



UNISINOS

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

**DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO, COM ÊNFASE NA
CARBONATAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANA PAULA WERLE

SÃO LEOPOLDO
2010

ANA PAULA WERLE

**DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO, COM ÊNFASE NA
CARBONATAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marlova Piva Kulakowski

Banca Examinadora: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaía

Prof^a. Dr^a. Jane Proszek Gorninski

São Leopoldo

Julho/2010

W489d Werle, Ana Paula
Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação / Ana Paula Werle. -- 2010.

159 f. : il.; 30cm.

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2010.

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak; Co-Orientadora: Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski.

1. Construção civil. 2. Construção - Resíduo - Demolição. 3. Concreto - Agregado reciclado. 4. Concreto - Durabilidade - Propriedade - Carbonatação. I. Título. II. Kazmierczak, Claudio de Souza. III. Kulakowski, Marlova Piva.

CDU624

Catálogo na Publicação:
Biblioteca Eliete Mari Doncato Brasil - CRB 10/1184


TERMO DE APROVAÇÃO


“DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO COM ÊNFASE NA CARBONATAÇÃO”


ANA PAULA WERLE

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada e aprovada pela banca examinadora no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

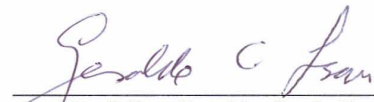
Aprovado por:

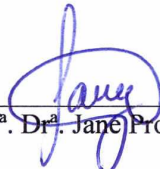

Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Orientador


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


Prof.^a. Dr.^a. Marlova Piva Kulakowski
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia


Prof.^a. Dr.^a. Jane Proszek Gorninski

SÃO LEOPOLDO, RS – BRASIL
Julho/2010

*Dedico este trabalho aos meus pais:
Claudio e Iva, vocês são um grande
Exemplo de superação e determinação
AMO VOCÊS!!!*

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta jornada aprendi muito, muito além do que eu imaginava. Em muitos momentos me conheci melhor em outros não me reconheci. Dentre todos os aprendizados adquiridos no caminho, acredito que o mais valioso tem sido o de que não estamos sós, não somos NADA sozinhos.

Por este motivo agradeço a Deus por ter me dado esta oportunidade e ter colocado junto a mim todas estas pessoas, que de alguma forma, influenciam o meu modo de pensar, agir e interagir.

Em primeiro lugar quero agradecer, de coração, à minha querida família. Agradeço todo o suporte, físico, financeiro e principalmente emocional para enfrentar os desafios que a vida apresenta. Pai, Mãe e mano Luis, AMO muito vocês. Ao mano que me ajudou muito no laboratório, partir, aspergir, fotografar e contabilizar, além de ajudar na limpeza e organização ao final das atividades no laboratório: muito obrigada! Vou retribuir a ajuda no seu TCC!

À minha avó querida, Vó Erica, obrigada por todas as orações, elas são sempre muito bem vindas, e tia Sylvania (minha segunda mãe) que lá de Panambi sempre me acompanha. E Vó, a faculdade ainda não terminou, eu ainda não estou pronta!

Ao meu amor querido, que mesmo estando longe, em Pelotas e agora em São Paulo, acompanha meus passos profissionais de perto. Caio obrigada pelo apoio e incentivo. Amo você! Estou chegando!

Agradeço também a família do Caio, por estar me acolhendo durante estes dez anos de relacionamento, agradeço muito pelo apoio e pelo empréstimo do carro, que foi de grande ajuda na logística de deslocamento Estância – Ivoti - São Leopoldo. Um grande abraço para a Márcia, para o Ivan, para a Carla e para o André, também amo vocês.

Faço aqui um agradecimento especial para a minha querida amiga Aline. Aline, quantas horas de trabalho passamos juntas, quantos perrengues, quanto tempo decorrido para a gente aprender a se entender e quanto aprendemos uma com a outra. Certa vez comentamos no laboratório que parecíamos Pinky e Cérebro, tentando concretar o mundo, ao menos era concreto reciclado! Mas o que sei de verdade é que ganhei uma amiga para toda a vida, amo você amiga!

Ao meu querido orientador, agradeço pela paciência, pelos ensinamentos, discussões e pela confiança em mim investida. Levo para a vida o seu exemplo de retidão, calma e diplomacia para resolver todas as questões em pauta, muito obrigada por tudo.

À co-orientadora, professora, mãezona e amiga Marlova muito obrigada por tudo, obrigada pelo ombro amigo, pela disposição, pelas discussões e todo o empenho em fazer com que nossas dissertações fossem organizadas, obrigada!

Ao professor Marco Aurélio que nos ajudou muito no tratamento estatístico dos resultados. Professor, eu disse que ia dar certo! Obrigada pela dedicação empenhada.

Aos demais professores do mestrado que foram muito importantes para a minha formação: Andréa, Luciana, Feliciane, Carlos, Jane e Luiz.

Aos colegas de turma, Laila, Roger, Luiz Felipe, Mariana, Fabiane, Queli, Déri, obrigada por compartilharem comigo muitos momentos bons.

Ao meu colega de concretagens (que pareciam que não ter fim) Marcelo Grub. Agradeço pelo seu bom humor frente a todos os obstáculos que apareceram durante o percurso. Obrigada pela parceria.

Às amigas de fé: Marjorie, Letícia, Edna, Débora, Liliana, Fabiana e Sandra obrigada pela amizade incondicional e pelas boas energias transmitidas.

Agradeço aos meus queridos bolsistas: Ludiero, Jeferson, Ana Claudia e Maiquel, pela ajuda e competência.

Aos secretários Camila, Simone e Sandra, obrigada por toda a ajuda prestada no decorrer deste período.

À Prefeitura Municipal de Ivoti, especialmente aos colegas de trabalho Márcia, Vivian, Armando, Guiga, Carlos e Jonatas, que acompanharam nestes últimos meses a ansiedade de concluir a dissertação, muito obrigada pela compreensão. Agradeço também à administração, especialmente à secretária Maria Elena e à prefeita municipal, Sra. Maria de Lourdes Bauermann pela compreensão e tolerância em relação às faltas e mudanças de horários.

É importante salientar que para realizar o programa experimental de mestrado se fez necessária a interação com os diversos laboratórios e serviços prestados pelos laboratoristas do campus, portanto, o meu, muito obrigada ao Sr. João e Sr. Airton responsáveis pela maquetaria, ao laboratório de metalografia, Salgadinho (Rodrigo)

obrigada pela ajuda com o software de análise de imagem, ao Matheus e Jacson do laboratório de mecânica, sempre disponíveis para soldar e cortar nossas fôrmas. Agradeço à Letícia responsável pelo laboratório de mecânica dos solos, obrigada pelo empréstimo das estufas. Ao Sr. João do laboratório de construção civil, ao pessoal do laboratório de química, pelos empréstimos de vidrarias e soluções químicas, ao laboratório de materiais de construção pelo suporte técnico oferecido, ao pessoal do laboratório de elétrica, obrigada pelos empréstimos de chaves de fenda, fiação, multímetro etc...

Agradeço ao pessoal do setor de compras que nos auxiliou com os orçamentos e compras de equipamentos, ao pessoal da Dalkia que, mesmo atrasando o programa experimental em 4 MESES, finalmente instalou a câmara de carbonatação e consertou os equipamentos que quebraram ao longo do processo.

O meu, muito obrigada ao pessoal da biblioteca setorial do curso de Arquitetura, Juliano e Vagner, que sempre guardaram as minhas coisas enquanto eu ia rapidinho buscar um lanche, tinham sempre um lugarzinho tranquilo pra eu estudar e um cafezinho quentinho pra me oferecer. Obrigada meninos pela companhia tão agradável.

Agradeço ao Plano de Bacia Sinos, pela concessão da bolsa de estudos.

E à empresa Super Bonder, pela doação dos rolos de fita extra-forte (Tape Bonder) utilizados para a realização do ensaio de absorção por capilaridade.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – Absorção do agregado

A/C – Relação água/cimento

A/AGL – Relação água/aglomerante

AN – Agregado Natural

ANOVA – Análise de Variância

ARC – Agregado Reciclado de Concreto

AutoCAD – Software gráfico

CEB – Comité Euro-International du Beton

CO₂ – Dióxido de carbono ou gás carbônico

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPII – F – Cimento Portland Composto com Fíler

CPV – ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

Ca²⁺ - Íon Cálcio

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

CO₃⁻ - Íon Carbonato

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

C₂S – Silicato dicálcico

C₃S – Silicato tricálcico

FCAG – Resistência à compressão do concreto que originou o agregado

H⁺ - Íon Hidrogênio

H₂CO₃ – Ácido Carbônico

H₂O - Água

H₂S – Gás sulfídrico

INOVA – Projeto “Ações de Inovação na Engenharia”

KOH – Hidróxido de potássio

LMC – Laboratório de Materiais de Construção

Mg(OH)₂ - Hidróxido de magnésio

MPa – Mega Pascal

NaOH – Hidróxido de sódio

NM – Norma Mercosul

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

OH⁻ - Hidroxila

pH – Potencial de Hidrogênio

PPGEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

RCC – Resíduo de Construção Civil

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

RILEM – Reunion Internationale de Laboratoires D'essais et Materiaux

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SO₂ – Dióxido de Enxofre

TAG – Teor de agregado

TPM – Teor de pré-molhagem

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

UR – Umidade Relativa

vol – Volume

μm – Micrômetro (10⁻⁶ metros)

α – Teor de argamassa

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quadro comparativo de caracterização do RCD.....	28
Tabela 2. Concentrações de CO ₂ em ambientes naturais. (SAETA e VITALIANI, 2004).....	49
Tabela 3. Percentuais de CO ₂ utilizados por alguns pesquisadores.....	50
Tabela 4. Caracterização física do CP V - ARI.....	63
Tabela 5. Caracterização química do CP V - ARI.....	63
Tabela 6. Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural (AN).....	64
Tabela 7. Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural.....	64
Tabela 8. Caracterização granulométrica dos agregados reciclados de concreto (ARC) de 18 MPa, 37 MPa e 50 MPa.....	68
Tabela 9. Caracterização física dos ARC.....	69
Tabela 10. Caracterização mecânica dos ARC.....	77
Tabela 11. Médias dos resultados de compressão axial aos 28 dias.....	94
Tabela 12. ANOVA da influência dos fatores independentes sobre a resistência a compressão.....	94
Tabela 13. Médias dos resultados obtidos para resistência à tração por compressão diametral.....	99
Tabela 14. ANOVA para os dados de resistência à tração por compressão diametral....	99
Tabela 15. Médias dos resultados de Absorção de água para cada combinação (g/cm ²).....	103
Tabela 16. ANOVA do modelo para absorção de água por capilaridade.....	111
Tabela 17. Parâmetro das variáveis analisadas para a absorção de água por capilaridade.....	111
Tabela 18. Comparação de dados de absorção encontrados para Levy (2001) e presente estudo.....	115
Tabela 19. Médias das profundidades de carbonatação e coeficientes de difusão de CO ₂	121
Tabela 20. ANOVA do modelo para profundidade de carbonatação.....	122
Tabela 21. Parâmetro das variáveis analisadas para profundidade de carbonatação.....	122

Tabela 22. Dados obtidos por Levy (2001) para profundidades de carbonatação aos 28 dias de exposição.....	126
Tabela 23. Valores de profundidade de carbonatação para 28 dias de ensaio acelerado no presente estudo.....	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Organograma da utilização de RCD na construção civil.....	19
Figura 2. Composição do RCD de São Leopoldo (KAZMIERCZAK et al, 2006).....	26
Figura 3. Composição do RCD de Novo Hamburgo (KAZMIERCZAK et al, 2006)....	26
Figura 4. Composição do RCD de Porto Alegre (LOVATO, 2007).....	26
Figura 5. Detalhe do poro do concreto (THIERY et al., 2007).....	46
Figura 6. Graus de saturação dos poros no concreto. Adaptada de Andrade (1992).....	51
Figura 7. Etapas do programa experimental.....	59
Figura 8. Cronologia do programa experimental.....	59
Figura 9. Matriz fracionada do programa experimental.....	62
Figura 10. Curva granulométrica do agregado natural miúdo.....	65
Figura 11. Diagrama de dosagem do concreto.....	66
Figura 12. Curvas granulométricas dos ARC.....	68
Figura 13. Ensaio de absorção por imersão dos ARC e AN.....	70
Figura 14. Absorção nos minutos iniciais de imersão do ARC e AN.....	71
Figura 15. Absorção por imersão dos ARC e AN ao longo do tempo.....	71
Figura 16. Subdivisão do corpo-de-prova para o ensaio de absorção por capilaridade..	72
Figura 17. Preparo da amostra para o ensaio de absorção por capilaridade.....	72
Figura 18. Método de absorção por capilaridade RILEM TC 116 PCD (modificado).....	73
Figura 19. Recipiente para o ensaio de absorção por capilaridade.....	74
Figura 20. Suporte para o abastecimento contínuo de água para o ensaio de absorção por capilaridade.....	74
Figura 21. Absorção por capilaridade para ARC e AN.....	74
Figura 22. Diferença entre os métodos de absorção por imersão e absorção por capilaridade.....	75
Figura 23. Volume total de poros dos ARC.....	76
Figura 24. Distribuição de poros dos ARC.....	76
Figura 25. Execução da pré-molhagem.....	78
Figura 26. Embalagem impermeável.....	81
Figura 27. Sistema utilizado para o ensaio acelerado de carbonatação.....	83
Figura 28. Disposição dos corpos-de-prova na câmara de carbonatação.....	84

Figura 29. Disposição dos corpos-de-prova na câmara de carbonatação.....	84
Figura 30. Amostra carbonatada com referência de escala.....	88
Figura 31. Imagem da amostra monocromática.....	89
Figura 32. Seleção das áreas de interesse.....	89
Figura 33. Delimitação das áreas de interesse.....	90
Figura 34. Seleção das áreas de interesse.....	91
Figura 35. Medidas de carbonatação.....	91
Figura 36. Efeito isolado da variável “tipo de agregado” no comportamento da resistência à compressão axial.....	95
Figura 37. Efeito isolado da variável “teor de agregado” no comportamento da resistência à compressão axial.....	95
Figura 38. Efeito isolado da variável “teor de pré-molhagem” no comportamento da resistência à compressão axial.....	96
Figura 39. Influência do tipo de agregado na resistência à tração por compressão diametral.....	100
Figura 40. Influência do teor de agregado na resistência à tração por compressão diametral.....	100
Figura 41. Influência do teor de pré-molhagem na resistência à tração por compressão diametral.....	101
Figura 42. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 25% ARC 18MPa.....	103
Figura 43. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 50% ARC 18MPa.....	104
Figura 44. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 75% ARC 18MPa.....	104
Figura 45. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 100% ARC 18MPa.....	105
Figura 46. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 25% ARC 37MPa.....	106
Figura 47. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 50% ARC 37MPa.....	106

Figura 48. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 75% ARC 37MPa.....	107
Figura 49. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 100% ARC 37MPa.....	107
Figura 50. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 25% ARC 50MPa.....	108
Figura 51. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 50% ARC 50MPa.....	108
Figura 52. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 75% ARC 50MPa.....	109
Figura 53. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 100% ARC 50MPa.....	109
Figura 54. Apresentação do comportamento da absorção de água por capilaridade, considerando três níveis fixos de relação água/cimento.....	113
Figura 55. Concreto de referência com aspersão imediata e após 7 dias.....	116
Figura 56. Amostra T4 com aspersão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.....	116
Figura 57. Amostra T8 com aspersão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.....	116
Figura 58. Amostra T21 com aspersão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.....	117
Figura 59. Amostra T23 com aspersão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.....	118
Figura 60. Amostra T37 com aspersão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.....	118
Figura 61. Amostra T38 com aspersão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.....	119
Figura 62. Dispersão das profundidades de carbonatação aos 147 dias.....	120
Figura 63. Comportamento dos concretos com ARC frente à carbonatação ao longo do tempo.....	124

RESUMO
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO, COM ÊNFASE NA
CARBONATAÇÃO

ANA PAULA WERLE

Grande parte das pesquisas com agregados provenientes da britagem de resíduos de construção e demolição (RCD) tem como foco principal o comportamento mecânico de concretos compostos com estes agregados. Este trabalho tem por objetivo o estudo das propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto (ARC), abordando além das propriedades mecânicas de resistência à compressão e tração, questões relacionadas à durabilidade com ênfase na carbonatação. Para controlar as características do concreto reciclado, estes foram produzidos em laboratório com as seguintes resistências 18, 37 e 50 MPa, com o intuito de resultar em três agregados com porosidades distintas. Após 63 dias de cura submersa, este concreto foi britado e empregado como substituição parcial do agregado natural (AN) em um novo concreto que, por sua vez, foi moldado com uma relação água/aglomerante de 0,64. O ARC foi empregado em substituição ao AN em diversos teores (0, 25, 50, 75 e 100%). Previamente ao emprego, o ARC foi pré-molhado com teores de 0, 25, 50, 75 e 100% da água relativa à absorção total do resíduo. Para a verificação da durabilidade deste novo concreto quando exposto ao CO₂, empregou-se o ensaio acelerado de carbonatação, realizado em câmara de alimentação contínua com atmosfera de 1% de concentração de CO₂ e umidade relativa de 70% ± 5%, na qual os concretos permaneceram durante 147 dias.

Os resultados obtidos a partir da leitura da profundidade carbonatada nas idades estudadas apresentam um comportamento semelhante tanto para os concretos de referência, quanto para os concretos que incorporam ARC. Somente para concretos que incorporam um alto percentual de substituição nota-se um ligeiro aumento da profundidade de carbonatação em relação aos concretos de referência.

Com base nestes resultados pode-se inferir que até um percentual de 50% de substituição do AN por ARC com qualquer teor de pré-molhagem, a profundidade de carbonatação observada é a mesma para concretos com ARC e concretos de referência.

ABSTRACT
**DETERMINATION OF PROPERTIES OF CONCRETE WITH RECYCLED
CONCRETE AGGREGATE WITH EMPHASIS ON CARBONATION**

ANA PAULA WERLE

Much of the research with aggregates from crushing of construction and demolition waste (CDW) has focused primarily on the mechanical behavior of concrete made with these aggregates. This research aims at to study the properties of concrete made with recycled concrete aggregates (RCA), besides addressing the mechanical properties, the durability issues will be focused on the carbonation. To control the characteristics of recycled aggregate, they were produced in the laboratory with the water/cement ratios: 0,85, 0,56 and 0,43, in order to result in three types of aggregates with different porosities. After 63 days of curing under water, the concrete was crushed and used as partial replacement of natural aggregate (NA) in a new concrete which was made with a water/cement ratio of 0,64. The RCA was used to replace the NA at various levels of 0, 25, 50, 75 and 100%. Prior to employ the RCA, it has been pre-wetted with levels of 0, 25, 50, 75 and 100% of water absorption on the total residue.

To check the durability of the new concrete when exposed to CO₂, the accelerated carbonation test was carried out, performed in a climatic chamber with a constant atmosphere of 1% CO₂ and relative humidity of 70% ± 5%, in which the concrete remains for 147 days.

The results reading from the carbonation depth at the ages 1, 3, 7, 28, 63, 91 and 147 days, show a similar behavior for both, concrete reference and concrete with RCA. Only concrete that incorporate a high percentage of replacement shows an increase in carbonation depth in relation to the reference concrete.

Based on the results it is possible to infer that at replacements of NA to RCA lower than 50%, for any content of pre-wetting, the carbonation depth observed is the same for reference concrete and concrete with RCA.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
	1.1. JUSTIFICATIVA.....	19
	1.2. OBJETIVOS.....	22
	1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
	2.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	24
	2.1.1 Composição e variabilidade do RCD.....	24
	2.1.2 Propriedades dos agregados provenientes da britagem do RCD.....	27
	2.2 CONCRETO COM RCD.....	33
	2.2.1 Propriedades do concreto com RCD no estado fresco.....	34
	2.2.2 Propriedades do concreto com RCD no estado endurecido.....	36
	2.3 DURABILIDADE DO CONCRETO COM RCD.....	41
	2.3.1 Carbonatação.....	45
	2.3.1.1 Fatores que influenciam a carbonatação em concretos com RCD.....	48
	2.3.1.2 Carbonatação em concretos com RCD.....	56
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	59
	3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	60
	3.1.1 Variáveis de resposta.....	60
	3.1.2 Variáveis de controle.....	60
	3.1.3 Planejamento estatístico.....	61
	3.2 MATERIAIS.....	62
	3.2.1 Cimento.....	62
	3.2.2 Agregado graúdo natural (AN).....	63
	3.2.3 Agregado miúdo natural.....	64
	3.2.4 Agregado reciclado de concreto (ARC).....	65
	3.2.5 Água.....	77
	3.3 OBTENÇÃO DOS CONCRETOS COM ARC.....	77
	3.3.1 Dosagem.....	77
	3.3.2 Pré-molhagem dos ARC.....	78
	3.4 MÉTODOS.....	79

3.4.1	Moldagem e Cura.....	79
3.4.2	Sazonamento.....	80
3.4.3	Ensaio de resistência à compressão.....	81
3.4.4	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	82
3.4.5	Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	82
3.4.6	Ensaio acelerado de carbonatação.....	82
3.4.7	Verificação da homogeneidade da carbonatação entre o concreto novo e ARC.....	86
3.4.8	Medidas de profundidade de carbonatação.....	86
3.4.8.1	Medidas de profundidade média de carbonatação.....	88
3.4.8.2	Medidas de profundidade de carbonatação com grau de 90% de confiança.....	90
3.4.9	Análise Estatística.....	92
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	93
4.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	93
4.1.1	Resistência à compressão.....	93
4.1.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	98
4.2	DURABILIDADE.....	102
4.2.1	Absorção de água por capilaridade.....	102
4.2.1.1	Modelagem estatística da absorção de água por capilaridade....	110
4.2.1.2	Análise a partir da modelagem estatística da absorção de água por capilaridade.....	112
4.2.2	Verificação da diferença de comportamento entre concreto novo e o ARC.....	115
4.2.3	Profundidade de carbonatação.....	119
4.2.3.1	Modelagem estatística da profundidade de carbonatação.....	121
4.2.3.2	Análise a partir da modelagem estatística da profundidade de carbonatação.....	123
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	128
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	132
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134
	ANEXOS.....	143

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados ao longo de todo o processo construtivo de uma edificação. Os RCD são responsáveis por cerca de 50% de todo o resíduo sólido urbano (RSU) produzido pela população (ÂNGULO et al., 2003).

Estes resíduos possuem características distintas e uma alternativa para utilização deste material é a sua transformação em agregados. Porém para a efetiva transformação destes resíduos em co-produto é necessário o conhecimento sobre as especificidades do material, estimando-se o comportamento de um novo produto com RCD frente às solicitações que ele possa vir a sofrer.

A viabilidade técnica de reinserção do material reciclado como agregado em novas matrizes cimentícias é o objeto de várias pesquisas. Grande parte delas tem como foco principal as questões relacionadas à resistência mecânica destes novos compostos (BAZUCO, 1999; LEITE, 2001; BUTLER, 2003; CABRAL, 2007; LOVATO, 2007; entre outros), confirmando que se inserido até determinado limite (aproximadamente 30%), é possível usar este agregado reciclado para a confecção de concretos para fins estruturais.

Além de observar a resistência à compressão e à tração, propriedades básicas para a verificação do desempenho de concreto armado, também é de suma importância a observação da durabilidade do novo produto, principalmente quando se pretende adotar o resíduo para a confecção de um concreto estrutural. O concreto confeccionado com RCD tende a apresentar uma microestrutura mais porosa, pois além do agregado de RCD ser mais poroso do que um agregado natural, a interação que ocorre entre a pasta e os agregados reciclados tende a gerar um novo concreto mais poroso (CABRAL, 2007). Dentre as várias causas de deterioração do concreto, a ação do CO₂ e a penetração de íons cloreto, são os principais agentes que afetam a integridade do aço contido no concreto. Estes processos alteram química e fisicamente a microestrutura do concreto, tornando as armaduras vulneráveis à corrosão, influenciando diretamente na durabilidade deste material.

Portanto, a inserção de um agregado mais poroso que o agregado convencional em um novo concreto, exige uma atenção redobrada e é em função deste aspecto que a presente pesquisa procura determinar o comportamento da carbonatação, através de

ensaios acelerados, em concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto (ARC).

Este trabalho é parte integrante do projeto de pesquisa INOVA “Ações de Inovação em Engenharia”, aprovado no âmbito do Edital FINEP 06/2006, desenvolvido no PPGEC-UNISINOS, o qual tem como objetivo viabilizar tecnicamente a inserção de resíduos de construção e demolição (RCD) em novas matrizes cimentícias, cujo organograma é apresentado na figura 1.



Figura 1. Organograma da utilização de RCD na construção civil.

O grande tema engloba estudos sobre propriedades mecânicas e durabilidade dos concretos com ARC. A trabalhabilidade acompanha a perda de abatimento ao longo do tempo, já as pesquisas sobre durabilidade abordam a penetração de íons cloreto (TROIAN, 2010) e a ação da carbonatação (presente estudo) neste concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com Guerra et al. (2008) a indústria da construção civil está vivendo o desafio de executar uma atividade de grande impacto, procurando sistemas e soluções que conduzam a um desenvolvimento sustentável.

Nesta direção, citando a resolução CONAMA n° 307 (BRASIL, 2003), o gerador do resíduo é responsável pela destinação correta do mesmo. A resolução foi publicada em 2003, porém os municípios, em sua grande maioria, não conseguiram

implantar planos de gerenciamento para os RCD, assim como realizar a devida fiscalização junto aos geradores e transportadores de RCD, fato observado na região da Bacia do Rio dos Sinos, onde está inserida a pesquisa. Além da preocupação com o montante de RCD gerado, há uma preocupação também com a possibilidade de transformação deste material em um co-produto que possa retornar ao ciclo produtivo da construção civil.

Na mesma direção, podem-se citar as normas ABNT NBR 6118: 2007 e ABNT NBR 15575: 2008. Normas de projeto de estrutura de concreto armado e desempenho de edificações respectivamente, que atentam para os fatores de durabilidade das estruturas. O quesito durabilidade dos materiais é crucial no momento em que se questiona a sustentabilidade das edificações e dos sistemas que as compõem, pois a sua falta implica na geração de entulhos em um dado período (reformas e/ou demolição) ou o desempenho adequado minimiza o impacto causado pelas demolições, pois a vida útil das estruturas neste caso pode ser prolongada.

Com a revisão da norma ABNT NBR 6118: 2007 foram ampliados os critérios para o alcance da durabilidade em estruturas de concreto armado. As diretrizes relacionadas ao projeto das estruturas procuram orientar projetista e construtor para a especificação correta dos materiais, dimensionamento adequado das peças estruturais e condições para o monitoramento das estruturas ao longo dos anos.

Mehta e Monteiro (2008) apontam que a durabilidade do concreto está diretamente relacionada à exposição deste material à ação da água e a maneira como a mesma age dentro da rede de poros, interagindo com o material. Os autores definem que durabilidade é o tempo de vida útil que uma estrutura pode alcançar, definido por fatores como: o ambiente no qual a estrutura está inserida, a escolha dos materiais adotados para a sua fabricação e a periodicidade de manutenção da estrutura.

De acordo com Lima (2005), a durabilidade de um sistema estrutural deve levar em consideração a necessidade de manutenção e o conhecimento profundo dos mecanismos que atuam a partir dos agentes de degradação, devido às condições reais a que a estrutura está exposta.

Figueiredo (2005) aponta que as reações de neutralização do concreto ocorrem em função da presença de gás carbônico (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e gás

sulfídrico (H_2S) na atmosfera. O fenômeno recebe o nome de carbonatação em razão da maior incidência de CO_2 nas reações envolvidas.

As reações formadas entre o CO_2 presente na atmosfera e os produtos da hidratação do cimento, se iniciam a partir da superfície do concreto, avançam progressivamente para o interior da estrutura e provocam a redução do pH do concreto de 13 (situação normal) a aproximadamente 8. Esta redução do pH gera a despassivação da armadura podendo comprometer a estrutura de concreto armado.

O avanço das reações de carbonatação é possível em função da rede de poros existente dentro do concreto e da condição de umidade contida nestes poros. A umidade interna é originada através da água de amassamento da mistura (a água que não é consumida pelas reações químicas permanece na massa) e umidade do ambiente. Esta umidade permite que ocorram reações entre os produtos da hidratação do cimento e o CO_2 que penetra pelos poros.

A ação do fenômeno da carbonatação vem sendo estudada há algum tempo (PATEL et al., 1988; PAPADAKIS e FARDIS, 1989; PAPADAKIS et al., 1991; KAZMIERCKZAK, 1995; KULAKOWSKI, 2002; KIRCHREIM, 2003; PAULETTI, 2004; POSSAN, 2004; BARY e SELIER, 2004; DUPRAT e SELIER., 2006; THIERY et al., 2007; CASTELLOTE et al., 2008; entre outros), porém os estudos sobre a durabilidade em concretos produzidos com agregados de concreto são recentes e necessitam de mais estudos para se obter uma resposta adequada para este tipo de material.

Através da substituição de agregados naturais (com percentual de absorção de até 2,20%) por agregados reciclados de concreto (com percentual de absorção de até 8,50%), as propriedades do concreto no estado fresco são rapidamente alteradas. Pode haver um consumo de água da pasta da matriz pelo agregado em função desta porosidade e tendo em vista tal questão, faz-se necessário realizar uma compensação de água ou pré-molhagem nestes agregados, a fim de minimizar a absorção de água da pasta do concreto no estado fresco.

Porém, realizando tal procedimento nota-se um acréscimo de água na matriz do concreto, alterando a relação água/cimento final. Esta alteração interfere na rede de poros e conseqüentemente tende a tornar a matriz mais vulnerável ao ataque de CO_2 , pois os agregados reciclados têm uma constituição mais porosa e podem responder de

maneira distinta à carbonatação, quando comparados com um concreto confeccionado com agregado natural (rocha).

Também há dúvidas com relação ao comportamento da interface pasta/agregado, em função da utilização de ARC em um novo concreto. Como está sendo inserido um agregado que já contém uma zona de interface pasta/agregado, a esta interface será acrescida a nova interface entre a pasta do concreto novo e o agregado reciclado, e dependendo das especificidades tanto do concreto novo, quanto da qualidade do agregado, pode ser gerada uma zona de maior porosidade no concreto que incorpora o resíduo.

Em virtude destes aspectos e visando a aplicação do resíduo de concreto em novas estruturas de concreto armado, esta pesquisa pretende contribuir para o conhecimento do fenômeno da carbonatação neste material, abordando a questão da durabilidade, através da exposição destes novos concretos à ação do CO₂.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral contribuir para o estudo sobre a durabilidade de concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto (ARC), frente ao fenômeno da carbonatação.

Os seus objetivos específicos são:

- Observar a influência da porosidade do ARC (tipo de ARC) na carbonatação acelerada, na absorção de água, na resistência à compressão e na resistência à tração.
- Observar a influência dos teores de ARC na carbonatação acelerada, na absorção de água, na resistência à compressão e na resistência à tração.
- Observar a influência do teor de pré-molhagem dos ARC na carbonatação acelerada, na absorção de água, na resistência à compressão e na resistência à tração.
- Observar se existem diferenças entre o concreto convencional e o concreto com ARC, durante e após o processo de carbonatação acelerada, através da profundidade de carbonatação (mm).

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro deles destinado à introdução e justificativa, que apresentam a problemática abordada e a relevância do seu estudo, seguida dos objetivos a serem atingidos por este estudo.

O segundo capítulo engloba a revisão bibliográfica acerca dos temas RCD (definição, origem, geração e características) e durabilidade, focada na ação do CO₂ sobre as estruturas de concreto convencional e concretos que incorporam agregados reciclados de concreto.

O capítulo três apresenta o programa experimental adotado para alcançar os objetivos propostos, especificando os materiais e métodos utilizados na pesquisa.

Os resultados, as análises estatísticas e as discussões sobre os dados obtidos no decorrer do programa experimental estão inseridos no capítulo quatro.

O quinto capítulo é dedicado às considerações finais da pesquisa, as quais apontam para os fatores que possuem maior ou menor influência sobre o comportamento do novo material. Neste mesmo capítulo apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros em concretos com ARC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

A resolução CONAMA n° 307, que entrou em vigor no ano de 2002, define: “Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”. Esta terminologia também é adotada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Na maioria das publicações de pesquisas brasileiras (LEITE, 2001; BUTLER, 2003; LOVATO, 2007; CCABRAL, 2007), entretanto, a denominação mais comum é a de RCD, a qual é uma tradução do termo *Construction and Demolition Waste (CDW)*, utilizado na literatura internacional.

Esta pesquisa adota o termo “Resíduos de Construção e Demolição (RCD)”, por entender que este é utilizado pelo meio acadêmico, nacional e internacional, e o mesmo fornece em sua terminologia a definição e esclarecimento acerca do objeto de que trata.

2.1.1 Composição e variabilidade do RCD

O RCD é composto por uma gama bastante grande de materiais. Esta característica é, sem dúvida, um dos grandes empecilhos para a aplicação em larga escala dos resíduos de construção e demolição como agregados para produção de novos concretos.

Conforme Lovato (2007), o RCD pode ser constituído por diferentes materiais, tais como: solos, rochas naturais, concreto, argamassas, cerâmica vermelha, cerâmica de revestimento, cimento, gesso, vidro, chapas de aço galvanizado, madeira, plásticos, materiais betuminosos, tintas, papéis de embalagens e restos de vegetais. A composição do RCD está relacionada com as tecnologias e materiais que estão sendo empregados no momento.

Durante a execução de uma obra existem uma série de processos que ocorrem de maneira gradativa e outros concomitantes, nestes processos podem estar envolvidos diferentes tipos de materiais. Assim como o tipo de obra, a etapa em que a obra se

encontra e até mesmo fatores externos como disponibilidade de recursos naturais, específicos de cada região ou localidade, irão influenciar no tipo de resíduo gerado pela obra.

Oliveira et al. (2004) apud Carrijo (2005) citam aspectos que podem interferir na variabilidade do RCD:

- Desenvolvimento técnico da indústria local;
- Qualidade e treinamento da mão-de-obra disponível;
- Técnicas de construção e demolição empregadas;
- Programas empregados de qualidade e redução de perdas;
- Processos de reciclagem e reutilização adotados no canteiro de obras;
- Disponibilidade e predominância de materiais na região;
- Desenvolvimento econômico do local;
- Demanda de novas construções.

Damineli (2007) acrescenta a estes fatores que, a variabilidade do RCD também está relacionada com o momento no qual foi efetuada a coleta da amostra. De acordo com o autor, em determinados horários do dia, os tipos de RCD destinados a aterro podem variar. Estes aspectos ajudam a entender, de maneira mais ampla, o que ocorre no mercado da construção civil e que está refletido na característica do resíduo gerado por este setor.

Kazmierczak et al. (2006) avaliaram a composição do RCD na região sul do país, especificamente nas cidades de São Leopoldo e Novo Hamburgo, ambas situadas na região metropolitana da capital, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, integrantes da Bacia do Rio dos Sinos. Ao coletar amostras de aterros que recebem RCD, pode-se observar que não houve uma diferença expressiva na composição dos resíduos das duas cidades. Os percentuais de cada material encontrado nas amostras coletadas constam nas figuras 2 e 3.

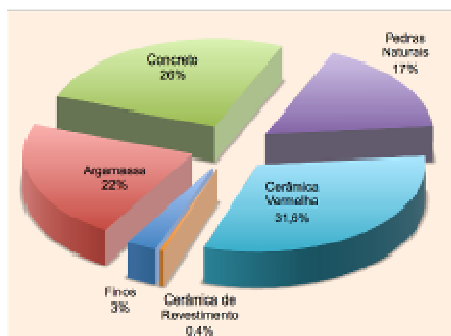


Figura 2. Composição do RCD de São Leopoldo (KAZMIERCZAK et al., 2006).

