juntamente com a pasta de cimento.



Figura 33 – Corpo de prova submetido a fenolftaleína após três dias de carbonatação acelerada.

4.4 TAXA DE ABSORÇÃO CAPILAR

Neste capítulo, os dados obtidos através da regressão múltipla não linear são analisados a partir de figuras. Os dados podem ser visualizados em forma de tabela no apêndice. A regressão múltipla não linear foi feita com a variável resposta de taxa de absorção capilar dada em $\text{mm/h}^{1/2}$. A equação 11 modelada é apresentada a seguir.

$$TA = b_0 + b_1 * CCA + b_2 * AAgl \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

TA = taxa de absorção por capilaridade;

CCA = cinza de casca de arroz (0%;10%;20%);

AAgl = relação água/aglomerante (0,42;0,53;0,64).

Na tabela 20 e 21, são apresentados os resultados para o modelo utilizado.

Tabela 20 - ANOVA do modelo para taxa de absorção por capilaridade.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	3	5,85E+01	1,95E+01	2372,261	0,0000000
Resíduos	78	6,41E-01	8,22E-03		
Total	81	5,92E+01			
Total Corrigido	80	4,69E+00			

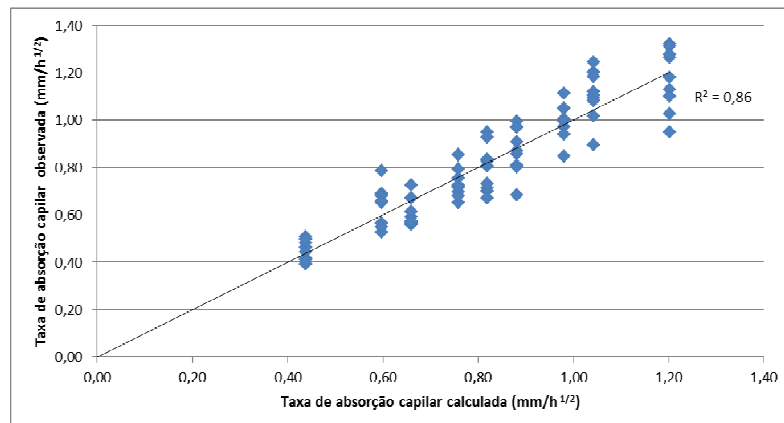
Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Tabela 21 - Parâmetro das variáveis analisadas para taxa de absorção por capilaridade.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b0	0,270366	0,061558	4,39206016	0,0000175
CCA	b1	-0,0222	0,001234	-17,9921075	0,0000000
AAgl	b2	1,45622	0,11219	12,9799447	0,0000000

Onde: CCA= cinza de casca de arroz; AAgl= relação água/aglomerante.

A ANOVA do modelo retornou com um valor de $r^2=0,86$, com os dados obtidos de taxa de absorção por capilaridade em que o valor de “p” menor que 0,01 demonstra que há significância do efeito dos fatores contemplados no modelo sobre a absorção com 99% de confiança. O coeficiente de determinação de 86% para o modelo proposto é considerado satisfatório (CABRAL, 2007). É possível dizer que é um valor usual, em função do tipo de agregado, mas a aproximação gera erros, visto que os agregados reciclados induzem a uma maior variabilidade dos resultados. O AGRC, quando inserido na equação, retornou um efeito não significativo sobre a variável de resposta, bem como as interações de segunda ordem. Na figura 34, é mostrada a relação entre os dados calculados e os dados observados na pesquisa. Nas figuras 35, 36 e 37, são apresentadas a relação entre os dados calculados e os dados observados na pesquisa, relacionando-os com a relação a/agl.

**Figura 34 – Relação entre a taxa de absorção capilar calculada e observada.**

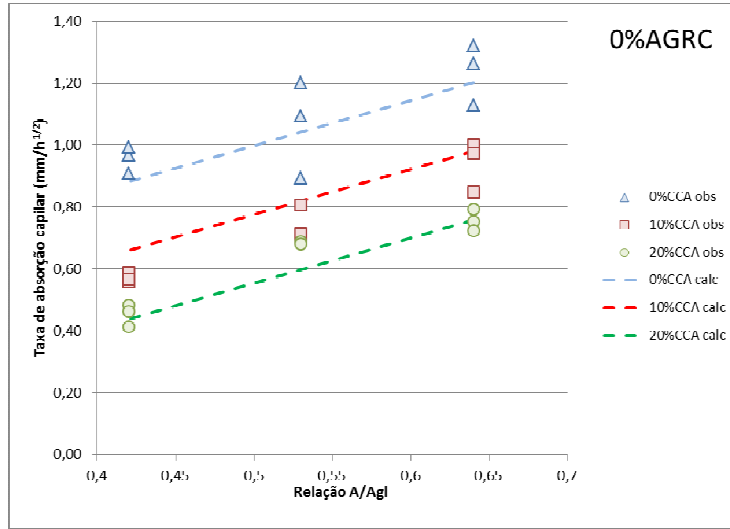


Figura 35 – Valores de taxa de absorção capilar observados e calculados sem substituição de AGN por AGRC.

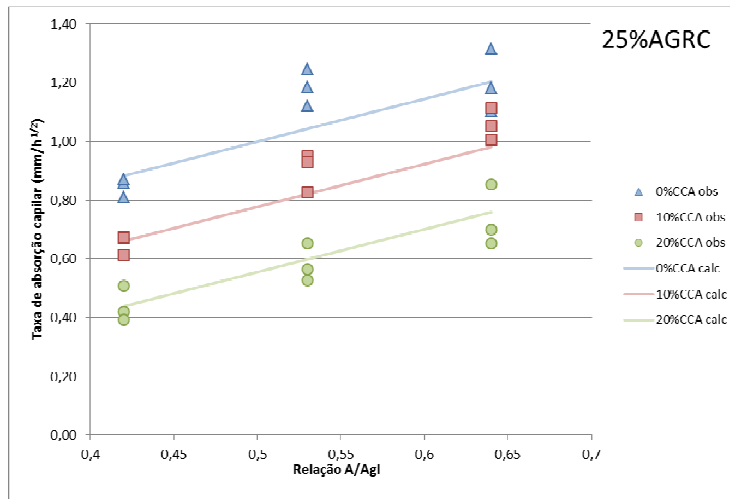


Figura 36 – Valores de taxa de absorção capilar observados e calculados com 25% de substituição de AGN por AGRC.

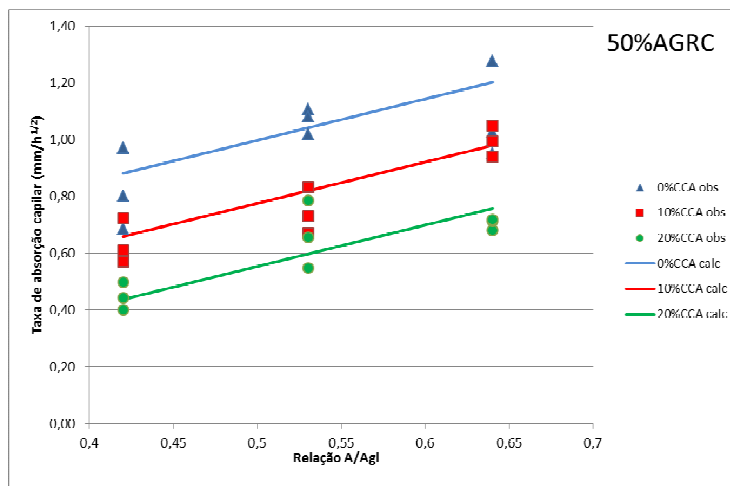


Figura 37 – Valores de taxa de absorção capilar observados e calculados com 50% de substituição de AGN por AGRC.

Nas figuras 35, 36 e 37, mostram-se a forte interação entre relação a/agl com a taxa de absorção capilar sendo diretamente proporcional, o que já era esperado.

Os concretos que não contém substituição de cimento por CCA com relação a/agl de 0,42 demonstram uma queda média de 15% na taxa de absorção capilar, quando substituído AGN por AGRC em 50 por cento. Para uma relação a/agl 0,53, há um aumento médio de 10% e uma tendência de estabilidade na taxa de absorção capilar para teores de 25% e 50% de AGRC, respectivamente. Na relação a/agl 0,64, o aumento do teor de AGRC em 50% causa uma diminuição média de 13% na taxa de absorção capilar.

Em média, conforme o teor de CCA aumenta, reduz-se a taxa de absorção capilar. A maior redução ocorreu na relação a/agl 0,42, quando o teor de CCA passou para 20% e foi verificado um decréscimo médio de 53% neste fator.

Concretos com AGRC de 25% e 50%, quando substituídos por cimento a 10% e 20% de CCA, também obtiveram tendência de redução na taxa de absorção capilar para todas as misturas, e foram vistos decréscimos de 34% à 53%.

A CCA pode estar reagindo com produtos de hidratação do AGRC e possivelmente aumentando o desempenho geral dos concretos estudados. Conforme visto na figura 33, o AGRC empregado na produção dos concretos não estava carbonatado, o que indica a possibilidade de haver $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponível para a reação com a CCA, proporcionando uma maior compacidade e um maior preenchimento de vazios pelo refinamento dos poros. Esse refinamento causado pela reação pozolânica da CCA também é visto por Martinelli (2010), Salas et al. (2009), Hoppe (2008) e Isaia; Vaghetti; Gastaldini (2001).

4.5 RELAÇÃO ENTRE TAXA DE ABSORÇÃO CAPILAR COM CARBONATAÇÃO ACELERADA

Neste capítulo, são apresentados gráficos da relação que há entre a taxa de absorção capilar e o coeficiente de carbonatação aos 64 dias, o qual foi a última data estudada. Ambos os dados foram obtidos através de regressão múltipla não linear, já apresentados anteriormente. Nas figuras 38, 39 e 40, são apresentados em cada gráfico uma linha de tendência e o respectivo “ r^2 ”.