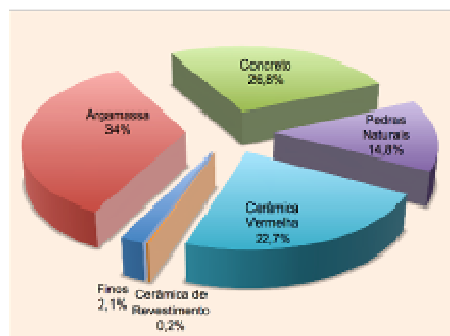


Figura 3. Composição do RCD de Novo Hamburgo (KAZMIERCZAK et al., 2006).

Lovato (2007) realizou coleta em aterro da Zona Sul de Porto Alegre, e obteve uma distribuição de materiais de acordo com a figura 4.

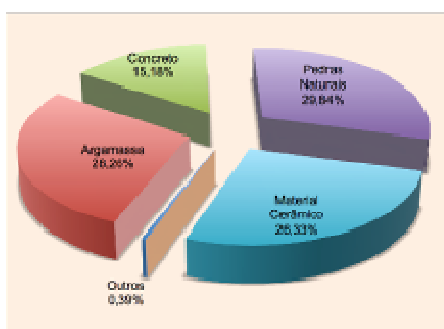


Figura 4. Composição do RCD de Porto Alegre (LOVATO, 2007).

Conforme os dados coletados por estes autores. Observa-se que as distribuições de materiais das três cidades amostradas, situadas próximas entre si, possuem praticamente a mesma composição. Tal fato pode ser decorrente das técnicas construtivas adotadas e insumos disponíveis para construção civil serem bastante similares na região.

A grande dificuldade está na forma em que este material encontra-se acondicionado. Na maioria dos casos, o RCD é depositado em aterro de resíduos sólidos, algumas vezes em área restrita a este tipo de resíduo, porém os diferentes materiais estão misturados, tornando sua separação muitas vezes inviável.

É bastante comum em nossas cidades o recolhimento de RCD gerado em pequenas obras ou reformas ser feito por caçambas, nas quais, enfatiza Lovato (2007), é possível que estejam contaminados com matéria orgânica e outros objetos, pois estas

caçambas, na maioria dos casos, não possuem dispositivo de fechamento que impeça a colocação de materiais contaminantes.

O RCD muitas vezes está contaminado com materiais perigosos, como tintas, solventes e óleos. Se estes não forem separados na fonte geradora antes de serem levados a um local de disposição final, podem contaminar águas e solos, além de prejudicar a saúde dos operários que trabalham com este material. Se estes resíduos estiverem estocados em locais inapropriados, através da percolação da água da chuva pode ocorrer uma lixiviação e formação de elementos químicos prejudiciais ao meio-ambiente (ROUSSAT et al., 2008).

Verifica-se na nas frações que identificam os diversos materiais que compõem o RCD que há uma grande quantidade de concreto presente e dentre os materiais constituintes do RCD, o concreto é um material gerado em grande quantidade e possui características adequadas para a sua transformação em um co-produto e ser reinserido na cadeia produtiva da construção civil na forma de agregado, após a sua cominuição.

2.1.2 Propriedades dos agregados provenientes da britagem do RCD

a. Massa específica e massa unitária

Conforme Bazuco (1999), o agregado proveniente de RCD de concreto possui menor massa específica, devido à maior quantidade de argamassa aderida à superfície dos agregados. A massa específica por ele encontrada, para o agregado graúdo reciclado é em média $2,31 \text{ kg/dm}^3$, em virtude da argamassa aderida ao agregado natural.

Leite (2001) encontrou em seus estudos, agregados mistos (cerâmica, concreto e argamassa) com massa específica em torno de 5% a 10% menor do que a massa específica de agregados naturais. Para Barra (1996) apud Leite (2001), quanto mais poroso o agregado, menor é a sua massa específica. Leite (2001) complementa que os resultados para a massa específica são bastante variados, mesmo para materiais com composição semelhante. Esta variação pode ocorrer em função das propriedades de cada material e também de acordo com os métodos de ensaio adotados.

Lovato (2007) infere que a massa específica e a massa unitária de agregados reciclados mistos, são menores do que valores encontrados para massa específica e massa unitária de agregados naturais devido à porosidade do material e em função da argamassa aderida às partículas. Esta autora realizou o ensaio de massa específica

conforme NBR 9776 e encontrou os seguintes resultados, para o agregado miúdo reciclado, de 2,40 kg/dm³ a 2,44 kg/dm³, para massa específica do agregado miúdo natural de 2,62 kg/dm³, massa específica do agregado graúdo natural igual a 2,85 kg/dm³, massa específica do agregado graúdo reciclado variam de 2,40 kg/dm³ a 2,58 kg/dm³.

Zordan (2003) encontrou, para o material retido na peneira de abertura de malha # 4,8mm, massa específica igual a 1,923 kg/dm³ e massa específica aparente de 1,023 kg/dm³.

Cabral (2007) verificou em seus estudos uma massa específica do agregado graúdo reciclado de 2,27 kg/dm³ e massa unitária do agregado graúdo reciclado de 1,22 kg/dm³. O autor ressalta que as diferenças encontradas relacionam-se com a forma das partículas e a maneira como estas se empacotam dentro do recipiente de ensaio.

Butler (2003) constata que a quantidade de argamassa aderida aos agregados reciclados de concreto é responsável pela redução da densidade do material, encontrando os valores apresentados na tabela 1. A tabela 1 apresenta um quadro comparativo dos valores obtidos por diversos autores, para diferentes tipos de RCD.

Tabela 1. Quadro comparativo de caracterização do RCD.

Tipo de agregado	Autor	Massa Unitária	Massa Específica
Agregados Mistos	LEITE (2001)	1,12 kg/dm ³	2,51 kg/dm ³
	VIEIRA (2003)	*	2,52 kg/dm ³
	ZORDAN (2003)	1,02 kg/dm ³	1,92 kg/dm ³
	LOVATO (2007)	1,02 – 1,12 kg/dm ³	2,40 – 2,58 kg/dm ³
	CABRAL (2007)	1,22 kg/dm ³	2,27 kg/dm ³
Agregados de Concreto	BAZUCO (1999)	*	2,30 – 2,32 kg/dm ³
	BUTLER (2003)	1,26 kg/dm ³ - Estado Solto 1,41 kg/dm ³ - Compacto	2,39 kg/dm ³ - Seca 2,54 kg/dm ³ - Saturada
Agregados Cinza	CARRIJO (2005)	*	1,78 – 2,6 kg/dm ³
Agregados Vermelhos		*	1,74 – 2,62 kg/dm ³

* Resultados não apresentados na pesquisa

b. Distribuição Granulométrica

Ângulo (2000) estabelece que as curvas granulométricas obtidas com agregados reciclados mistos apresentam resultados de acordo com as fases contidas no material examinado. Lovato (2007), que também trabalha com frações mistas de RCD (cerâmica, argamassa e concreto), acrescenta que a composição granulométrica está relacionada com a origem do material e o equipamento utilizado para o processamento do mesmo. Assim como Butler (2003), que trabalha somente com concreto, a autora expõe a interferência do tipo de britador e ajuste do mesmo, nas dimensões das partículas.

Lovato (2007) destacou que para diferentes amostras de RCD misto, a distribuição granulométrica é semelhante entre si, destacando a grande quantidade de material passante pela peneira de malha # 0,15mm.

Em pesquisa realizada por Carrijo (2005), a autora obteve curvas granulométricas contínuas para os agregados graúdos, assim como aponta para o fato de que materiais menos densos estão mais sujeitos à ruptura no processo de britagem, diminuindo as dimensões das partículas.

Bazuco (1999) percebe uma sensível diferença entre a granulometria do agregado natural e a granulometria do agregado reciclado de concreto. Em sua pesquisa utilizou somente a fração compreendida entre as peneiras de abertura de malha # 19 mm e # 9,5 mm, considerando o restante agregado miúdo. Nesta pesquisa, o autor verificou que ao britar três corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 150 mm x 300 mm, 70% do agregado gerado correspondia à fração graúda.

Os tempos de cura, de 7 dias e 28 dias, das peças de concreto, que seriam submetidas à cominuição, não influenciaram na granulometria do material (BUTLER, 2003). O autor aponta que a fração graúda representa entre 70% e 75% do total de material peneirado.

Ulsen (2006) submete os RCD mistos a uma britagem, na qual obteve até 45% de material passante pela peneira # 4.8mm, demonstrando a necessidade da criação de alternativas tecnológicas capazes de re-inserir este material na linha de produção da construção civil, como agregado miúdo.

Diversos autores propõem que a curva granulométrica seja ajustada, pois a composição granulométrica assume um papel importante em relação ao estado fresco de

um concreto, pois se a mesma for adequada à condição ideal, de um agregado requerido para a execução de concreto, este fator não afetará sensivelmente a trabalhabilidade da mistura.

Nesta direção, Levy (1997) destaca que a granulometria do material misto deve ser um critério adotado para prever a trabalhabilidade de um concreto confeccionado com RCD, o autor avalia também que o RCD pode ser peneirado para a aproximação da curva granulométrica do agregado reciclado à curva granulométrica do agregado natural utilizado.

Da mesma forma Cabral (2007), sugere esta aproximação das curvas granulométricas para agregado reciclado e agregado natural. Este autor optou por fracionar o resíduo adotado para a inserção em uma nova matriz, separando-os em agregados miúdos e graúdos e também em função de sua natureza (o autor trabalha separadamente os resíduos de concreto, argamassa e cerâmica vermelha).

Lima (1999) enfatiza que para a confecção de concreto é preciso eliminar a fração miúda da granulometria do RCD misto, com o intuito de melhorar as propriedades do concreto.

Os autores citados entendem que para incorporação com êxito do material em uma nova matriz de concreto, a granulometria do material reciclado deve ser o mais próxima possível ao material de referência. A ação proposta se justifica em consequência das correções necessárias ao traço do concreto, caso a forma do agregado e a sua distribuição granulométrica sejam inadequadas (alteração no teor de argamassa, uso de aditivos, etc.), o que poderá resultar em perdas econômicas e ambientais. Entretanto, é necessário questionar a real necessidade de adequação da granulometria do resíduo à do agregado natural, pois o emprego de mais energia para a transformação do resíduo pode gerar um alto custo e tornar o material não sustentável.

c. Forma

De acordo com Butler (2003), a forma do agregado de RCD é resultado, além das características próprias do material, do processo de britagem pelo qual ele passa. Deste processo fazem parte, o tipo de britador utilizado, os ajustes de abertura do britador e o número de vezes que se submeteu o agregado reciclado à britagem.

Em relação às características do material, Etxeberria et al. (2007), observam que a quantidade de argamassa aderida ao agregado original irá condicionar o agregado reciclado quanto à sua capacidade de absorção, assim como determinar a forma do grão.

A respeito de alguns britadores, Bazuco (1999) ressalta que o britador de mandíbulas acentua a forma angular e o britador giratório proporciona o desgaste em toda a superfície do agregado, proporcionando partículas mais arredondadas, ideais para a utilização em concreto, porém Ângulo (2000) salienta que mesmo no próprio resíduo há variabilidade de forma entre os agregados, independente do tipo de britador utilizado.

Leite (2001) afirma que os agregados de RCD, após serem submetidos à etapa de cominuição, tendem a apresentar uma forma mais angular. A autora complementa que esta característica implica em um maior atrito entre os agregados e, portanto, o concreto necessita de um teor de argamassa mais elevado para manter um nível satisfatório de trabalhabilidade. Assim como Leite (2001), Lima (1999) enfatiza que o agregado apresenta uma forma lamelar o que dificulta a trabalhabilidade da mistura.

Em seu trabalho Buest Neto (2006) também considera que a forma lamelar dos grãos de RCD interfere sensivelmente na mistura, especificamente no empacotamento das partículas. O autor aponta que o formato lamelar gera um grande número de vazios, os quais podem não ser preenchidos com partículas menores, esta característica pode refletir na perda de resistência mecânica do material.

Por outro lado, Butler e Machado (2004) inferem que as partículas angulares, juntamente com sua textura irregular e áspera, favorecem a resistência ao esforço de tração.

Nota-se que há um consenso a respeito da interferência do britador utilizado sobre a forma das partículas geradas, assim como a influência das especificidades do material sobre este aspecto, e que o fator “forma” influencia as propriedades do concreto tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

d. Porosidade

A porosidade de um material é a sua propriedade de apresentar vazios (CAMPITELI, 1987). A porosidade dos agregados provenientes da britagem de concreto depende da relação água/cimento utilizada para a confecção da pasta deste concreto, pois quanto maior a relação água/cimento da pasta, maior será o número total

de poros, assim como os poros terão dimensões maiores e serão capazes de absorver mais água.

De acordo com Gómez-Soberón (2003), os agregados reciclados de concreto apresentam diâmetro de poros em torno de 40% maiores do que os poros dos agregados naturais. Este acréscimo de porosidade se dá em função da quantidade de argamassa aderida aos grãos de RCD. Vieira e Dal Molin. (2004), enfatizam que a maior porosidade e a menor resistência dos agregados graúdos, são fatores que podem influenciar na resistência à compressão obtida com estes novos concretos. As autoras apontam que, devido à porosidade, os agregados reciclados possuem uma alta taxa de absorção de água.

e. Absorção de água

O potencial de absorção de água é um dos mais significativos parâmetros que distingue o agregado reciclado do agregado natural (ETXEBERRIA et al., 2007), esta capacidade de absorção deve ser considerada no momento da confecção de novos concretos que incorporam este material.

A absorção de água ocorre através da rede de poros do material, esta característica determina a quantidade de fluido que é absorvido para o interior do sólido avançando através dos seus poros. Este dado pode ser usado para avaliar a porosidade do agregado e a sua resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Leite (2001) ressalta que a absorção depende também da umidade interna do material e que a absorção de água pelo agregado reciclado de concreto (ARC) está diretamente relacionada com a camada de argamassa aderida aos grãos. A autora encontra uma taxa de absorção de água de 4,95% para agregados graúdos mistos.

Ângulo (2000) relaciona a elevada absorção de água pelos RCD com a porosidade deste material, salientando que, em média, concretos absorvem menos água do que as argamassas, devido à sua constituição porosa. A argamassa aderida aos grãos é responsável pela maior absorção de água.

Para Padmini et al. (2009), a absorção do agregado de concreto aumenta à medida em que aumenta a resistência do concreto que gerou o agregado. Para o autor, quanto mais resistente for o concreto, no momento da cominuição do mesmo, haverá uma porção elevada de argamassa aderida ao agregado reciclado. Por outro lado, quanto

menor a resistência do concreto de origem, quando realizada a britagem, há uma tendência de separação entre as fases, gerando uma grande quantidade de material de menor dimensão, composto somente pela fração argamassa e os grãos maiores compostos de rocha mineral e argamassa.

Bazuco (1999), que trabalha com resíduos de concreto, aponta para uma taxa média de absorção, após 24 horas de 8,45%, onde quase toda a quantidade de água foi absorvida nos primeiros 30 minutos do ensaio, a absorção de água neste intervalo de tempo chegou a aproximadamente 75% do valor das 24 horas de imersão. Na pesquisa realizada por Lovato (2007) 50% da capacidade de absorção total de água dos agregados reciclados mistos foi absorvida pelos grãos nos primeiros 30 minutos de ensaio.

Cabral (2007) observou que nos primeiros 10 minutos do ensaio, que totalizou 24 horas, 80% da massa de água foi absorvida pelos grãos de concreto. Para Butler (2003) a absorção de 88% da massa da água absorvida pelos agregados de concreto também ocorreu nos primeiros 10 minutos.

É fato que os resultados apresentados pelos diversos autores, sobre as taxas de absorção de água dos RCD, não são passíveis de comparação entre si, devido à alta variabilidade dos componentes ensaiados, assim como os métodos de ensaio adotados (CABRAL, 2007).

Em função destas considerações, algumas precauções devem ser tomadas antes da utilização dos agregados reciclados. Há uma necessidade de submeter o material, que se deseja inserir em nova matriz de concreto, a um ensaio prévio de absorção de água, com o intuito de verificar o comportamento do mesmo em relação a este aspecto.

Os ensaios de absorção fornecem dados que permitem avaliar a necessidade de compensação de água na mistura de concreto, para que o agregado não absorva água da pasta e altere as características de trabalhabilidade do concreto.

2.2 CONCRETO COM RCD

Uma das possíveis aplicações para os RCD é a sua transformação em agregados para incorporação em concretos. Embora se aplique este material somente para execução de base e sub-base para pavimentação, as pesquisas realizadas com concretos que incorporam parcelas de RCD, têm mostrado resultados satisfatórios quanto às suas

propriedades mecânicas (LEVY, 2001; BUTLER, 2003; CABRAL, 2007), o que possibilita a execução de concretos para fins estruturais com este co-produto.

Levy (2001) realiza um levantamento de obras já executadas na Europa com concretos que incorporam em sua matriz RCD. Entre elas pode-se citar: unidades residenciais na Alemanha em 1996, edifício do meio ambiente do BRE na Inglaterra em 1996, novo centro para operações de tratamento de água também na Inglaterra em 1999, empreendimento residencial de médio padrão na Holanda em 1997.

A aplicação deste co-produto em concretos para fins estruturais exige o conhecimento do material, assim como o conhecimento das implicações da sua inserção em novas matrizes de concreto. Portanto, explorar o comportamento do concreto com RCD tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido são premissas básicas que norteiam o uso deste produto alternativo.

2.2.1 Propriedades do concreto com RCD no estado fresco

A inserção de agregados provenientes de RCD em uma nova matriz de concreto implica em mudanças sensíveis nas características do produto, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. No estado fresco, em função da porosidade do agregado, estima-se uma alteração na trabalhabilidade, sendo esperada uma perda de abatimento do concreto ao longo do tempo.

A trabalhabilidade é definida como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco, com a perda mínima de homogeneidade (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Em seu estudo com resíduos de concreto, Butler (2003) avaliou a trabalhabilidade do concreto com RCD, realizando o ensaio de tronco de cone, fixando um abatimento de 60 ± 10 mm (abatimento do concreto de referência). Para alcançar este parâmetro, o autor relata a necessidade de correção da relação a/c, em virtude da alta porosidade dos agregados para alcançar o abatimento proposto.

Leite (2001), utilizando agregados mistos (alta e baixa porosidade), fixou o teor de água das misturas e adotou um parâmetro de abatimento de 70 ± 10 mm (concreto de referência) e realizou substituições de agregados graúdos e miúdos. Com relação às substituições de agregados graúdos, a autora infere que quanto maior for a relação a/c, ou seja, quanto menor for o consumo de cimento, o abatimento destas misturas tende a

descer a níveis muito baixos, pois não há um teor de argamassa capaz de lubrificar as partículas e permitir que as mesmas deslizem entre si e proporcionem abatimentos satisfatórios. A mesma autora salienta que quanto maior o teor de agregados graúdos reciclados utilizados em um determinado concreto, menor será o abatimento obtido com estas misturas, tornando o teor de incorporação de RCD um fator limitador em relação à trabalhabilidade.

Para Cabral (2007), utilizando uma mesma relação materiais secos/pasta, a substituição de agregado convencional pelo reciclado resulta numa perda de trabalhabilidade da mistura, decorrente da maior porosidade dos agregados. O autor aponta que o processo de britagem dos resíduos torna-os mais angulares, aumentando a fricção interna nos concretos com RCD, dificultando o deslizamento das partículas.

Bazuco (1999) observa que a perda de abatimento é mais acentuada em traços mais pobres de concreto que incorporam resíduo de concreto, além da composição do traço, as condições ambientais externas também contribuem para a resposta do concreto ao ensaio de tronco de cone, pois fatores como a umidade relativa do ar, a temperatura externa e a temperatura dos insumos, devem ser levados em consideração para a melhor análise dos resultados. O autor realizou o ensaio de perda de abatimento ao longo do tempo e constata uma elevada perda de abatimento dos concretos que incorporam RCD durante a primeira hora de ensaio, este fato é o reflexo da incorporação do resíduo seco e sua capacidade de absorção de água da pasta.

Ângulo (2005) ressalta as variações de abatimento, mesmo sendo empregado aditivo e compensação de água para manter um abatimento satisfatório. O autor salienta que a variabilidade dos resultados aumenta quando se utiliza agregados mais densos e que há pouca influência da relação a/c ou do consumo de cimento.

Em pesquisa realizada por Carrijo (2005), com utilização de RCD misto, foi necessário fazer uma correção de água de mistura para manter um abatimento fixo de 80 ± 10 mm. Porém mesmo com a correção, a autora relata uma alta variabilidade de abatimentos para os concretos com RCD, a mesma autora chama atenção para outros fatores que podem estar relacionados a este comportamento, tais como: a forma heterogênea angular dos grãos e textura rugosa, que proporcionam um maior travamento das partículas, além da própria massa específica do material.

O ensaio de perda de abatimento ao longo do tempo pode ser feito através do ensaio estático (abatimento com tronco de cone) ou ensaio dinâmico (mesa vibratória). Ambos procuram quantificar a diferença da trabalhabilidade do concreto em dado espaço de tempo, simulando um período desde a mistura até o seu lançamento. E desta forma estabelecer o comportamento dos concretos confeccionados com agregados reciclados.

2.2.2 Propriedades do concreto com RCD no estado endurecido

a. Resistência à compressão

As pesquisas realizadas com RCD, independente da composição do mesmo, entram em um consenso com relação à resistência a compressão em concretos confeccionados com o RCD, quanto maior for o teor de substituição de agregados naturais por agregados reciclados, há uma tendência de redução da resistência proporcional a este teor, assim como a relação a/c é um fator decisivo na resistência final dos concretos produzidos com RCD (BAZUCO, 1999; ÂNGULO, 2000; LEITE, 2001; BUTLER, 2003; LOVATO, 2007; CABRAL, 2007).

Em sua pesquisa Carrijo (2005) utiliza resíduos mistos de RCD separados por categorias, menos porosos (argamassas e concretos) e mais porosos (cerâmica). A autora relata uma redução na resistência na medida em que aumenta a porosidade dos agregados, aumenta a relação a/c e quando os agregados reciclados apresentam uma massa específica reduzida.

Bazuco (1999), utilizando resíduo de concreto nas condições seco e saturado com resistências de 18 MPa, verifica redução nas resistências dos concretos confeccionados com RCD aos 28 dias de cura. O autor salienta que a resistência do concreto de origem do agregado é um fator limitante para a sua incorporação.

No trabalho realizado por Butler (2003), o autor ensaiou concretos aos 7 dias e aos 28 dias, e também utilizou resíduos de concreto que foram britados aos 7 e 28 dias de cura. Quando os resíduos foram incorporados a uma nova matriz de concreto, observou-se que aos 7 dias de cura, a resistência do resíduo e a quantidade de substituição de agregado natural pelo agregado reciclado não interferiram substancialmente na resistência do concreto, porém quando o concreto foi ensaiado aos 28 dias houve uma interação maior entre os agregados e a pasta do concreto. Nesta fase,

a qualidade do concreto passa a exercer um papel decisivo na resistência do conjunto. O grau de hidratação influencia na resistência final, pois se o agregado possui cimento anidro, quando é inserido em uma nova matriz, tem a possibilidade de reagir, incrementando desta forma a resistência a compressão.

Para Leite (2001) e Cabral (2007) a relação a/c é o fator que mais interfere na resistência a compressão dos concretos com RCD, pois quanto maior for a relação a/c, maior será a porosidade gerada na matriz de concreto, ocasionando perda na resistência. Cabral (2007) relata que substituindo os agregados graúdos, houve uma perda de 28% na resistência do concreto em relação ao concreto de referência, mesmo utilizando um agregado menos poroso (agregado de concreto). Porém Leite (2001) aponta que para concretos com uma alta relação a/c, a incorporação de teores de agregado reciclado gerou uma perda de resistência, para concretos com uma relação a/c intermediária e inserindo diversos teores de agregados reciclados, os resultados das resistências se mantiveram semelhantes para concretos com RCD e concretos convencionais e para concretos com uma baixa relação a/c, as resistências dos concretos que incorporam um baixo teor de RCD são maiores do que os concretos de referência.

Lovato (2007) obteve, com a incorporação de 100% de agregados graúdos reciclados mistos, uma redução de até 24% na resistência à compressão destes concretos. A autora salienta que na medida em que se aumenta a relação a/c, a qualidade dos resíduos incorporados, deixa de ser um fator determinante na resistência à compressão. Da mesma forma Ângulo (2000) aponta uma redução de resistência com o uso dos agregados graúdos mistos na faixa de até 40%, em relação ao concreto de referência e enfatiza que a resistência está condicionada pela relação a/c da pasta, que por sua vez é responsável pela porosidade da mesma. O mesmo autor sugere que agregados menos densos (e, portanto, com menos resistência) não são convenientes para um concreto estrutural, pois estes necessitarão de um maior consumo de cimento para alcançar a resistência à compressão desejada, lembrando que o elevado consumo de cimento torna o produto mais caro, podendo inviabilizar a execução.

Na pesquisa realizada por Vieira (2003), na qual a autora utiliza resíduos mistos, observa que a resistência à compressão passa a diminuir quando há uma substituição de mais de 50% dos agregados naturais pelos agregados graúdos reciclados. No mesmo trabalho observou-se que quanto menor a relação a/c e maior o teor de substituição dos

agregados naturais pelos reciclados, menor é o valor encontrado para a resistência deste concreto. A autora infere que para relação a/c de 0,40 com 100% de substituição dos agregados, a resistência alcançada foi na ordem de 70% do valor obtido para a resistência do concreto de referência e para uma relação a/c de 0,55 e 100% de substituição de agregados, a resistência obtida alcança 85% da resistência do concreto de referência, demonstrando a importância da relação a/c quando se pretende incorporar resíduos de construção e demolição a uma nova matriz de concreto.

Assim como Vieira (2003), Hui-Sheng et al. (2009) encontraram uma maior resistência à compressão para uma baixa relação a/c e baixa resistência para alta relação a/c. Neste estudo, os autores apontam que quanto maior o tempo de cura a que os concretos são submetidos, há um incremento na resistência à compressão dos mesmos. Em relação ao teor de substituição, com até 30% de substituição dos agregados graúdos reciclados de concreto, os autores constataram um aumento da resistência.

Em estudo realizado por Padmini et al. (2009), em concretos feitos com agregados graúdos de concreto, quanto mais resistente é o concreto de origem, mais resistente será o concreto que o incorpora. Os pesquisadores trabalharam com faixas granulométricas distintas, separando os grãos em dimensões de 10 mm, 20 mm e 40 mm e utilizando tal procedimento, observaram que quanto maior a dimensão do agregado, maior é a resistência do concreto com este resíduo. Os autores explicam que este aspecto deve-se ao fato de que em agregados de maior dimensão, há um maior percentual de agregados naturais contidos, proporcionando um material mais resistente. Quanto menor o agregado, maior o percentual de argamassa, o que contribui para diminuir a resistência do conjunto.

Etxeberria et al. (2007) mencionam que os concretos feitos com RCD, necessitam de maior quantidade de cimento para alcançar a resistência requerida, tornando-os menos econômicos, assim os autores recomendam usar RCD em concretos com resistências médias ou baixas (45 a 20 MPa). Estes autores apontam que o ponto mais fraco dos concretos com RCD, em uma matriz de resistência entre 45 a 60 MPa é a resistência dos agregados reciclados.

Para resistência à compressão média entre 30 a 45 MPa, utilizando-se até 25% de RCD, a resistência é semelhante ao concreto de referência. Para esta resistência,

incorporando-se 50% ou 100% de RCD, é necessária uma relação a/c 4 a 10% menor e 5 a 10% com mais cimento para obter uma mesma resistência.

Nota-se que, quando tratamos de concretos que incorporam resíduos de construção e demolição, não é possível generalizar os resultados obtidos pelas pesquisas realizadas no meio acadêmico, pois existem diferenças metodológicas e diferenças entre os agregados utilizados. Entretanto, considerando-se as limitações, pode-se verificar que a aplicação dos resíduos em concretos estruturais, pode resultar em valores satisfatórios de resistência a compressão.

b. Resistência à tração

Segundo Butler (2003), a resistência à tração por compressão diametral de concretos com agregados reciclados é influenciada pelas características da matriz e da zona de transição entre a pasta e os agregados, sendo que as características do agregado como superfície áspera e irregular, favorecem a resistência à tração do concreto. Observou-se, neste trabalho, uma redução de 16% na resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de cura e uma redução de 4% aos 28 dias de cura, em relação ao concreto de referência. A redução da diferença entre os resultados ensaiados aos 7 e 28 dias, pode se explicar em função da presença de cimento anidro na superfície do agregado, que ao entrar em contato com a umidade da nova matriz de concreto, tem a possibilidade de hidratar e incrementar a resistência.

Leite (2001) observa que quanto maior o percentual de substituição de agregados naturais pelos agregados reciclados, menor é a resistência à tração alcançada, seguindo o mesmo comportamento do concreto com RCD submetido ao ensaio de compressão. Para a relação a/c ocorre o mesmo, quanto maior a relação a/c, menor a resistência a tração. A autora salienta que a resistência à tração varia pouco quando se analisa a mesma em função da relação a/c e percentual de substituição.

A resistência à tração tende a diminuir com o aumento da substituição de agregados naturais por agregados reciclados (LOVATO, 2007). A autora obteve uma redução de 25,5% para um teor de 100% de substituição e constata que quanto menor é a relação a/c, maior é a influência da presença do agregado gráudo reciclado na mistura do concreto. Quando se aumenta a relação a/c, a resistência fica condicionada à resistência da própria pasta.

c. Absorção de água e índice de vazios

Absorção de água é o processo físico pelo qual a água tem acesso ao interior do concreto. Este processo se dá através da penetração de água em poros não capilares ou por capilaridade, sendo que os dois processos são possíveis em função dos poros ou vazios existentes no material, que proporcionam uma rede interconectada por onde a água tem passagem (CAMPITELI, 1987).

A absorção de água no concreto com RCD é influenciada pelos agregados graúdos contidos na mistura. A porosidade destes agregados condiciona a capacidade de absorção destes e conseqüentemente, quando inseridos em uma nova matriz, interfere na capacidade de absorção deste novo material (LOVATO, 2007). A autora ressalta que quanto mais agregados graúdos de RCD estiverem contidos no concreto, maior será a taxa de absorção do mesmo, assim como quanto maior é a relação a/c da matriz, maior é a quantidade de poros capazes de absorção de água na pasta, gerando uma condição para uma elevada taxa de absorção do concreto.

Em seu trabalho Butler (2003), aponta que a capacidade de absorção de água e o índice de vazios do mesmo são proporcionais à quantidade de argamassa aderida aos grãos de ARC. O autor salienta o grande potencial de absorção dos concretos confeccionados com ARC, pois este material absorve em torno de 40% mais água do que o concreto de referência.

Em relação ao índice de vazios, este percentual gira em torno de 30% quando comparado com o concreto convencional. Conforme Ângulo (2000), a absorção dos concretos está diretamente relacionada com os poros capilares ou não, acessíveis à água. O autor, que usou agregados separados por densidade, constata que quanto menos densos, maior o potencial de absorção.

Conhecendo-se a estrutura dos poros é possível estimar a durabilidade do material, pois concretos que têm maior capacidade de absorção, tendem a uma durabilidade reduzida (LEVY, 2001). O autor salienta que a absorção de água e o índice de vazios variaram mais em função do tipo de agregado utilizado do que em função da relação a/c.

Cabral (2007) infere que quando é realizada a substituição dos agregados graúdos naturais pelos agregados graúdos reciclados, o volume de poros capilares aumenta independentemente do tipo de agregado. Nesta pesquisa o autor constata que a

substituição de agregados graúdos interfere mais no volume de poros e índices de vazios, do que quando se faz a substituição somente de agregados miúdos, quando se trata de 100% de substituição e o acréscimo de absorção ocorre na ordem de 40% para agregados provenientes de concreto. O autor também salienta que o outro aspecto que contribui para os poros capilares é a relação a/c da pasta.

São diversos os fatores que influenciam na capacidade de absorção dos concretos. A relação a/c e os agregados empregados geram condições de porosidade interna diversas. Agregados com formas mais arredondadas e com granulometria contínua tendem a promover um melhor empacotamento das partículas no concreto, resultando em um material com menor quantidade de vazios entre os grãos. Quando inserido um agregado de RCD na pasta, ocorre uma descontinuidade dos grãos, fato que colabora com o aumento de vazios, além da própria porosidade do agregado. Somados, estes fatores acarretam em uma maior capacidade de absorção do concreto produzido com RCD.

2.3 DURABILIDADE DO CONCRETO COM RCD

A durabilidade das edificações vem sendo cada vez mais exigida pelos agentes envolvidos no processo da construção civil. Projetistas, empreendedores e usuários estão empenhados em oferecer edificações com elevado tempo de vida útil, com o mínimo de custo de manutenção a realizar. Conforme Pauletti (2004), a crescente preocupação com a durabilidade das edificações tem repercutido no aumento de pesquisas que contribuam, de alguma maneira, para o entendimento de fatores que interferem na durabilidade das estruturas.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a durabilidade de uma estrutura de concreto de cimento Portland é a sua capacidade de permanecer com a sua forma, qualidade e capacidade de uso, no ambiente para o qual ele foi projetado por um determinado período de tempo.

De acordo com CEB (1997), durabilidade é a capacidade de uma estrutura apresentar o desempenho requerido durante o período de serviço pretendido, sob os fatores de degradação incidentes no meio ambiente onde a estrutura está inserida. Isaía (2001) comenta que a durabilidade dos materiais está ligada a sua capacidade de se

conservar em determinado estado, com a mesma qualidade ao longo de determinado tempo.

Para o projeto de uma estrutura de concreto durável, vários aspectos devem ser abordados. Aspectos relacionados ao meio ambiente, onde está localizada a estrutura, devem ser abordados de maneira a adequá-la à realidade do local (LIMA, 2005). Helene (2004) afirma que para alcançar a durabilidade, é necessário manter uma visão holística a respeito de todas as facetas que resultam na durabilidade, bem como no tempo de vida útil das mesmas. Este tema deve ser tratado de maneira sistemática e abrangente, envolvendo equipes multidisciplinares, para que, com ações coordenadas durante todas as etapas de projeto, execução e utilização da edificação, possa ser alcançada a durabilidade para qual a edificação foi projetada.

Dentre as etapas do processo construtivo, a etapa de projeto é a mais complexa, pois envolve projetos específicos que devem ser compatibilizados, como sugere Prudêncio (1995), a fim de evitar anomalias capazes de acarretar em deterioração precoce das estruturas, assim como considerar as demais interfaces que resultam no produto pronto da construção civil e que necessita atingir determinados padrões de desempenho.

De acordo com a norma de durabilidade, NBR 15575 (2008), a vida útil é uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes. A vida útil estimada é a durabilidade prevista para um dado produto, inferida a partir dos dados históricos de desempenho do produto ou de ensaios de envelhecimento acelerado. Sendo a vida útil influenciada por uma decisão de projeto estabelecida inicialmente para balizar todo o processo de produção do bem.

Para Andrade (2005), a deformabilidade das estruturas, cobrimento de armaduras e detalhes arquitetônicos, influenciam na durabilidade das peças de concreto. O autor salienta que a vida útil depende também de ações preventivas e manutenção periódica para que a mesma mantenha suas características e qualidades requeridas por maior período de tempo. Além dos aspectos técnicos abordados, a vida útil das estruturas depende também das condições de exposição ambientais, com as quais a estrutura mantém contato.

A microestrutura é um dos fatores que determinam a vida útil e o desempenho das estruturas. Hartmann et al. (2002) entendem que para que um concreto seja durável,

o conhecimento das suas propriedades e características microestruturais é imprescindível, pois estes aspectos são determinantes para o desempenho do material. Bauer et al. (2001), ressaltam a importância do conhecimento da rede de poros de uma estrutura, pois esta relaciona-se diretamente com a durabilidade. A corrosão de armaduras é um exemplo patológico do fenômeno causado por mecanismos de transporte de fluídos através da rede de poros. Diesel et al. (2006) inferem que este tipo de problema está cada vez mais recorrente, e é detectado em estruturas precocemente danificadas.

Podem atuar sobre as estruturas de concreto diversos mecanismos, de natureza física ou química, que podem causar a sua deterioração. A velocidade da deterioração das estruturas de concreto é influenciada pelos agentes agressivos, presentes no meio ambiente.

Em geral, existe um ou mais agentes agressivos associados às causas de deterioração do concreto, sendo que estes agentes interagem com o aço e o concreto provocando sua gradativa redução de desempenho. A água é um agente presente em quase todos os mecanismos de degradação (ANDRADE, 2005). Ela é um elemento presente tanto no momento de confecção do material, concreto, quanto na deterioração do mesmo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Dentre os agentes deletérios mais comumente encontrados no meio pode-se citar a ação de íons cloreto e CO_2 . Os íons cloreto são encontrados em ambientes marinhos, em aditivos utilizados no concreto, em insumos contaminados adotados para a confecção do concreto e em ambiente quimicamente agressivo. O CO_2 abundante na atmosfera é responsável pela diminuição do pH do concreto, sendo este fenômeno chamado de “carbonatação” (ANDRADE, 1992).

Duprat e Sellier. (2005) estimam que 10% das estruturas corroam depois de 35 anos de exposição ao tempo, esta proporção chega a 25% quando as estruturas alcançam 50 anos de existência. Esta estimativa é suficientemente forte para o aprofundamento das causas que promovem esta patologia, dentre elas a carbonatação.

Quando se aborda concretos com a inserção de agregados provenientes de RCD, o cuidado com todos os fatores que repercutem em durabilidade deve ser redobrado. Pesquisas sobre a inserção de agregados de RCD em novas matrizes de concreto (LEITE, 2001; BUTLER, 2003; CARRIJO, 2005; LOVATO, 2007; ETXEBERRIA et

al., 2007; TABSH e ABDELFAH, 2009; DUCMAN e MIRTIC 2009; CORDINALDESI e MORICONI. 2009; PADMINI et al. 2009; entre outros) demonstram a viabilidade técnica deste novo composto referente às solicitações mecânicas, pois é um requisito básico que um novo material deve atender. Porém, existem poucos trabalhos que abordam a durabilidade de concretos feitos com agregados de RCD.

Autores como Bazuco (1999), Ângulo (2000), Limbachiya et al. (2000), Leite (2001), Butler (2003), Gómez-Soberón (2003), Katz (2003), Lovato (2007), Cabral (2007), Padamini et al. (2009), Hui-Sheng et al. (2009), entre outros, estudaram o comportamento do concreto com agregados de RCD. Estes estudos têm mostrado que a inserção de agregados provenientes de RCD altera as propriedades do concreto. Dentre as propriedades estudadas, a absorção de água por este novo material é constantemente observada e os resultados obtidos pelas pesquisas apontam que os concretos que incorporam resíduos tendem a ser mais porosos e, portanto, mais suscetíveis à ação dos agentes deletérios. Estes mesmos autores ressaltam o aumento na quantidade de poros capilares, responsáveis pela absorção de água, e aumento da quantidade total de poros, que permitem a passagem de água e gás para o seu interior. A passagem de gases para o interior do concreto propicia a formação de reações químicas que interferem na condição do aço incorporado ao concreto (no caso de concreto armado), podendo levar à corrosão do aço.

Via de regra, o concreto que incorpora RCD é mais poroso que um concreto convencional, este fator está relacionado com a característica microestrutural do material (RYU, 2002^a; TOPÇU e SENDEL, 2004).

Olorunsogo e Padayachee (2002) inferem que a durabilidade do concreto que incorpora ARC diminui com o aumento da quantidade de RCD inserido, e salientam que este fator é atenuado de acordo com o tempo de cura a que estes concretos são submetidos.

Os estudos que abordam a questão da durabilidade em concretos que incorporam ARC, entretanto, ainda não conseguem elucidar o comportamento do novo material. De uma maneira geral os trabalhos abordam somente alguns aspectos relacionados com as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto com ARC, dificilmente todos os

aspectos serão contemplados em um mesmo programa experimental, e por esta razão há certa dificuldade para inferir plenamente sobre a durabilidade destes concretos.

Neste trabalho a questão da durabilidade tem com foco principal a ação do CO_2 sobre os concretos com ARC.

2.3.1 Carbonatação

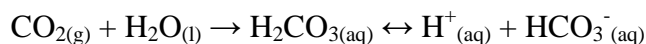
O concreto endurecido possui propriedades físicas e químicas peculiares em relação a outros materiais de construção civil, em função de ser composto por diversos insumos que, somados à armadura, constituem um sistema eficiente. As características das reações químicas resultam num produto final complexo, capaz de atender às solicitações físicas especificadas em projeto.

Quanto às propriedades mecânicas, sem dúvida a mais importante é a resistência à ação de solicitações, devendo atender aos esforços para os quais as estruturas de concreto armado são submetidas, seguida, mas não menos importante das propriedades de durabilidade. Dentre as propriedades do concreto que interferem na durabilidade do material, a rede de poros do concreto, pode torná-lo mais ou menos suscetível à ação de agentes agressivos, dentre eles os CO_2 , responsável pela carbonatação do concreto.

O fenômeno da carbonatação pode ser ocasionado pelas reações químicas provenientes da interação entre os principais constituintes presentes na atmosfera, como o CO_2 (gás carbônico), SO_2 (dióxido de enxofre) e H_2S (gás sulfídrico) com os produtos da hidratação do cimento no concreto, que se encontram no líquido intersticial dos poros (CUNHA e HELENE, 2001). Segundo Bary e Sellier (2004), a reação ocorre, principalmente, com os íons cálcio contidos na solução aquosa dos poros, em equilíbrio com os produtos de hidratação do cimento.

Para que o processo físico de difusão do CO_2 e as reações químicas ocorram é necessário que o concreto disponha de constituintes carbonatáveis e umidade relativa interna suficiente (PETER et al., 2008).

Conforme Thiery et al. (2007) o fenômeno de carbonatação ocorre com a difusão do CO_2 na fase aquosa dos poros do concreto, quando encontra um ambiente parcialmente saturado. A dissolução do CO_2 em meio aquoso forma o ácido carbônico (H_2CO_3), sua dissociação resulta nos íons HCO_3^- e CO_3^{2-} de acordo com a equação 1.



Equação 1

No poro do concreto, nestas mesmas condições ambientais, está presente o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio), produto da hidratação do cimento. A dissolução do sólido $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em meio aquoso libera os íons Ca^{2+} e OH^- (hidroxila). A combinação dos íons $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ formam o composto CaCO_3 (carbonato de cálcio). Estas reações podem ser visualizadas na figura 5.

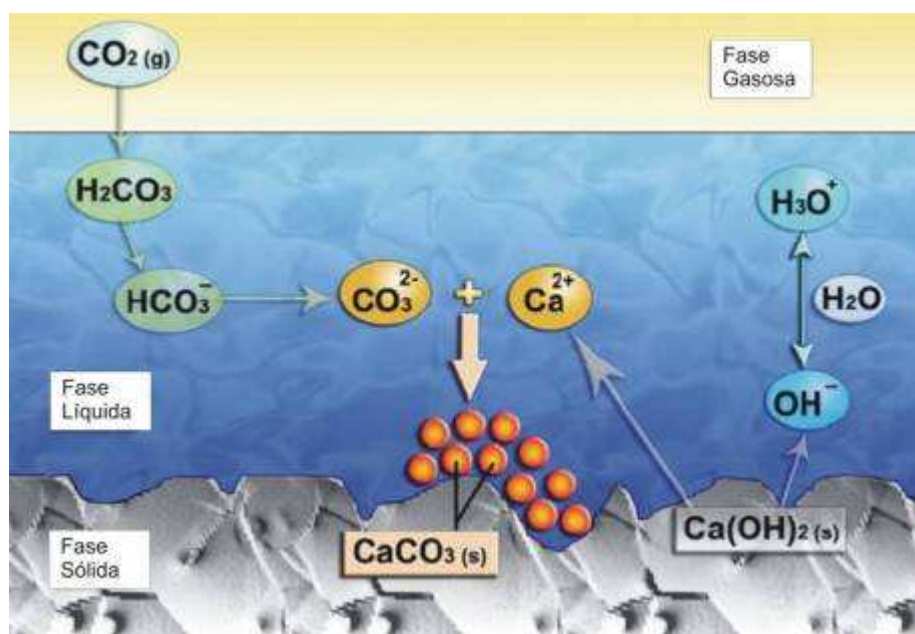
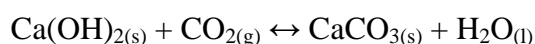


Figura 5. Detalhe do poro do concreto (THIERY et al., 2007).

De acordo com o Thiery et al. (2007), todas estas reações intermediárias podem ser sintetizadas em uma reação química amplamente difundida:



Equação 2

Esta reação simplificada do fenômeno da carbonatação é utilizada pela maioria dos autores que abordam o tema (PAPADAKIS et al., 1991; THIERY et al., 2007; PETER et al., 2008, entre outros).

Além do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, há evidências de que as reações de carbonatação não ocorrem somente entre o CO_2 e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mas sim com todos os demais compostos hidratados do cimento, como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), sulfato trihidratado (etringita),

monossulfato hidratado, C_3S (silicato tricálcico) e C_2S (silicato dicálcico), interferindo no pH do concreto (PAPADAKIS et al., 1991; PETER et al., 2008; WANG e LEE, 2009). Segundo Peter et al. (2008) os constituintes presentes na pasta de cimento em pequena quantidade, como KOH (hidróxido de potássio), NaOH (hidróxido de sódio) e $Mg(OH)_2$ (hidróxido de magnésio), além das fases dos aluminatos também são suscetíveis à carbonatação.

A reação básica refere-se à combinação do CO_2 com $Ca(OH)_2$ em função da rapidez com que estas reações ocorrem em relação aos demais elementos carbonatáveis. O CO_2 reage com o $Ca(OH)_2$ três vezes mais rápido do que reage com C-S-H, vinte vezes mais rápido do que a reação com C_2S e cinquenta vezes mais rápido do que a reação com o C_3S (PETER et al., 2008).

Considerando a reação básica de carbonatação, que envolve o CO_2 e $Ca(OH)_2$, com a precipitação do carbonato de cálcio na parede dos poros há uma diminuição do volume dos poros em função do volume molar do carbonato (THIERY et al., 2007).

O elevado pH do concreto (pH = 13), resultante da hidratação do cimento, permite a passivação da armadura contra a corrosão. Nestas condições extremamente alcalinas, há uma formação de uma fina camada oxidante que envolve o aço e o protege da oxidação. Entretanto, quando o hidróxido de cálcio é consumido pelas reações de carbonatação, ocorre a redução do pH do concreto, acarretando na despassivação da armadura.

A despassivação da armadura depende das condições a que o metal está exposto, no caso de armaduras em concreto, a corrosão irá acontecer quando o pH passar de 13 para em torno de pH 8 (ANDRADE, 1992). Conforme Bauer et al. (2001), Bary e Sellier (2004), Puertas et al. (2006), Song e Kwon (2007), Meier et al. (2007), Hui-Sheng et al. (2009), Lo et al. (2009), entre outros, o fenômeno da carbonatação é um exemplo clássico de despassivação da armadura.

Diversas pesquisas (SONG e KWON, 2007; MEIER et al., 2007; WANG e LEE, 2009; PETER et al., 2008; BARY e SELLIER, 2004) têm focado na elaboração de modelos matemáticos que visam prever a profundidade de carbonatação com o intuito de estimar a vida útil das estruturas de concreto armado. Os modelos matemáticos apresentados pelos pesquisadores citados têm alcançado seus objetivos quanto à reprodução de ensaios de carbonatação em laboratório, sob condições controladas,

porém há grande dificuldade em extrapolar estes valores e modelos para uma situação real de exposição, em virtude da gama de variáveis que interferem no fenômeno.

2.3.1.1 Fatores que influenciam a carbonatação em concretos com RCD

O fenômeno da carbonatação é diretamente dependente da concentração de CO_2 , do percentual de umidade do ar e do concreto, da temperatura a que a estrutura está submetida e dos condicionantes intrínsecos do concreto, como o tipo de cimento, as adições, os agregados e a cura, os quais conferem características peculiares ao material. Castellote et al. (2008) complementam que o fenômeno da carbonatação depende também da composição da mistura e estrutura de poros.

Quando o concreto é confeccionado com resíduos de construção e demolição, as propriedades dos agregados reciclados assumem grande importância, pois este material constitui mais uma variável na busca pelo entendimento do fenômeno da carbonatação.

a. Concentração de CO_2

A difusão do CO_2 na rede de poros se dá em função da diferença de concentração do gás entre o meio externo e interno (KULAKOWSKI, 2002).

Segundo Helene (1993) a concentração de CO_2 no meio externo varia de 0,03% a 0,05% para atmosferas rurais, de 0,1 a 1,2% para atmosferas urbanas onde há tráfego pesado de veículos e 1,8% em ambientes cuja atmosfera está viciada, onde não há troca de ar.

A tabela 2 traz as diferentes concentrações de CO_2 para algumas condições naturais Saetta e Vitaliani (2004) afirmam que as diferenças entre as concentrações de CO_2 e umidade interferem sensivelmente na difusão da carbonatação através da rede de poros do concreto.

Tabela 2. Concentrações de CO₂ em ambientes naturais encontradas por Saetta e Vitaliani (2004).

Ambiente	Concentração de CO₂ (% vol.)
Zona rural	0,015
Centro da cidade	0,036
Zona Industrial	0,045
Estábulo arejado	0,046
Estábulo	0,075
Exaustão de veículo motorizado	16,69
Respiração Humana	3,62

Tam et al. (2005), assim como Thiery et al. (2007) inferem que a concentração normal nos ambientes gira em torno de 0,03% a 0,1% proporcionando uma carbonatação extremamente lenta do concreto.

Além do tempo necessário para que uma peça de concreto apresente uma profundidade de carbonatação considerável nestas concentrações de CO₂, existem outros fatores do meio externo que não são controláveis. As reações de carbonatação têm início no momento em que existem condições ideais para as reações, desta forma tanto em função do percentual de CO₂ contido no meio, quanto em função da condição hídrica do poro a propagação da carbonatação tende a ser lenta em meio natural.

Portanto, uma peça exposta a intempérie, que sofre com a ação de chuva e sol, onde hora os poros estão saturados de água ou secos pelo sol e calor, tem sua profundidade de carbonatação determinada pelas variáveis atuantes no meio.

Em função da multiplicação das variáveis encontradas em um ambiente natural e da disponibilidade de tempo para execução de uma pesquisa, opta-se pela realização dos ensaios de carbonatação em ambiente de laboratório, utilizando câmaras, onde é possível intensificar o percentual de CO₂ e desta forma acelerar o fenômeno da carbonatação.

Dentre os percentuais utilizados para a realização do ensaio acelerado de carbonatação, encontramos os mais variados, como exemplifica a tabela 3. A identificação de um percentual ideal de CO₂ é um fator que suscita dúvidas entre os pesquisadores (PAULETTI, 2009).

Tabela 3. Percentuais de CO₂ utilizados por alguns pesquisadores.

Autor	Percentual de CO₂ Utilizado
Levy (2001)	12%
Kulakowski (2002)	5%
Kirchheim (2003)	5%
Katz (2003)	5%
Masce et al. (2003)	10%
Possan (2004)	5%
Abreu (2005)	6% e 50%
Pauletti (2004/2009)	6% e 100%
Castellote et al. (2009)	≤ 3%
Hui-Sheng et al. (2009)	20±3%

As pesquisas demonstram a escassez de trabalhos que contemplem diferentes concentrações de CO₂ em um mesmo estudo (PAULETTI et al, 2009), sendo que alguns estudos apontam que nem sempre o maior percentual de CO₂ gera uma maior profundidade de carbonatação. Em função deste fato recomenda-se a adoção de teores inferiores a 20% de CO₂, para evitar que haja uma brusca mudança na microestrutura do material, que possa mascarar os resultados almejados.

De acordo com Pauletti (2009), a determinação de ensaio acelerado de carbonatação, utilizando 1% de CO₂, garante que os produtos formados pelas reações de carbonatação são os mesmos gerados em condições naturais de exposição ao CO₂, alterando a microestrutura do concreto da mesma forma que ocorre no meio ambiente.

b. Umidade relativa interna do concreto e do ambiente externo

A velocidade da carbonatação depende das condições internas dos poros. Quando os poros encontram-se completamente secos (A, Figura 6), não há umidade suficiente onde o CO₂ possa ser dissociado para posterior associação com os demais constituintes, iniciando o fenômeno. Se estes estiverem saturados de água (B, Figura 6), há uma dificuldade de penetração do gás CO₂, retardando o fenômeno. Desta forma, é necessário que haja uma concentração parcial de umidade nos poros para que ocorra o fenômeno da carbonatação (C, Figura 6).

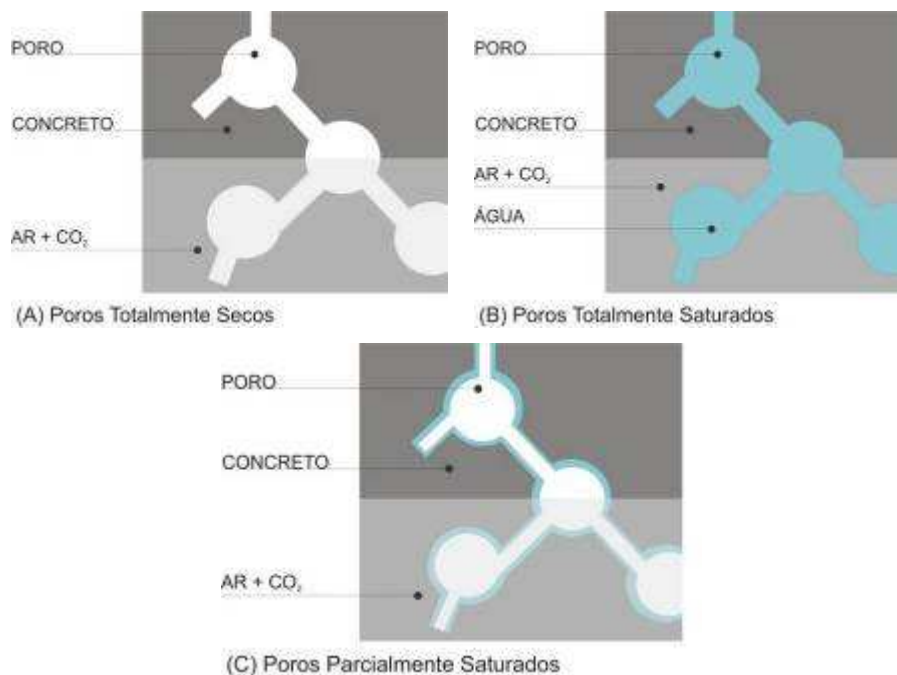


Figura 6. Graus de saturação dos poros no concreto. Adaptada de Andrade (1992).

Helene (1993) salienta que quando a carbonatação ocorre em um ambiente natural, não há a possibilidade de controle de fatores como temperatura e umidade, sendo a condição de umidade muito afetada pela ocorrência de chuvas, que é responsável pelo fechamento dos poros capilares, dificultando a entrada de CO_2 .

Figueiredo e Nepomuceno (2006) após extrair testemunhos de edificações com diferentes idades destacam que a absorvidade é um importante parâmetro para o estudo da porosidade de um concreto que está na face da estrutura recebendo água. Esta propriedade está diretamente conectada à carbonatação, pois o coeficiente de absorção indicará a capacidade absorviva dos poros, pelos quais se dá acesso ao CO_2 para o interior da estrutura.

Em ensaios acelerados, procura-se utilizar um teor de umidade interna que resulte numa elevada velocidade de carbonatação. Papadakis et al. (1991) percebe que no ensaio realizado a profundidade máxima de carbonatação se deu para uma unidade relativa de 50% ou mais, os autores inferem que não ocorre o fenômeno da carbonatação para umidades relativas abaixo de 50%.

Para que haja uma condição ótima de carbonatação, o ambiente no qual a peça está inserida deve estar com uma umidade relativa interna entre 50% e 70% de acordo

com Thiery et al (2007). Dentro desta faixa de umidade relativa apresentada por Thiery et al. (2007), encontram-se trabalhos que adotam como parâmetro de umidade $60\pm 5\%$ (KATZ, 2003 e LO et al., 2009), $70\pm 5\%$ (RYU, 2002^a; MASCE et al., 2003; POSSAN, 2004; Hui-Sheng et al., 2009). Pauletti et al. (2009) apontam que um percentual de umidade relativa muito usado é de $\pm 70\%$, pois foi observado que com esta umidade há uma maior velocidade do avanço da frente de carbonatação no corpo-de-prova.

Para alcançar um grau de carbonatação elevado, é necessário que a umidade relativa do ar, interna da peça, esteja em uma condição ótima. Excetuando-se umidades abaixo de 50% ou acima de 80% (ANDRADE, 1992). No primeiro caso, não há umidade suficiente para que as reações ocorram. Já no segundo caso, a quantidade de umidade interna é tão elevada que retarda intensamente o avanço das reações.

Pauletti (2009) enfatiza que para uma condição ideal de carbonatação, deve haver um equilíbrio entre a umidade relativa interna do corpo-de-prova e externa e ele. Há um consenso entre os pesquisadores da área no que diz respeito a uma faixa de umidade relativa que está situada entre 40 e 85%, porém não se sabe com precisão qual o ponto ótimo para o desenvolvimento do fenômeno de carbonatação. Em estudos realizados por Bary e Sellier (2007), a faixa de umidade relativa interna dos poros, que parece ser mais adequada para ocorrência do fenômeno está entre 40 e 80%.

c. Temperatura

Apesar da pouca interferência, a temperatura não pode ser desprezada no estudo da corrosão (PAULETTI, 2009). Helene (1993) observa que na evolução da carbonatação a influência da temperatura na velocidade de carbonatação foi pouco visível para temperaturas entre 25 e 30°C. Da mesma forma Kulakowski (2002) aponta que para temperaturas entre 20 e 40°C não há interferência significativa na velocidade de carbonatação.

Em estudo realizado por Papadakis et al. (1991) os autores submeteram os corpos-de-prova de concreto a um ensaio acelerado de carbonatação, cuja temperatura variou de aproximadamente 22°C a 42°C, os autores apontam que para a dada umidade relativa da câmara (65%), há um pequeno aumento da profundidade carbonatada com o aumento da temperatura, pois o fator que governa o avanço da carbonatação é a difusão do CO₂, o qual é muito pouco afetado pela temperatura.

d. Tipo de cimento

O tipo e a quantidade de cimento adotado para a confecção do concreto determinam a quantidade de compostos alcalinos disponíveis para reagir com o CO_2 , assim como as condições de cura, relação a/c e fissuras, contribuem para o avanço da frente de carbonatação (FIGUEIREDO, 2005).

Em relação ao tipo de cimento, este influencia a velocidade de carbonatação de acordo com sua composição química e finura dos grãos, pois quanto mais puro e fino for o cimento, há mais produção de álcalis, gerando condições propícias de reação com CO_2 . Porém, os cimentos que contêm adições podem constituir uma matriz sujeita a ação da carbonatação, devido à alcalinidade dos seus compostos.

Pauletti (2004) observa que concretos confeccionados com cimentos que possuem adições, tendem a carbonatar mais do que concretos confeccionados com cimentos comuns. Utilizando cimento pozolânico e cimento comum, confirmou que a profundidade de carbonatação é maior para argamassas confeccionadas com adição de pozolana em relação ao cimento comum.

A composição química do cimento é abordada também por Kirchheim (2003). A autora trabalha com cimento branco em seu experimento e relata que a profundidade de carbonatação está condicionada à composição química deste cimento, além da relação a/c, assim como para Castellote et al. (2009).

Katz (2003) realizou carbonatação acelerada em concretos confeccionados com cimento comum e cimento branco. Neste estudo foram encontrados valores maiores de carbonatação para os concretos confeccionados com cimento comum do que para aqueles onde foi adotado o cimento branco utilizado na pesquisa.

Em estudo realizado por Sierra e Souza (1999), observa-se que para o mesmo cimento, quanto menor a relação a/c, menor é a profundidade de carbonatação. Este trabalho também relaciona a profundidade de carbonatação ao tipo de cimento utilizado, neste caso especificamente, o autor utilizou cimento CP II – F, o qual apresentou melhores resultados (menor profundidade de carbonatação observada). Pode-se atribuir este comportamento ao efeito filler gerado pela composição do cimento empregado, atuando de maneira benéfica para o refinamento dos poros, diminuindo o acesso ao CO_2 , acarretando uma menor frente de carbonatação.

e. Adições

Venquiarutto et al. (2002) encontram profundidades maiores de carbonatação em concretos com adições de maior finura. Quanto mais fina a adição, mais reativa, reagindo mais rapidamente com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e diminuindo a reserva alcalina do meio, sujeito à carbonatação.

Para Possan (2004), a presença de adições minerais acelera o fenômeno da carbonatação. Há um incremento da profundidade carbonatada para misturas com altos teores de substituição (50% de cinza de casca de arroz ou cinza volante) e maior relação a/agl . A autora enfatiza que os tipos de adições, teores de substituição e relação a/agl têm maior influência na profundidade de carbonatação do que a finura dos grãos das adições.

Lo et al. (2009) utilizam diferentes percentuais de substituição, em peso, de cimento por cinza volante (25%, 40% e 55%) e sílica ativa (5%, 10% e 15%). Quando estes concretos foram submetidos ao ensaio acelerado de carbonatação, observou-se que para as misturas que continham até 25% de substituição de cinza a profundidade de carbonatação foi insignificante e para misturas com todos os teores de sílica, houve um aumento substancial na profundidade de carbonatação. Importante salientar que neste trabalho a concentração de CO_2 foi monitorada pelo pH da câmara, portanto, a real concentração de CO_2 é desconhecida.

Bauer et al. (2001) observam que em corpos-de-prova contendo sílica ativa, após passarem pela carbonatação, há uma alteração na distribuição de poros, o que diminui o acesso de água aos poros do material.

Diesel et al. (2006) colocam que quanto maior for a relação a/agl , menor será o crescimento dos coeficientes de carbonatação. Em seu estudo utiliza adição de cal hidratada na pasta e observa que esta adição diminui a profundidade de carbonatação.

f. Relação a/agl

A interferência da relação a/c e a/agl na profundidade de carbonatação é apontada por diversos autores (PAPADAKIS et al., 1991; SIERRA e SOUZA, 1999; KULAKOWSKI, 2009; BAUER et al., 2002; HARTMANN et al., 2002; KIRCHHEIM, 2003; PAULETTI, 2004; TAM et al., 2005; DIESEL et al., 2006; MEIRA et al., 2006; CASTELLOTE et al., 2008; WANG e LEE, 2009). Há uma tendência entre os autores

em afirmar que quanto maior a relação a/c e quantidade de adições minerais, a profundidade de carbonatação será ampliada. Papadakis et al. (1991) infere que a profundidade da carbonatação aumenta a medida em que a relação a/agl aumenta.

Pauletti (2009) verifica em seu estudo, por meio de análise de variância (ANOVA), que os fatores mais significantes na profundidade de carbonatação são o percentual de CO₂, no qual os corpos-de-prova estão expostos, a relação a/c da argamassa e a umidade interna do concreto. A autora constata que a profundidade de carbonatação é maior nos primeiros dias de exposição ao CO₂ para argamassas elaboradas com relação a/c maiores do que 0,7.

Nos estudos de Kulakowski (2002), percebe também que a relação a/agl exerce significativa influência na profundidade de carbonatação. Para baixa relação a/agl, igual ou menor que 0,45, não houve carbonatação durante o ensaio acelerado.

Esta mesma autora apresenta resultados dos ensaios de carbonatação para concreto e argamassas. No que tange ao concreto a autora relata que a relação a/agl e idade são fatores significativos para o avanço da carbonatação. Neste mesmo estudo se observa que há um aumento da profundidade de carbonatação em concretos cuja relação a/agl é superior a 0,70. Concretos com fck de 15 MPa e relação a/agl 0,80 são extremamente suscetíveis à carbonatação. Em estudos com argamassa, a autora constata que as argamassas com relação a/agl 0,45, não houve carbonatação.

Hartmann et al. (2002) infere que à medida em que aumenta a relação a/c, a espessura da camada carbonatada tende a aumentar. Da mesma forma Meira et al. (2006) e Ryu (2002^a) relacionam o aumento da espessura de carbonatação ao aumento da relação a/c. Os autores descrevem que quanto menor a relação a/c, menor será a permeabilidade e menor será a entrada de CO₂, portanto o material será menos suscetível à carbonatação.

g. Condições de Cura

A condição de cura dos corpos-de-prova é um fator de relevante para o desempenho das estruturas de matriz cimentícia. Em função das reações químicas formadas, que geram calor de hidratação, este pode ser responsável pelo surgimento de fissuras no concreto, assim como internamente, uma condição adequada, permite

melhor hidratação dos compostos da matriz, interferindo na porosidade final do concreto.

Quanto melhores as condições de cura, melhores serão as propriedades do concreto, pois ela melhora as condições de hidratação, processo que tende a diminuir a porosidade do concreto (HELENE, 1993).

Pauletti (2009) infere que aumentando o tempo de cura submersa, há uma diminuição da profundidade de carbonatação, este fato deve-se em função da matriz estar em condições de umidade adequada para as reações de hidratação e minimiza as retrações decorrentes da secagem.

Em trabalho realizado por Lo et al. (2008), utilizando sílica ativa e cinza volante sob uma cura acelerada de 60°C durante 3 dias, observam que em relação à carbonatação nestes concretos, há um aumento da profundidade carbonatada para as amostras curadas a 60°C em relação aos concretos curados sob condições de temperatura normal.

h. Tipo de agregado utilizado

Na maioria das pesquisas sobre carbonatação em concretos, não há uma preocupação especial com o agregado, pois ele é considerado um material inerte em relação à carbonatação. Papadakis et al. (1991) ressaltam ainda que a presença do agregado não afeta sensivelmente a difusão do CO₂.

Em concretos confeccionados com RCD, entretanto, pode-se observar um consenso entre os pesquisadores deste tema, em relação à alteração da porosidade do concreto. Ao se substituir um agregado natural, cuja porosidade é mínima, por um agregado reciclado, que possui porosidade variada, a tendência do novo concreto é apresentar uma maior porosidade, quando comparado a um concreto convencional. Em consequência é esperado que a velocidade de carbonatação aumente.

2.3.1.2 Carbonatação em concretos com RCD

As pesquisas que incorporam RCD em novos concretos inferem que o novo concreto tende a ser mais poroso do que o concreto de referência (LEVY, 2000 e CABRAL, 2007).

Cabral (2007) aborda as propriedades mecânicas e aspectos de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados. Segundo ele, independentemente do tipo de agregado reciclado que é inserido em uma nova matriz de concreto, este concreto contará com um maior volume de poros em sua totalidade. O fator que determina uma maior ou menor carbonatação e penetração de íons cloreto no seu interior é a relação a/agl da nova pasta, pois se o concreto for produzido com uma alta relação a/agl , este estará mais suscetível à ação deletéria.

Levy (2001) constata que para agregados provenientes de concretos de 20 e 30 MPa, a profundidade de carbonatação foi menor do que a apresentada pelo concreto de referência, quando foi dosado um novo concreto de 40 MPa. A quantidade de agregados reciclados e origem dos mesmos (concreto ou cerâmica), não foi significativa para os resultados de profundidade de carbonatação, sugerindo a formação de uma camada de blindagem entre a pasta e o ARC (em função de suas micro fissuras, superfície rugosa e material cimentante). O mesmo autor relata que quanto maior o teor de substituição, menor será o desempenho deste concreto em relação à durabilidade, recomendando baixos teores de substituição. O autor ainda infere que apesar de o concreto com ARC ser mais poroso, conter mais vazios e ter capacidade de absorver mais água do que um concreto convencional, de alguma forma os produtos formados pelas reações de carbonatação contribuem para o retardo do avanço da frente de carbonatação, independente do grau de empacotamento das partículas. Entretanto, quanto maior o teor de substituição, menor será o desempenho deste concreto em relação à durabilidade, recomendando o uso de teores de substituição de até 20%.

Em trabalho realizado por Cordinaldesi e Moriconi (2009) pode-se verificar que quanto menor o fator a/c , menor a profundidade de carbonatação, independente da quantidade de ARC inserido no concreto, devido a uma reorganização dos poros da pasta. Os autores apontam para o fato de os agregados possuírem compostos alcalinos que, somados à alcalinidade da pasta nova, tendem a preservar a armadura por mais tempo do que um concreto comum, protegendo a superfície do concreto contra os mecanismos da carbonatação. Este benefício pode aumentar a vida útil da estrutura, o que retarda o início da corrosão de armaduras no caso de concreto armado.

De acordo com Barra et al. (2002), em um concreto com percentual de até 20% de agregados reciclados não há alteração visível na profundidade de carbonatação, em

relação a um concreto sem agregados reciclados. Porém, uma substituição acima deste percentual representa uma baixa proteção do aço, menor do que a proteção do aço para um concreto convencional.

A afirmação feita por Barra et al. (2002) pode ser considerada como uma tendência, porém os percentuais de substituição de agregados naturais pelos agregados reciclados podem variar em função das especificidades do novo concreto onde este material será inserido e da qualidade do resíduo adotado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A ordem de execução das etapas realizadas no programa experimental encontram-se nas figuras 7 e 8.



Figura 7. Etapas do programa experimental.



Figura 8. Cronologia do programa experimental.

3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

3.1.1 Variáveis de resposta

Para alcançar os objetivos determinados pela proposta da pesquisa, para os concretos confeccionados com ARC, foram estipuladas as seguintes variáveis de resposta:

- Resistência à compressão aos 28 dias;
- Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias;
- Absorção de água por capilaridade;
- Profundidade de carbonatação;

3.1.2 Variáveis de controle

As variáveis de controle e seus níveis fixos foram determinados de forma a possibilitar mensurar as influências que exercem sobre as variáveis de resposta estabelecidas, sendo listadas na sequência:

- Teor de agregado: percentual de substituição de agregados naturais por agregados de concreto reciclado com níveis fixos de substituição de 25, 50, 75 e 100%;
- Teor de pré-molhagem: percentual de pré-molhagem utilizado em função da capacidade de absorção de água do agregado, sendo que estes foram fixos em 0, 25, 50, 75 e 100%;
- Porosidade do agregado: agregados confeccionados a partir de concretos com as seguintes relações a/c: 0,85, 0,56 e 0,43, gerando agregados de concretos com $f_{ck_{63d}}$ de 18, 37 e 50 MPa, respectivamente (adotou-se um Sd de 4 15, 30 e 40 MPa);
- Períodos de exposição: análise da profundidade de carbonatação nos períodos de exposição de 1, 3, 7, 28, 63, 91 e 147 dias.