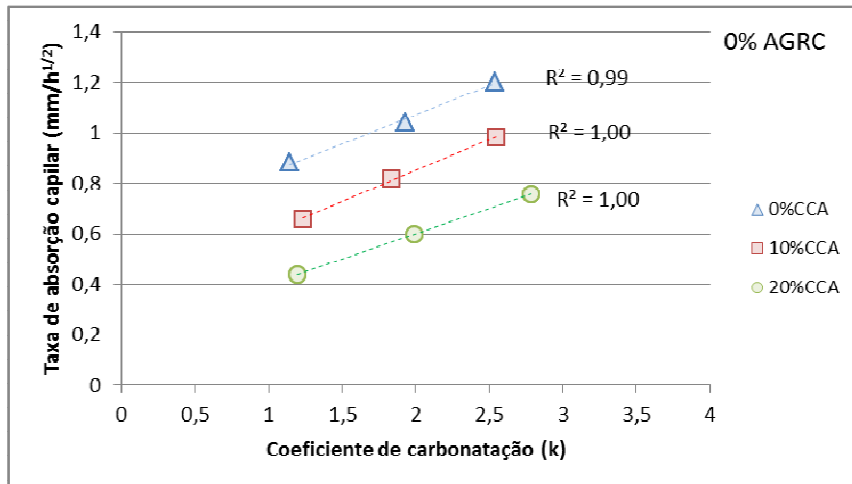


Figura 38 – Relação entre taxa de absorção capilar e coeficiente de carbonatação em concretos sem substituição de AGN por AGRC.

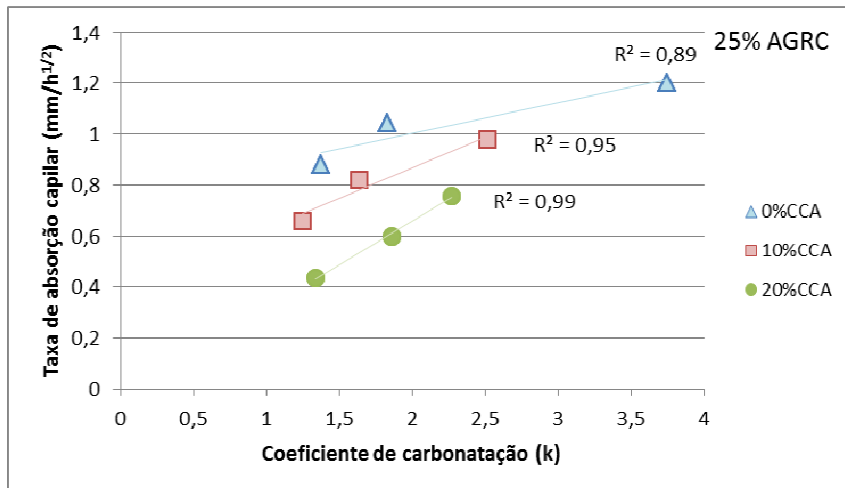


Figura 39 – Relação entre taxa de absorção capilar e coeficiente de carbonatação em concretos com 25% de substituição de AGN por AGRC.

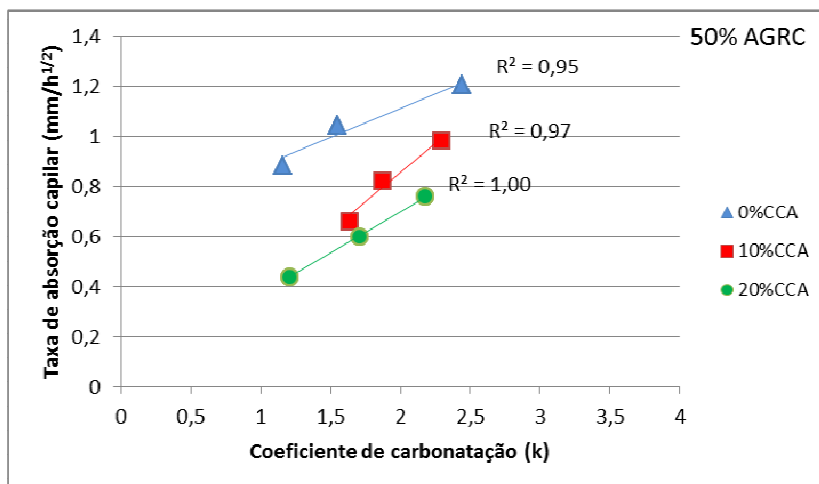


Figura 40 – Relação entre taxa de absorção capilar e coeficiente de carbonatação em concretos com 50% de substituição de AGN por AGRC.

Nota-se a forte relação que há entre o coeficiente de carbonatação e a taxa de absorção capilar. Se diminuir essa taxa, o coeficiente de carbonatação também diminui para este estudo. Pode-se dizer que a taxa de absorção capilar e o coeficiente de carbonatação são diretamente proporcionais, apresentando divergências quanto à inclinação da reta.

4.6 POROSIDADE TOTAL

Neste item, os dados obtidos através de regressão múltipla não linear são mostrado, e a análise se dará por gráficos gerados a partir das curvas modeladas e dos valores observados, os quais estão no apêndice em forma de tabela. Os dados de porosidade total empregados para a análise foram em percentagem. Na equação 12, apresenta-se o modelo ajustado por regressão múltipla.

$$PT = b_0 + b_1 * AGRC + b_2 * CCA + b_3 * AAgI \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

PT = porosidade total (%);

AGRC = agregado graúdo reciclado de concreto (0%; 25%; 50%);

CCA = cinza de casca de arroz (0%; 10%; 20%);

AAgl = relação água/aglomerante (0,42; 0,53; 0,64).

Nas tabelas 21 e 22 são apresentados os resultados para o modelo por regressão.

Tabela 22 - ANOVA do modelo para porosidade total.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
Modelo	4	7072,83	1768,21	2077,832	0,0000000
Resíduos	77	65,5261	0,850988		
Total	81	7138,36			
Total Corrigido	80	817,048			

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

Tabela 23 - Parâmetro das variáveis analisadas para porosidade total.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	p
CONSTANTE	b0	3,63387	0,638646	5,68996	0,0000001
AGRC	b1	-0,01347	0,005021	-2,68212	0,0044742
CCA	b2	-0,32383	0,012554	-25,7961	0,0000000
AAgl	b3	16,557	1,14123	14,50803	0,0000000

Onde: AGRC= agregado graúdo reciclado de concreto; CCA= cinza de casca de arroz; AAgl= relação água/aglomerante.

A ANOVA do modelo retornou com um valor de $r^2=0,92$ com os dados obtidos de porosidade total, e o valor de “p” menor que 0,01 demonstra que há significância entre os fatores analisados com 99% de confiança. Uma confiabilidade de 92% nos dados calculados é considerada viável, visto que os agregados reciclados têm grande variabilidade em relação aos agregados naturais. Os dados calculados se mostraram coerentes com os observados, de modo que se consegue verificar a tendência de como os dados se comportam. Na figura 41, é mostrada a relação entre os dados calculados e os dados observados na pesquisa, e nas figuras 42, 43 e 44, é apresentada a relação entre os dados calculados e os dados observados os correlacionando com a relação a/agl.

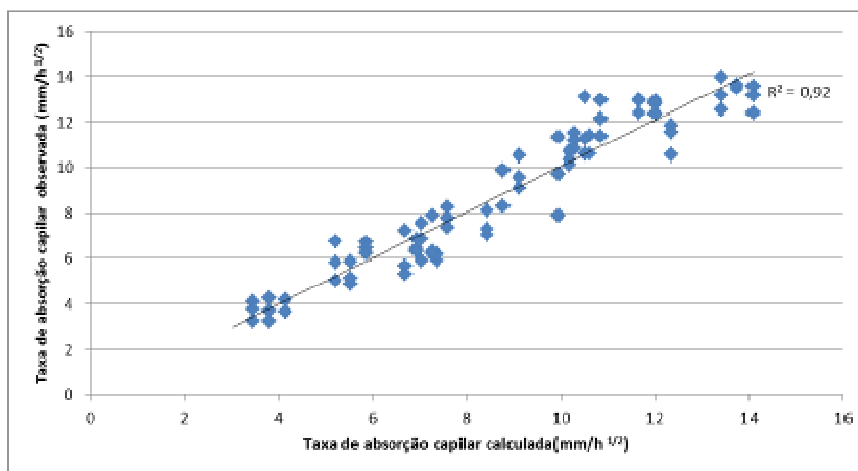


Figura 41 – Relação entre a porosidade total calculada e observada.

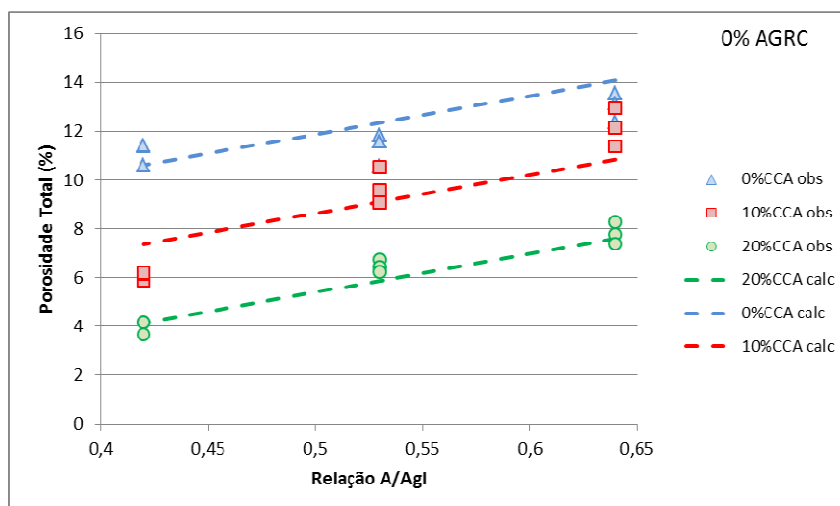


Figura 42 – Valores de porosidade total observados e calculados sem substituição de AGN por AGRC.

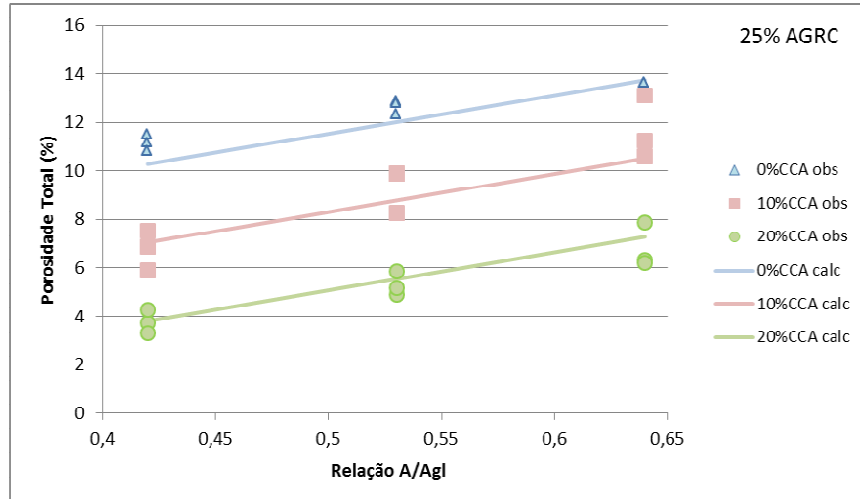


Figura 43 – Valores de porosidade total observados e calculados com 25% de substituição de AGN por AGRC.

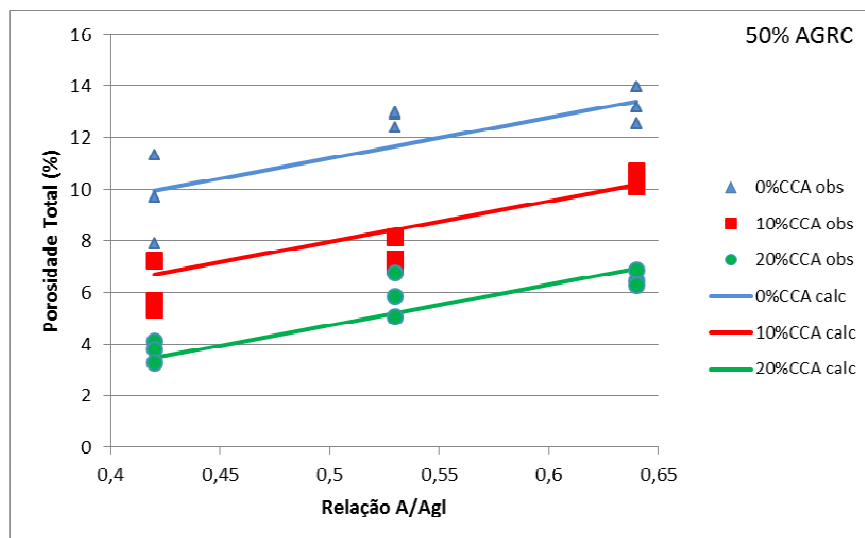


Figura 44 – Valores de porosidade total observados e calculados com 50% de substituição de AGN por AGRC.

Analisando as figuras 42, 43 e 44, é notado um comportamento similar ao de taxa de absorção por capilaridade. A CCA em média auxilia na redução da porosidade total dos concretos estudados. O AGRC em média tem pouca influência quando inserido juntamente com a CCA. Em média, na relação a/agl 0,42, ao substituímos 50% de AGN por AGRC, a ação é sucedida por um decréscimo de 13% nos valores de porosidade total. Para relação a/agl 0,53 e 0,64, a substituição de 25% e 50% de AGN por AGRC ocasiona um aumento que varia de 1% a 11% na porosidade total.

Nas relações a/agl estudadas em concretos sem AGRC, ao se substituir 10% e 20% do cimento por CCA, é visto em média uma redução na porosidade que varia de 36% a 57%. Para concretos com teores de 25% de AGRC nas relações a/agl estudadas, a substituição de cimento por CCA em 10% e 20% acarreta em uma redução média na porosidade total que

varia de 50% a 66%. Em média, para concretos com teores de 50% de AGRC e relações a/agl 0,42, 0,53 e 0,64, a substituição de cimento por CCA em 10% e 20% ocasiona também uma redução na porosidade total que varia de 50% a 60%.

É visto que em média, a porosidade total é minimizada ao se substituir cimento por CCA juntamente com a substituição de AGN por AGRC, podendo chegar a 66% os valores de redução da porosidade total. Essa tendência de comportamento repete a tendência observada no item 4.4, e sua interação com o coeficiente de carbonatação apresenta retas similares.

4.7 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À CARBONATAÇÃO ACELERADA

Na figura 45, relaciona-se resistência à compressão aos 28 dias com a carbonatação acelerada aos 64 dias. Como os corpos de prova que foram submetidos à carbonatação acelerada tiveram uma cura úmida de 28 dias, é conveniente analisar o seu comportamento quando relacionada a resistência à compressão com o fator do coeficiente de carbonatação.

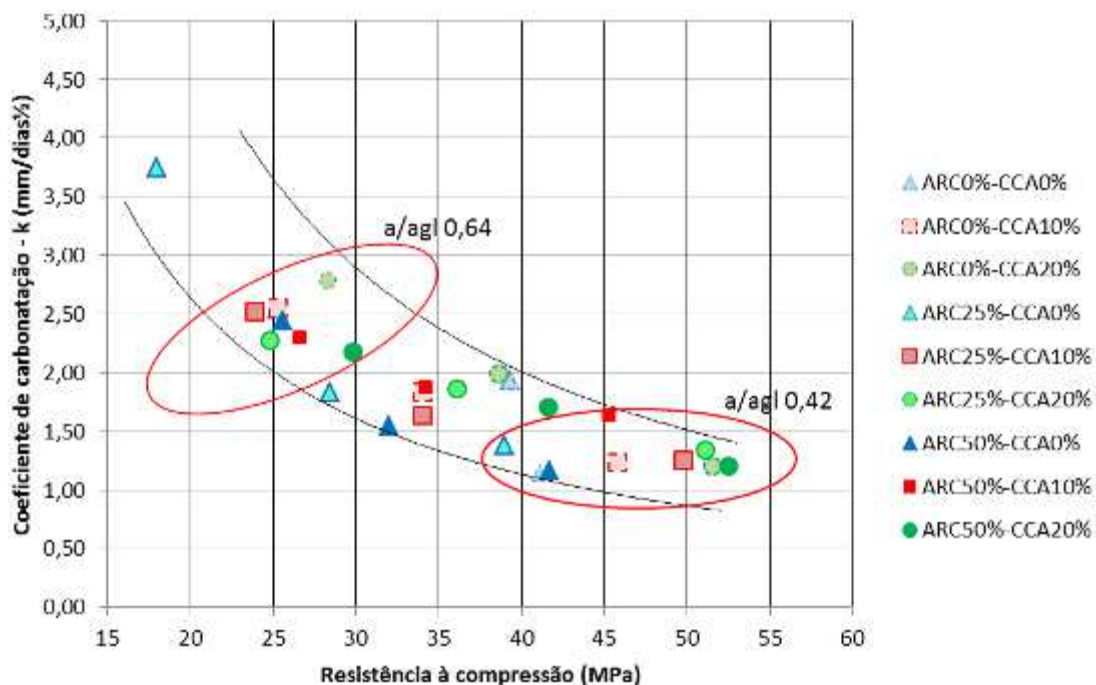


Figura 45 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e o coeficiente de carbonatação aos 64 dias.

Em média, a relação a/agl tem ampla significância tanto na resistência à compressão quanto no coeficiente de carbonatação.

A resistência à compressão dos concretos com relação a/agl 0,42, para a grande parte dos concretos ensaiados, fica na faixa de 40 MPa a 55 MPa, com coeficiente de carbonatação de $1,0\text{mm}/\text{dia}^{1/2}$ a $1,5\text{ mm}/\text{dia}^{1/2}$. Na relação a/agl mais alta (0,64), as resistências dos concretos ficam entre 15 MPa e 30 MPa, sendo que, para grande parte desses, o coeficiente de carbonatação se apresenta na faixa abaixo dos $3,0\text{ mm}/\text{dia}^{1/2}$ e acima do $2,0\text{ mm}/\text{dia}^{1/2}$.

Verifica-se que, em média, os concretos que apresentam maior resistência à compressão são aqueles que têm em sua composição 20% de CCA, que ficam entre 50 MPa e 55 MPa na relação a/agl 0,42. Já os concretos com 10% de CCA, na mesma relação a/agl , encontram-se na faixa de 45 MPa a 50 MPa. Esses dois concretos com teores de 10% e 20% de CCA apresentam maior resistência à compressão que o concreto de referência, e se apresentam juntamente com o referência abaixo da faixa de coeficiente de carbonatação de $1,5\text{ mm}/\text{dia}^{1/2}$.

No entanto, ressalta-se que as diferenças entre os coeficientes de carbonatação (k) parecem ser baixas, mas uma pequena variação de “ k ” pode significar uma grande diferença de profundidade de carbonatação, já que o tempo é empregado de forma exponencial para calcular essa profundidade a partir do “ k ”. Como exemplo, utiliza-se a equação 9, em que, para concretos com relação a/agl 0,42 e com coeficiente de carbonatação (k) de 1,0, representa uma profundidade de carbonatação, considerando 50 unidades de tempo, de 7,07 mm. Para a mesma relação a/agl , com “ k ” de 1,5, a profundidade de carbonatação, para o mesmo intervalo de tempo, representa 10,61 mm. Essa diferença entre profundidade de carbonatação representa um aumento de 33,37%.

Observa-se que, em média, para todas as relações a/agl estudadas, as misturas que contêm juntamente AGRC e CCA, demonstram um aumento na resistência à compressão e uma redução no coeficiente de carbonatação, conforme é aumentando as proporções de AGRC e CCA. Nos concretos sem AGRC, quando se substitui 10% e 20% de cimento por CCA, também é observado um aumento na resistência à compressão, porém o coeficiente de carbonatação também aumenta. O fato da CCA não apresentar um efeito negativo nos concretos com AGRC, à medida que se aumenta o teor de pozolana, poderia ser atribuído a uma maior disponibilidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no novo concreto devida à argamassa presente no

AGRC, o que pode tornar o aumento do coeficiente de carbonatação mais lento em relações a/agl mais altas.

As curvas plotadas nos limites superiores e inferiores dos dados da figura 45 demonstram que há uma maior dispersão dos dados em relações a/agl mais altas (0,64), e conforme se diminui a relação a/agl (0,42), ocorre uma menor dispersão dos dados. Para relações a/agl mais altas (0,64) e com menores resistências, o AGRC e a CCA têm grande influência no coeficiente de carbonatação dessas misturas. Em relações a/agl 0,42 e com maiores resistências, o coeficiente de carbonatação tem menor dispersão, com menor influência das características do AGRC e a CCA. Observa-se que a mudança na porosidade do concreto ocasionada pela CCA torna-se mais relevante em relações a/agl mais elevadas, em comparação às relações a/agl mais baixas.

A seguir é apresentada a figura 46, na qual se apresenta o consumo de cimento, dado em kg/m^3 , pela resistência à compressão, e são apresentados todos os traços estudados.