Os fatores fixos adotados pela pesquisa são:

- Tipo de cimento - O cimento utilizado para execução do programa experimental é o cimento CP V – ARI;
- Relação a/c inicial da nova matriz – Para execução do novo concreto optou-se pela adoção de uma relação a/c igual a 0,64, para um $f_{c_{28}}$ de 25 MPa, gerando

um nível de porosidade tal que permitisse a obtenção de profundidades de carbonatação satisfatórias para um período de 5 meses;

- Procedimento de Cura - Os exemplares que foram utilizados para os ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e absorção de água foram mantidos em tanques com água saturada com Ca(OH)_2 , em sala com temperatura de $21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, durante um período de 28 dias e as amostras que seguiram para o ensaio acelerado de carbonatação permaneceram submersas por 63 dias, tempo suficiente para o concreto atingir um elevado grau de hidratação;
- Período de Sazonamento - O período de sazonalidade é iniciado com uma secagem em estufa a 50°C (até atingir 70% de umidade interna) após, os corpos-de-prova são embalados e selados em material impermeável e mantidos em sala com temperatura controlada ($21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) por um período mínimo de 28 dias, aguardando o equilíbrio interno da umidade, seguindo o procedimento preconizado pela RILEM TC 116 PCD (1999).
- Carbonatação Acelerada - Os corpos-de-prova foram carbonatados em câmara de carbonatação acelerada, com uma concentração de 1% de CO_2 e umidade relativa de $70\% \pm 5\%$.

3.1.3 Planejamento estatístico

Dal Molin et al. (2005) afirmam que a utilização de um planejamento estatístico para execução de um programa experimental na engenharia civil, colabora para o enriquecimento dos resultados obtidos pelos ensaios realizados. A opção por um planejamento fracionado, apesar da redução do número da amostra, não compromete a qualidade do resultado final, pois a partir dos resultados do planejamento fracionado é possível fazer a modelagem destes resultados, com a vantagem de racionalizar os recursos físicos e financeiros empregados em uma pesquisa.

A figura 9 apresenta a matriz fracionada do experimento, com todas as combinações executadas.

		PM	0%	25%	50%	75%	100%
ARC 18 MPa	RCD	PM					
	25%			●		●	
	50%	●			●		●
	75%		●			●	
	100%	●			●		●

		PM	0%	25%	50%	75%	100%
ARC 37 MPa	RCD	PM					
	25%	●			●		●
	50%		●			●	
	75%	●			●		●
	100%		●			●	

		PM	0%	25%	50%	75%	100%
ARC 50 MPa	RCD	PM					
	25%			●		●	
	50%	●			●		●
	75%		●			●	
	100%	●			●		●

Figura 9. Matriz fracionada do programa experimental.

O concreto de referência não está incluso na matriz do experimento por não conter percentual de ARC.

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados para realização deste programa experimental são produzidos e empregados na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

3.2.1 Cimento

O cimento escolhido para a pesquisa é o cimento Portland de alta resistência inicial, CP V - ARI. Esta escolha deu-se pelo fato do mesmo apresentar um pequeno percentual de adições em sua composição química, assim como ser um cimento que proporciona rápida hidratação, permitindo um elevado grau de hidratação dos corpos-de-prova até a data da exposição destes ao ensaio de carbonatação acelerada.

As análises físico-químicas do cimento foram obtidas através da empresa fornecedora do cimento, conforme dados expressos nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Caracterização física do CP V - ARI.

Ensaio	Norma utilizada	Resultados (média)
Expansibilidade a quente	NBR 3435	0,85
Tempo de início de pega (hora: min.)	NBR NM 65	2:22
Tempo de fim de pega (hora: min.)	NBR NM 65	3:04
Consistência Normal	NBR NM 43	28,5
Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76	4.347
Retido na # 200 (%)	NBR 11579	0,16
Retido na # 325 (%)	NBR 9202	1,91
Resistência à Compressão 01 dia (MPa)	NBR 7215	20,5
Resistência à Compressão 03 dias (MPa)	NBR 7215	33,8
Resistência à Compressão 07 dias (MPa)	NBR 7215	40,5
Resistência à Compressão 28 dias (MPa)	NBR 5733	48,6
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 23	3,12

Tabela 5. Caracterização química do CP V - ARI.

Ensaio	Norma Utilizada	Resultados
Al ₂ O ₃	NBR 14656	4,07
SiO ₂	NBR 14656	18,67
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	2,56
CaO	NBR 14656	59,90
MgO	NBR 14656	5,31
SO ₃	NBR 14656	3,02
Perda ao Fogo (%)	NBR NM 18	3,32
CaO Livre	NBR NM 12	1,70
Resíduo Insolúvel	NBR NM 15	0,64
Equivalente Alcalino	NBR 14656	0,63

3.2.2 Agregado graúdo natural (AN)

O agregado graúdo natural adotado para a pesquisa é de origem basáltica, proveniente de extração na região de Quatro Colônias (distrito pertencente ao município de Campo Bom) e comercializado na cidade de Campo Bom, Rio Grande do Sul.

A granulometria do agregado graúdo natural foi realizada de acordo com a norma NM 248/2003, no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) – UNISINOS. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6. Este agregado foi lavado, para remoção de finos aderidos aos grãos e seco à temperatura ambiente para posterior utilização.

De acordo com os resultados obtidos, o agregado graúdo está concentrado na faixa granulométrica #12,5 e #9,5mm.

Tabela 6. Caracterização granulométrica do agregado gráudo natural (AN).

Abertura de Peneira #	% Retido	% Acumulado
25 mm	0	0
19 mm	2	2
12,5 mm	60	62
9,5 mm	32	94
6,3 mm	6	100
4,8 mm	0	100
< 4,8 mm	0	100
Dimensão Máxima Característica(mm)	19	
Módulo de Finura	2,73	

A massa específica e a massa unitária do agregado natural (AN) foram determinadas de acordo com as normas NBR NM 52/2002 e NBR 45/1995 – Método “C”, respectivamente, resultando nos valores de 2,75 g/cm³ para massa específica e 1,49 g/cm³ para massa unitária.

3.2.3 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo empregado no experimento é uma areia de origem quartzosa, proveniente de extração no Rio Jacuí, Rio Grande do Sul.

O agregado miúdo foi caracterizado no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) – UNISINOS. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 7 e a curva granulométrica pode ser visualizada na figura 10. De acordo com os resultados obtidos, o agregado miúdo pertence à zona utilizável, conforme a ABNT NM 248/2003.

Tabela 7. Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural.

Abertura de Peneira#	% Retido	% Acumulado
4,8 mm	3	3
2,4 mm	11	14
1,2 mm	18	32
0,6 mm	18	50
0,3 mm	27	77
0,15 mm	20	97
0,075 mm	3	100
< 0,15 mm	0	100
Dimensão Máxima Característica(mm)	4,8	
Módulo de Finura	0,96	

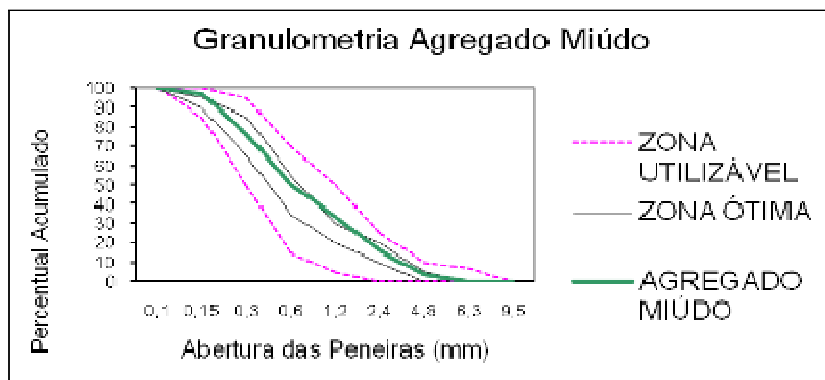


Figura 10. Curva granulométrica do agregado miúdo natural.

Além das características granulométricas, foram determinadas a massa específica e a massa unitária do agregado miúdo, conforme as normas NBR NM 52/2002 e NBR NM 45/1995 (método “C”) e os resultados obtidos para estes ensaios foram $2,49\text{g/cm}^3$ e $1,61\text{g/cm}^3$, respectivamente.

3.2.4 Agregado reciclado de concreto (ARC)

O ARC utilizado na pesquisa foi confeccionado em laboratório para garantir o controle das características do material. Para obtenção deste concreto foram adotados os mesmos insumos escolhidos para o concreto que incorpora o ARC, os quais serão submetidos aos ensaios mecânicos e de durabilidade.

Além dos mesmos insumos, o método de dosagem adotado para produção do ARC e para a produção dos novos concretos com ARC é o mesmo, baseado em Helene e Terzian (1993). Para dosagem do concreto reciclado se estabeleceu um teor ideal de argamassa, $\alpha = 49\%$, para o cimento escolhido, bem como agregados que fazem parte da mistura. A quantidade de água envolvida foi a necessária para atingir um abatimento estipulado em 100 ± 20 mm. Foram executadas oito betonadas (55 kg cada) de cada traço: pobre (a/c 0,85), intermediário (a/c 0,56) e rico (a/c 0,43), gerando concretos com as respectivas resistências de 18, 37 e 50 MPa, após 63 dias de cura submersa.

Para obter o teor ideal de argamassa, foram adotados três pontos de dosagem, ou seja, três traços (traço intermediário, traço rico e traço pobre), de forma a compor uma curva de dosagem. Após, foram ajustados os traços rico e pobre, empregando o teor ideal de argamassa para estes, adequando apenas o teor de água para alcançar o abatimento fixado. A quantidade de insumos utilizados na mistura foi calculada para

utilizar a capacidade máxima da betoneira, somando assim aproximadamente 55 kg de material seco por mistura.

As curvas de Abrams, Molinari e Lyse, do concreto dosado podem ser visualizadas na figura 11.

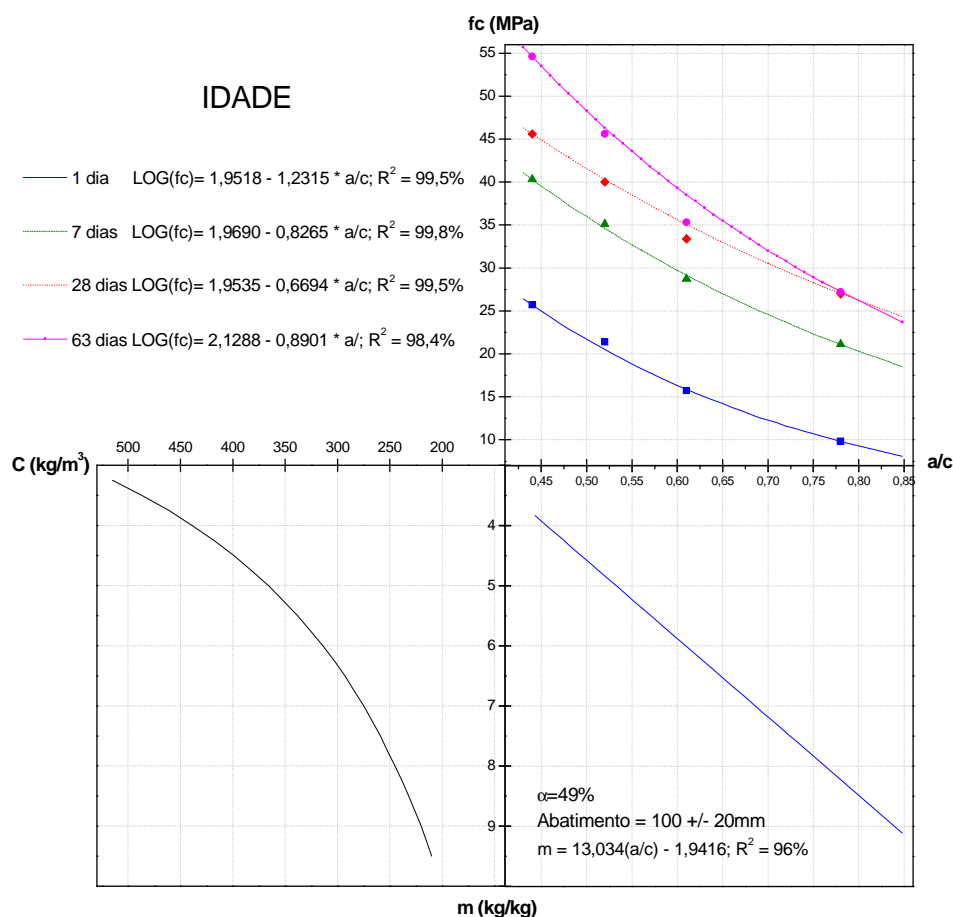


Figura 11. Diagrama de dosagem do concreto.

Moldagem e cura: Para cada betonada foram moldados corpos-de-prova de dimensões 10 x 20 cm, sendo que estes, após o processo de desmolde, foram submetidos à cura submersa por 63 dias dentro de câmara de cura (para atingir um elevado grau de hidratação do cimento, e minimizar o efeito de uma eventual alteração na distribuição de poros no concreto novo devido à continuidade da hidratação do cimento anidro existente no agregado de concreto utilizado), cuja temperatura média da água é de $21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Britagem e secagem: Após o tempo de cura, os corpos-de-prova foram levados a um

processo de cominuição através de britador de mandíbulas, logo em seguida, já britados, permaneceram em estufa a 60°C até a estabilização da massa (diferença entre as pesagens de ± 1 g). Em função de logística para utilização das estufas e das remessas de material, foi estabelecido um período de 7 dias para permanência do material na estufa, este processo garantiu a estabilização de massa do concreto cominuído e a organização da equipe quanto à produção de material. Como os ARC não deveriam sofrer carbonatação durante o período de estoque e concretagem dos concretos a serem feitos com este material, optou-se por secá-los para evitar que carbonatassem antes de serem expostos ao ensaio acelerado de carbonatação.

Peneiramento e armazenamento: Após a secagem, o ARC passou por um processo de peneiramento, em agitador de peneiras 50 x 50 cm, durante um intervalo de 15 minutos. Este processo foi imprescindível, pois se definiu que, para confecção dos novos concretos, seria utilizada somente a fração graúda do ARC gerado. Por esta razão a parcela de material considerada adequada ao uso é a passante pela peneira de abertura # 25 mm e retida em peneira de abertura # 4,8 mm, em função da dimensão máxima característica do agregado de referência. Depois de peneirado, o ARC foi armazenado em tonéis plásticos, evitando qualquer tipo de contaminação e garantindo um baixo percentual de umidade. Ao final do processo foram gerados aproximadamente 2.000 kg de ARC. Esta produção foi adequada à demanda definida pelo projeto, de acordo com os percentuais de substituição, em volume, de AN por ARC.

a. Granulometria dos ARC

As curvas granulométricas dos agregados gerados situam-se em zona entre 12,5 e 25 mm, conforme exposto na tabela 8 e figura 12. As médias adotadas para os percentuais retidos foram determinadas segundo a norma NBR NM 248/2003.

Tabela 8. Caracterização granulométrica dos agregados reciclados de concreto (ARC) de 18 MPa, 37 MPa e 50 MPa.

Abertura de Peneira	ARC 18MPa (63 dias)		ARC 37MPa (63 dias)		ARC 50MPa (63 dias)	
	% Retido	% Acumulado	% Retido	% Acumulado	% Retido	% Acumulado
# 25 mm	1	1	1	1	1	1
# 19 mm	13	14	12	13	18	19
# 12,5 mm	54	68	47	60	45	64
# 9,5 mm	9	77	11	71	9	73
# 6,3 mm	9	86	11	82	9	82
# 4,8 mm	4	90	5	87	5	87
< 4,8 mm	10	100	13	100	13	100
Dimensão Máxima Característica (mm)	25		25		25	
Módulo de Finura	4,36		4,14		4,26	

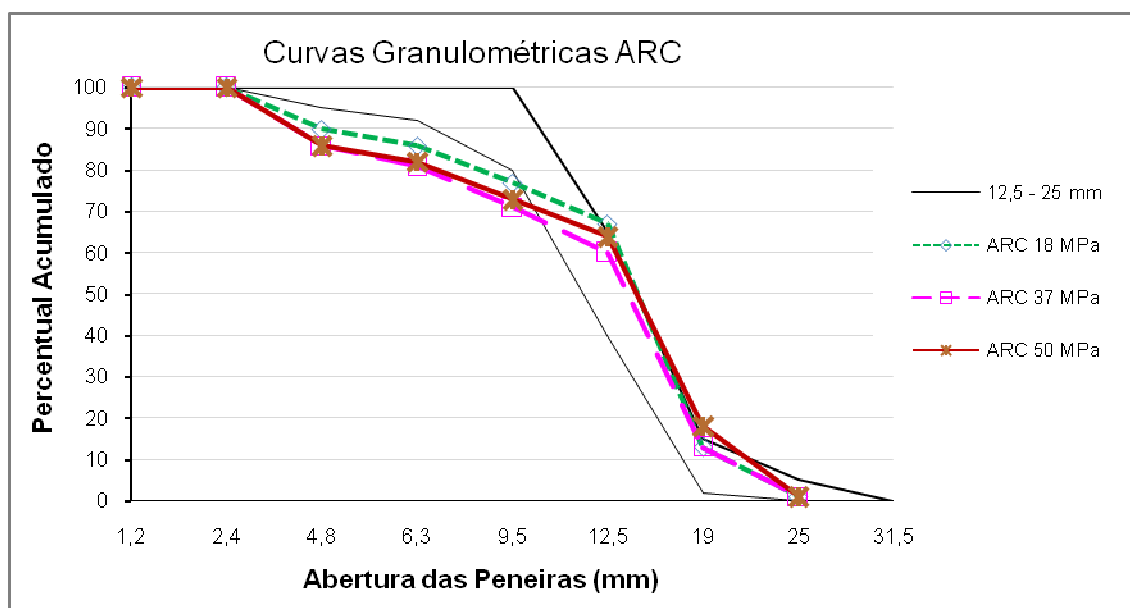


Figura 12. Curvas granulométricas dos ARC.

b. Características físicas dos ARC

Os dados obtidos da caracterização física dos ARC estão expressos na tabela 9. Em relação aos ensaios de massa unitária, pode-se verificar que os resultados obtidos para os três materiais foram muito próximos. Os resultados de massa específica

apontam para a presença de argamassa aderida aos grãos, aspecto que interfere no resultado deste ensaio.

Tabela 9. Caracterização física dos ARC.

Tipo de ARC	Dimensão Máxima Característica (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica (g/cm³) – NM 52/2002 - NM 53/2002	Massa Unitária (g/cm²) – NM 45/1995
18MPa	25	4,36	2,50	1,21
37MPa	25	4,14	2,47	1,20
50MPa	25	4,26	2,49	1,21

c. Absorção de água por imersão dos ARC

Optou-se pela realização de dois métodos de absorção de água para a caracterização dos ARC: A absorção de água pelos agregados por imersão foi realizado modificando-se o método utilizado por Leite (2001) e a absorção do concreto, que gerou o ARC, por capilaridade, foi baseado na norma RILEM TC 116 PCD (1999), modificada. A opção pela execução destes dois métodos se deu em função das dificuldades apresentadas no momento de quantificar a pré-molhagem dos agregados, pois nota-se uma dinâmica diferente de absorção de água quando os agregados são imersos em água (onde há pressão da água em todas as direções da superfície do agregado) ou submetidos a um fluxo unidirecional de água, assim como especificar o tempo a ser destinado à etapa de pré-molhagem.

Para a realização do ensaio de absorção por imersão dos agregados ao longo do tempo foi utilizado um método semelhante ao adotado por Leite (2001), porém com algumas alterações, conforme detalhado na sequência.

As amostras de agregados foram secas em estufa até constância de massa (variação de $\pm 0,1g$ na massa da amostra, entre a última e penúltima pesagem) e após resfriadas em dessecadores vedados que contêm sílica (o que impede que a amostra entre em contato com a umidade), até alcançar a temperatura ambiente, antes de serem submetidas ao ensaio de absorção.

O ensaio de absorção por imersão é dividido em duas etapas:

- Etapa 1- Registro de absorção no primeiro minuto:

A amostra seca foi previamente pesada, colocada dentro de um recipiente vazado e submersa em água; ao alcançar 1 minuto, foi registrado o peso com auxílio de balança hidrostática e logo após o material foi retirado da água, seco superficialmente com um pano úmido, e a massa é determinada pela pesagem da amostra;

Esta sequência é realizada com 3 amostras de 500g para determinar a absorção no primeiro minuto de ensaio. A figura 13 ilustra as etapas do procedimento adotado.



Figura 13. Ensaio de absorção por imersão dos ARC e AN.

- Etapa 2 – Registro da absorção ao longo do tempo:

Após a conclusão da primeira etapa, uma amostra de 500g, preparada como as demais, é colocada em um recipiente vazado, acoplado a uma balança hidrostática, e o conjunto é submerso em água;

São registrados os valores da massa determinada na balança hidrostática, nos seguintes intervalos de tempo: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos; 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48 e 72 horas; a amostra permanece submersa ininterruptamente durante as 72 horas do ensaio (ou até a constância de massa).

A curva de absorção do agregado é obtida a partir do procedimento descrito na etapa 1, para o 1º minuto e da etapa 2 para os períodos posteriores, cujos resultados do ensaio podem ser vistos nas figuras 14 e 15.

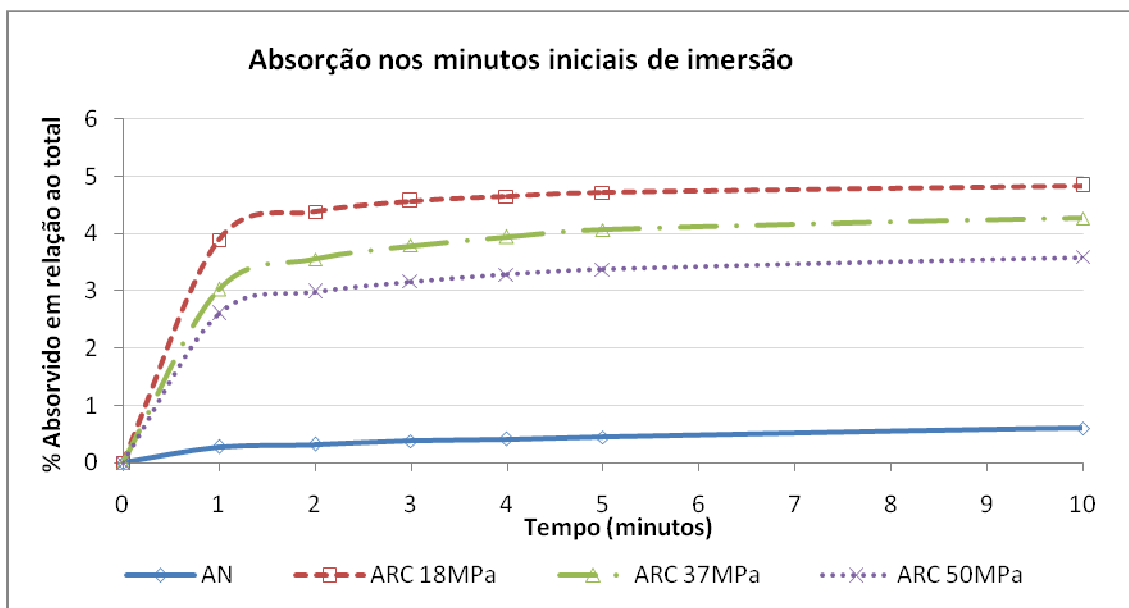


Figura 14. Absorção nos minutos iniciais de imersão do ARC e AN.

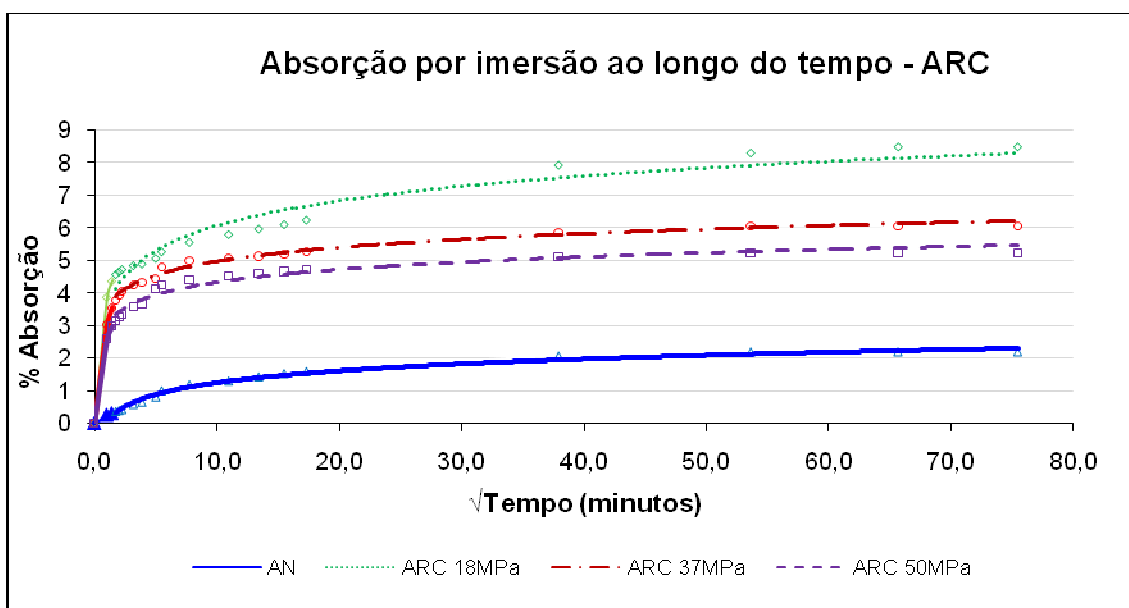


Figura 15. Absorção por imersão dos ARC e AN ao longo do tempo.

d. Absorção de água por capilaridade dos concretos que geraram os ARC

Além da execução do ensaio de absorção por imersão dos agregados, foi realizado também o ensaio de absorção por capilaridade dos concretos que geraram os agregados. Este ensaio tem o intuito de comparar os dois métodos a fim de obter um melhor entendimento em relação ao mecanismo de absorção de água pelos agregados no momento da pré-molhagem dos mesmos.

Este ensaio consiste na seguinte metodologia:

Após 28 dias de cura submersa dos concretos, 1 corpo-de-prova 10x20cm foi serrado em 5 partes, sendo três partes com altura de 5cm, retirados da parte central da peça, desprezando as partes superior e inferior do corpo-de-prova, como mostra a figura 16.



Figura 16. Subdivisão do corpo-de-prova para o ensaio de absorção por capilaridade.

As três amostras de 10x5cm foram mantidas em estufa a 60°C até a estabilização de massa. Estas amostras, após saírem da estufa, permaneceram em dessecador até atingirem temperatura ambiente em sala com temperatura controlada ($21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), sem contato com a umidade. Assim que retiradas do dessecador, as laterais das amostras foram seladas com fita adesiva “Tape Bonder”, de forma a impermeabilizar esta face. As superfícies, superior e inferior, foram deixadas livres, de acordo com figura 17.



Figura 17. Preparo da amostra para o ensaio de absorção por capilaridade.

Depois de selado lateralmente, um balão foi colocado na superfície superior, para que não haja uma interferência da umidade externa na face superior da amostra. A

maleabilidade do látex do balão propicia espaço para que o ar expulso pela absorção de água possa ficar contido neste espaço. A superfície inferior permanece em contato com uma lâmina de água, com profundidade de 3 mm, mantendo o nível da água com esta profundidade constante, através de fluxo contínuo de água e recipiente com extravasor, conforme visualizado na figura 18.

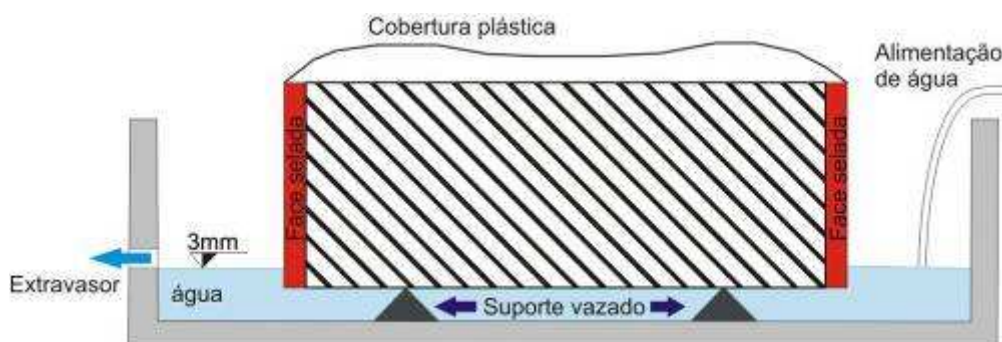


Figura 18. Método de absorção por capilaridade baseado na recomendação RILEM TC 116 PCD (modificado).

A absorção de água por capilaridade é acompanhada através da pesagem das amostras nos seguintes intervalos de tempo: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas (mesmos intervalos de tempo adotados para o ensaio de absorção por imersão dos agregados).

Para a execução do ensaio, foram utilizadas bandejas metálicas com fundo plano para colocação de um estrado vazado interno (que possibilita o acesso de água para as amostras), como mostra a figura 19. O abastecimento de água é por um fluxo contínuo, viabilizado pelo suporte de água apresentado na figura 20.



Figura 19. Recipiente para o ensaio de absorção por capilaridade.



Figura 20. Suporte para o abastecimento contínuo de água para o ensaio de absorção por capilaridade.

Para o registro do peso, as amostras são retiradas da água, secas superficialmente com pano úmido (para remover o excesso de água), de modo que a superfície permaneça úmida.

Os resultados obtidos por este ensaio com os ARC e com o agregado natural estão apresentados na figura 21.

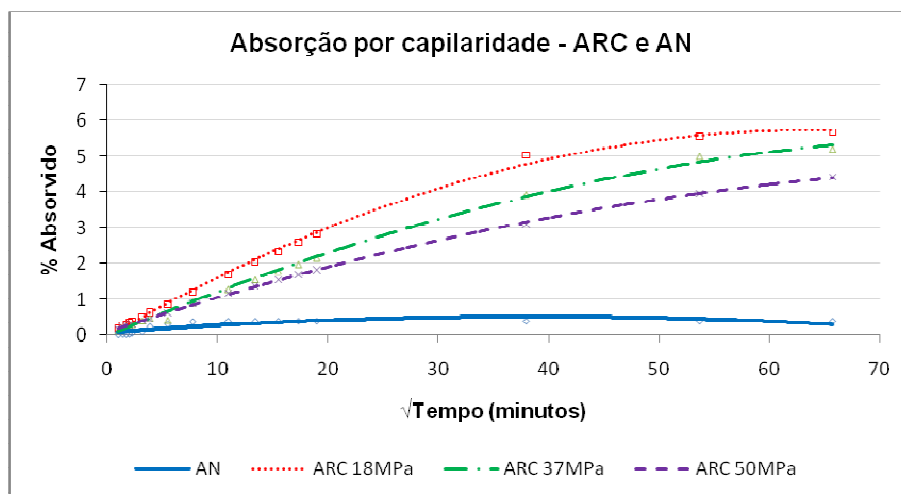


Figura 21. Absorção por capilaridade para ARC e AN.

Os dados apresentados na figura 22, representam a diferença encontrada na execução dos dois métodos, testando os três tipos de ARC (18 MPa, 37 MPa e 50 MPa) em um único intervalo de tempo (10 minutos).

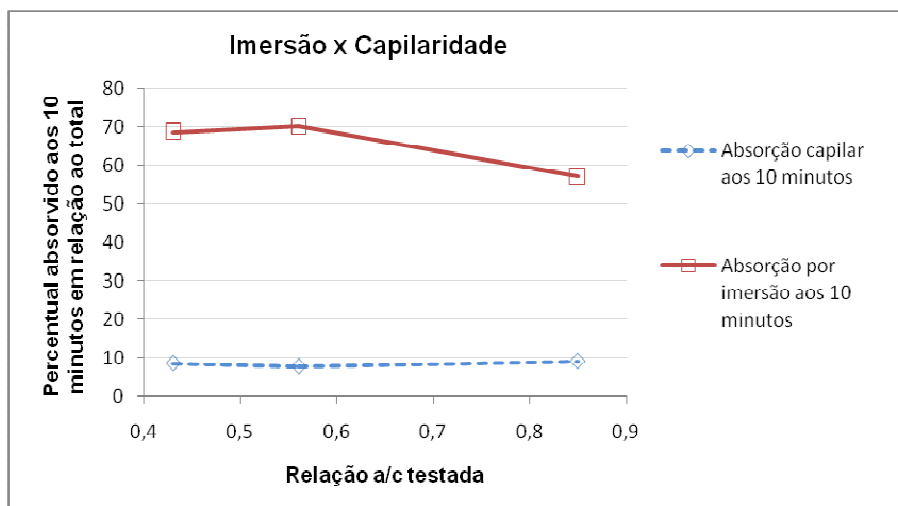


Figura 22. Diferença entre os métodos de absorção por imersão e absorção por capilaridade.

A comparação entre os dois métodos demonstra que a absorção do agregado imerso em água é brusca, ocorrendo em sua maioria no primeiro minuto de contato com a água, enquanto que a absorção por capilaridade ocorre de forma mais lenta e gradual. Considerando-se a quantidade de água absorvida, há uma diferença na ordem de 60% da absorção total do agregado entre os dois. Partindo-se da hipótese de que o comportamento real da absorção de água de um agregado imerso em argamassa é mais próximo da capilaridade do que da imersão, verifica-se que a estimativa da absorção de água por imersão pode levar a sérias distorções na determinação da quantidade de água que deve ser utilizada na pré-molhagem do agregado reciclado, uma vez que a absorção de água do agregado no concreto fresco irá ocorrer em velocidade substancialmente inferior àquela obtida pelo ensaio de absorção por imersão.

A estimativa do teor de água a ser utilizado na pré-molhagem, segundo o exposto, não deve se basear na absorção determinada por imersão, mas sim por capilaridade, uma vez que o ensaio de imersão tende a superestimar a quantidade de água que será absorvida da argamassa pelo agregado ao longo dos primeiros minutos de contato com a água.

e. Distribuição dos poros por porosimetria de intrusão de mercúrio.

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio permite determinar a quantidade e a distribuição dos poros existentes no material analisado. Com este procedimento obteve-se os resultados apresentados nas figuras 23 e 24.

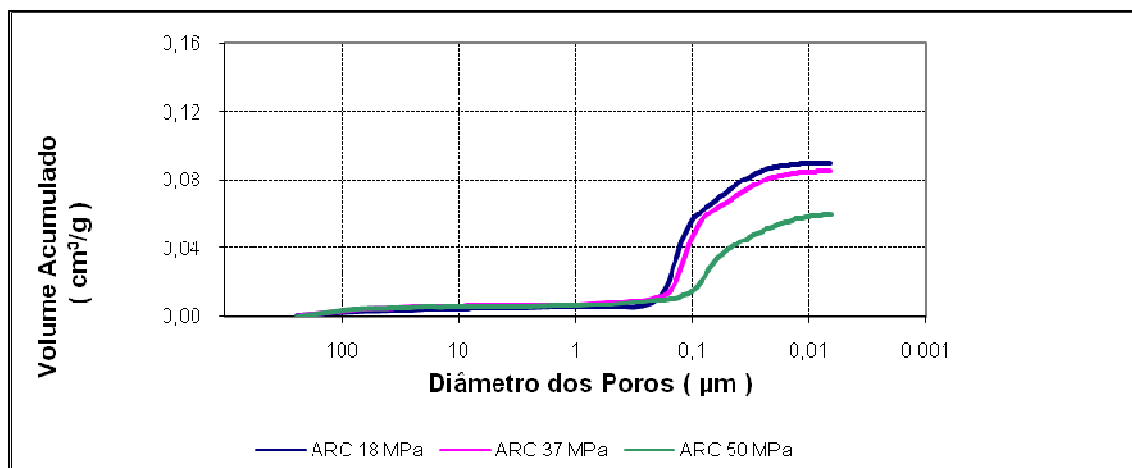


Figura 23. Volume total de poros dos ARC.

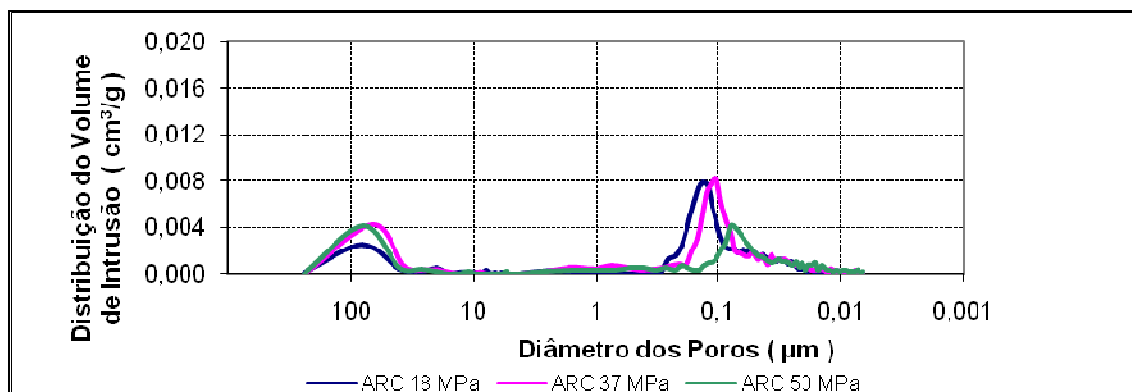


Figura 24. Distribuição de poros dos ARC.

Conforme esperado, observa-se que quanto menor a resistência do concreto, maior a quantidade de poros (figura 21). Quanto à distribuição dos poros, pode-se verificar que o concreto de 50 MPa possui um menor volume de poros capilares (superiores a 50µm), comparativamente aos demais.

f. Características mecânicas

Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, aos 28 dias de cura, para cada um dos traços executados, a fim de acompanhar a qualidade dos concretos executados. Para os ensaios de resistência à compressão, foram ensaiados 3 corpos-de-prova de cada traço. As médias dos resultados obtidos estão expressos na tabela 10.

Tabela 10. Caracterização mecânica dos ARC.

Relação a/c do ARC	Resistência a Compressão Axial (28 dias) – NM 101/1996	Resistência a Tração por Compressão Diametral (28 dias) – NM 8/1994
0,85	18 MPa	7 MPa
0,56	37 MPa	11 MPa
0,43	50 MPa	14MPa

3.2.5 Água

A água utilizada para as misturas de concreto é potável, proveniente da rede de abastecimento municipal de São Leopoldo.

3.3 OBTENÇÃO DOS CONCRETOS COM ARC

3.3.1 Dosagem

Para obtenção da dosagem dos concretos confeccionados com ARC, a sistemática de dosagem adotada foi a mesma utilizada para a dosagem dos ARC. Com a dosagem definida, foi realizado um piloto de alguns traços contendo o resíduo. Este piloto mostrou a ineficiência da adoção de um baixo teor de argamassa ($\alpha = 49\%$) para estes concretos contendo ARC, em função da desagregação das partículas no momento de execução do teste de abatimento com tronco de cone. Levando em consideração este fator, optou-se por aumentar o teor ideal de argamassa para $\alpha = 53\%$ mantendo a relação $a/c = 0,64$. Esta relação a/c foi escolhida em virtude do ensaio de carbonatação. Em função do curto período previsto (147 dias) para o contato entre o concreto e o CO_2 , optou-se em utilizar uma relação a/c maior, que propicia um concreto mais poroso, que por sua vez tende a carbonatar mais, gerando uma profundidade carbonatada satisfatória para este período de ensaio de carbonatação acelerada.

3.3.2 Pré-molhagem dos ARC

Observa-se a partir dos ensaios realizados de absorção por imersão dos agregados, que ele absorve aproximadamente 80% de toda a sua capacidade de absorção de água nos primeiros 5 minutos em contato com a água. Considerando também a necessidade de um tempo adequado para a mistura dos materiais com a água, a pré-molhagem foi realizada em 10 minutos antes da mistura dos materiais na betoneira.

Para a realização da pré-molhagem, o agregado é colocado em um recipiente metálico, previamente umedecido, de forma que a água destinada à pré-molhagem não fique aderida ao recipiente. A água de pré-molhagem é pesada e logo após despejada sobre o agregado com o auxílio de um regador. A medida em que a água é colocada, manualmente os agregados são misturados, como mostra a figura 25, para permitir que haja uma molhagem homogênea sobre os grãos. Este procedimento de molhagem e mistura manual dos agregados dura em torno de 3 minutos. Considerando uma etapa de 5 minutos para a absorção da água pelo agregado, somadas estas duas etapas e adotando uma tolerância de 2 minutos, o tempo resultante é de 10 minutos. Este período de tempo garante que as operações sejam feitas sem ultrapassar os tempos ideais de absorção e colabora para a logística do ensaio.



Figura 25. Execução da pré-molhagem.

A pré-molhagem foi realizada em sala com umidade controlada com $85 \pm 5\%$ de umidade relativa, impedindo que a umidade da pré-molhagem fosse perdida para o meio.

Para manutenção de um abatimento na ordem de 100 ± 20 mm, foi necessário realizar um ajuste de água nas misturas, originando uma variável de controle a/c final com níveis aleatórios, a qual foi inclusa na análise estatística dos dados.

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Moldagem e cura

Para determinar o procedimento de moldagem dos corpos-de-prova de concreto em forma prismática, foi executada uma concretagem teste, moldando corpos-de-prova cilíndricos 50 x 100 mm e prismáticos 40 x 40 x 160 mm, adensados com diferentes dispositivos, mesa vibratória durante 10 segundos e mesa de consistência com 30 golpes, para posterior ensaio de ultra-som. Este ensaio foi realizado com a finalidade de averiguar se havia diferença na compactação do concreto em função dos processos de adensamento.

Não houve distinção entre os dois processos e por esta razão optou-se por utilizar a mesa vibratória pela facilidade e rapidez de execução dos moldes nesta pesquisa.

Foram adotados corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 60 x 60 x 180 mm, para utilização no ensaio de carbonatação acelerada. Os moldes foram preenchidos e adensados em mesa vibratória, com dimensões de 50 x 50cm, (com capacidade para 150kg) durante 10 segundos, este tempo foi subdividido em duas etapas, primeiro 8 segundos para o adensamento e para realizar o acabamento no molde, mais 2 segundos de vibração.

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 100 x 200 mm, conforme a norma NBR 5738 (2003), destinados aos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e absorção por capilaridade.

O procedimento de cura adotado para todas as amostras é a cura submersa, pois esta constitui um fator fixo no programa experimental. A cura é realizada em tanques com solução saturada de água e cal, por um período de 28 dias para as amostras destinadas aos ensaios de compressão, tração e absorção de água e 63 dias para as amostras que seriam carbonatadas, este período de cura diferenciado foi considerado para estabilizar a hidratação do cimento CPV – ARI utilizado. Foi realizado um estudo determinando-se a distribuição de poros dos concretos nas idades de 7, 28 e 63 dias, comprovando este comportamento. A cura submersa segue o procedimento determinado pela norma NBR 5738 (2003).

3.4.2 Sazonamento

Para que os corpos-de-prova estejam em condições ideais para exposição ao CO₂, os mesmos necessitam passar pelo processo de sazonalamento.

Alguns autores exemplificam como executaram seu procedimento de sazonalamento (PAULETTI, 2004; THIERY et al., 2007; HUI-SHENG et al., 2009), sendo que os procedimentos diferem entre si, na temperatura adotada, no tempo de permanência na estufa e na forma de acondicionamento das amostras.

Para realização do ensaio de carbonatação, definiu-se que todas as amostras estariam com umidade interna aparente de 70%, de maneira a permitir que a carbonatação não seja influenciada por esta variável.

O processo foi dividido em duas etapas, primeiro a etapa de pré-secagem e segundo a etapa de embalagem.

- Etapa de pré-secagem: Para o presente estudo, os corpos-de-prova necessitam perder 30% da umidade interna. Assim que são retirados da cura submersa, os mesmos são secos superficialmente e pesados. Logo após são acondicionados em estufa ventilada a uma temperatura de 50°C, permanecendo neste ambiente durante o tempo necessário para atingir uma umidade interna aparente de 70%, ou seja, devem perder aproximadamente $30\% \pm 0,5\%$ de umidade. Deve-se considerar que há dúvidas sobre a eficiência deste procedimento, em função da dificuldade de equilibrar a umidade nos poros não interligados: entretanto, a adoção do procedimento minimiza consideravelmente os efeitos da diferença de umidade na carbonatação dos diversos exemplares.

Para estabelecer este parâmetro foi realizado um ensaio prévio com um exemplar de cada traço. Estes corpos-de-prova foram secos em estufa a 105°C, desta forma foi possível estimar a perda total de umidade para cada combinação em relação à sua massa saturada. Com base nestes resultados, fez-se a estimativa da perda de massa para cada amostra para atingir os 70% de umidade interna. Além da previsão da massa a perder, pode-se observar a impossibilidade de estimar um tempo único para todos os corpos-de-prova, pois cada traço apresenta uma constituição distinta, o que acarreta em um comportamento distinto no processo de secagem.

- Etapa de embalagem: Após atingir a umidade interna de 70%, os corpos-de-prova foram selados em embalagem impermeável, que não permite a troca de

gás com o meio externo como mostra a figura 26, com o objetivo de permitir a homogeneização da umidade interna de cada exemplar.



Figura 26. Embalagem impermeável.

Depois de embaladas, as amostras foram acondicionadas em sala climatizada com temperatura e umidade relativa controlada ($T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 70\% \pm 5\%$).

É importante salientar que a secagem em estufa promove uma rápida perda de umidade nas bordas das amostras, porém o interior da amostra continua com uma alta concentração de umidade. O ambiente vedado, no qual os corpos-de-prova estão inseridos induz à redistribuição da umidade interna em relação às bordas do corpo-de-prova, ou seja, há uma migração da umidade que está no meio do corpo-de-prova pela diferença de concentração, em direção às bordas mais secas da amostra, sendo que a embalagem impermeável tem a finalidade de proporcionar este ambiente.

O período necessário para que haja a redistribuição da umidade interna satisfatória é de no mínimo 14 dias, conforme a recomendação da RILEM TC 116 PCD (1999), porém a pesquisa adotou um período de 28 dias para a redistribuição da umidade interna, do mesmo modo que Pauletti (2004).

3.4.3 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi executado de acordo com a norma NBR 5739 (2007). Para este ensaio foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos 100 x 200 mm e a prensa utilizada para realização deste ensaio é uma prensa classe I, marca Controls com capacidade de 2000 KN.

3.4.4 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi executado de acordo com a norma NBR 7222 (1994). Para este ensaio também foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos 100 x 200 mm.

A prensa utilizada para realização deste ensaio é uma prensa de marca Controls com capacidade de 2000 KN.

3.4.5 Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade segue o procedimento, modificado, baseado na recomendação RILEM TC 116 PCD (1999). O ensaio realizado para o concreto com RCD segue o mesmo procedimento feito para os concretos que geraram o RCD, conforme item 3.2.4.

3.4.6 Ensaio acelerado de carbonatação

Os ensaios acelerados de carbonatação proporcionam a obtenção de resultados em um curto período de tempo. Entretanto, não há consenso sobre a forma de transposição dos resultados provenientes do ambiente de laboratório para as condições naturais de exposição, ou sobre o procedimento de ensaio.

Após o preparo das amostras, em torno de 100 dias, desde a moldagem até a abertura das embalagens, os corpos-de-prova seguem para o ensaio de carbonatação acelerada. Para realização deste ensaio, foi utilizada a câmara de carbonatação do LMC/UNISINOS.

O abastecimento da câmara se dá pela mistura de ar e CO₂. O ar é capturado do meio externo, por meio de um compressor e misturado com CO₂ proveniente de um cilindro de CO₂.

Depois de homogeneizada, em um compartimento específico para tal fim, a mistura de ar e CO₂ seguem para a câmara de carbonatação. A figura 27 apresenta o sistema utilizado para o ensaio de carbonatação.

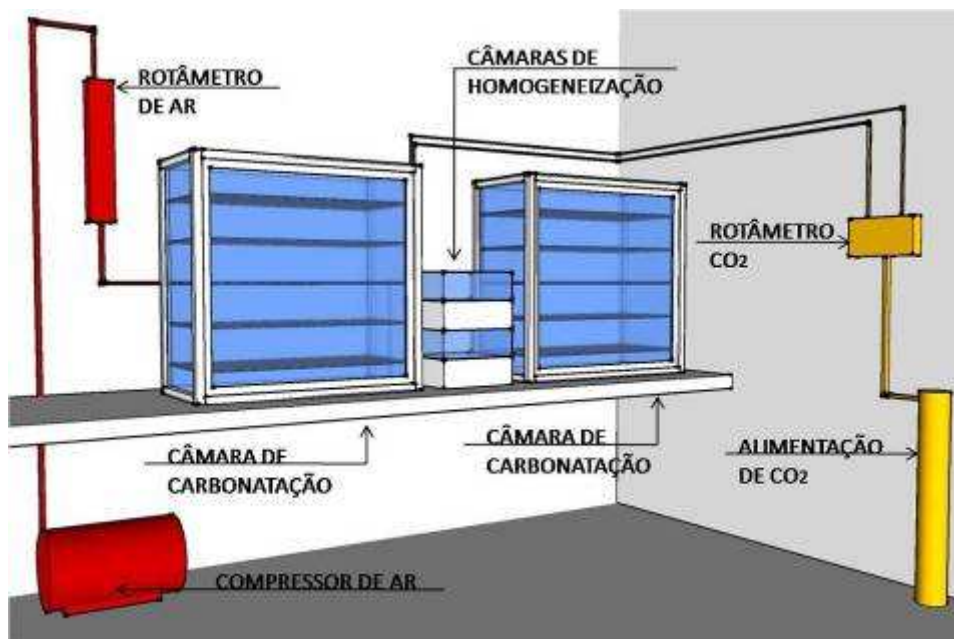


Figura 27. Sistema utilizado para o ensaio acelerado de carbonatação.

Em função do grande número de exemplares, o procedimento de carbonatação foi realizado em duas câmaras, com as mesmas condições, simultaneamente. A alimentação das câmaras é contínua, havendo um expurgo conectado ao exterior, por onde saem os gases, não prejudicando a salubridade da sala climatizada, onde as câmaras se localizam.

Para realizar uma distribuição homogênea dos gases em todo o compartimento foram instalados ventiladores, dois localizados no lado esquerdo superior e dois ventiladores no lado direito inferior, proporcionando uma boa circulação do ar.

Os corpos-de-prova foram dispostos horizontalmente em bandejas, que possuem uma superfície vazada, de maneira haja pleno acesso do gás aos corpos-de-prova, como mostram as figuras: 28 e 29.

Maiores informações acerca do funcionamento do sistema de carbonatação utilizado por esta pesquisa podem ser consultados no Manual de Montagem e Operação de Câmara de Carbonatação (2010).



Figura 28. Disposição dos corpos-de-prova na câmara de carbonatação.



Figura 29. Disposição dos corpos-de-prova na câmara de carbonatação.

Para que as reações de carbonatação aconteçam, a umidade interna da câmara deve estar em equilíbrio com a umidade interna das amostras, para que os corpos-de-prova não percam umidade para o meio e prejudique a velocidade de carbonatação.

A umidade interna da câmara foi estipulada em 70%, para alcançar este fator foi necessário monitorar com frequência a umidade, e com o auxílio de um sensor de umidade, ajustá-la com o uso de Iodeto de Potássio (para reduzir a umidade) ou aumentando a umidade através de um recipiente com água. A umidade é continuamente monitorada com um sensor de umidade eletrônico tipo *Tinytag*.

Da mesma forma como foi realizada a aferição da temperatura e umidade internas da câmara de carbonatação, também foi utilizado um sensor de CO_2 para aferir o teor de CO_2 contido nas câmaras.

Em relação ao percentual de CO_2 , as pesquisas utilizam as mais variadas concentrações de CO_2 . Pauletti et al. (2009) salientam a escassez de pesquisas que abordem mais de um teor de CO_2 em um mesmo experimento, fato que dificulta a comparação entre os dados relatados. na literatura sobre o tema, há uma forte discussão sobre a influência do teor de CO_2 sobre a cinética e a representatividade dos ensaios realizados com teores elevados de CO_2 .

Castellote et al. (2008) inferem que utilizando percentuais de CO_2 superiores a 10% há uma mudança expressiva na rede de poros e com baixos percentuais há uma carbonatação progressiva, mais próxima ao que ocorre no meio ambiente, concluindo

que teores de até 3% são os que mais se aproximam da condição de carbonatação natural.

Os autores recomendam a utilização de baixos percentuais de CO₂ para que a velocidade das reações de carbonatação e a quantidade de produtos formados não interfiram na microestrutura dos poros, colmatando os poros e impedindo o avanço da entrada de CO₂.

De acordo com Tam et al. (2005), a concentração de CO₂ em áreas rurais é de 0,03%, em um laboratório não ventilado é de 0,1%, em grandes cidade de 0,3% e excepcionalmente chegam a 1%. Com o intuito de uma aproximação com as condições naturais e mantendo um processo de carbonatação acelerado esta pesquisa optou pela concentração de 1% de CO₂.

As medidas de carbonatação foram realizadas com base na recomendação RILEM CPC 18, com o uso do indicador químico fenolftaleína para determinação das zonas com diferentes níveis de pH, pois é o mais utilizado, devido à sua praticidade e baixo custo.

O procedimento de aspersão do indicador químico fenolftaleína (na concentração de 1%) é realizado a cada período de exposição ao CO₂, quando o corpo-de-prova é retirado da câmara, rompido em prensa manual, resultando em uma fatia com espessura de aproximadamente 40 mm. A amostra retirada é aspergida com fenolftaleína na superfície recém fraturada e o restante do corpo-de-prova retorna para a câmara de carbonatação até atingir o tempo necessário para se realizar uma nova amostragem.

O indicador químico fenolftaleína, possui pH de viragem em torno de 9,3, permitindo identificar visualmente as regiões com diferentes níveis de pH existente num exemplar parcialmente carbonatado.

Em áreas carbonatadas o pH é reduzido para em torno de 9, mantendo a área aspergida incolor e nas áreas não carbonatadas o pH permanece bastante alcalino, em torno de 13, gerando uma área com coloração vermelho-carmim após a aspersão do indicador.

3.4.7 Verificação da homogeneidade da carbonatação entre o concreto novo e o ARC.

Para a verificação da homogeneidade da carbonatação entre o concreto novo e o ARC, partiu-se da hipótese de que o ARC teria um comportamento distinto da matriz em relação à carbonatação e que este comportamento seria visível após o ensaio de aspensão da fenolftaleína. Pretendia-se identificar os ARC dentro da nova matriz de concreto das amostras que estavam sendo avaliadas.

Após a aspensão imediata de fenolftaleína e registro fotográfico das amostras carbonatadas, recém rompidas, foi estipulado um período de 7 dias para um novo registro fotográfico destas mesmas amostras.

A amostra estava acondicionada em sala com temperatura e umidade controladas ($T = 21 \pm 2^\circ\text{C}$ e $UR = 70 \pm 5\%$), a qual não possui sistema de ventilação natural, portanto, em contato com CO_2 presente nesta atmosfera.

Com este método esperou-se verificar se a frente de carbonatação é homogênea entre os ARC e a pasta do concreto novo ou se, em função da porosidade dos ARC, a velocidade de carbonatação, na face exposta da amostra, seria diferente. Esta diferença poderia resultar na mudança de coloração da cor apontada pelo indicador químico, fenolftaleína. Desta maneira seria possível realizar uma análise qualitativa do fenômeno da carbonatação em concretos com diferentes tipos de ARC.

3.4.8 Medidas de profundidade de carbonatação

Indicadores químicos são produtos que reagem de forma diferente com produtos alcalinos e básicos, alterando a sua coloração em determinadas condições de pH, e portanto, podem ser utilizados para identificar o pH do concreto. Indiretamente pode servir para distinguir as regiões onde o concreto está carbonatado (com pH inferior a 10) de regiões não carbonatadas (com pH em torno de 13).

De acordo com Pauletti (2004), o uso do indicador químico fenolftaleína para determinação de carbonatação é o mais utilizado, devido à sua praticidade e baixo custo. A reação do indicador com a superfície do concreto resulta na coloração do concreto, sendo possível diferenciar o pH das parcelas carbonatadas e não carbonatadas.

A parcela do concreto onde o pH está em torno de 13, o indicador químico tingiu de cor vermelho-carmim (parcela que não sofreu com o fenômeno da carbonatação) e mantém incolor a parcela carbonatada, cujo pH encontra-se inferior a 10.

Thiery et al (2007) adverte que a profundidade de carbonatação pode ser maior do que a indicada pela aspersão de fenolftaleína, este fato pode ser comprovado utilizando métodos de termogravimetria e densitometria-gama, que avaliam o concreto parcialmente carbonatado, quantificando os elementos encontrados nas amostras retiradas de cada parcela. Estas análises levam em consideração a quantidade de carbonatos precipitados na rede de poros do material. Os autores sugerem que o perfil e posição da carbonatação do Ca(OH)_2 , determinada pela aspersão do indicador fenolftaleína, se desenvolve em três zonas. Uma primeira seria a de material não carbonatado, mantendo a cor vermelho carmim, a segunda zona seria intermediária, contendo material carbonatado e material não carbonatado juntos e a terceira zona seria onde o praticamente todo o material está carbonatado. Nesta última faixa existe ainda Ca(OH)_2 não carbonatado, porém este conteúdo é insuficiente para manter o pH maior do que 9.

Conforme Kazmierczak e Lindenmeyer (1996) é necessário ter certo cuidado com a superfície da amostra para não comprometer o resultado da aspersão do indicador químico, a superfície não deve ser serrada, molhada ou apresentar excesso de poeira. A aplicação deve ser realizada após limpeza com pincel ou jato de ar comprimido, no máximo um minuto após o rompimento do material. Para a leitura precisa da profundidade carbonatada, a mesma deve ser feita no máximo a 10 minutos da aspersão, quando há a viragem da cor vermelho-carmim torna-se nítida.

Este trabalho adota o mesmo procedimento utilizado por Kulakowski (2002), Kirchheim (2003) e Pauletti (2004) que, após a aspersão do indicador químico, foi realizada a documentação fotográfica das amostras e submissão das mesmas à análise de imagem, com o auxílio de softwares específicos, com o objetivo de determinar a profundidade da frente de carbonatação.

Em função da hipótese de que a existência de ARC poderia resultar em profundidades de carbonatação diferentes da encontrada na nova argamassa, procurou-se verificar qual seria a melhor maneira de determinar a profundidade de carbonatação em um corpo-de-prova. Para tal, utilizou-se o software Image Tool, que permite a rápida

determinação da profundidade média e um segundo processo consiste na determinação da profundidade de carbonatação em diversos pontos, de maneira que fosse possível a determinação da profundidade carbonatada com um grau de confiança de 90%. Para a verificação das diversas profundidades, utilizou-se o software *AutoCAD*.

A amostra aspergida é fotografada após 1 hora de aspersão do indicador químico e posteriormente analisada com o auxílio do software *Image Tool*, o qual distingue as faixas carbonatadas e não carbonatadas em função da diferença de coloração da amostra. O programa possui uma ferramenta que permite a delimitação das áreas carbonatadas, assim como fornece dados como área em mm² da parcela carbonatada delimitada, profundidade média e comprimento médio da delimitação feita.

As imagens foram obtidas mantendo fixa a distância entre a câmera fotográfica e a amostra, evitando distorções que podem prejudicar a posterior análise de imagem.

3.4.8.1 Medidas de profundidade média de carbonatação

Para a determinação das profundidades médias de carbonatação com o auxílio do software de análise de imagem, *Image Tool*, seguindo os passos:

- Abertura da imagem no software para calibrar o programa à dimensão da imagem inserida através da escala contida na imagem, conforme ilustrado na figura 30.



Figura 30. Amostra carbonatada com referência de escala.

Uma vez calibrado o programa, com este padrão é possível analisar as imagens seguintes.

- Abertura das imagens que serão analisadas.
- Transformação em imagens monocromáticas, de acordo com a figura 31.

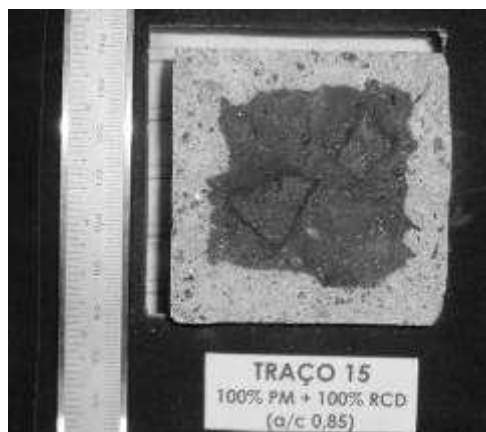


Figura 31. Imagem da amostra monocromática.

- Identificação das parcelas interessantes ao estudo. Para este trabalho se convencionou que somente as laterais do corpo-de-prova seriam analisadas, o topo foi descartado em função da exsudação de água para a superfície durante o processo de moldagem e cura, assim como o fundo foi descartado pelo motivo contrário, por conter uma menor quantidade de água em sua composição, como exemplifica a figura 32.

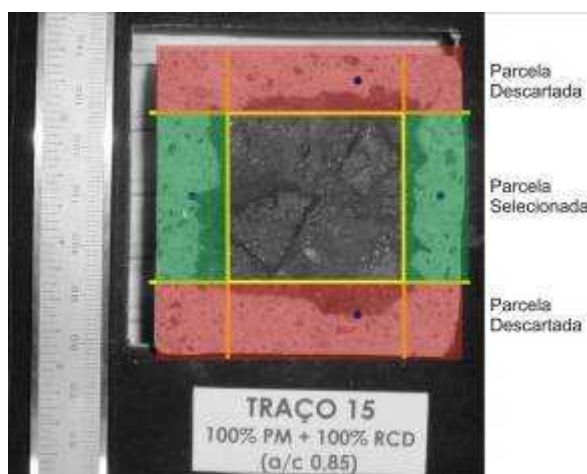


Figura 32. Seleção das áreas de interesse.

- A delimitação das áreas de interesse é realizada conforme a figura 33.

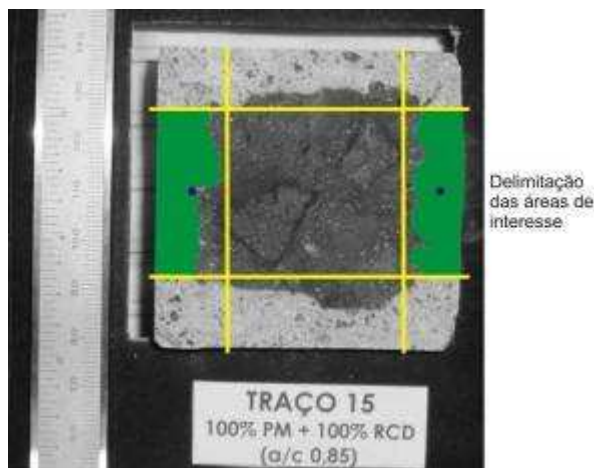


Figura 33. Delimitação das áreas de interesse.

- Cálculo da área atingida: o programa fornece o dado da área delimitada, neste caso específico em mm^2 , assim como informações sobre o perímetro, a maior distância longitudinal e a maior distância transversal.
- O cálculo da profundidade de carbonatação é dado pela área (mm^2) delimitada dividida pela maior dimensão longitudinal (mm), o que resulta em uma média de valores de profundidade de carbonatação.

Aos 147 dias as amostras foram submetidas a dois métodos para verificação da profundidade de carbonatação. O primeiro método utilizou o software *ImageTool*, descrito no item 3.4.8.1 e o segundo método adota o software *Auto CAD*, como descrito no item 3.4.8.2.

3.4.8.2 Medidas de profundidade de carbonatação com grau de 90% de confiança

Com a finalidade de averiguar possíveis diferenças entre os métodos, que por ventura representassem melhor o comportamento da frente de carbonatação verificada ao longo dos ensaios de aspersão de fenolftaleína, optou-se pela realização de outro método para verificação da profundidade de carbonatação que consiste nas seguintes etapas.

- A imagem da amostra fotografada é inserida no programa gráfico *Auto CAD*. Com o auxílio da ferramenta *scale*, é possível escalar a imagem para que fique de acordo com sua dimensão real.

- Depois que a imagem está com as devidas dimensões, as áreas de interesse foram selecionadas e devidamente delimitadas, como mostra a figura 34.



Figura 34. Seleção das áreas de interesse.

- Com as áreas de interesse delimitadas, foram traçadas 15 linhas paralelas, equidistantes entre si, em para cada lado da amostra, conforme ilustrado na figura 35, totalizando 30 medidas de profundidade de carbonatação para cada corpo-de-prova, o que permitiu realizar uma análise detalhada da frente de carbonatação para os concretos com ARC.

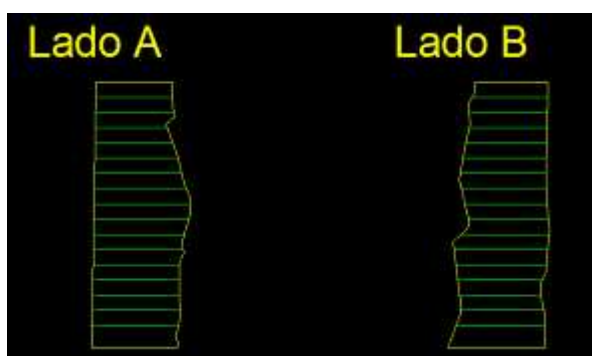


Figura 35. Dispersão das medidas de carbonatação em um mesmo exemplar.

- Os dados oriundos da medida de cada traço originaram uma amostra de 60 pontos ao total (15 pontos de cada face x 2 corpos-de-prova amostrados) para cada traço. Dentre esta amostra foram considerados os valores correspondentes a

90% de todas as profundidades lidas.

3.4.9 Análise Estatística

Os resultados dos ensaios foram tratados estatisticamente, com o intuito de prever o comportamento da variável de resposta em função das variáveis de controle.

Com a aplicação da ferramenta de regressão, foi possível analisar quais são os fatores que interferem significativamente no comportamento das variáveis de resposta, assim como verificar se as interações entre estes fatores são significativas ou não para o modelo.

Para a realização destas análises foi utilizado o software *Statgraphics* (versão demonstrativa) e o nível de confiança adotado foi de 95%.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise e discussão dos resultados são acompanhadas da análise estatística, cujas ferramentas adotadas para este fim é a análise de variância (ANOVA) e a análise de regressão, pois estas apontam se há significância para as variáveis escolhidas individualmente, assim como as possíveis interações entre as variáveis frente aos resultados obtidos. A variável “tipo de agregado” (TAG), além do agregado natural, é estudada em três níveis e foi abordada através da sua capacidade de absorção de água (ABS) ou resistência a compressão axial (FCAG) do concreto que gerou o ARC.

Procurou-se contrapor os resultados obtidos com demais trabalhos, apresentados pelo meio acadêmico acerca do mesmo tema, porém foram encontradas dificuldades de comparação de resultados em função da diversidade metodológica existente e demais características específicas dos materiais adotados.

Os resultados de caracterização da resistência à compressão, resistência à tração e absorção de água foram obtidos num trabalho em conjunto com outros alunos de mestrado (TROIAN (2010) e Marcelo Grub, no âmbito do projeto FINEP “Ações de Inovação na Engenharia” e encontram-se detalhados no relatório técnico do projeto.

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.1.1 Resistência à compressão

As médias obtidas para os ensaios de compressão axial estão apresentados na tabela 11 e os resultados obtidos para cada amostra ensaiada constam no Anexo A. A ANOVA realizada a partir dos resultados obtidos é apresentada na tabela 12, na qual são avaliadas as influências do teor de agregado (TAG), resistência do concreto que gerou o agregado (FCAG) e o teor de pré-molhagem (TPM) sobre a resistência à compressão do concreto com ARC, assim como a influência do efeito isolado das variáveis estudadas são apresentadas nas figuras 36, 37 e 38. Para esta análise, foi levada em consideração a resistência à compressão do concreto de origem do ARC para a variável “tipo de agregado (FCAG)”.

Tabela 11. Médias dos resultados de compressão axial aos 28 dias.

Tipo de ARC	Teor de substituição (TAG)	Resistência (MPa)				
		Teor de pré-molhagem (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
18MPa (a/c 0,85)	25%		33,3		27,2	
	50%	29,9		30,4		28,5
	75%		27,9		26,6	
	100%	26,8		25,5		25,6
37MPa (a/c 0,56)	25%	29,5		35,4		32,7
	50%		31,6		33,7	
	75%	30,8		29,3		27,1
	100%		26,7		30,7	
50MPa (a/c 0,43)	25%		32,7		25,8	
	50%	33,5		34,3		33,8
	75%		28,2		25,7	
	100%	31,1		32,6		28,8

O concreto de referência apresentou valor de $f_c = 32,4$ MPa (considerando-se um $S_d 4 = 25$ MPa).

Tabela 12. ANOVA da influência dos fatores independentes sobre a resistência à compressão.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p
FCAG	2	149,826	74,9128	8,30	0,0005
TAG	3	0,0596373	80,2656	8,90	0,0000
TPM	4	240,797	17,7291	1,97	0,1078
Erro	80	70,9162	9,02097		
Total Corrigido	89	11,9106			

Sendo: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; FCAG = resistência do ARC; TAG = teor de ARC; TPM = teor de pré-molhagem.

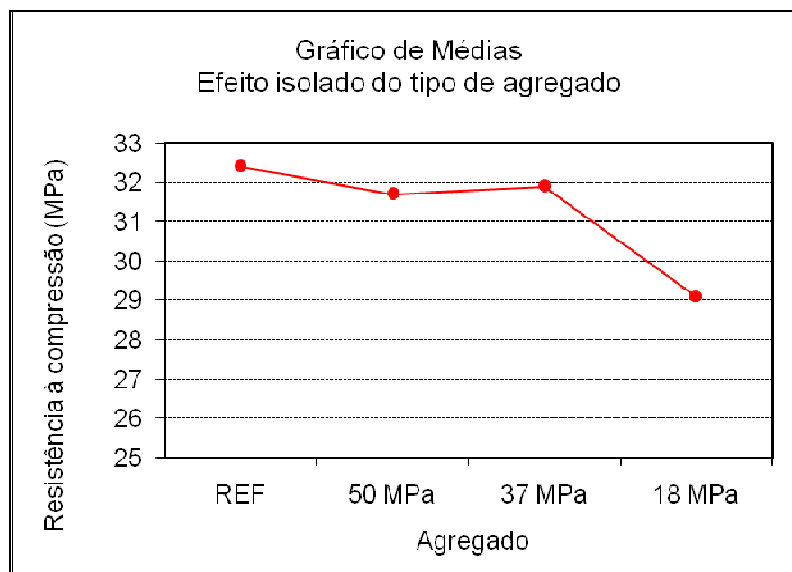


Figura 36. Efeito isolado da variável “tipo de agregado” no comportamento de resistência à compressão axial aos 28 dias.