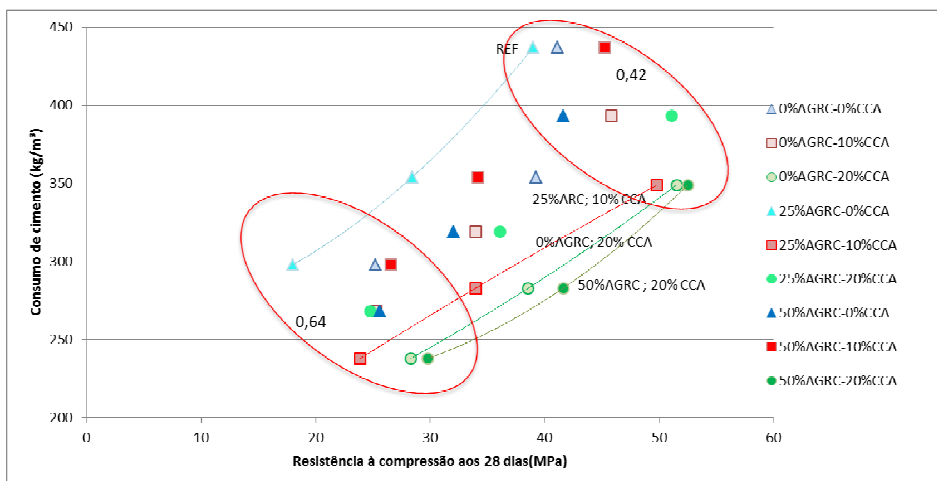


Figura 46 – Relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e o consumo de cimento.

O consumo de cimento fica abaixo para concretos contendo a substituição de cimento por CCA, o que era de se esperar. Ainda se verifica que, concretos contendo 50% de AGRC e 20% de CCA, e concretos com 25%AGRC e 10% CCA, têm um baixo consumo de cimento e com resistências à compressão superiores ao concreto referência. Quanto maior a resistência à compressão, maior é o consumo de cimento. Concretos com menor relação a/agl 0,42 ficam na faixa de consumo de cimento entre 350 kg/m^3 a 450 kg/m^3 , e com resistências entre 55MPa a 40 MPa, e concretos com relação a/agl 0,64 ficam na faixa de consumo de cimento, entre 300 kg/m^3 a 225 kg/m^3 e com resistências entre 30 MPa e 18 MPa. Verifica-se

que concretos com 50% AGRC e 20% CCA têm o mesmo consumo de outros traços, porém, com resistências à compressão superiores aos mesmos.

A indústria do cimento Portland gera grandes emissões de CO₂ na produção de clínquer. Para fabricar uma tonelada de clínquer de cimento Portland, estima-se que a mesma lança uma tonelada de CO₂ na atmosfera (Mehta e Monteiro, 2008). Para diminuir este impacto ocasionado pela indústria, a redução da quantidade de cimento em 20 %, como é o caso dos concretos estudados, pode ser viável.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho, conforme segue.

A **substituição de cimento por CCA** em média pode aumentar a **resistência à compressão e à tração**, mostrando que seu emprego é benéfico para aumentar esses dois fatores, tanto **em concretos sem AGRC, quanto em concretos com os teores estudados de AGRC**. Os concretos com 25% de AGRC e substituições de cimento por 10% e 20% de CCA, nas relações a/agl estudadas, podem promover um aumento na resistência à tração de 15% e 26%, e na resistência à compressão de 24% e 27%. Concretos com 50% de AGRC e substituições de cimento por 10% e 20% de CCA, nas relações a/agl estudadas, podem promover um aumento na resistência à compressão de 21% e 14%, e na resistência à tração de 10% e 9%. Provavelmente a CCA está melhorando a interface entre a pasta e agregados

Quanto à **porosidade total e taxa de absorção capilar** é possível verificar que, em média, o **aumento da CCA diminui os dois parâmetros**, tanto para concretos com AGN, quanto para concretos com AGRC. Para a taxa de absorção capilar, concretos com AGRC de 25% e 50%, quando substituídos por cimento a 10% e 20% de CCA, obtiveram tendência de redução para todas as misturas, e foram vistos decréscimos de 34% à 53%. Na porosidade total dos concretos com teores de 25% e 50 % de AGRC, nas relações a/agl estudadas, a substituição de cimento por CCA em 10% e 20% acarreta uma redução média que varia de 50% a 66%. A CCA pode estar reagindo com produtos de hidratação do AGRC e possivelmente aumentando o desempenho geral dos concretos estudados, podendo indicar a possibilidade de haver Ca(OH)_2 disponível para a reação com a CCA, e proporcionando uma compacidade maior e um melhor preenchimento de vazios pelo refinamento dos poros

Em relação à **carbonatação**, a **influência da CCA** na matriz de cimento pode estar gerando uma diminuição dos macroporos pela reação pozolânica, o que torna mais fechados e tortuosos e faz com que a difusão de CO_2 em concretos com maior quantidade de macro poros seja diminuída, pois ocorre o decréscimo da profundidade de carbonatação. Esse refinamento de poros gerado pela reação pozolânica pode estar ocorrendo também com os produtos de hidratação do cimento contido no AGRC. Em concretos com uma matriz de poros mais refinada (0,42), a CCA pode estar agindo da mesma maneira, pois predomina o efeito da menor reserva alcalina, resultando em uma frente de carbonatação mais veloz, ou seja, a CCA

consome maior quantidade de Ca(OH)_2 , resultando em uma menor quantidade de CH remanescente.

A **resistência à compressão relacionada à carbonatação** demonstra que concretos com relação a/agl 0,42, para a grande parte dos concretos ensaiados, fica na faixa de resistência à compressão de 40 MPa a 55 MPa, com coeficiente de carbonatação de $1,0\text{mm}/\text{dia}^{1/2}$ a $1,5\text{ mm}/\text{dia}^{1/2}$. Na relação a/agl mais alta (0,64), as resistências dos concretos ficam entre 15 MPa e 30 MPa, sendo que, para grande parte desses, o coeficiente de carbonatação se apresenta na faixa abaixo dos $3,0\text{ mm}/\text{dia}^{1/2}$ e acima do $2,0\text{ mm}/\text{dia}^{1/2}$. Observa-se que a mudança na porosidade do concreto ocasionada pela CCA se torna mais relevante em relações a/agl mais elevadas em comparação às relações a/agl mais baixas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, S. **Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review.** Cement & Concrete Composites 25 (2003) 459–471. Arabia Saudita. 2003.

AMADEI, B. I. D. **A questão dos resíduos da construção civil: Um breve estado da arte.** Revista NUPEM, Campo Mourão, v.3, n.5, ago./dez.2011. Campo Mourão. 2011.

ANGEL, J. D. M. et al. **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.

ANGULO, C. S. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** Tese de doutorado. USP. São Paulo. 2005.

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.

BA, M; QIAN, C; GAO, G. **Influence of Absolute Basicity and Capillary Porosity on Carbonation of Concrete.** Journal of Wuhan University of Technology-Mater. 2010.

BATTAGIN, F. A. et. al. **Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho.** Instituto Brasileiro de Concreto – 44º Congresso Brasileiro. São Paulo. 2002.

BUEST NETO, T. G. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento portland.** Dissertação de Mestrado. UFPR. Curitiba. 2006.

BUTTLER, M. A. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** Dissertação de Mestrado. São Carlos. 2003.

CABRAL, B. E. A.; **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** Tese de Doutorado. São Carlos. 2007.

CASCUDO, O; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto, Concreto ciência e tecnologia.** Vol 1, cap 24. São Paulo. 2011.

CASTELLOTE et al. **Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO2 concentrations.** Materials and Structures 42: 515-525. 2009

CECCONELLO, V. **Contribuição ao estudo da durabilidade por meio da análise da retração em concretos produzidos com agregados reciclados graúdos de concreto e cinza de casca de arroz.** Dissertação de metrado. 2013.

CDIAC - CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER. **Global Fossil-Fue CO₂ Emissions.** 2011. Disponível em: <http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob_2008.html>. Acesso em: 05 Jan. 2013.

CHIAO, J; LI, J. ZHANG, Ch. **Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading.** Cement and Concrete Research 35 (2005) 1187– 1194. Tongji University. Shanghai. China. 2004.

CHIAO, J; LEI B & ZHANG C. **On carbonation behavior of recycled aggregate concrete.** doi: 10.1007/s11431-012-4798-5. China. 2011.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. **Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials 23 (2009) 2869–2876. Italy. 2009.

CUNHA, Q. C. A; HELENE, L. R. P. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação.** BT/PCC/283. ISSN 0103-9830. São Paulo. 2001

DAL MOLIN, C. C. D. **Adições Minerais, Concreto Ciência e Tecnologia.** Vol 1, cap 8. São Paulo. 2011.

DUART A. M. et. al. **Modificação da porosidade em concretos com adição mineral de cinza de casca de arroz.** 53º IBRACON – ISSN 2175 – 8182. 2011.

ETXEVERRIA, M. **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.** Cement and concrete research 37 (2007) 735–742. UPC. Catalunya. 2007.

FEDUMENTI, B. M. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz na penetração de íons cloreto em concretos com agregado reciclado de concreto.** Dissertação de Mestrado. UNISINOS. São Leopoldo, 2013.

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.** Dissertação de Mestrado. UNISINOS. 2011.

HELENE, P. R.; CASTRO BORGES, P. **A NOVEL METHOD TO PREDICT CONCRETE CARBONATION.S/A.**

HOPPE, E. A. **Carbonatação em concretos com cinza de casca de arroz sem moagem.** Dissertação de Mestrado. UFSM. Santa Maria. 2008.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese de Doutorado. USP. São Paulo. 2008.

ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A.; GASTALDINI, A. L. **Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar.** IBRACON. 2001.

JI, Y. et. al. **Comparison of Concrete Carbonation Process under Natural Condition and High CO₂ Concentration Environments.** Journal of Wuhan University of Technology-Mater. 2010.

JUVEKAR, V. A; SHARMA, M.M. **Absorption of CO₂ in a suspension of lime.** Chemical Engineering Science, 1973, Vol. 28, pp. 825-837. India. 1972.

KIELING, A. **Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material absorvente.** Dissertação de Mestrado. UNISINOS. São Leopoldo. 2009.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar.** Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre. 2003.

KHUNTHONGKEAW J.; TANGTERMSIRIKUL S.; LEELAWAT T. **A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete.** Construction and Building Materials 20. 744–753, (2006).

KONG, D. et. al. **Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials 24 (2010) 701–708. 2010.

KOU, S.C.; POON, C.S.; AGRELA, F. **Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures.** Cement & Concrete Composites 33 (2011) 788–795. 2011.

KOU, S.C.; POON, C.S. **Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate.** Construction and Building Materials 35 (2012) 69–76. Hong Kong. 2012.

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 37 (2013) 12–19. Hong Kong. 2013.

KOU, C. S; POON, S.C; ETXEBERRIA, M. **Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete.** Cement & Concrete Composites 33 (2011) 286–291. Hong Kong. 2011.

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

KULAKOWSKI, P. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre. 2002.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese de Doutorado. Porto Alegre. 2001

LIMA, G. M. **Ações do meio ambiente sobre as estruturas de concreto, Concreto ciência e tecnologia.** Vol 1, cap 21. São Paulo. 2011.

LIMA, R. A. J. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e suas aplicações em argamassas e concretos.** Dissertação de Mestrado. São Carlo. 1999.

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

LOVATO P. S, et. al. **Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes.** Construction and Building Materials 26 (2012) 437–447.

MARTINELLI, L. A. **Carbonatação natural de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz.** Dissertação de Mestrado. Santa Maria. UFSM. 2010

MEDEIROS, F. H. M; ANDRADE, O. J. J; HELENE, P. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto, Concreto ciência e tecnologia.** Vol 1, cap. 22. São Paulo. 2011.

MEHTA P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo. 2008.

MOURA, A. W; DAL MOLIN, C. C. D. **Influência da adição de escória de cobre em características relacionadas à durabilidade do concreto.** Ambiente Construído, v. 4, n. 2, p. 41-56. Porto Alegre. 2004.

NETO, S. C. **Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto, Concreto Ciência e Tecnologia.** Vol 1, cap 7. São Paulo. 2011.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelo de predição.** Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre. 2009.

PETER, M. A.; MUNTEAN, A.; MEIER, S. A.; BOHM, M. **Competition of several carbonation reactions in concrete. A parametric study.** Cement and Concrete Research, v. 38, p. 1385 – 1393, 2008.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado.** Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre. 2004.

RILEM TC 116-PCD: **Permeability of concrete as a criterion of its durability.** Material and Structures, vol. 32. 1999.

SALAS A.; et. al. Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. Cement and Concrete Research 39 (2009) 773–778. 2009.

SATO, N. M. N. Analise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos. 1988.

SILVA, M. V. Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construída em escala natural e reduzida. Tese de Doutorado.USP. São Paulo. 2007.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. Waste Management 31 (2011) 2352–2360. 2011.

SOMNA, R.; JATURAPITAKKUL, C.; AMBE A. M. Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. Cement & Concrete Composites 34 (2012) 848–854. 2012.

TASCA, M. Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura. Dissertação de mestrado. Santa Maria. 2013

THIERY, M.; VILLAIN, G.; DANGLA, P.; PLATRET, G. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. Cement and Concrete Research, v xx, p. xx – xx, 2007.

TORGAL et. al. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. Construction and Build Materials 36. 141-150, 2012.

TIBONI; R. A utilização de cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento portland. Dissertação de Mestrado. USP. São Carlos. 2007.

VIEIRA, P. M. Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa. Tese de Doutorado. UFRGS. 2003.

WERLE, P. A. Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação. Dissertação de Mestrado. UNISINOS. São Leopoldo. 2010.

APÊNDICES

Tabela A1 – Resultados obtidos de compressão axial para todas idades, em MPa.

CCA (%)	AGRC (%)	a/agl	7 dias	28 dias	63 dias	91 dias	Média 7 dias	Média 28 dias	Média 63 dias	Média 91 dias
0	0	0,42	37,5	37,9	45,2	47,1	37,1	41,1	47,0	46,9
		0,42	36,9	44,6	47,8	45,0				
		0,42	36,9	40,8	47,9	48,7				
0	0	0,53	35,2	35,4	38,8	47,1	35,6	39,3	41,8	44,8
		0,53	35,3	41,4	44,4	40,1				
		0,53	36,4	41,0	42,2	47,2				
0	0	0,64	20,2	27,0	26,3	26,9	20,7	25,2	27,3	27,2
		0,64	21,1	24,3	26,2	28,2				
		0,64	20,9	24,4	29,4	26,6				
10	0	0,42	42,1	47,0	51,1	50,1	41,6	45,8	51,9	46,3
		0,42	41,0	43,4	55,3	37,1				
		0,42	41,6	47,0	49,4	51,7				
10	0	0,53	25,7	35,4	25,6	38,5	25,0	34,0	32,8	39,7
		0,53	23,5	33,1	36,4	40,3				
		0,53	25,7	33,4	36,5	40,3				
10	0	0,64	17,3	26,5	31,3	21,6	17,8	25,3	31,0	27,4
		0,64	18,1	22,8	31,5	31,2				
		0,64	18,1	26,6	30,2	29,5				
20	0	0,42	40,2	47,7	43,9	49,2	38,5	51,5	44,4	49,7
		0,42	34,2	50,3	47,8	44,4				
		0,42	41,0	56,6	41,5	55,4				
20	0	0,53	27,3	36,5	32,3	42,2	27,2	38,6	37,3	41,0
		0,53	25,9	37,3	34,6	38,3				
		0,53	28,5	41,9	44,9	42,6				
20	0	0,64	20,0	28,5	31,4	30,3	19,4	28,3	30,0	31,4
		0,64	18,5	29,6	29,1	31,8				
		0,64	19,8	26,8	29,5	32,2				
0	25	0,42	34,8	37,0	43,5	40,6	34,0	39,0	43,5	31,6
		0,42	33,0	37,9	40,8	17,0				
		0,42	34,2	42,1	46,1	37,3				
0	25	0,53	24,1	33,2	33,7	34,8	24,8	28,4	33,8	32,5
		0,53	24,5	22,2	33,9	32,3				
		0,53	25,8	29,9	33,8	30,5				
0	25	0,64	15,9	20,2	20,3	18,2	21,9	18,0	21,8	22,0
		0,64	23,2	20,5	18,4	23,5				
		0,64	26,5	13,3	26,8	24,3				
0	50	0,42	42,4	46,6	56,4	42,4	38,9	41,7	43,3	41,8
		0,42	38,0	36,6	43,9	36,9				
		0,42	36,3	41,8	29,6	46,1				
0	50	0,53	25,6	29,1	35,4	36,7	25,0	32,0	37,1	32,7
		0,53	25,1	33,3	39,6	29,1				
		0,53	24,3	33,7	36,3	32,2				
0	50	0,64	17,9	24,9	29,4	36,0	20,3	25,6	30,2	28,2
		0,64	22,9	25,0	30,6	25,4				
		0,64	20,2	26,9	30,5	23,1				
10	25	0,42	35,3	50,0	45,9	39,9	34,6	49,8	42,8	42,5
		0,42	34,7	46,9	30,2	43,2				
		0,42	33,7	52,6	52,4	44,4				
10	25	0,53	22,7	34,1	22,8	34,8	22,2	34,0	32,7	35,9
		0,53	22,1	36,2	40,7	35,3				
		0,53	21,9	31,6	34,6	37,6				
10	25	0,64	15,8	22,3	28,1	26,5	16,7	23,9	28,6	28,0
		0,64	17,0	23,4	28,7	29,8				
		0,64	17,3	26,0	28,9	27,6				
10	50	0,42	34,5	42,4	22,5	53,4	35,6	45,3	33,1	53,3
		0,42	33,5	50,8	32,1	53,7				
		0,42	38,8	42,6	44,6	52,9				
10	50	0,53	22,8	33,5	42,8	41,5	24,9	34,2	40,4	41,0
		0,53	27,1	35,8	39,9	41,3				
		0,53	24,7	33,2	38,4	40,2				
10	50	0,64	17,9	27,2	32,2	28,1	19,3	26,6	30,8	29,7
		0,64	20,4	26,9	30,6	30,2				
		0,64	19,6	25,7	29,7	30,7				
20	25	0,42	37,5	55,2	44,9	40,7	39,1	51,1	46,5	36,5
		0,42	39,4	44,4	42,2	44,1				
		0,42	40,5	53,7	52,4	24,6				
20	25	0,53	29,3	34,1	42,7	40,9	28,8	36,1	40,5	42,3
		0,53	28,6	40,6	35,5	42,4				
		0,53	28,5	33,7	43,3	43,6				
20	25	0,64	20,7	22,3	30,9	36,3	20,2	24,8	32,1	31,5
		0,64	20,6	24,3	32,1	30,3				
		0,64	19,3	27,8	33,2	27,8				
20	50	0,42	40,3	50,7	54,9	61,4	41,3	52,5	51,5	52,2
		0,42	42,2	56,6	50,3	49,2				
		0,42	41,5	50,2	49,2	46,1				
20	50	0,53	26,5	41,7	39,9	48,5	27,6	41,6	33,9	46,1
		0,53	28,8	41,3	23,1	40,8				
		0,53	27,5	41,9	38,6	48,9				
20	50	0,64	22,2	29,1	37,2	40,5	21,2	29,8	34,0	38,1
		0,64	20,9	31,8	33,4	35,6				
		0,64	20,5	28,5	31,4	38,2				

Tabela A2 – Resultados obtidos de absorção de água por capilaridade.

AGRC	CCA		Taxa de Absorção Capilar	Porosidade Total	Média	Média
(%)	(%)	a/agl	(mm/h1/2)	(%)	Taxa de Absorção Capilar (mm/h1/2)	Porosidade (%)
0	0	0,64	1,32	13,55	1,24	13,03
			1,26	13,15		
			1,13	12,38		
			0,89	10,57		
0	0	0,53	1,20	11,85	1,06	11,33
			1,09	11,57		
			0,97	11,39		
			0,99	11,41		
0	0	0,42	0,91	10,60	0,96	11,13
			1,00	12,96		
			0,97	12,15		
			0,85	11,36		
0	10	0,64	0,70	9,09	0,94	12,16
			0,81	10,52		
			0,71	9,58		
			0,56	5,91		
0	10	0,53	0,59	6,17	0,74	9,73
			0,57	6,22		
			0,75	7,77		
			0,79	8,25		
0	10	0,42	0,72	7,39	0,57	6,10
			0,68	6,72		
			0,48	4,18		
			0,46	4,18		
0	20	0,64	0,41	3,67	0,76	7,80
			0,69	6,45		
			0,68	6,24		
			0,48	4,18		
0	20	0,53	0,46	4,18	0,68	6,47
			0,41	3,67		
			0,68	6,24		
			0,48	4,18		
0	20	0,42	0,41	3,67	0,45	4,01
			0,46	4,18		
			0,68	6,24		
			0,48	4,18		
25	0	0,64	1,10	13,47	1,20	13,58
			1,18	13,61		
			1,31	13,66		
			1,12	12,35		
25	0	0,53	1,24	12,89	1,18	12,69
			1,18	12,82		
			0,86	11,51		
			0,87	11,18		
25	0	0,42	0,81	10,83	0,85	11,17
			1,05	10,59		
			1,11	13,10		
			1,01	11,26		
25	10	0,64	0,95	9,88	1,06	11,65
			0,83	8,28		
			0,93	9,91		
			0,67	6,85		
25	10	0,53	0,67	7,54	0,90	9,36
			0,67	7,54		
			0,61	5,91		
			0,85	7,87		
25	10	0,42	0,70	6,32	0,65	6,77
			0,65	6,22		
			0,85	7,87		
			0,70	6,32		
25	20	0,64	0,65	6,22	0,73	6,80
			0,70	6,32		
			0,85	7,87		
			0,65	6,22		