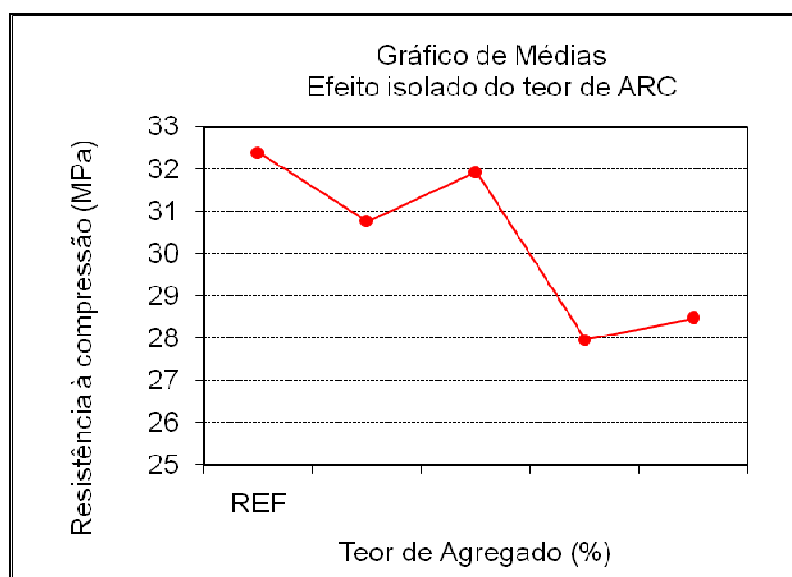


Figura 37. Efeito isolado da variável “teor de agregado” no comportamento de resistência à compressão axial aos 28 dias.

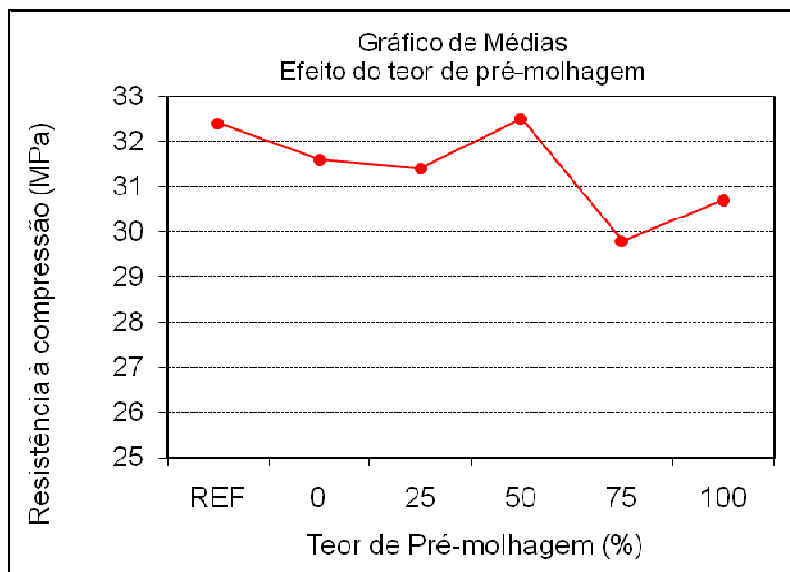


Figura 38. Efeito isolado da variável “teor de pré-molhagem” no comportamento da resistência à compressão axial aos 28 dias.

Pela análise de variância é possível inferir através do teste p, que a resistência do ARC empregado possui grande influência sobre o comportamento da resistência a compressão do novo concreto, da mesma forma que o teor de substituição de AN por ARC também é um fator determinante para a resposta deste concreto à compressão.

Por outro lado, o teor de pré-molhagem mostrou-se um fator não significativo em relação à influência na resistência a compressão do concreto com ARC. Da mesma forma, as interações realizadas entre as variáveis sobre o comportamento à compressão não foram significativas.

Em relação ao comportamento da resistência à compressão, levando em consideração somente o efeito do tipo de agregado (fck do concreto de origem do ARC), pode-se inferir de acordo com o gráfico apresentado na figura 37, que utilizando ARC de média e alta resistência, o ARC não exerce influência na resistência do novo concreto, porém quando se opta pela adoção de um ARC de baixa resistência, neste caso específico, verifica-se a redução da resistência.

Quando o efeito isolado do teor de ARC é analisado, através do gráfico ilustrado na figura 38, vê-se claramente um ponto de corte para o teor máximo de substituição de AN por ARC. A substituição de até 50% de agregados não altera a resistência à compressão requerida. Observa-se neste mesmo gráfico que entre os teores de 25 e 50% de ARC, há pouca diferença na influência quanto à resistência à compressão, porém

quando o teor de ARC passa de 50% para 75%, há uma queda brusca na resistência à compressão dos concretos e entre os teores de 75 e 100% observa-se uma manutenção das resistências obtidas.

Em relação ao teor de pré-molhagem, o mesmo não se mostrou significativo para a resistência à compressão destes concretos, fato observado quando realizado o teste “p” para este fator, esta variável apresentou um nível de confiança de 90%.

Em consonância com os resultados obtidos, Tabsh e Abdelfatah (2009) constata uma perda de resistência à compressão na ordem de 10% quando utiliza um ARC de resistência igual a 30 MPa e utilizando um ARC de resistência igual a 50 MPa, os autores encontram resistências similares para os concretos feitos com este tipo de ARC e para os concretos de referência. Os autores apontam também que é possível a inserção de até 50% de ARC em novas matrizes de concreto para fins estruturais, quando utilizando uma matriz “forte”, de baixa relação a/c.

Gomes e Brito (2009) trabalharam com a inserção de ARC em nova matriz de concreto, cuja relação a/c varia de 0,43 a 0,48, realizando substituições de AN por ARC nos teores de 12,5%, 25%, 50% e 100%. A partir dos resultados obtidos, os autores inferem que não há uma influência significativa na resistência à compressão quando se insere ARC. Esta conclusão, segundo os pesquisadores, deve-se ao fato de que o ARC adotado possui ainda cimento anidro assim como a matriz onde está sendo inserido é possui alta resistência, de maneira que o ARC não é o fator mais influente em relação à resistência à compressão. No presente trabalho, observou-se a queda de resistência a compressão apenas quando foi inserido o agregado de menor resistência. Quando utilizado ARC de resistência similar ou superior à resistência da matriz, não houve alteração na resistência à compressão, ressaltando-se que provavelmente não houve contribuição da hidratação do ARC, pois este já se encontrava com elevado grau de hidratação.

Xiao et al. (2005) realizaram um experimento com ARC, proveniente da reciclagem de concreto, com resistência e composição desconhecidos, em nova matriz de concreto, sendo que esta nova matriz possui resistência de 32,5 MPa. Empregando teores de substituições de agregado natural por ARC em níveis de 0, 30, 50, 70 e 100%, os autores obtiveram resultados de resistência à compressão até 8% maiores do que o resultado obtido para o concreto de referência.

Já os estudo realizado por Masce et al. (2003) apontam que em relação à resistência à compressão, os concretos confeccionados com ARC (com resistências variando entre 32 e 68 MPa) apresentaram redução de resistência à medida em que diminui a resistência do ARC.

Segundo Li (2008), com um teor menor do que 20% de substituição de ARC, não há alteração no comportamento mecânico do concreto.

No presente estudo observou-se que com o uso de ARC pode-se obter pequenos ganhos de resistência dependendo da composição da mistura, sendo que ao se utilizar agregados de menor resistência a redução da resistência à compressão foi sempre inferior a 10%.

Algumas ressalvas devem ser feitas em relação principalmente quando se pretende inserir um ARC de baixa resistência em uma matriz de alta resistência. Mas mesmo assim, controlando a qualidade da matriz, é possível tornar este resíduo um co-produto eficiente.

4.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

As médias dos dados obtidos para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, para os concretos com ARC estão expressos na tabela 13 e os resultados obtidos para cada amostra ensaiada constam no Anexo A. A ANOVA elaborada a partir destes dados é apresentada na tabela 14, contendo as influências das variáveis: tipo de agregado (FCAG), teor de agregado (TAG) e teor de pré-molhagem (TPM) sobre a resistência à tração por compressão diametral, assim como a representação gráfica dos efeitos isolados da influência dos fatores fixos podem ser visualizados nas figuras 39, 40 e 41.

Tabela 13. Médias dos resultados obtidos para resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Tipo de ARC	Teor de substituição (TAG)	Resistência (MPa)				
		Teor de pré-molhagem (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
18MPa (a/c 0,85)	25%		11,5		10,3	
	50%	9,6		8,8		8,8
	75%		8,8		9,1	
	100%	8,5		7,3		6,8
37MPa (a/c 0,56)	25%	8,7		10,7		10,0
	50%		10,8		10,1	
	75%	9,0		9,3		9,1
	100%		8,5		7,4	
50MPa (a/c 0,43)	25%		10,0,		8,8	
	50%	10,4		8,8		9,7
	75%		7,9		9,6	
	100%	8,3		8,5		9,4

O resultado médio da resistência à tração por compressão diametral para o concreto referência foi de 10,4 MPa.

Tabela 14. ANOVA para os dados de resistência à tração por compressão diametral.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância – p
FCAG	2	1,6849	0,842449	0,60	0,5523
TAG	3	45,1972	15,0657	10,70	0,0000
TPM	4	2,75245	0,688113	0,49	0,7441
Erro	80	112,669	1,40836		
Total Corrigido	89	166,164			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; FCAG = resistência do ARC; TAG = teor de ARC; TPM = teor de pré-molhagem.

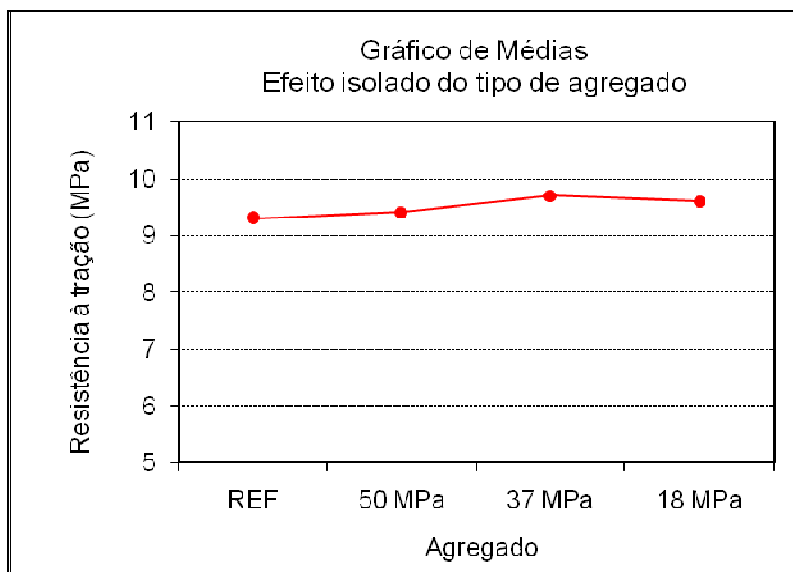


Figura 39. Influência do tipo de agregado na resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

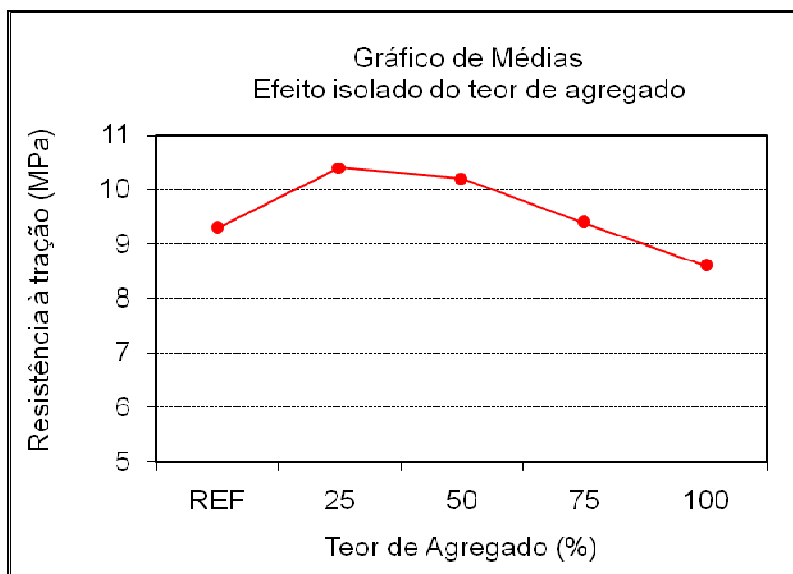


Figura 40. Influência do teor de agregado na resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

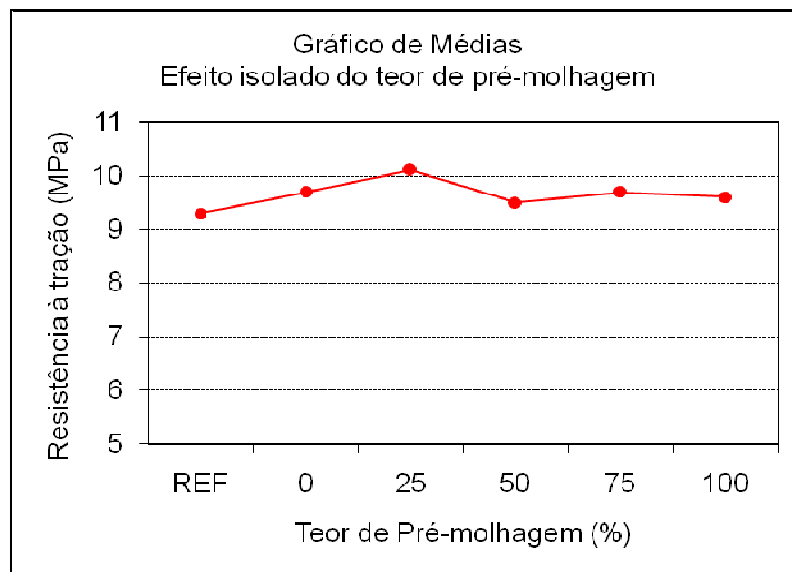


Figura 41. Influência do teor de pré-molhagem na resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

De acordo com ANOVA realizada para os dados de resistência à tração por compressão diametral, somente o fator “teor de agregado” mostrou significância estatística para o comportamento dos concretos estudados, pois o teste “p” apresenta um percentual de 99% de significância, ou seja, a variável “teor de agregado” é significativa para um limite de confiança de 99%.

Os fatores: “tipo de agregado”, representado pela resistência à compressão do agregado e o fator “teor de pré-molhagem” apresentaram para o teste “p” da ANOVA os valores de 0,55 e 0,74, respectivamente. Estes valores demonstram que estas variáveis de controle exerceram influência pouco significativa sobre a resistência à tração por compressão dos concretos com ARC.

Como hipótese inicial da pesquisa, estimava-se que a resistência à tração dos concretos sofresse alterações proporcionais à resistência à compressão, mas este comportamento não foi constatado. Acredita-se que a interface pasta/agregado deva ter influenciado os resultados dos ensaios de tração, que não apresentaram a queda de resistência esperada.

Fazendo uma análise do teor de pré-molhagem, isoladamente, sobre sua influência na resistência à tração, observa-se que há uma pequena variação de comportamento, porém esta variável não é estatisticamente significativa.

Quando se faz a análise individual dos fatores testados: tipo de ARC, teor de ARC e teor de pré-molhagem, como mostram as figuras 38, 39 e 40, observa-se que o tipo de ARC inserido no concreto não influencia na resistência à tração, seja qual for a resistência do ARC.

Levando em consideração somente o teor de ARC empregado, verifica-se que o comportamento é coerente com os resultados obtidos para a resistência à compressão, quanto maior o teor de ARC inserido na mistura, menor será a resistência à tração do material, sendo que o ponto de corte, onde ocorre esta redução de resistência, para os dois casos (resistência à tração e resistência à compressão) está a partir dos 50% de substituição de AN por ARC.

Verificando a influência de cada teor de ARC na resistência à tração, a inserção de 25% e 50% acarreta em um acréscimo na resistência de 7% e 4% respectivamente quando comparados ao concreto convencional, porém quando há um teor de ARC de 75% e 100%, observaram-se, em alguns casos, reduções de resistências de 4% até 36% em relação ao concreto de referência.

A redução da resistência à tração na faixa de 13% para um concreto com 100% de ARC também foi constatada por Topçu e Sengel (2004). Este percentual também é alcançado na pesquisa realizada por Katz (2003), este autor chega a uma redução de 9 a 13% da resistência à tração quando comparados com um concreto convencional.

A partir dos resultados apresentados é possível afirmar que utilizando um percentual de substituição de até 50% de AN por ARC em uma matriz de concreto, é possível gerar novos concretos com propriedades mecânicas similares às propriedades do concreto de referência.

4.2 DURABILIDADE

4.2.1 Absorção de água por capilaridade

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos para os concretos com ARC e concreto de referência, submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade durante 48 horas. Na tabela 15 estão compiladas as médias resultantes dos ensaios para todas as combinações realizadas e os resultados obtidos para a absorção capilar de água de cada amostra ensaiada para cada combinação feita constam no Anexo E. Os resultados estão expressos em de massa de água absorvida pela área de contato (g/cm^2) da amostra.

A absorção de água ao longo do tempo, para as combinações feitas com ARC de 18 MPa, estão ilustradas da figura 42 a figura 45. Os dados obtidos foram tratados estatisticamente e os resultados são apresentados nas tabelas 16 e 17.

Tabela 15. Médias dos resultados de Absorção de água para cada combinação (g/cm²).

TIPO DE ARC	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO (TAG)	TEOR DE PRÉ-MOLHAGEM (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
18MPa (a/c 0,85)	25%		0,5		0,7	
	50%	0,8		0,7		0,8
	75%		0,7		0,8	
	100%	0,8		0,8		0,8
37MPa (a/c 0,56)	25%	0,6		0,5		0,8
	50%		0,7		0,7	
	75%	0,6		0,8		0,8
	100%		0,8		0,8	
50MPa (a/c 0,43)	25%		0,6		0,6	
	50%	0,6		0,6		0,7
	75%		0,8		0,7	
	100%	0,8		0,8		0

Obs.: O concreto de referência absorve 0,5 g/cm².

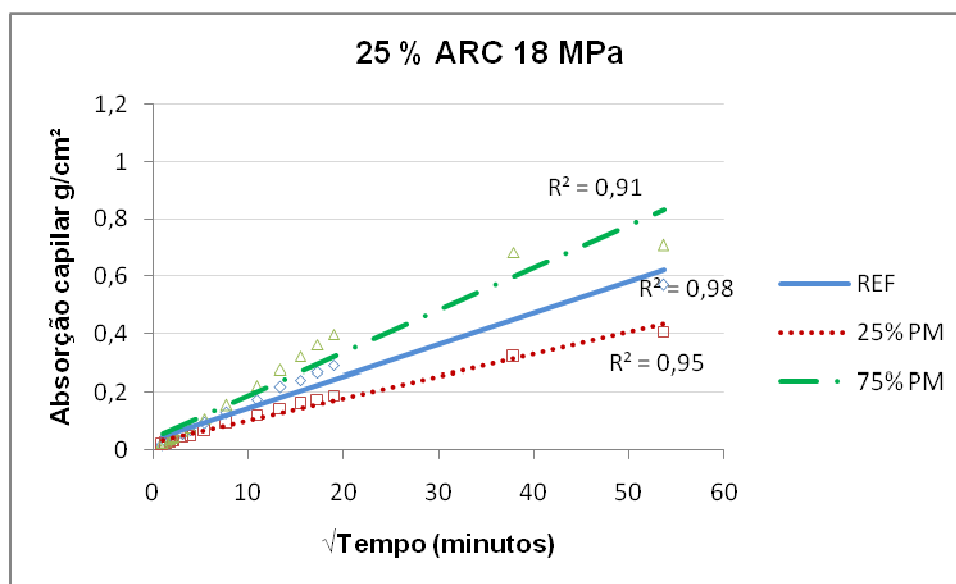


Figura 42. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 25% ARC 18MPa.

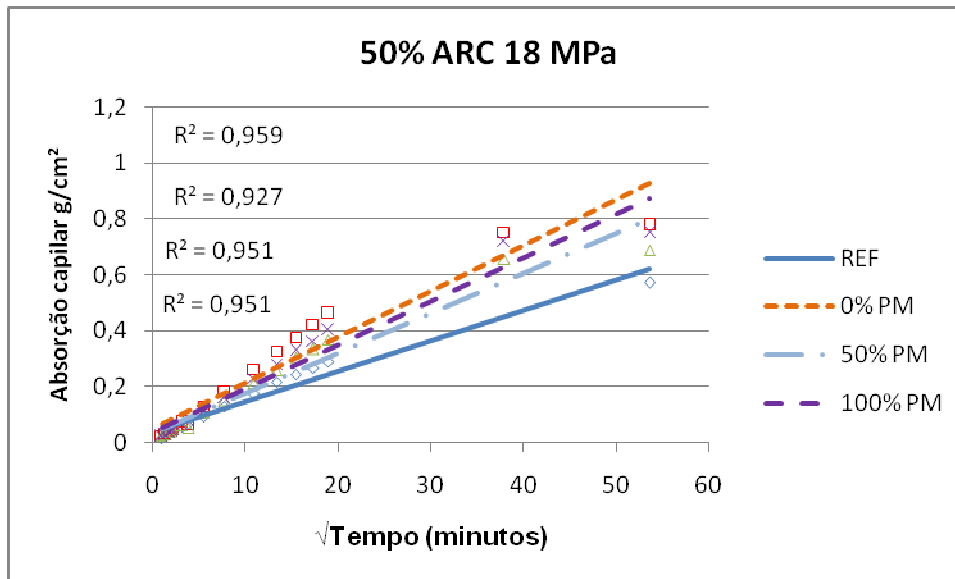


Figura 43. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 50% ARC 18MPa.

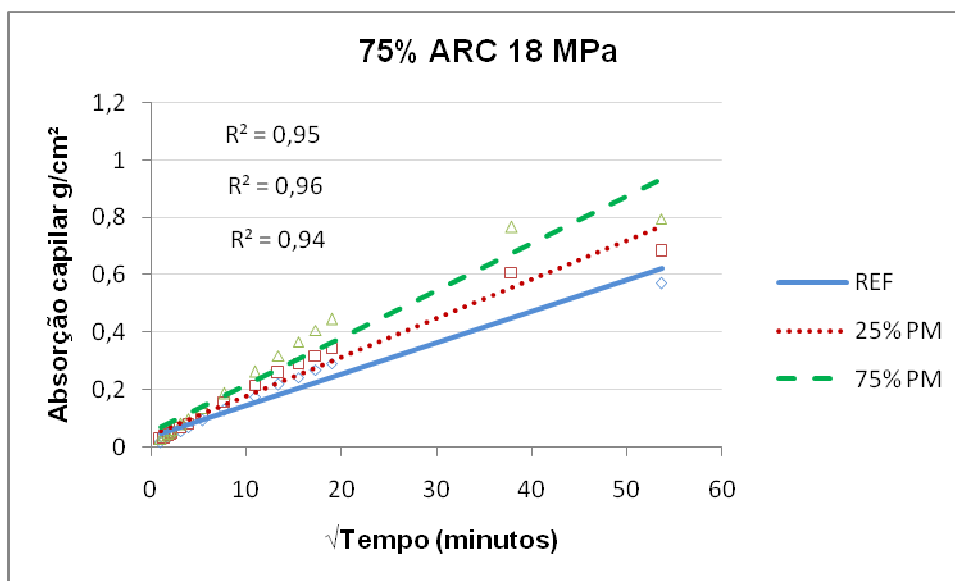


Figura 44. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 75% ARC 18MPa.

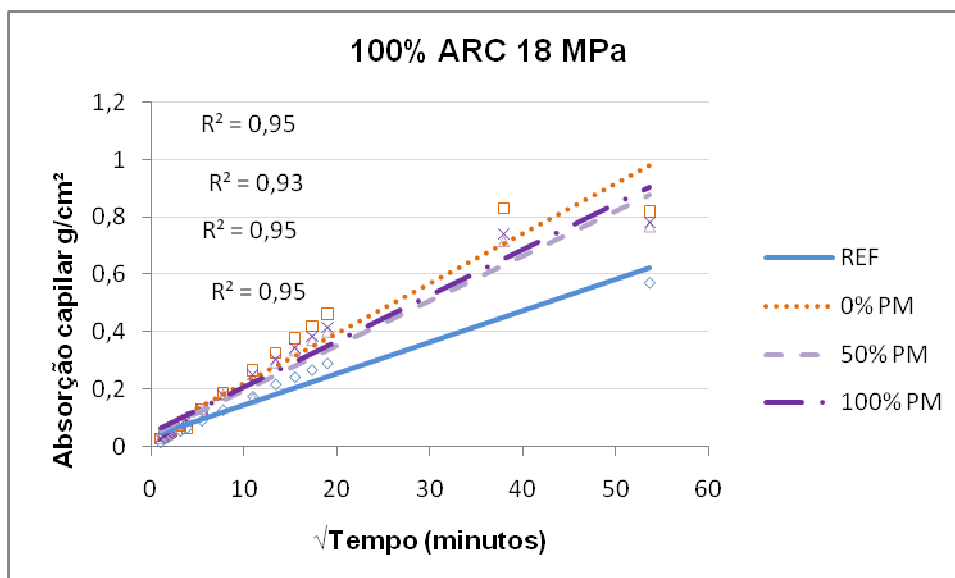


Figura 45. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 100% ARC 18MPa.

A partir da tabela 15 e dos gráficos apresentados da figura 42 à figura 45, considerando somente o coeficiente de determinação (r^2) alcançado pela reta que representa os dados obtidos pelo ensaio, pode-se admitir que o comportamento é bem explicado pelas regressões utilizadas. Quando comparado com o concreto de referência, o concreto que incorpora ARC de 18 MPa absorve até 35% a mais de água do que o concreto de referência durante um período de 48 horas de ensaio.

Analisando o fator “teor de ARC” nota-se que há uma tendência de aumento de absorção com o aumento do teor de ARC, embora pouco expressiva.

A absorção de água ao longo do tempo para os concretos que incorporam ARC de 37 MPa estão ilustradas das figuras 46 à 49.

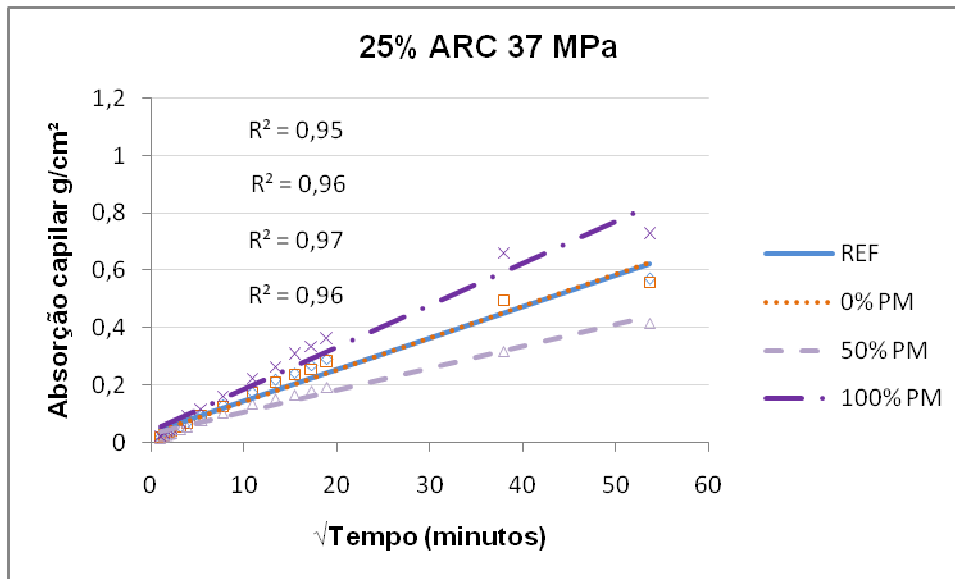


Figura 46. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 25% ARC 37MPa.

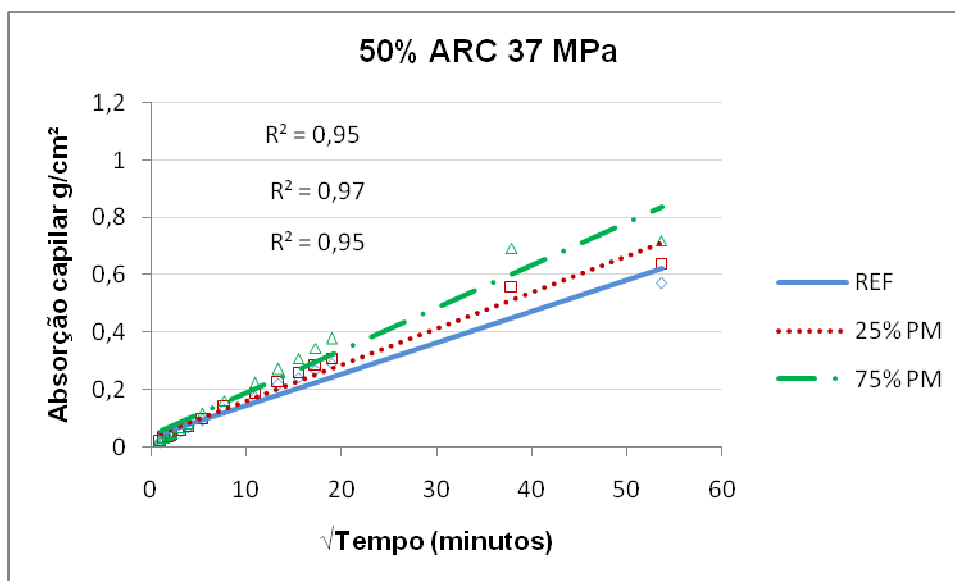


Figura 47. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 50% ARC 37MPa.

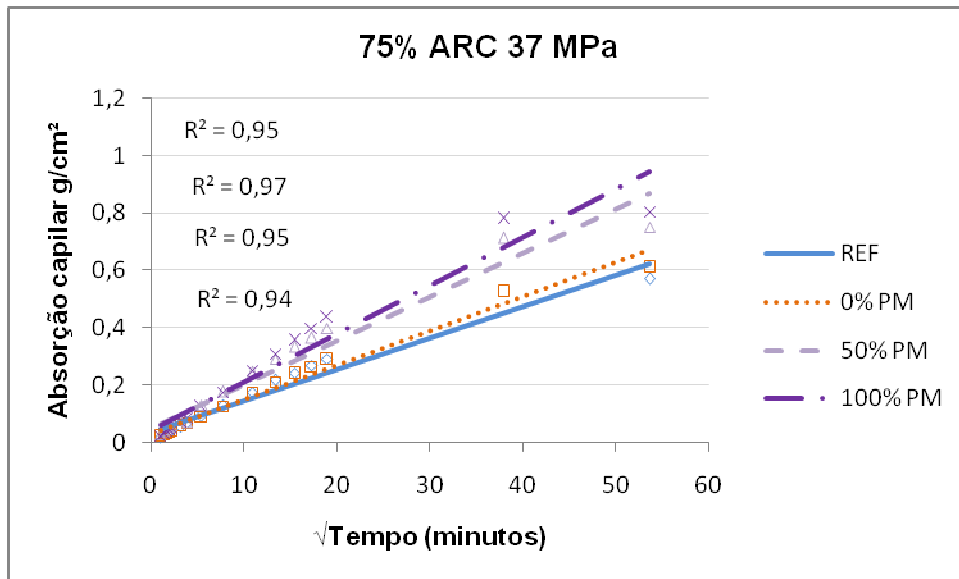


Figura 48. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 75% ARC 37MPa.

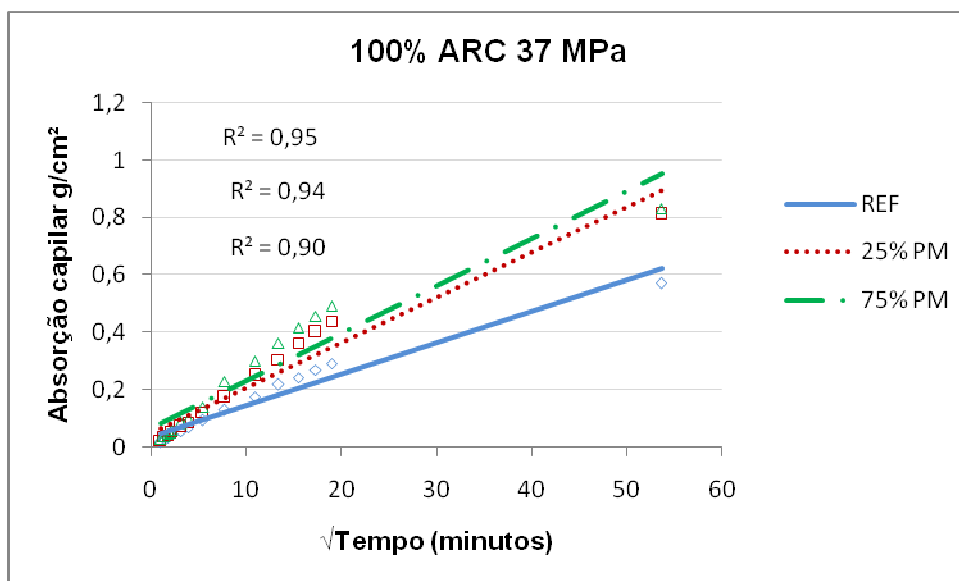


Figura 49. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 100% ARC 37MPa.

Todos os concretos com ARC de 37MPa sofreram um aumento na absorção de água, chegando a acréscimos de até 28% com relação ao concreto de referência. Analisando o fator “teor de ARC” nota-se que há uma tendência de aumento de absorção com o aumento do teor de ARC, embora pouco expressiva.

Nota-se que para esta matriz de combinações o fator “teor de pré-molhagem” se torna relevante para a absorção de água, exceto quando inserido um teor de ARC de 25%. Nos demais teores de ARC (50%, 75% e 100%), à medida em que aumenta o teor

de pré-molhagem há um aumento do percentual de absorção de água por estes concretos.

A figuras 50 a 53 apresentam o comportamento de absorção de água ao longo do tempo para os concretos com ARC de 50 MPa.

Todos os concretos com ARC de 50 MPa sofreram um aumento na absorção de água, chegando a acréscimos de até 26% com relação ao concreto de referência.

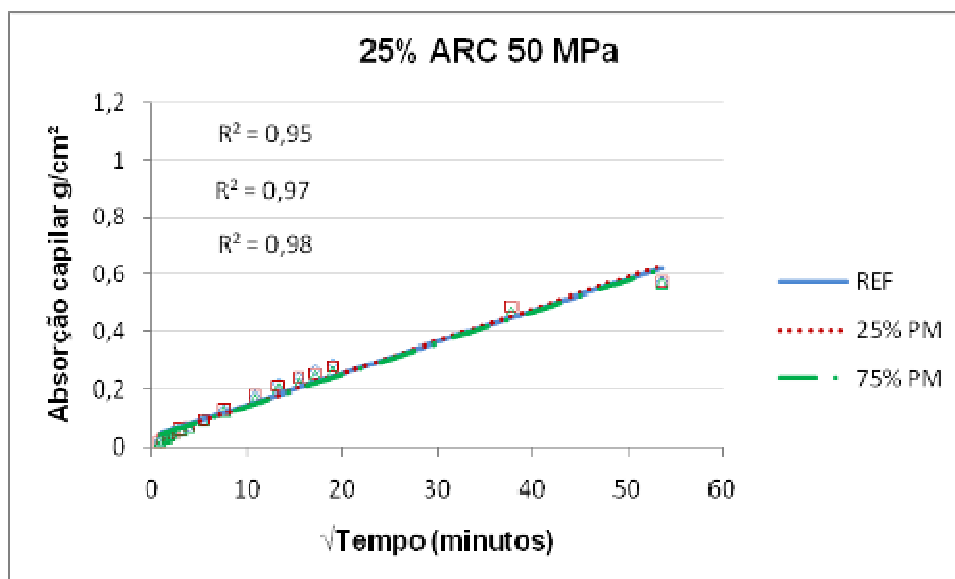


Figura 50. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 25% ARC 50MPa.