			0,65	5,86		
25	20	0,53	0,53	4,89	0,58	5,30
			0,56	5,15		
			0,42	3,72		
25	20	0,42	0,51	4,25	0,44	3,75
			0,39	3,29		
			1,28	13,98		
50	0	0,64	1,03	13,17	1,08	13,23
			0,95	12,54		
			1,11	12,91		
50	0	0,53	1,08	12,97	1,07	12,75
			1,02	12,38		
			0,80	9,70		
50	0	0,42	0,69	7,90	0,82	9,65
			0,97	11,34		
			1,05	10,70		
50	10	0,64	0,94	10,34	0,99	10,38
			0,99	10,11		
			0,83	8,12		
50	10	0,53	0,67	7,03	0,75	7,48
			0,73	7,29		
			0,61	5,68		
50	10	0,42	0,72	7,21	0,64	6,07
			0,57	5,32		
			0,68	6,42		
50	20	0,64	0,71	6,29	0,71	6,53
			0,72	6,88		
			0,79	6,75		
50	20	0,53	0,66	5,83	0,66	5,88
			0,55	5,04		
			0,50	4,10		
50	20	0,42	0,44	3,80	0,45	3,73
			0,40	3,29		

Tabela A3 – Resultados obtidos de profundidade de carbonatação

AGRC	CCA	A/Ag1	Tempo	Profundidade	Coefficiente de	Média de	Média do
(%)	(%)		(dias)	Carbonatada	Carbonatação	Profundidade	Coefficiente
				(mm)		Carbonatada	de Carbonatação
						(mm)	
0	0	0,42	1	2,57	2,57		
0	0	0,42	1	4,98	4,98		
0	0	0,42	1	6,48	6,48	3,6645	3,6645
0	0	0,42	1	0,628	0,628		
0	0	0,42	3	1,76	1,016136474		
0	0	0,42	3	2,63	1,518431208		
0	0	0,42	3	3,54	2,043819953	2,7125	1,566062605
0	0	0,42	3	2,92	1,685862786		
0	0	0,42	7	4,24	1,602569366		
0	0	0,42	7	3,06	1,156571287		
0	0	0,42	7	4,79	1,810449826	3,9375	1,488235112
0	0	0,42	7	3,66	1,383349971		
0	0	0,42	28	7,43	1,404138017		
0	0	0,42	28	6,01	1,135783241		
0	0	0,42	28	6,89	1,30208761	6,745	1,274685185
0	0	0,42	28	6,65	1,256731873		
0	0	0,42	64	8,38	1,0475		
0	0	0,42	64	8,74	1,0925		
0	0	0,42	64	10,13	1,26625	9,15	1,14375
0	0	0,42	64	9,35	1,16875		
0	0	0,53	1	2,87	2,87		
0	0	0,53	1	5,64	5,64		
0	0	0,53	1	5,12	5,12	3,7725	3,7725
0	0	0,53	1	1,46	1,46		
0	0	0,53	3	3,03	1,749371316		
0	0	0,53	3	5,61	3,23893501		
0	0	0,53	3	5,27	3,042635919	4,3325	2,501370041
0	0	0,53	3	3,42	1,974537921		
0	0	0,53	7	9,41	3,556645691		
0	0	0,53	7	9,08	3,431917415		
0	0	0,53	7	5,35	2,022109931	8,0125	3,02844034
0	0	0,53	7	8,21	3,103088323		
0	0	0,53	28	12,4	2,343379733		
0	0	0,53	28	11,68	2,207312522		
0	0	0,53	28	11,35	2,144948384	11,495	2,172350809
0	0	0,53	28	10,55	1,993762595		
0	0	0,53	64	16,64	2,08		
0	0	0,53	64	15,61	1,95125		
0	0	0,53	64	15	1,875	15,4575	1,9321875
0	0	0,53	64	14,58	1,8225		
0	0	0,64	1	3,06	3,06	2,8825	2,8825

0	0	0,64	1	3,06	3,06		
0	0	0,64	1	1,97	1,97		
0	0	0,64	1	3,44	3,44		
0	0	0,64	3	5,26	3,036862416		
0	0	0,64	3	5,16	2,979127389	5,575	3,218727751
0	0	0,64	3	5,16	2,979127389		
0	0	0,64	3	6,72	3,879793809		
0	0	0,64	7	7,02	2,653310601		
0	0	0,64	7	8,21	3,103088323	7,485	2,82906408
0	0	0,64	7	7,43	2,808276034		
0	0	0,64	7	7,28	2,751581364		
0	0	0,64	28	12,93	2,443540318		
0	0	0,64	28	13,72	2,592836285	13,2725	2,508266734
0	0	0,64	28	13,41	2,534251792		
0	0	0,64	28	13,03	2,462438542		
0	0	0,64	64	19,46	2,4325		
0	0	0,64	64	21,53	2,69125	20,3225	2,5403125
0	0	0,64	64	24,45	3,05625		
0	0	0,64	64	15,85	1,98125		
0	10	0,42	1	0,334	0,334		
0	10	0,42	1	2,36	2,36	0,766	0,766
0	10	0,42	1	0	0		
0	10	0,42	1	0,37	0,37		
0	10	0,42	3	1,195	0,689933572		
0	10	0,42	3	1,24	0,715914334	1,74125	1,005311156
0	10	0,42	3	1,612	0,930688634		
0	10	0,42	3	2,918	1,684708085		
0	10	0,42	7	4,878	1,843710699		
0	10	0,42	7	5,59	2,112821404	3,5875	1,355947547
0	10	0,42	7	0,586	0,221487181		
0	10	0,42	7	3,296	1,245770903		
0	10	0,42	28	9,91	1,872813964		
0	10	0,42	28	5,89	1,113105373	7,4825	1,414059585
0	10	0,42	28	4,79	0,905224913		
0	10	0,42	28	9,34	1,765094089		
0	10	0,42	64	9,87	1,23375		
0	10	0,42	64	8,89	1,11125	9,87	1,23375
0	10	0,42	64	9,62	1,2025		
0	10	0,42	64	11,1	1,3875		
0	10	0,53	1	0,37	0,37		
0	10	0,53	1	0,87	0,87	0,4075	0,4075
0	10	0,53	1	0,26	0,26		
0	10	0,53	1	0,13	0,13		
0	10	0,53	3	4,15	2,396003617		
0	10	0,53	3	4,88	2,817469314	4,8525	2,801592181
0	10	0,53	3	6,29	3,631533193		

0	10	0,53	3	4,09	2,361362601		
0	10	0,53	7	6,47	2,44543014		
0	10	0,53	7	6,35	2,400074404	4,28	1,617687944
0	10	0,53	7	1,19	0,449777723		
0	10	0,53	7	3,11	1,175469511		
0	10	0,53	28	11,74	2,218651457		
0	10	0,53	28	10,38	1,961635615	11,12	2,10148247
0	10	0,53	28	10,1	1,908720589		
0	10	0,53	28	12,26	2,31692222		
0	10	0,53	64	14,46	1,8075		
0	10	0,53	64	16,96	2,12	14,645	1,830625
0	10	0,53	64	12,22	1,5275		
0	10	0,53	64	14,94	1,8675		
0	10	0,64	1	1,96	1,96		
0	10	0,64	1	6,65	6,65	3,7875	3,7875
0	10	0,64	1	3,81	3,81		
0	10	0,64	1	2,73	2,73		
0	10	0,64	3	6	3,464101615		
0	10	0,64	3	4,24	2,447965141	5,0925	2,940156246
0	10	0,64	3	4,89	2,823242816		
0	10	0,64	3	5,24	3,025315411		
0	10	0,64	7	8,04	3,038834363		
0	10	0,64	7	14,09	5,325519425	10,3425	3,909097562
0	10	0,64	7	12,88	4,868182412		
0	10	0,64	7	6,36	2,403854048		
0	10	0,64	28	15,66	2,959461824		
0	10	0,64	28	13,57	2,564488949	13,6575	2,581024895
0	10	0,64	28	13,84	2,615514153		
0	10	0,64	28	11,56	2,184634654		
0	10	0,64	64	19,79	2,47375		
0	10	0,64	64	19,96	2,495	20,3625	2,5453125
0	10	0,64	64	19,35	2,41875		
0	10	0,64	64	22,35	2,79375		
0	20	0,42	1	3,36	3,36		
0	20	0,42	1	2,26	2,26	1,9575	1,9575
0	20	0,42	1	1,15	1,15		
0	20	0,42	1	1,06	1,06		
0	20	0,42	3	2,86	1,65122177		
0	20	0,42	3	2,98	1,720503802	2,7225	1,571836108
0	20	0,42	3	3,22	1,859067867		
0	20	0,42	3	1,83	1,056550993		
0	20	0,42	7	3,69	1,394688905		
0	20	0,42	7	4,85	1,833127694	3,3125	1,252007317
0	20	0,42	7	3,38	1,277519919		
0	20	0,42	7	1,33	0,502692749		
0	20	0,42	28	6,2	1,171689866	5,41	1,022393899

0	20	0,42	28	4,5	0,850420064		
0	20	0,42	28	5	0,944911183		
0	20	0,42	28	5,94	1,122554485		
0	20	0,42	64	11,02	1,3775		
0	20	0,42	64	10,29	1,28625		
0	20	0,42	64	6,81	0,85125	9,5825	1,1978125
0	20	0,42	64	10,21	1,27625		
0	20	0,53	1	2,91	2,91		
0	20	0,53	1	2,06	2,06		
0	20	0,53	1	2,73	2,73	2,6725	2,6725
0	20	0,53	1	2,99	2,99		
0	20	0,53	3	4,41	2,546114687		
0	20	0,53	3	3,97	2,292080569		
0	20	0,53	3	4,42	2,55188819	4,1575	2,400333744
0	20	0,53	3	3,83	2,211251531		
0	20	0,53	7	5,23	1,976754194		
0	20	0,53	7	4,47	1,689501194		
0	20	0,53	7	5,08	1,920059523	4,945	1,869034319
0	20	0,53	7	5	1,889822365		
0	20	0,53	28	9,74	1,840686984		
0	20	0,53	28	9,22	1,742416221		
0	20	0,53	28	11,12	2,10148247	9,8	1,852025918
0	20	0,53	28	9,12	1,723517997		
0	20	0,53	64	13,25	1,65625		
0	20	0,53	64	17,26	2,1575		
0	20	0,53	64	14,56	1,82	15,91	1,98875
0	20	0,53	64	18,57	2,32125		
0	20	0,64	1	3,52	3,52		
0	20	0,64	1	3,09	3,09		
0	20	0,64	1	5,39	5,39	3,8075	3,8075
0	20	0,64	1	3,23	3,23		
0	20	0,64	3	5,76	3,325537551		
0	20	0,64	3	5,09	2,93871287		
0	20	0,64	3	5,26	3,036862416	5,3675	3,09892757
0	20	0,64	3	5,36	3,094597443		
0	20	0,64	7	7,85	2,967021113		
0	20	0,64	7	7,33	2,770479587		
0	20	0,64	7	8,11	3,065291876	7,7875	2,943398334
0	20	0,64	7	7,86	2,970800758		
0	20	0,64	28	14,06	2,657090245		
0	20	0,64	28	14,65	2,768589765		
0	20	0,64	28	14,67	2,77236941	14,2025	2,684020214
0	20	0,64	28	13,43	2,538031436		
0	20	0,64	64	26,07	3,25875		
0	20	0,64	64	19,46	2,4325	22,265	2,783125
0	20	0,64	64	20,48	2,56		

0	20	0,64	64	23,05	2,88125		
25	0	0,42	1	0,83	0,83		
25	0	0,42	1	1,93	1,93	1,2225	1,2225
25	0	0,42	1	0,6	0,6		
25	0	0,42	1	1,53	1,53		
25	0	0,42	3	0,16	0,092376043		
25	0	0,42	3	0,59	0,340636659	0,3925	0,226609981
25	0	0,42	3	0,15	0,08660254		
25	0	0,42	3	0,67	0,38682468		
25	0	0,42	7	0,49	0,185202592		
25	0	0,42	7	1,36	0,514031683	1,6675	0,630255759
25	0	0,42	7	2,57	0,971368696		
25	0	0,42	7	2,25	0,850420064		
25	0	0,42	28	8,62	1,629026879		
25	0	0,42	28	6,54	1,235943827	7,465	1,410752396
25	0	0,42	28	6,81	1,286969031		
25	0	0,42	28	7,89	1,491069846		
25	0	0,42	64	9,91	1,23875		
25	0	0,42	64	12,61	1,57625	11,01	1,37625
25	0	0,42	64	12,7	1,5875		
25	0	0,42	64	8,82	1,1025		
25	0	0,53	1	0,83	0,83		
25	0	0,53	1	0	0	1,22	1,22
25	0	0,53	1	1,89	1,89		
25	0	0,53	1	2,16	2,16		
25	0	0,53	3	4,41	2,546114687		
25	0	0,53	3	2,39	1,379867143	2,56	1,478016689
25	0	0,53	3	1,25	0,721687836		
25	0	0,53	3	2,19	1,26439709		
25	0	0,53	7	6,19	2,339600088		
25	0	0,53	7	5,03	1,901161299	5,98	2,260227549
25	0	0,53	7	7,29	2,755361008		
25	0	0,53	7	5,41	2,044787799		
25	0	0,53	28	9,23	1,744306043		
25	0	0,53	28	9,46	1,787771957	11,2925	2,134081906
25	0	0,53	28	14,08	2,66086989		
25	0	0,53	28	12,4	2,343379733		
25	0	0,53	64	13,34	1,6675		
25	0	0,53	64	16,13	2,01625	14,6425	1,8303125
25	0	0,53	64	14,93	1,86625		
25	0	0,53	64	14,17	1,77125		
25	0	0,64	1	1,92	1,92		
25	0	0,64	1	2,5	2,5	2,0375	2,0375
25	0	0,64	1	1,87	1,87		
25	0	0,64	1	1,86	1,86		
25	0	0,64	3	7,13	4,116507419	5,7425	3,315433921

25	0	0,64	3	4,45	2,569208698		
25	0	0,64	3	6,5	3,75277675		
25	0	0,64	3	4,89	2,823242816		
25	0	0,64	7	9,21	3,481052796		
25	0	0,64	7	7,89	2,982139692	8,51	3,216477665
25	0	0,64	7	7,38	2,789377811		
25	0	0,64	7	9,56	3,613340362		
25	0	0,64	28	17,85	3,373332922		
25	0	0,64	28	18,78	3,549086402	19,3125	3,649719442
25	0	0,64	28	22,22	4,199185295		
25	0	0,64	28	18,4	3,477273152		
25	0	0,64	64	30	3,75		
25	0	0,64	64	30	3,75	30	3,75
25	0	0,64	64	30	3,75		
25	0	0,64	64	30	3,75		
50	0	0,42	1	0	0		
50	0	0,42	1	0,19	0,19	0,6225	0,6225
50	0	0,42	1	0	0		
50	0	0,42	1	2,3	2,3		
50	0	0,42	3	4,44	2,563435195		
50	0	0,42	3	3,54	2,043819953	3,47	2,003405434
50	0	0,42	3	2,35	1,356773133		
50	0	0,42	3	3,55	2,049593456		
50	0	0,42	7	4,76	1,799110892		
50	0	0,42	7	8,3	3,137105126	6,6	2,494565522
50	0	0,42	7	5,72	2,161956786		
50	0	0,42	7	7,62	2,880089284		
50	0	0,42	28	4,77	0,901445268		
50	0	0,42	28	6,38	1,205706669	5,8225	1,100349072
50	0	0,42	28	7,14	1,349333169		
50	0	0,42	28	5	0,944911183		
50	0	0,42	64	8,49	1,06125		
50	0	0,42	64	10,12	1,265	9,2725	1,1590625
50	0	0,42	64	9,13	1,14125		
50	0	0,42	64	9,35	1,16875		
50	0	0,53	1	1,53	1,53		
50	0	0,53	1	4,5	4,5	1,7825	1,7825
50	0	0,53	1	0,75	0,75		
50	0	0,53	1	0,35	0,35		
50	0	0,53	3	5,23	3,019541908		
50	0	0,53	3	3,86	2,228572039	4,49	2,592302709
50	0	0,53	3	3,87	2,234345542		
50	0	0,53	3	5	2,886751346		
50	0	0,53	7	5,32	2,010770996		
50	0	0,53	7	6,86	2,592836285	5,6	2,116601049
50	0	0,53	7	4,95	1,870924141		

50	0	0,53	7	5,27	1,991872773		
50	0	0,53	28	10,11	1,910610411		
50	0	0,53	28	9,22	1,742416221	9,645	1,822733671
50	0	0,53	28	10,34	1,954076325		
50	0	0,53	28	8,91	1,683831727		
50	0	0,53	64	14,14	1,7675		
50	0	0,53	64	13,15	1,64375	12,385	1,548125
50	0	0,53	64	11,77	1,47125		
50	0	0,53	64	10,48	1,31		
50	0	0,64	1	1,73	1,73		
50	0	0,64	1	1,84	1,84	2,165	2,165
50	0	0,64	1	2,37	2,37		
50	0	0,64	1	2,72	2,72		
50	0	0,64	3	4,51	2,603849714		
50	0	0,64	3	7,96	4,595708143	6,1925	3,575241542
50	0	0,64	3	8	4,618802154		
50	0	0,64	3	4,3	2,482606158		
50	0	0,64	7	7,78	2,9405636		
50	0	0,64	7	7,95	3,00481756	7,965	3,010487028
50	0	0,64	7	8,2	3,099308679		
50	0	0,64	7	7,93	2,997258271		
50	0	0,64	28	9,1	1,719738352		
50	0	0,64	28	13,72	2,592836285	11,7375	2,218179001
50	0	0,64	28	14,71	2,779928699		
50	0	0,64	28	9,42	1,780212668		
50	0	0,64	64	19,21	2,40125		
50	0	0,64	64	19,86	2,4825	19,51	2,43875
50	0	0,64	64	19,62	2,4525		
50	0	0,64	64	19,35	2,41875		
25	10	0,42	1	1,23	1,23		
25	10	0,42	1	1,38	1,38	1,525	1,525
25	10	0,42	1	1,99	1,99		
25	10	0,42	1	1,5	1,5		
25	10	0,42	3	1,29	0,744781847		
25	10	0,42	3	1,46	0,842931393	2,2025	1,271613968
25	10	0,42	3	4,5	2,598076211		
25	10	0,42	3	1,56	0,90066642		
25	10	0,42	7	2,03	0,76726788		
25	10	0,42	7	2,32	0,876877577	3,5325	1,335159501
25	10	0,42	7	4,2	1,587450787		
25	10	0,42	7	5,58	2,109041759		
25	10	0,42	28	8,87	1,676272438		
25	10	0,42	28	7,17	1,355002636	7,505	1,418311685
25	10	0,42	28	7,07	1,336104412		
25	10	0,42	28	6,91	1,305867254		
25	10	0,42	64	9,94	1,2425	9,9725	1,2465625

25	10	0,42	64	10,15	1,26875		
25	10	0,42	64	10,1	1,2625		
25	10	0,42	64	9,7	1,2125		
25	10	0,53	1	3,02	3,02		
25	10	0,53	1	2,08	2,08		
25	10	0,53	1	1,85	1,85	2,9	2,9
25	10	0,53	1	4,65	4,65		
25	10	0,53	3	7,73	4,462917581		
25	10	0,53	3	3,22	1,859067867	5,535	3,19563374
25	10	0,53	3	3,66	2,113101985		
25	10	0,53	3	7,53	4,347447527		
25	10	0,53	7	7,86	2,970800758		
25	10	0,53	7	4,33	1,636586168	5,6625	2,140223828
25	10	0,53	7	5,15	1,946517036		
25	10	0,53	7	5,31	2,006991352		
25	10	0,53	28	8,86	1,674382615		
25	10	0,53	28	10,89	2,058016556	10,2875	1,944154758
25	10	0,53	28	12,27	2,318812042		
25	10	0,53	28	9,13	1,725407819		
25	10	0,53	64	11,63	1,45375		
25	10	0,53	64	15,83	1,97875	13,06	1,6325
25	10	0,53	64	11,63	1,45375		
25	10	0,53	64	13,15	1,64375		
25	10	0,64	1	2,06	2,06		
25	10	0,64	1	3,12	3,12	2,6025	2,6025
25	10	0,64	1	2,89	2,89		
25	10	0,64	1	2,34	2,34		
25	10	0,64	3	6,63	3,827832285		
25	10	0,64	3	7,02	4,05299889	6,975	4,027018128
25	10	0,64	3	7,14	4,122280922		
25	10	0,64	3	7,11	4,104960414		
25	10	0,64	7	7,28	2,751581364		
25	10	0,64	7	8,49	3,208918376	7,1675	2,70906036
25	10	0,64	7	5,95	2,248888614		
25	10	0,64	7	6,95	2,626853087		
25	10	0,64	28	15,76	2,978360047		
25	10	0,64	28	13,37	2,526692502	13,965	2,639136933
25	10	0,64	28	13,61	2,572048239		
25	10	0,64	28	13,12	2,479446943		
25	10	0,64	64	22,98	2,8725		
25	10	0,64	64	22,57	2,82125	20,1225	2,5153125
25	10	0,64	64	17,71	2,21375		
25	10	0,64	64	17,23	2,15375		
50	10	0,42	1	0,44	0,44		
50	10	0,42	1	0,33	0,33	0,38	0,38
50	10	0,42	1	0,43	0,43		