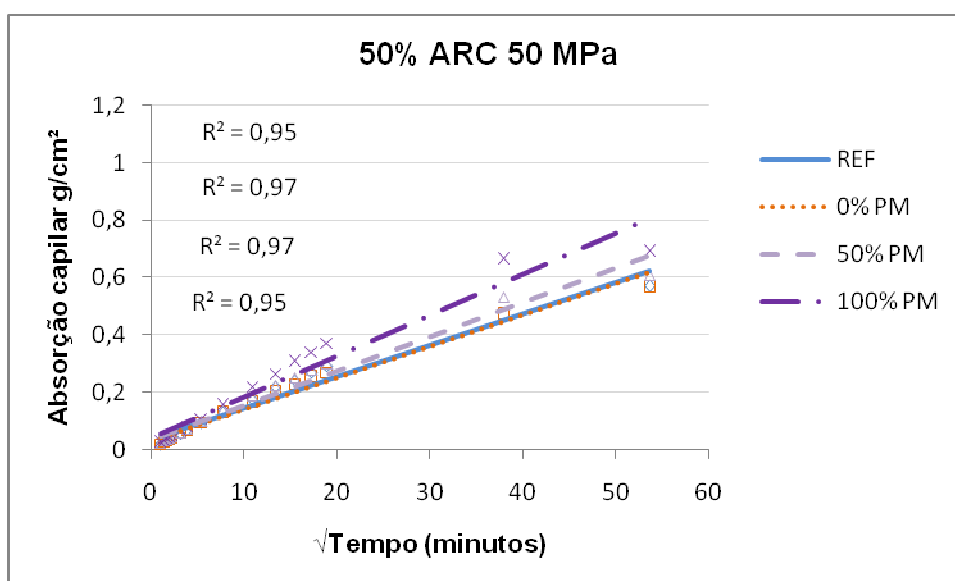


Figura 51. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 50% ARC 50MPa.

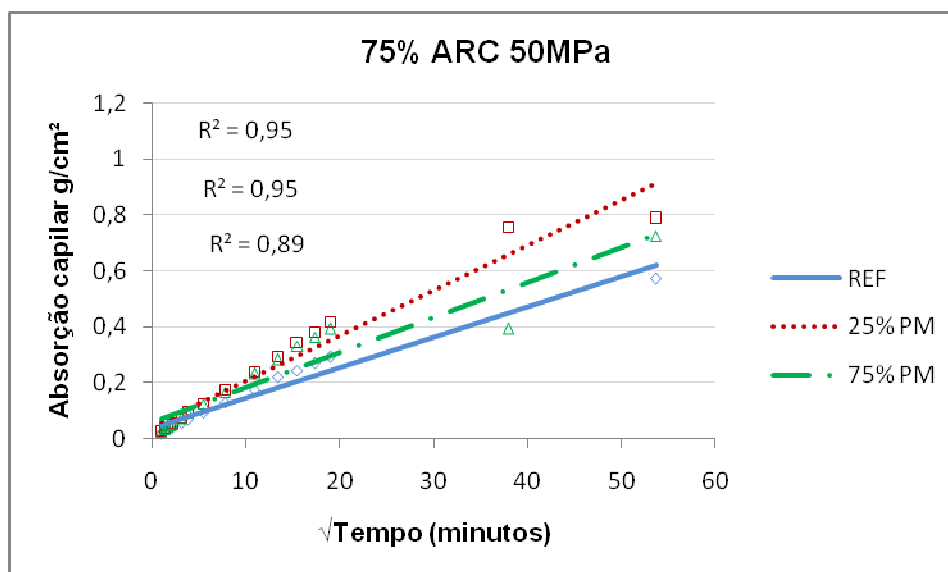


Figura 52. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 75% ARC 50MPa

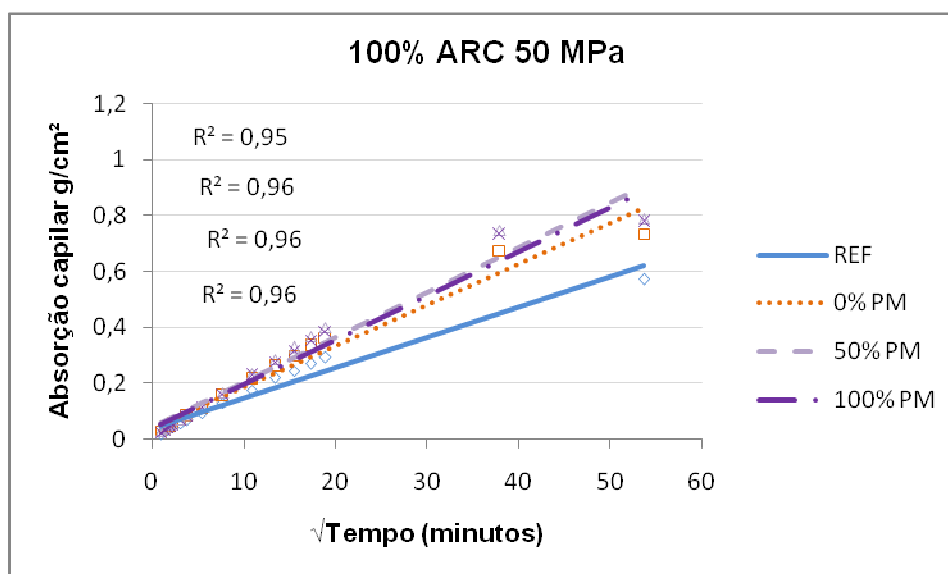


Figura 53. Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo – 100% ARC 50MPa

Analisando o fator “teor de ARC” nota-se que há uma tendência de aumento de absorção com o aumento do teor de ARC, embora pouco expressiva.

Analisando os fatores que influenciam este comportamento, nota-se, a partir de análise estatística, que novamente o fator “teor de pré-molhagem” não foi relevante.

Assim como visto para os concretos anteriores, que incorporam ARC de 18 MPa ou ARC de 37 MPa, também para o concreto com ARC 50 MPa, o fator “teor de ARC”

influencia nos resultados obtidos, pois há uma clara relação do aumento de absorção de água com o aumento do teor de ARC na mistura.

Analisando as três matrizes adotadas para a pesquisa, algumas observações são pertinentes quanto ao comportamento esperado pela pesquisadora. Os resultados obtidos pelo ensaio confirmam que utilizando um ARC mais poroso (ARC 18 MPa), este tornará o novo concreto mais poroso e conseqüentemente com maior potencial de absorção de água. Em relação ao ARC de 50 MPa, esperava-se que o concreto que o incorporasse apresentaria uma baixa absorção de água, porém o comportamento foi distinto do esperado, apresentando valores praticamente iguais ao concreto confeccionado com ARC de 37 MPa e razoavelmente próximo ao concreto confeccionado com ARC de 18 MPa. Observa-se que quando utilizado ARC de 18 MPa, 37 MPa e 50 MPa, estes concretos absorvem respectivamente, 35%, 28% e 26% mais água do que o concreto de referência.

Em função da especificação de uma matriz com resistência igual a 32 MPa, a inserção de um ARC com menor resistência, tende a resultar em um concreto com maior capacidade de absorção de água.

É importante salientar que além da qualidade do ARC empregado, a qualidade da matriz exerce uma grande influência nas propriedades do concreto com ARC. Uma matriz de alta qualidade pode ser o alvo dos concretos passíveis de incorporação de ARC sem grandes prejuízos nas suas propriedades.

4.2.1.1 Modelagem estatística da absorção de água por capilaridade

Foi realizada uma modelagem estatística do comportamento do fenômeno de absorção de água por capilaridade, sendo que o modelo matemático que melhor representa a absorção de água é apresentado na equação 3.

$$ABS_{H_2O} = b_0 + b_1 \times ACF + b_2 \times TAG + b_3 \times TPM + b_4 \times TPM^2 + b_5 \times ABS \\ \times ACF + b_6 \times ACF \times TPM + b_7 \times TAG \times TPM$$

Equação 3

Onde:

ABS_{H_2O} = absorção de água (g/cm^2);

TAG = teor de substituição de agregado (%);

TPM = teor de pré-molhagem (%);

ACF = relação água/cimento final;

ABS = absorção do agregado (%);

b_n = constantes da equação.

A análise de variância (ANOVA) do modelo proposto é apresentada na tabela 16 e os parâmetros calculados para os fatores analisados estão expressos na tabela 17.

Tabela 16. ANOVA do modelo para absorção de água por capilaridade.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância – p
Modelo	7	0,233059	0,0332942	12,28	0,0000
Resíduos	22	0,059673	0,00271079		
Total Corrigido	29	0,292697			

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

Tabela 17. Parâmetro das variáveis analisadas para a absorção de água por capilaridade.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	P
Constante	B0	1,46322	0,349455	4,18714	0,0004
ACF	B1	-1,67611	0,549887	-3,0481	0,0059
TAG	B2	0,00581171	0,00119515	4,86273	0,0001
TPM	B3	-0,0190954	0,00662685	-2,88153	0,0087
TPM ²	B4	0,0000526974	0,0000164424	3,20496	0,0041
ABS*ACF	B5	0,0282539	0,0110744	2,55127	0,0182
ACF*TPM	B6	0,0249873	0,00817842	3,05527	0,0058
TAG*TPM	B7	-0,0000443243	0,0000155035	-2,85899	0,0091

Onde: TAG = teor de substituição de agregado; TPM = teor de pré-molhagem; ACF = relação a/c final; ABS = absorção do agregado.

A análise de variância apresenta um coeficiente de determinação (r^2) = 0,7962, este coeficiente de determinação indica que o modelo proposto explica 80% dos dados analisados, sendo que obtendo um valor de “p” menor do que 0,01 aponta que as variáveis adotadas no modelo relacionam-se com um nível de confiança de 99%.

Esta análise permite constatar que mesmo tratando de um material com certa variabilidade, as variáveis que foram escolhidas para explicar o fenômeno, possuem uma significância estatística a um nível de 99%. Somente para a interação das variáveis ABS x ACF, observou-se um valor de “p” maior do que 0,01 (0,0180), mas mesmo

assim todas as variáveis apresentam relevância estatística. A equação 4 apresenta o modelo matemático ajustado para absorção de água.

$$\text{ABS}_{\text{H}_2\text{O}} = 1,46322 - 1,67611 \cdot \text{ACF} + 0,00581171 \cdot \text{TAG} - 0,0190954 \cdot \text{TPM} + 0,0000526974 \cdot \text{TPM}^2 + 0,0282539 \cdot \text{ABS} \cdot \text{ACF} + 0,0249873 \cdot \text{ACF} \cdot \text{TPM} - 0,0000443243 \cdot \text{TAG} \cdot \text{TPM}$$

Equação 4

Onde:

$\text{ABS}_{\text{H}_2\text{O}}$ = Absorção de água por capilaridade (g/cm²);

TAG = Teor de substituição de agregado (valores entre 25 e 100%);

TPM = Teor de pré-molhagem (valores entre 25 e 100%);

ACF = Relação água/cimento final (valores entre 0,55 e 0,86);

ABS = Absorção do agregado (valores entre 5,24 e 8,49%).

4.2.1.2 Análise a partir da modelagem estatística da absorção de água por capilaridade

Foi necessário realizar um ajuste na água de amassamento para alcançar o abatimento pré-determinado ($100 \pm 20\text{mm}$), mesmo fazendo-se uso da pré-molhagem. Nos traços onde o percentual de pré-molhagem varia de 0 a 50%, há necessidade de acréscimo de água na mistura e para os traços onde o teor de pré-molhagem é de 75 e 100% houve necessidade de redução na quantidade de água destinada à mistura do traço.

Através dos ajustes realizados para alcançar o abatimento estipulado, cada concreto resultou em uma relação a/c final distinta. Para avaliar o comportamento da influência dos agregados e demais variáveis, optou-se pela fixação (teórica) das relações a/c, estipulando-se três pontos contidos na variação do experimento, que são as relações a/c 0,55, 0,65 e 0,75.

A figura 54 apresenta o comportamento da absorção de água por capilaridade em relação aos fatores teor de pré-molhagem e teor de agregado, considerando-se três relações água/cimento fixas (0,55; 0,65 e 0,75).

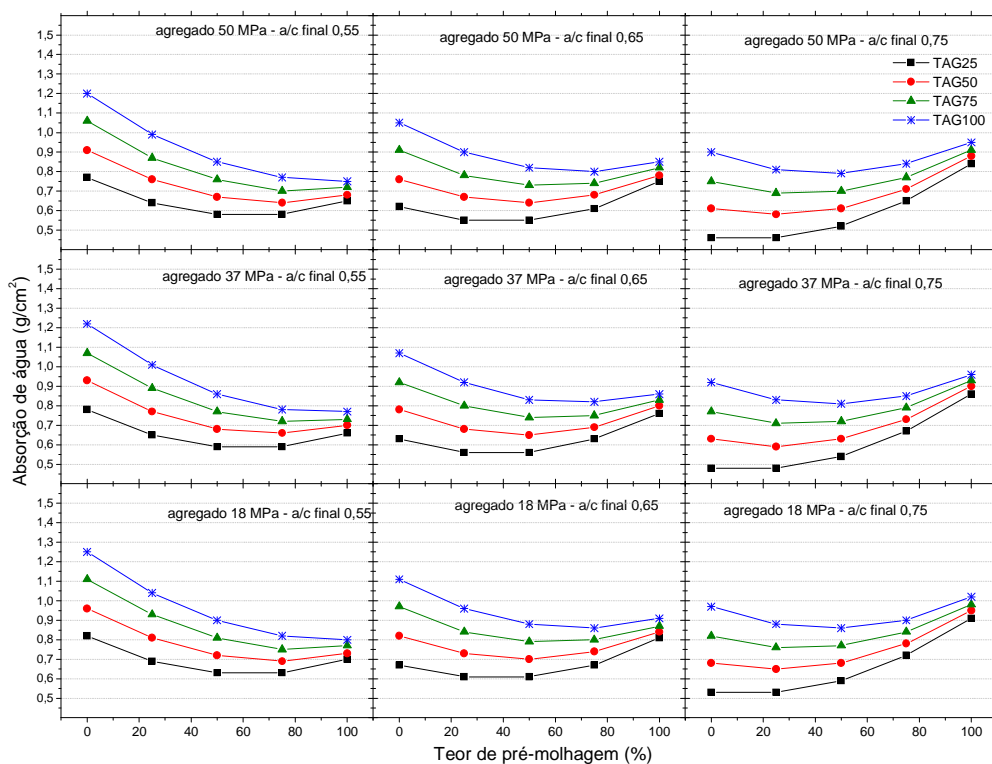


Figura 54. Apresentação do comportamento da absorção de água, considerando três níveis fixos de relação água/cimento.

A partir dos dados apresentados, nota-se que todos os concretos com ARC absorvem mais água do que o concreto de referência (que absorve $0,5 \text{ g/cm}^2$).

Observa-se também que, independente do tipo de agregado utilizado, quanto mais agregado é inserido no concreto, mais água ele absorve. Pequenos teores de ARC com maior relação a/c possuem maior absorção de água e este comportamento é observado para todos os tipos de ARC empregados.

Em relação à variável teor de pré-molhagem, observa-se que quanto menor for a relação a/c final da matriz, ou seja, quanto mais seco for o concreto e maior for o teor de pré-molhagem executado, menor a capacidade de absorção de água deste material, e menor a dispersão dos resultados.

Analisando os três níveis de relação a/c final (0,55, 0,65 e 0,75), nota-se que para cada relação a/c o comportamento entre os concretos com ARC de diferentes resistências é bastante similar, porém à medida em que se aumenta a relação a/c começa

a haver uma inversão na curva de comportamento, que fica evidente na relação a/c final de 0,75, a partir de 50% de pré-molhagem.

Procurando fazer uma analogia entre o presente estudo e os demais programas experimentais encontrados na bibliografia, nota-se, como mencionado anteriormente, uma grande diferença entre as metodologias adotadas pelos pesquisadores e em virtude desta questão, torna-se inviável uma comparação direta de resultados, portanto, procurou-se avaliar e comparar as tendências de comportamento de absorção entre os trabalhos estudados.

Gomes e Brito (2009), cujo experimento consiste na elaboração de concretos com ARC nos teores de 12,5, 25, 50 e 100% de substituição de agregados naturais por ARC. Os autores mencionam que a inserção deste material na nova matriz acarretou na mudança da relação a/c final dos concretos, variando de uma relação a/c = 0,43 até um concreto com relação a/c = 0,48 (em virtude da porosidade do ARC). Os autores realizaram o ensaio de absorção por capilaridade e encontraram concretos que absorvem no máximo 16,6% mais água do que o concreto referência.

Comparando este valor ao encontrado no presente estudo, pode-se inferir que os concretos produzidos absorvem até 35% mais água do que o concreto de referência, um valor bastante elevado quando comparado aos dados apresentados por Gomes e Brito (2009). Porém o presente estudo possui uma matriz com relação a/c = 0,64, mais porosa do que a utilizada na pesquisa de Gomes e Brito (2009), cuja relação a/c, na pior situação, foi de 0,48. Este fato por si só explica a grande diferença de percentuais e exemplifica a dificuldade de comparação dos dados, no entanto, comprova que independente da relação a/c da matriz e qualidade dos ARC, um concreto produzido com ARC absorve mais água do que um concreto convencional.

Olorunsogo e Padayachee (2002) apontam o mesmo fato em relação à absorção de água. Os autores complementam que a absorção de água também é dependente do tempo e das condições de cura a que este novo material é submetido.

Cabral (2007) constata que a porosidade do concreto confeccionado com ARC é influenciada pelo formato angular das partículas de ARC, pois gera um material com maior índices de vazios e conseqüentemente mais poroso.

Avaliando os dados obtidos por Levy (2001) para o ensaio de absorção por imersão, considerando que o autor utiliza ARC em uma matriz de concreto 30MPa,

realizando substituições dos agregados naturais pelos reciclados em teores de 20, 50 e 100%, encontram-se resultados similares aos obtidos pela presente pesquisa, de acordo com os dados expressos na tabela 18.

Tabela 18. Comparação de dados de absorção encontrados para Levy (2001) e o presente estudo.

Levy (2001)		Presente Estudo	
Teor de ARC (%)	Absorção (%)	Teor de ARC (%)	Absorção (%)
0	6,6	0	4,4
20	6,3	25	5,2
50	7,0	50	6,1
100	8,0	100	7,3

4.2.2 Verificação da diferença da carbonatação entre concreto novo e ARC

A verificação das diferenças de comportamento da carbonatação entre os concretos com e sem ARC foi realizada por dois métodos: análise visual de exemplares carbonatados e verificação do coeficiente de variação entre os dois tipos de concreto.

Partindo do pressuposto que haveria diferenças no processo de carbonatação para os concretos com ARC, uma vez que os ARC possuem diferentes porosidades, procurou-se verificar se regiões com maiores profundidades de carbonatação que correspondem à presença de ARC. Após a aspersão de fenolftaleína nos corpos-de-prova carbonatados, estes foram acondicionados em sala com temperatura e umidade controlada ($T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 70\% \pm 5\%$). Decorridos 7 dias da aspersão os corpos-de-prova foram inspecionados para se identificar os ARC e verificar se eles correspondem à regiões com maiores profundidades de carbonatação, realizando desta forma uma análise do perfil de carbonatação para os concretos de referência e nos concretos com ARC.

A figura 55 apresenta a amostra do concreto de referência recém aspergido e após uma semana de aspersão de fenolftaleína e as figuras 56 e 57 ilustram a diferença observada para concretos confeccionados com ARC 18 MPa após 7 dias de aspersão.

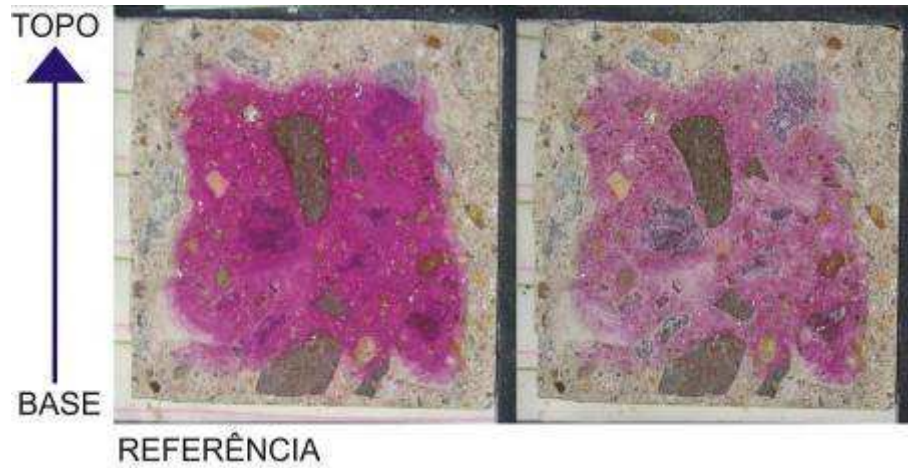


Figura 55. Concreto de referência com aspersão imediata e após 7 dias.

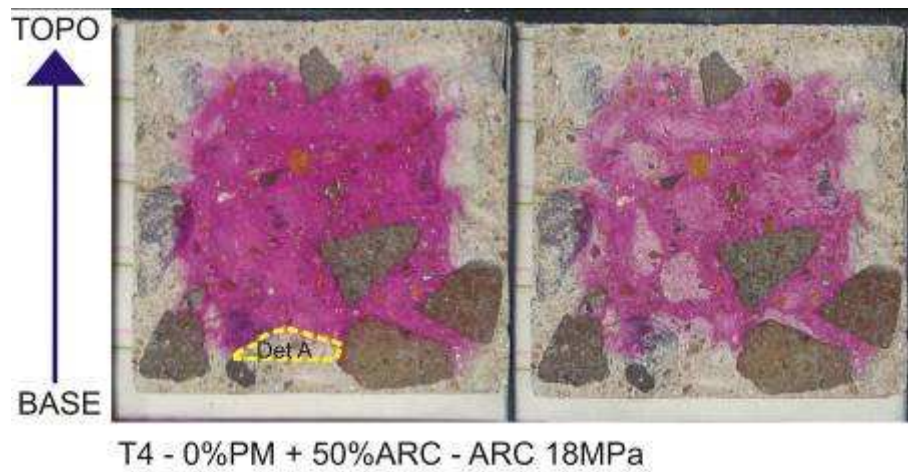


Figura 56. Amostra T4 com aspersão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.

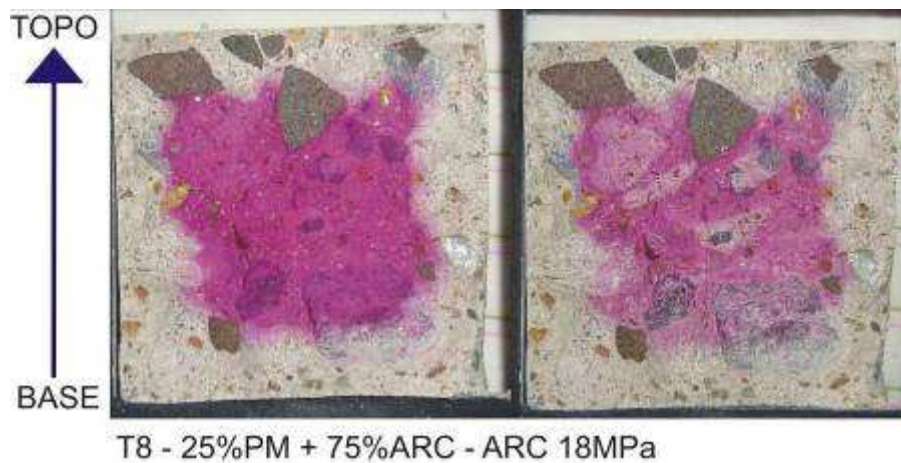


Figura 57. Amostra T8 com aspersão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.

Realizando uma análise visual das amostras, pode-se inferir, através da diferença de coloração proporcionada pela reação da fenolftaleína em contato com o ambiente da sala (que contém CO_2), que as parcelas descoloridas constituem o ARC de 18 MPa. Em função de o ARC ser mais poroso, há uma maior facilidade para a penetração do CO_2 , proporcionando desta forma a diferença de cor que permite a sua identificação. Conforme o detalhe A da figura 56 pode-se observar que no local onde se identifica um ARC mais poroso, este proporcionou uma maior profundidade de carbonatação. Estas imagens permitem inferir que para um ARC de 18 MPa, há uma maior velocidade de carbonatação quando comparada com a pasta do concreto, cuja resistência é de 32,5 MPa.

Entretanto, esta diferença é pouco expressiva quando comparamos as profundidades de carbonatação entre ARC (37 e 50 MPa), conforme pode-se visualizar nas figuras 58 a 61.

Analisando as imagens 58 e 59, referentes à inserção de ARC de 37 MPa em uma matriz de concreto de 32 MPa, observa-se que praticamente há uma perda homogênea da coloração após uma semana de aspersão da fenolftaleína, ou seja, há uma descoloração uniforme entre a matriz e o ARC, pois ambos apresentam resistências similares.

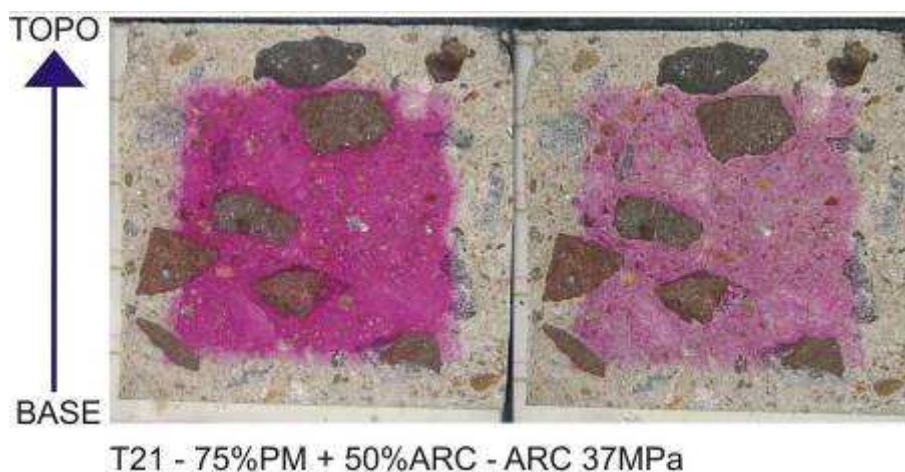


Figura 58. Amostra T21 com aspersão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.

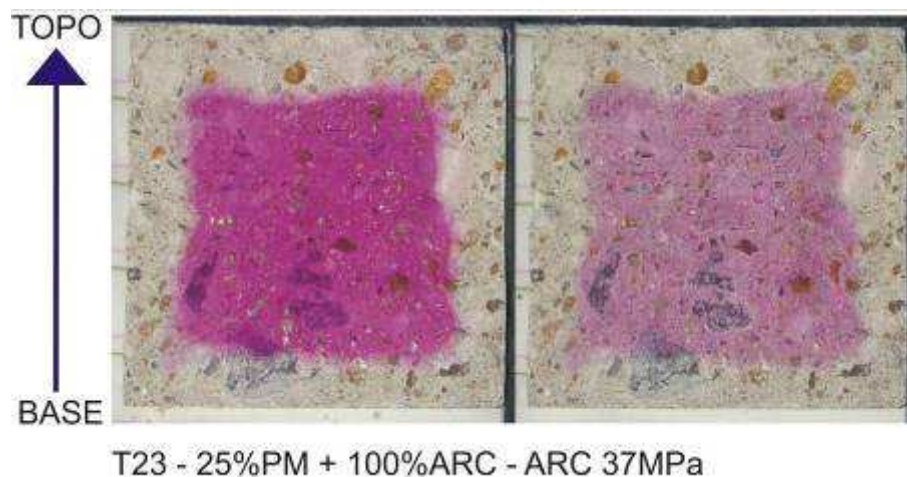


Figura 59. Amostra T23 com aspensão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.

Com base nas imagens 58 e 59, não é possível distinguir a parcela referente à pasta e a parcela referente à argamassa que compõe o ARC. Este comportamento se dá em função dos componentes, pasta e ARC, possuírem porosidades semelhantes e proporcionarem uma velocidade de carbonatação semelhante entre a pasta e o ARC.

Quando a última situação proposta pelo programa experimental foi analisada, a inserção de um ARC menos poroso (50 MPa) dentro de uma matriz mais porosa (32,5 MPa), o resultado é similar ao encontrado no concreto de referência, onde o agregado se comporta como uma “barreira” contra a carbonatação. As imagens 60 e 61 exemplificam o resultado desta combinação após 7 dias da aspensão da fenolftaleína nas amostras carbonatadas.

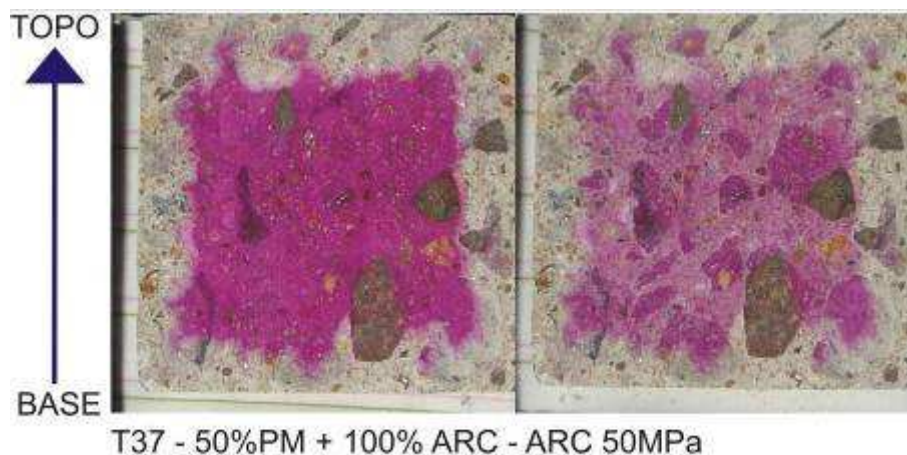


Figura 60. Amostra T37 com aspensão imediata de fenolftaleína e após 7 dias.

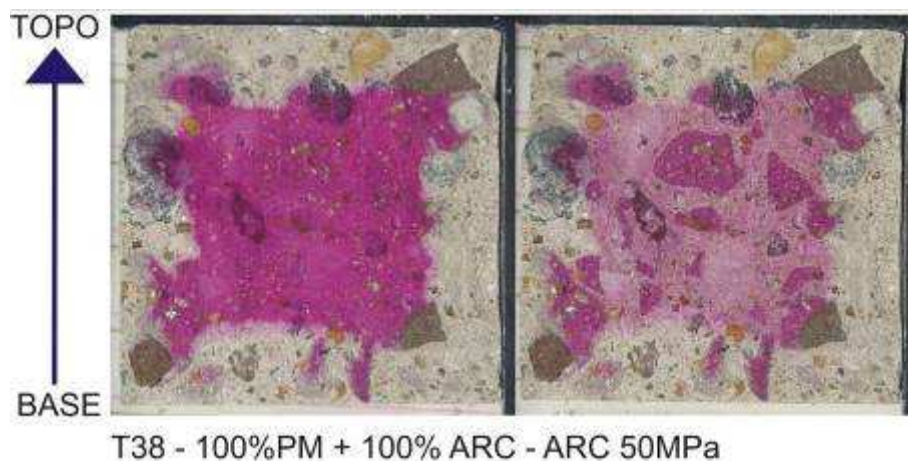


Figura 61. Amostra T38 com aspersione imediata de fenolftaleína e após 7 dias.

As figuras, 60 e 61 apresentam diferenças expressivas de coloração, permitindo identificar com clareza a parcela referente ao ARC e a parcela referente à pasta do concreto novo. Através das figuras é possível constatar que na pasta houve uma maior velocidade de carbonatação em relação ao ARC.

Esta velocidade de carbonatação diferenciada torna-se evidente em função da diferença de porosidade observada para a pasta do concreto novo e para o ARC. Portanto, nos locais onde há um ARC de 50 MPa (menos poroso) a carbonatação ocorre mais lentamente do que na matriz (que é mais porosa).

As figuras apresentadas para os tipos de ARC empregados neste programa experimental denotam que existem diferenças na velocidade da carbonatação, quando utilizados ARC com diferentes porosidades em concretos expostos a uma condição natural de carbonatação.

4.2.3 Profundidade de carbonatação

Após a aspersione todos os corpos-de-prova foram fotografados para posterior determinação da profundidade carbonatada. As medidas de profundidade de carbonatação foram obtidas através da média da profundidade de carbonatação utilizando-se para tal o software *Image Tool*. Partindo-se da premissa de que o uso do ARC pode gerar uma grande variação na profundidade de carbonatação entre as zonas correspondentes ao concreto novo e as zonas correspondentes ao material reciclado, decidiu-se verificar se a utilização da média é afetada para este tipo de concreto.

Para tal verificou-se os coeficientes de variação, os valores máximos e mínimos de cada grupo constituído por ARC de diferentes resistências (18, 37 e 50 MPa), apresentados no Anexo F.

A figura 62 corresponde a todos os valores de profundidade de carbonatação, obtidos aos 147 dias, para cada resistência de ARC.

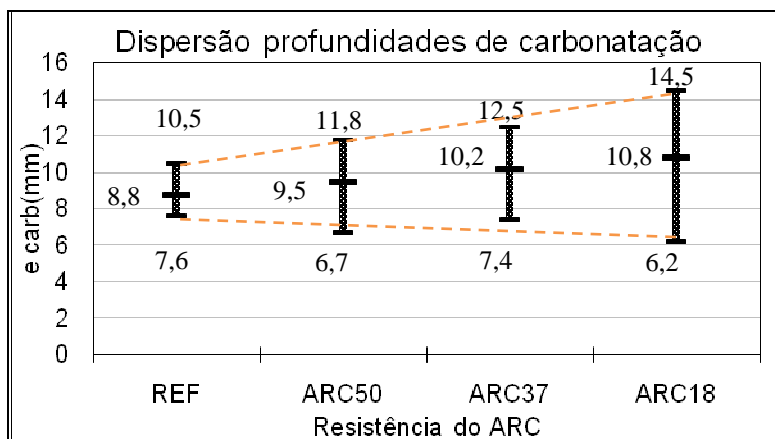


Figura 62. Dispersão das profundidades de carbonatação aos 147 dias.

A partir destes resultados pode-se inferir que quando é inserido ARC na nova matriz de concreto, as médias se mantêm em uma posição intermediária entre os valores máximos e mínimos. Observa-se também que para os ARC de 37 e 50 MPa, o coeficiente de variação é maior do que para o concreto de referência, sendo que quando se utiliza um ARC de 18 MPa (mais poroso), nota-se o maior coeficiente de variação.

Com base nos resultados obtidos, pode-se averiguar que não houve diferenças sensíveis entre os dois métodos, pois utilizando a média da profundidade de carbonatação (com software *ImageTool*) ou considerando 90% das medidas lidas (com software *Auto CAD*), ambos representam bem o comportamento verificado, portanto, visando a agilidade no momento de verificação da profundidade de carbonatação sugere-se o uso do software *Image Tool*, que permite rapidamente realizar este trabalho sem perder a qualidade da informação gerada.

O detalhamento do trabalho encontra-se nos itens 3.4.8.1 e 3.4.8.2.