50	10	0,42	1	0,32	0,32		
50	10	0,42	3	1,72	0,993042463		
50	10	0,42	3	1,14	0,658179307	1,375	0,79385662
50	10	0,42	3	1,37	0,790969869		
50	10	0,42	3	1,27	0,733234842		
50	10	0,42	7	3,21	1,213265958		
50	10	0,42	7	5,14	1,942737391	3,5375	1,337049323
50	10	0,42	7	3,28	1,239723471		
50	10	0,42	7	2,52	0,952470472		
50	10	0,42	28	7,54	1,424926063		
50	10	0,42	28	4,8	0,907114735	6,8175	1,288386397
50	10	0,42	28	8,53	1,612018477		
50	10	0,42	28	6,4	1,209486314		
50	10	0,42	64	14,33	1,79125		
50	10	0,42	64	9,76	1,22	13,0925	1,6365625
50	10	0,42	64	14,65	1,83125		
50	10	0,42	64	13,63	1,70375		
50	10	0,53	1	0,74	0,74		
50	10	0,53	1	0,37	0,37	0,66	0,66
50	10	0,53	1	0,26	0,26		
50	10	0,53	1	1,27	1,27		
50	10	0,53	3	4,05	2,33826859		
50	10	0,53	3	3,92	2,263213055	4,2575	2,458068771
50	10	0,53	3	4,93	2,846336827		
50	10	0,53	3	4,13	2,384456612		
50	10	0,53	7	4,25	1,60634901		
50	10	0,53	7	5,94	2,24510897	5,5425	2,094868092
50	10	0,53	7	5,96	2,252668259		
50	10	0,53	7	6,02	2,275346128		
50	10	0,53	28	8,7	1,644145458		
50	10	0,53	28	8,47	1,600679543	9,25	1,748085688
50	10	0,53	28	10,3	1,946517036		
50	10	0,53	28	9,53	1,801000714		
50	10	0,53	64	16	2		
50	10	0,53	64	13,66	1,7075	14,9425	1,8678125
50	10	0,53	64	14,26	1,7825		
50	10	0,53	64	15,85	1,98125		
50	10	0,64	1	3,18	3,18		
50	10	0,64	1	2,69	2,69	3,0475	3,0475
50	10	0,64	1	3,47	3,47		
50	10	0,64	1	2,85	2,85		
50	10	0,64	3	5,84	3,371725572		
50	10	0,64	3	4,99	2,880977843	5,8425	3,373168948
50	10	0,64	3	5,21	3,007994902		
50	10	0,64	3	7,33	4,231977473		
50	10	0,64	7	7,09	2,679768114	6,4025	2,419917538

50	10	0,64	7	5,1	1,927618812		
50	10	0,64	7	6,77	2,558819482		
50	10	0,64	7	6,65	2,513463746		
50	10	0,64	28	15,79	2,984029514		
50	10	0,64	28	12,98	2,45298943	13,1025	2,476139754
50	10	0,64	28	12,29	2,322591687		
50	10	0,64	28	11,35	2,144948384		
50	10	0,64	64	20,23	2,52875		
50	10	0,64	64	16,76	2,095	18,3475	2,2934375
50	10	0,64	64	16,75	2,09375		
50	10	0,64	64	19,65	2,45625		
25	20	0,42	1	4,66	4,66		
25	20	0,42	1	0,12	0,12	1,725	1,725
25	20	0,42	1	1,34	1,34		
25	20	0,42	1	0,78	0,78		
25	20	0,42	3	3,06	1,766691824		
25	20	0,42	3	3,13	1,807106343	2,72	1,570392732
25	20	0,42	3	3	1,732050808		
25	20	0,42	3	1,69	0,975721955		
25	20	0,42	7	6,36	2,403854048		
25	20	0,42	7	3,41	1,288858853	2,6275	0,993101653
25	20	0,42	7	0,6	0,226778684		
25	20	0,42	7	0,14	0,052915026		
25	20	0,42	28	8,03	1,517527359		
25	20	0,42	28	6,94	1,311536721	8,5725	1,620050222
25	20	0,42	28	8,89	1,680052083		
25	20	0,42	28	10,43	1,971084727		
25	20	0,42	64	10,51	1,31375		
25	20	0,42	64	9,14	1,1425	10,6975	1,3371875
25	20	0,42	64	11,61	1,45125		
25	20	0,42	64	11,53	1,44125		
25	20	0,53	1	1,7	1,7		
25	20	0,53	1	2,69	2,69	2,15	2,15
25	20	0,53	1	1,43	1,43		
25	20	0,53	1	2,78	2,78		
25	20	0,53	3	3,32	1,916802894		
25	20	0,53	3	5,16	2,979127389	4,0325	2,328164961
25	20	0,53	3	4,1	2,367136104		
25	20	0,53	3	3,55	2,049593456		
5,5475	20	0,53	7	4,84	1,829348049		
	20	0,53	7	6,12	2,313142575		2,096757914
	20	0,53	7	5,5	2,078804602		
	20	0,53	7	5,73	2,16573643		
11,01	20	0,53	28	11,98	2,264007193		
	20	0,53	28	11,93	2,254558082		2,080694424
	20	0,53	28	9,27	1,751865332		

	20	0,53	28	10,86	2,052347088		
25	20	0,53	64	14,88	1,86		
25	20	0,53	64	14,59	1,82375	14,9025	1,8628125
25	20	0,53	64	16,48	2,06		
25	20	0,53	64	13,66	1,7075		
25	20	0,64	1	3,18	3,18		
25	20	0,64	1	2,58	2,58	3,04	3,04
25	20	0,64	1	2,69	2,69		
25	20	0,64	1	3,71	3,71		
25	20	0,64	3	6,27	3,619986188		
25	20	0,64	3	4,2	2,424871131	5,4725	3,159549348
25	20	0,64	3	3,72	2,147743001		
25	20	0,64	3	7,7	4,445597073		
25	20	0,64	7	7,02	2,653310601		
25	20	0,64	7	6,39	2,415192983	6,67	2,521023035
25	20	0,64	7	6,2	2,343379733		
25	20	0,64	7	7,07	2,672208824		
25	20	0,64	28	12,37	2,337710266		
25	20	0,64	28	14,23	2,689217225	13,2925	2,512046379
25	20	0,64	28	13,28	2,509684101		
25	20	0,64	28	13,29	2,511573923		
25	20	0,64	64	21,73	2,71625		
25	20	0,64	64	15,48	1,935	18,1725	2,2715625
25	20	0,64	64	16,33	2,04125		
25	20	0,64	64	19,15	2,39375		
50	20	0,42	1	1,93	1,93		
50	20	0,42	1	0,81	0,81	1,2225	1,2225
50	20	0,42	1	0,88	0,88		
50	20	0,42	1	1,27	1,27		
50	20	0,42	3	0,16	0,092376043		
50	20	0,42	3	0,4	0,230940108	0,525	0,303108891
50	20	0,42	3	1,15	0,66395281		
50	20	0,42	3	0,39	0,225166605		
50	20	0,42	7	2,49	0,941131538		
50	20	0,42	7	4,18	1,579891497	3,1525	1,191533001
50	20	0,42	7	3,17	1,198147379		
50	20	0,42	7	2,77	1,04696159		
50	20	0,42	28	7,69	1,453273399		
50	20	0,42	28	13,09	2,473777476	8,93	1,687611372
50	20	0,42	28	8,33	1,57422203		
50	20	0,42	28	6,61	1,249172583		
50	20	0,42	64	7,47	0,93375		
50	20	0,42	64	9,16	1,145	9,6425	1,2053125
50	20	0,42	64	13,12	1,64		
50	20	0,42	64	8,82	1,1025		
50	20	0,53	1	1,44	1,44	1,5475	1,5475

50	20	0,53	1	1,77	1,77		
50	20	0,53	1	1,7	1,7		
50	20	0,53	1	1,28	1,28		
50	20	0,53	3	3,47	2,003405434		
50	20	0,53	3	6,2	3,579571669	4,5775	2,642820857
50	20	0,53	3	5,93	3,423687096		
50	20	0,53	3	2,71	1,56461923		
50	20	0,53	7	4,22	1,595010076		
50	20	0,53	7	5,93	2,241329325	5,34	2,018330286
50	20	0,53	7	6,31	2,384955825		
50	20	0,53	7	4,9	1,852025918		
50	20	0,53	28	11,65	2,201643055		
50	20	0,53	28	9,57	1,808560003	10,8975	2,059433922
50	20	0,53	28	10,78	2,03722851		
50	20	0,53	28	11,59	2,190304121		
50	20	0,53	64	13,8	1,725		
50	20	0,53	64	11,84	1,48	13,65	1,70625
50	20	0,53	64	13,22	1,6525		
50	20	0,53	64	15,74	1,9675		
50	20	0,64	1	1,3	1,3		
50	20	0,64	1	2,94	2,94	2,0625	2,0625
50	20	0,64	1	2,25	2,25		
50	20	0,64	1	1,76	1,76		
50	20	0,64	3	3,31	1,911029391		
50	20	0,64	3	3,25	1,876388375	3,7925	2,189600896
50	20	0,64	3	3,71	2,141969499		
50	20	0,64	3	4,9	2,829016319		
50	20	0,64	7	6,83	2,581497351		
50	20	0,64	7	7,12	2,691107048	6,82	2,577717706
50	20	0,64	7	6,27	2,369837246		
50	20	0,64	7	7,06	2,668429179		
50	20	0,64	28	10,35	1,955966148		
50	20	0,64	28	12,81	2,42086245	11,3775	2,150145396
50	20	0,64	28	12,3	2,324481509		
50	20	0,64	28	10,05	1,899271477		
50	20	0,64	64	18,95	2,36875		
50	20	0,64	64	16,67	2,08375	17,39	2,17375
50	20	0,64	64	16,24	2,03		
50	20	0,64	64	17,7	2,2125		