A tabela 19 apresenta as médias de profundidade de carbonatação obtidas para a última idade ensaiada (147 dias), juntamente com os coeficientes de difusão de CO₂ obtidos para cada traço. As médias de profundidade de carbonatação ao longo do tempo (1 a 147 dias) estão expressas na em Anexo F.

Tabela 19. Médias das profundidades de carbonatação e coeficientes de difusão de CO₂.

TIPO DE ARC	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO (TAG)	e carb (mm) K e carb (mm/t ^{1/2})				
		0% PM	25% PM	50% PM	75% PM	100% PM
18 MPa (a/c 0,85)	25%		11 mm 0,9		8 mm 0,7	
	50%	8 mm 0,8		9 mm 0,8		11 mm 0,9
	75%		12 mm 1,0		12 mm 1,0	
	100%	13 mm 1,1		12 mm 1,0		12 mm 1,0
37MPa (a/c 0,56)	25%	9 mm 0,8		10 mm 0,8		8 mm 0,7
	50%		11 mm 0,9		10 mm 0,8	
	75%	11 mm 0,9		10 mm 0,8		10 mm 0,8
	100%		11 mm 0,9		11 mm 0,9	
50MPa (a/c 0,43)	25%		11 mm 0,9		9 m 0,7	
	50%	11 mm 0,9		9 mm 0,7		9 mm 0,7
	75%		10 mm 0,8		9 mm 0,7	
	100%	9 mm 0,7		10 mm 0,8		10 mm 0,8

Obs.: Profundidade de carbonatação para concreto de referência 9 mm e K = 0,7

4.2.3.1 Modelagem estatística da profundidade de carbonatação

A equação matemática utilizada para modelar os dados obtidos a partir das médias (média de 6 valores observados) de profundidade de carbonatação é apresentada na equação 5. Esta equação foi adaptada do modelo utilizado por Kulakowski et al. (2009).

$$E_c = EXP \times (b_0 + (b_1/FC) + (b_3/ACF) + (b_{12} \times TAG/FC) + (b_{23} \times ACF/TAG)) \times (T^{b_4})$$

Equação 5

Onde:

E_c = profundidade de carbonatada (mm);

FC = resistência do concreto de origem do agregado (MPa);

ACF = relação água/cimento final;

TAG = Teor de substituição de agregado (valores entre 25 e 100%);

b_n = constantes da equação.

Obs.: este modelo não contém a variável TPM pela razão da mesma mostrar pouca significância no comportamento do material, de acordo com a análise de variância expressa na tabela 20 e 21.

Tabela 20. ANOVA do modelo para profundidade de carbonatação.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância – p
Modelo	6	6758,96	1126,49	3173,38	0,0000
Resíduos	204	72,4162	0,35981		
Total Corrigido	209	2551,84			

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

Tabela 21. Parâmetro das variáveis analisadas para profundidade de carbonatação.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	P
CONSTANTE	b0	-1,28513	0,188477	6,8185	0,0000
FC	b1	-18,8571	2,573	7,32884	0,0000
ACF	b3	0,172024	0,0698678	2,462136	0,0073
TAG*FC	b12	11,6286	1,47938	3,482411	0,0000
ACF*TAG	b23	0,77336	0,222046	7,860455	0,0003
T	b4	1,20895	0,0236006	51,22539	0,0000

Onde: FC = resistência do agregado, ACF = relação a/c final, T = tempo de exposição ao CO₂, TAG = teor de agregado

O coeficiente de determinação (r^2) apresentado pela análise de variância foi de 0,97, ou seja, o modelo proposto explica 97% dos dados observados para o fenômeno da carbonatação ao longo do tempo. O modelo permite avaliar ainda, que as variáveis estipuladas possuem significância estatística com 99% de confiança, pois apresentam um teste “p” inferior a 0,01. O modelo matemático ajustado que melhor representou o comportamento da profundidade de carbonatação ao longo do tempo está expresso na equação 6.

Cabe salientar que o fator TAG (teor de agregado) não foi significativo para o modelo proposto quando avaliado isoladamente, por outro lado quando submetido a interações com os demais fatores, este mostrou-se significativo. Portanto, o fator isolado TAG, não consta no modelo ajustado.

$$EC = \text{EXP}(1,28513 + (18,8571/FC) + (0,172024/ACF) + (11,6286 * TAG/FC) + (0,77336 * ACF/TAG)) * (T^{1,20895})$$

Equação 6

Onde:

EC = profundidade de carbonatada (mm);

FC = resistência do concreto de origem do agregado (MPa);

ACF = relação água/cimento final;

TAG = Teor de substituição de agregado (valores entre 25 e 100%).

4.2.3.2 Análise a partir da modelagem estatística da profundidade de carbonatação

A figura 63 apresenta o comportamento dos concretos em relação ao fenômeno da carbonatação ao longo do tempo. Para realizar esta análise optou-se por utilizar o parâmetro da relação a/c fixo (teórico) de maneira que se pudesse focar na influência do tipo de agregado e teores de substituição quanto à carbonatação.

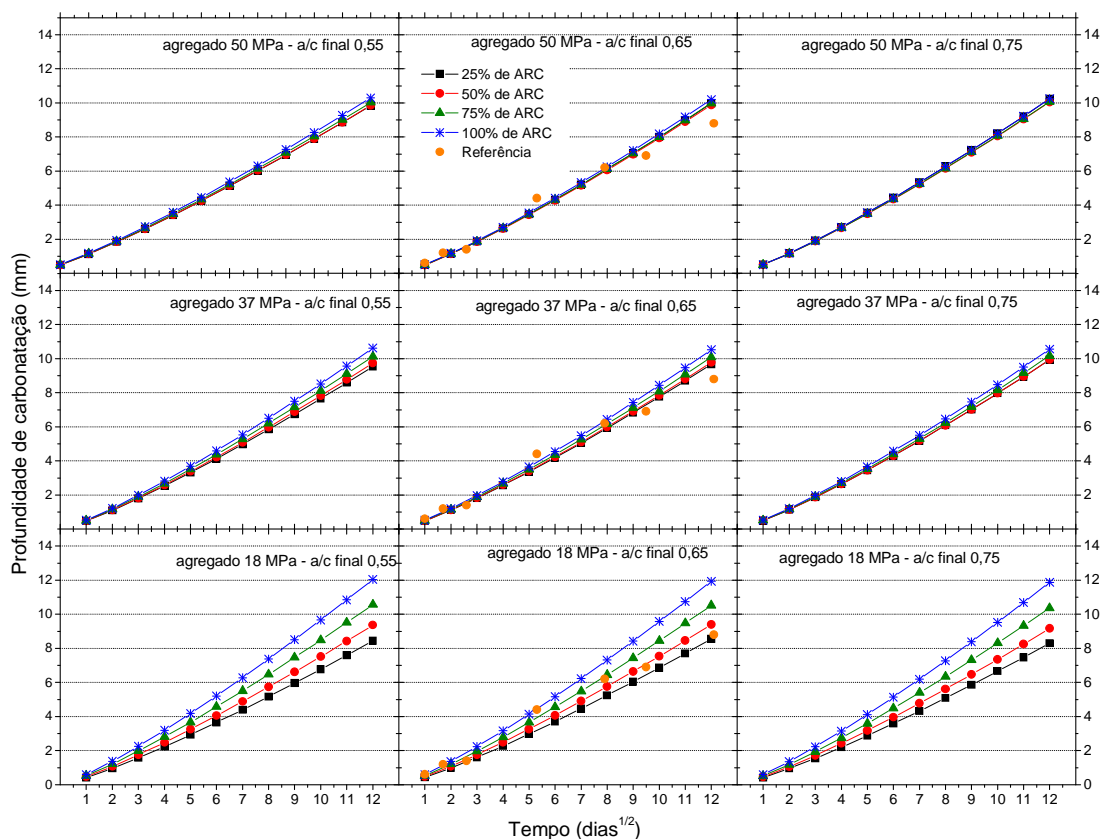


Figura 63. Comportamento dos concretos com ARC frente à carbonatação ao longo do tempo.

Conforme os gráficos plotados na figura 54, pode-se compreender que, quanto aos concretos feitos com ARC 50 MPa, o teor de agregado praticamente não exerce influência sobre a frente de carbonatação. Nota-se que as profundidades modeladas dos concretos com ARC 50 MPa, para três níveis fixos de relação a/c são muito próximas entre si, assim como são próximas da profundidade de carbonatação modelada para o concreto de referência.

Quando é inserido um ARC de 37 MPa, nestes mesmos níveis fixos de relação a/c, o comportamento da evolução da carbonatação é praticamente o mesmo para todos os concretos com ARC, mantendo uma diferença pouco significativa sobre a profundidade de carbonatação de acordo com TAG, ou seja quanto maior o teor de agregado há mais profundidade de carbonatação, porém a diferença de profundidades entre os concretos é muito similar. Para os concretos com este ARC a profundidade de carbonatação é maior do que para o concreto de referência.

Realizando uma análise geral dos resultados obtidos, pode-se observar que existem diferenças de comportamento frente à profundidade de carbonatação de acordo com a resistência do ARC inserido na matriz. Quando incorporado um ARC de 18 MPa, mais poroso, observa-se uma maior profundidade de carbonatação em relação aos demais concretos, fato que não ocorre quando se insere agregados com resistência igual ou superior à resistência da matriz. Este é o mesmo comportamento observado para os coeficientes de difusão do CO_2 nos concreto com ARC (relacionados no Anexo F). A inserção de um ARC mais poroso acarreta em um maior coeficiente de difusão e com a inserção de um ARC menos poroso, há uma dificuldade na passagem do gás, portanto há um menor coeficiente de difusão do CO_2 .

Analisando os concretos feitos com ARC de 37 MPa e 50 MPa, nota-se que o comportamento entre estes concretos é bastante similar. Em relação ao TAG, pode-se notar que há um TAG limite que influencia na profundidade de carbonatação que é de 50%. De maneira geral, quanto mais ARC é inserido, maior é a profundidade de carbonatação alcançada por este material.

Para Wu e Song (2006) apud Li (2008), quanto maior é o teor de ARC, maior é a profundidade de carbonatação. Os autores afirmam que a profundidade de carbonatação é 62% maior do que a carbonatação em um concreto de referência para os concretos que incorporam 60% de ARC e complementam que a alta porosidade do ARC é responsável pelo fenômeno. Katz (2003) confeccionou concretos com ARC parcialmente hidratado, sendo que as amostras permaneceram em sala com temperatura e umidade controladas ($T = 20^\circ\text{C}$ e $\text{UR} = 60\%$) durante um período de 6 meses, logo após foram submetidos à carbonatação acelerada com 5% de CO_2 , as amostras foram testadas nas idades de 3 e 7 dias, e os resultados encontrados apontam para uma profundidade de carbonatação entre 1.3 a 2.5 vezes maior do que a profundidade de carbonatação para o concreto de referência. Embora os artigos não explicitam a resistência do ARC, estima-se que seja inferior à da matriz.

Em seu trabalho, Levy (2001) encontra uma forte relação linear entre o coeficiente de carbonatação e a relação a/c , conforme aumenta a relação a/c , há um aumento na profundidade carbonatada. O autor, que utiliza teores de substituição de 20, 50 e 100% de ARC (32,5 MPa) em matriz cujo $f_{c,j} = 20, 30$ e 40 MPa, encontra maiores profundidades de carbonatação para os concretos de referência do que para os concretos

provenientes da combinação destes fatores, após 28 dias de permanência em câmara com 12% de CO₂. Os resultados encontrados por Levy (2001) estão expressos na tabela 22.

Tabela 22. Dados obtidos por Levy (2001) para profundidades de carbonatação aos 28 dias de exposição.

Concretos	e- carb (mm)		
	20MPa	30MPa	40MPa
Referência	9,6	6,0	3,5
20% ARC	5,5	3,9	2,7
50% ARC	5,0	3,4	2,3
100% ARC	7,7	5,2	3,4

Considerando o programa experimental adotado pelo autor (LEVY, 2001), é possível fazer uma analogia somente em relação à parcela do experimento que insere o ARC de 35,5 MPa em uma matriz de $f_{cj} = 30$ MPa, estes dados podem ser comparados aos obtidos por este experimento, pois parte dos resultados são advindos de concretos com ARC de 37 MPa inseridos em matriz cujo $f_c = 32,5$ MPa. Comparando as profundidades de carbonatação encontradas pelo referido autor, com as profundidades de carbonatação encontradas por esta pesquisa, pode-se concluir (resguardadas as especificidades de metodologia, como TPM e % de CO₂) que os valores encontrados são relativamente próximos, de acordo com os dados expressos na tabela 23.

Tabela 23. Valores de profundidade de carbonatação para 28 dias de ensaio acelerado no presente estudo.

Teor de ARC (TAG)	e-carb (mm)				
	0%PM	25%PM	50%PM	75%PM	100%PM
25% ARC 37MPa	3,7		3,3		3,7
50% ARC 37MPa		4,1		3,5	
100% ARC 37MPa		3,3		4,4	

Profundidade de carbonatação aos 28 dias de ensaio acelerado para o concreto referência = 4,4 mm

Obs.: Para efeito de comparação, foram suprimidos os dados obtidos para os concretos confeccionados com TAG = 75%, em virtude deste teor não ter sido testado por Levy (2001).

Observa-se que há uma inversão no comportamento da profundidade carbonatada entre o concreto de referência e os concretos com ARC, entre as idades de carbonatação de 28 e 147 dias.

Em estudo realizado por Gomes e Brito (2009), os autores utilizam um tipo de ARC, cujo percentual de absorção é de 8,49%, material similar ao ARC de 18 MPa utilizado nesta pesquisa, que possui um percentual de absorção de 8,5%, porém a variação da relação a/c do experimento situa-se entre 0,43 (concreto referência) até 0,48 e do presente experimento variação da relação a/c está na entre 0,55 e 0,86. Os autores adotaram diferentes teores de agregado (12,5%, 25%, 50% e 100%), sendo que os agregados foram pré-saturados antes da mistura e após confeccionados os concretos, estes foram expostos em câmara com concentração de 5% de CO₂. De acordo com as medidas de carbonatação verificadas para estes concretos aos 7, 28, 63 e 90 dias, os autores constatarem que até aos 28 dias as diferenças das profundidades carbonatadas eram mais enfáticas, porém após este período a diferença entre elas tornou-se mais homogênea, onde foi possível notar que as profundidades de carbonatação são pequenas entre os concretos com ARC, independente do teor de substituição.

Gomes e Brito (2009) afirmam ainda que a profundidade de carbonatação para os concretos feitos com até 50% de ARC não mostram diferenças expressivas em relação ao concreto de referência para a idade de 90 dias de exposição ao CO₂ e salientam ainda que para um teor de 50% de substituição deste ARC o concreto produzido possui boa resistência ao fenômeno da carbonatação, pois os resultados obtidos apontam um acréscimo de carbonatação na faixa de 10% do concretos com ARC em relação ao concreto de referência e para um teor de 25% de ARC um acréscimo de 9% em relação à profundidade de carbonatação do concreto referência.

No presente estudo, os resultados encontrados foram similares, sendo que os teores de 75 e 100% de ARC apresentam diferenças expressivas nas profundidades de carbonatação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema carbonatação em concreto com ARC é abordado por alguns pesquisadores, porém a analogia dos resultados obtidos por cada um é bastante restrita, em função das especificidades de cada programa experimental, infelizmente, não se consegue chegar a um consenso a respeito de metodologias e o comportamento dos materiais, para poder então avançar na busca por conceitos e práticas que possam ser generalizadas para a aplicação do ARC em concretos estruturais.

No entanto, cada programa experimental realizado acerca do tema, evidentemente possui méritos e contribui para o entendimento das propriedades dos concretos com ARC. É sob este prisma que o presente estudo apresenta as conclusões finais para os objetivos estabelecidos e procura tecer considerações a partir dos dados obtidos ao longo de todo o programa experimental.

Influência da porosidade do ARC, cujas relações a/c utilizadas para sua produção foram: 0,85, 0,56 e 0,43, gerando concretos com diferentes resistências, 18, 37 e 50 MPa, respectivamente, inseridos em uma matriz com relação a/c de 0,64, cuja resistência é de 32,5MPa, podem ser feitas as seguintes considerações:

- Nos concretos com ARC de porosidade maior ou igual (37 e 50 MPa) à porosidade da nova matriz (32,5 MPa), a profundidade de carbonatação, aos 147 dias (última verificação), é similar à do concreto de referência, variando de 8,8 a 10,8 mm, porém para os concretos com ARC de maior porosidade (18 MPa), a profundidade de carbonatação apresentou maior dispersão e foi substancialmente superior à do concreto de referência (aproximadamente 50%).

Ressalta-se que nos resultados de carbonatação aos 28 dias, os concretos com ARC apresentaram menor profundidade de carbonatação do que o concreto de referência, invertendo o comportamento aos 147 dias, o que implica na necessidade de se adotar maiores tempos para a realização dos ensaios acelerados de carbonatação.

Na observação das amostras pós-aspersão, vê-se com clareza que os ARC mais porosos (18 MPa) carbonatam mais rápido do que a matriz (32,5 MPa), os ARC com porosidade igual (37 MPa) à matriz carbonatam na mesma velocidade que a matriz e para os ARC com porosidade menor (50 MPa) do que a matriz a velocidade de carbonatação é mais lenta do que na matriz.

- No presente estudo verificou-se que a porosidade do agregado interfere na capacidade de absorção de água do concreto que o incorpora. A absorção de água por capilaridade é maior nos concretos que incorporam ARC mais poroso. Nota-se que com ARC com porosidade menor ou igual (50 ou 37 MPa) à porosidade da matriz do novo concreto (32,5 MPa), houve uma absorção em torno de 26%, porém quando o ARC possui mais poros (18 MPa), observou-se um acréscimo de absorção de água na ordem de 35% a mais do que a absorção do concreto de referência.

A capacidade de absorção, de todas as combinações e do concreto referência, deve-se pela presença de poros capilares e a rede de poros, os quais são responsáveis pela entrada e condução de água para o interior do concreto. O fato de inserir materiais mais porosos em uma nova matriz de concreto aumenta a presença de poros capilares, o que potencializa a capacidade de absorção.

- Quanto à resistência à compressão axial, pode-se inferir que utilizando ARC de resistência maior ou igual à resistência da matriz, onde este agregado será inserido, não houve prejuízos na resistência a compressão alcançada, porém quando foi inserido um ARC com resistência inferior à da matriz, nota-se uma redução de resistência de no máximo 10% em relação ao concreto de referência. As diferenças de comportamento em função da resistência do agregado podem ser explicadas pela porosidade própria do agregado, pois de acordo com o observado, quanto mais poroso o agregado, menor foi a resistência alcançada pelo concreto que o incorpora.
- Em relação à resistência à tração por compressão diametral, os resultados não mostram o mesmo comportamento observado para a resistência à compressão axial. De acordo com os dados obtidos, observa-se uma manutenção dos resultados de resistência à tração, ou seja, há uma mesma resistência à tração independente da resistência do agregado inserido.

Estes resultados podem ser explicados pelo fato de que os agregados possuem uma alta porosidade situada na interface pasta/agregado, zona diretamente afetada pelo esforço de tração. No caso de concreto com ARC, por estar se inserindo um agregado que já possui uma interface pasta/agregado enfraquecida, se está aumentando este agravante dentro do novo concreto, pois além da

interface já existente no agregado, há a nova interface pasta nova/agregado reciclado que produz uma zona de alta porosidade, desta forma interferindo na resistência à tração.

Influência do teor de ARC, que variam de 25 a 100% de substituição do agregado natural pelo ARC, pode-se inferir os seguintes comentários:

- De acordo com os resultados obtidos para a profundidade de carbonatação, pode-se inferir quanto ao teor de substituição que quanto maior é o teor de ARC maior é a profundidade de carbonatação.

Tecendo um comentário generalista, o aumento do teor de ARC é diretamente proporcional ao acréscimo da profundidade de carbonatação. Para os concretos com ARC de 37 e 50 MPa, as diferenças de profundidade de carbonatação encontradas para cada teor de substituição são proporcionais entre si.

Para um ARC de 18 MPa, as diferenças se tornam mais expressivas. Estas diferenças de profundidade de carbonatação observadas situam-se na faixa de 0,8 Kc entre os teores de 25 e 50%, passando para 1,0 Kc entre os teores de 75 e 100%, os coeficientes de difusão de CO₂ relatados são válidos somente na carbonatação de concreto com este tipo de ARC.

Quando analisadas as profundidades dos demais concretos, estas diferenças entre os teores de substituição praticamente desaparecem, tornando o comportamento homogêneo, independente do teor utilizado.

- Para todas as combinações testadas, com percentuais de substituição de ARC de 25 a 100%, os concretos produzidos absorvem mais água do que o concreto de referência.

Quanto maior o teor de ARC no concreto, maior será a sua capacidade de absorção de água. Este comportamento é determinado pela constituição do material, ou seja, a microestrutura porosa do ARC é responsável pelo aumento na capacidade de absorção de água do novo concreto.

Portanto, quanto mais material poroso é inserido na matriz, maior é a capacidade de absorção de água pelo conjunto, absorvendo até 36% de água a mais do que o concreto de referência.

- Considerando somente o aspecto do teor de substituição de agregados na resistência à compressão, pode-se inferir que há um ponto crítico na redução da

resistência do concreto, este ponto situa-se entre os teores de 50 e 75% de substituição.

De acordo com os resultados do programa experimental, até uma substituição de 50% de agregados naturais pelos ARC, os concretos produzidos possuem características mecânicas adequadas à aplicação em concretos para fins estruturais.

- Na propriedade de resistência à tração, o comportamento observado é similar ao observado para compressão axial, pois o ponto crítico de substituição é determinado no teor de 50%, de qualquer forma, para estas duas propriedades, inserindo até 50% de ARC, o concreto apresenta boas características de resistência à tração.

No entanto, quando se substitui 75 ou 100% dos agregados naturais pelos de ARC, as resistências à tração diminuem e, desta forma inviabilizam a adoção destes altos teores de ARC para os concretos que necessitam resistir às tensões de tração.

Influência do teor de pré-molhagem, que varia de 0 a 100% de pré-molhagem dos agregados de ARC previamente a mistura, julga-se pertinente os seguintes comentários:

- Assim como observado para a absorção por capilaridade, a variável teor de pré-molhagem também não foi significativa para as profundidades de carbonatação, desta forma pode-se inferir que se utilizando somente um teor “ideal” de 50% de pré-molhagem em concretos com ARC, este procedimento não irá afetar o concreto no que tange à ação do CO₂ sobre o mesmo.

Da mesma forma que ocorre para a absorção por capilaridade, também para a profundidade de carbonatação, as demais variáveis é que determinam o comportamento dos concretos.

- Em função dos ajustes feitos para a manutenção da trabalhabilidade dos concretos, estes apresentam diversas relações água/cimento finais, conseqüentemente, apresentam porosidades distintas e desta forma, a capacidade de absorção dos concretos foi afetada por esta tomada de decisão.

Porém os dados obtidos para o ensaio de absorção por capilaridade mostram um concreto onde, o teor de pré-molhagem, não exerce influência significativa sobre

este comportamento. Por este motivo, constata-se que as demais variáveis envolvidas possuem um maior peso sobre o comportamento deste novo material.

- De acordo com o programa experimental proposto, para contemplar um determinado nível de trabalhabilidade, foi realizado o procedimento de pré-molhagem, este procedimento nem sempre foi o suficiente para garantir esta característica, portanto foram necessários ajustes de água nas misturas, o que dificultou a análise da influência da pré-molhagem nos resultados. Portanto, fez-se necessário a inserção de uma variável com níveis aleatórios para conseguir avaliar o comportamento dos concretos e em relação à resistência à compressão. A pré-molhagem não apresentou influência significativa para os resultados de compressão axial.

Porém, através dos resultados obtidos, é possível determinar um possível percentual limite de pré-molhagem de 50%. De acordo com os dados, após este percentual há uma redução da resistência à compressão dos concretos.

- O comportamento observado para a resistência à tração por compressão diametral, considerando os teores de pré-molhagem, também apresenta um comportamento muito variável.

De acordo com os dados obtidos, a resistência à tração se alterou, na pior hipótese, em torno de 35%, mas não há significância quando se associa estes valores aos teores de pré-molhagem adotados. De maneira que, quando analisados os resultados à tração obtidos em concretos com mesmos teores de agregado, mas com teores de pré-molhagem crescentes, não observou-se uma tendência nos resultados, ou seja, nem sempre o valor de resistência à tração diminuiu à medida em que se aumentou o teor de pré-molhagem. Mas isto não significa que é possível inserir um agregado saturado na mistura, pois esta água contida no agregado pode influenciar mais na resistência à compressão do que na resistência à tração.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a finalização do trabalho, algumas questões ainda necessitam de maiores esclarecimentos. Em virtude do tempo hábil para a realização de uma dissertação de mestrado e questões que foram surgindo ao longo da pesquisa, e que não faziam parte

do escopo do trabalho, faz-se necessário apontar algumas sugestões que possam vir a qualificar e contribuir ainda mais para a busca da efetiva aplicação dos ARC como co-produto, de qualidade, na fabricação de concretos para fins estruturais.

- Aplicação de aditivos nos estudos com concretos que incorporam ARC, para suprir a necessidade de trabalhabilidade do material e suprimir a etapa de pré-molhagem do processo de fabricação dos concretos com ARC;
- Testar a aplicação de ARC com resistências entre 18 e 37 MPa para se determinar o ponto onde ocorre a redução das resistências;
- Inserção de ARC em matrizes menos porosas;
- Exposição dos concretos com ARC ao ambiente natural, para acompanhamento da carbonatação natural e determinação do coeficiente de difusão de CO₂, para analogia aos resultados obtidos em condição acelerada de carbonatação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 168p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação: Antônio Carmona e Paulo Helene. Editora PINI, 1ª Edição, 1992.

ANDRADE, T. **Tópicos sobre durabilidade do concreto**. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. Vol. 1. Editor Geraldo Cechella Isaia, IBRACON, 2005.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2000.

ÂNGULO, S. C.; KAHN H.; JOHN, V. M.; ULSEN, C. **Metodologia da caracterização de resíduos de construção e demolição**. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e Suas Aplicações, São Paulo. Anais IBRACON, v.6, 2003.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento**. de concretos. 167p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** Rio de Janeiro, _____ . **NBR 6118**. Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9776**. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 15575**. Edificações de até 5 pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2008.

BARRA, M. **Estudio de La durabilidad del hormigón de árido reciclado em su aplicación como hormigón armado**. 223p. Tese (Doutorado) – Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camin, Canal i Ports. Universitat Politècnica de La Catalunya, Barcelona, 1996.

BARY, B.; SELLIER, A. **Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete**. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 1859 – 1872, 2004.

BAUER, E.; NEPOMUCENO, A. A.; POZZAN, E. **Caracterização da estrutura de poros em microestruturas carbonatadas, e sua relação com alguns mecanismos de transporte.** In: II Workshop sobre durabilidade das construções, p. 301 – 311, 2001.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos.** 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1999.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concreto de cimento Portland.** 164p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, 2006.

BUTTNER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto- influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BUTLER, A. M.; MACHADO, E. F. Jr. **Concreto com agregados reciclados de concreto – caracterização das propriedades mecânicas.** In: X Encontro Nacional DE Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC, São Paulo, 2004.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** 248p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos - Doutor em ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, 2007.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do concreto.** Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1987.

CARRIJO, P. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. **Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations.** Materials and Structures, v. 42, n. 4, p. 515 – 525, 2009.

CEB. Comitê Euro-Internacional du Beton. New approach to Durability Design, Lousanne, CEB (Bulletin 238).

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n° 307/2002.** Disponível em [HTTP://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html). Acesso em 18 de Fevereiro de 2009.

CORDINALDESI, V.; MORICONI, G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Constructions and Building Materials*, v. 23, p. 2869 – 2876, 2009.

CUNHA, A. C. Q. da; HELENE, P. R. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C.; KULAKOWSKI, M. P. **Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil.** *Ambiente Construído*, v. 5, n° 2, p. 37 – 50, 2005.

DAMINELI, B. L. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

DIESEL, F. B.; CADORE, W. W.; ISAIA, G. C.; GATALDINI, A. L. G. **Estudo da carbonatação na camada de cobrimento do concreto em protótipos com altos teores de adição mineral.** In: XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC, 2006.

DUCMAN, V.; MIRTIC, B. **The applicability of different waste materials for the production of lightweight aggregates.** *Waste Management*, v. xx, p. xx – xx, 2009.

DUPRAT, F.; SELIER, A. **Probabilistic approach to corrosion risk due to carbonation via na adaptive response surface method.** *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 21, p. 207 – 216, 2006.

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

FIGUEIREDO, E. P. **Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto.** *Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações*. Vol 2. Editor Geraldo C. Isaia – IBRACON, São Paulo. 2005.

FIGUEIREDO, C. R.; NEPOMUCENO, A. A. **Relação entre a carbonatação e a absorvidade em edificações de concreto em Brasília.** In: XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. **Relationship between gas adsorption and the shrinkage and creep of recycled aggregate concrete.** *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 25, n° 2. Paper IDC CCA11386 – 252, 2003.

GOMES, M.; BRITO, J. de. **Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance.** *Materials and Structures*, v. 42, p. 663 – 675, 2009.

GUERRA, J. S.; GUSMÃO, A. D.; SUKAR, S. F.; SIQUEIRA, M. S.; **Avaliação da Gestão de Resíduos de Construção de Edifícios na Cidade do Recife.** In: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC. Fortaleza, 2008.

HARTMANN, C. T.; MEDEIROS, M. H. F.; SELMO, S. .M. S.; HELENE, P. **Estudo da influência da relação água/cimento e da consistência na durabilidade dos concretos quanto à penetração de íons cloreto e a carbonatação.** 11p. 2º Workshop sobre durabilidade das construções, São José dos Campos, São Paulo, 2002.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 231p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.

HELENE, P. **A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto.** Texto técnico, 2004.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** 349p. Ed. Pini, São Paulo, 1993.

HUI-SHENG, S.; BI-WAN, X.; XIAO-CHEN, Z. **Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete.** Construction and Building Materials, vol. 23, p. 1980 – 1985, 2009.

INNOCENTINI, M. D. M.; PILEGI, R. G.; RAMAL Jr, F. T.; PARDO, A. R. F.; PANDOLFELLI, V. C.; BITTENCOURT, L. R. **Relação entre a permeabilidade e a velocidade de secagem em concretos refratários de alta alumina.** Cerâmica, v. 48, nº 37, São Paulo, 2002.

ISAÍÁ, G. C. **Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Reflexões sobre o tema.** In: 2º Workdur – Workshop sobre durabilidade das construções. São José dos Campos, São Paulo, p. 05 – 31, 2001.

KATZ, A. **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete.** Cement and Concrete Research, v. 33, p. 703 – 711, 2003.

KAZMIERCZAK, C. S.; LINDENMEYER, Z. **Comparação entre metodologias utilizadas para a determinação da profundidade de carbonatação em argamassas.** In: International Congresso n High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, Florianópolis, Santa Catarina, 1996.

KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P., BOITO, D.; GARCIA, A. C. A. **Estudo Comparativo da Geração de Resíduos de Construção e Demolição em São Leopoldo e Novo Hamburgo.** In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – ENTAC, 2006.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar.** 168p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –

Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KULAKOWSKI, M. P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. 199p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in sílica fume concrete. Construction and Building Materials, v. 23, p. 1189 – 1195, 2009.

LEITE, F. da C. Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 266p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização com agregado de argamassas e concretos. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.

LEVY, S. M. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. 182p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behavior of recycled aggregate concrete. Resources, Conservation and Recycling, v. 53, p. 36 – 44, 2008.

LIBÓRIO, J. A estrutura porosa de pasta, argamassa e concreto de cimento Portland e sua influência na durabilidade do concreto. In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, p. 29901 – 29911, 1999.

LIMA, J. A. R. de. Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduos de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. 222p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1999.

LIMA, M. G. Ação do Meio Ambiente sobre as estruturas de Concreto. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. Vol 1. Editor Geraldo C. Isaia – IBRACON, São Paulo, 2005.

LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. **Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete.** *Materials and Structures*, v. 33, p. 574 – 580, 2000.

LO, T. Y.; NADEEM, A.; TANG, W. C. P.; YU, P. C. **The effect of high temperature curing on the strength and carbonation of pozzolanic structural lightweight concretes.** *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 1306 – 1310, 2009.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto.** 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MASCE, N. O.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. **Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 443 – 451, 2003.

MEIER, S. A.; PETER, M. A.; MUNTEAN, A.; BOHM, M. **Dynamics of the internal reaction layer during carbonation of concrete.** *Chemical Engineering Science*, v. 62, p. 1125 – 1137, 2007.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J.; BORBA Jr, J. C. **Carbonatação natural de concretos: resultados de cerca de quatro anos de monitoramento.** In XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.

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

OLIVEIRA, M. J. de; ASSIS, C. S. de; TERNI, A. V. **Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate.** In: International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and Structures. P. 636 – 642, Espanha, 2004.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. **Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes.** *Cement and Concrete Research*, v. 32, p. 179 – 185, 2002.

PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. **Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete.** *Construction and Building Materials*, vol. 23, p. 829 – 836, 2009.

PATEL, R. G.; KILLOH, D. C.; PARROT, L. J.; GUTTERIDGE, W. A. **Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste.** *Materials and Structures*. n. 21, p. 192 - 197, 1988.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N. **Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation.** *AICHE Journal*. v. 35, n° 10 p. 1639 - 1650, 1989.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. **Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation**. ACI Materials Journal, n° 88, p. 363 - 373, 1991.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 176p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS e Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2009.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; KAZMIERCZAK, C. S. **Degradação do concreto por carbonatação: execução do ensaio**. Revista Concreto n° 53, p. 40 – 47, 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**. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PRUDÊNCIO, W. Jr. **A durabilidade da construção é fator de custo**. Artigo técnico, p. 655 – 660, ENTAC, Rio de Janeiro, 1995.

PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; VÁZQUEZ, T. **Carbonation process of alkali-activated slag mortars**. Journal Mater SCI, p. 3071 – 3081, 2006.

RILEM TC 116 PCD. **Permeability of concrete as a criterion of its durability. Concrete durability – an approach towards performance testing**. Materials and Structures, v. 32, p. 163 – 173, 1999.

RYU, J. S. **Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate**. Journal of Materials Science Letters, n° 21, p. 1565 – 1567, 2002.

RYU, J. S. **An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties**. Magazine of Concrete Research, v. 54, n° 1, p. 7 – 12, 2002^a.

ROUSSAT, N.; MÉHU, J.; ABDELGHAFOR, M.; BRULA, P. **Leaching behavior of hazardous demolition waste**. Waste Management, vol. 28, p. 2032 – 2040, 2008.

SAETTA, A. V.; VITALIANI, R. V. **Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation.** Cement and Concrete Research, v. 34, p. 571 – 579, 2004.

SIERRA, A.; SOUZA, V. C. M. de. **Um estudo sobre a carbonatação do concreto utilizando cimentos brasileiros e suas implicações no campo normativo.** Artigo Técnico, p. 1 – 9, 1999.

SONG, H. W.; KWON, S. J. **Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure.** Cement and Concrete Research, v. 37, p. 909 – 915, 2007.

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

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. **Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.** Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1195 – 1203, 2005.

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.

TOPÇU, I. B. **Physical and mechanical properties of concretes with waste concrete.** Cement and Concrete Research, v. 27, p. 1817 – 1823, 1997.

TOPÇU, I. B.; SENDEL, S. **Properties of concretes produced with waste concrete aggregate.** Cement and Concrete Research, v. 34, p. 1307 – 1312, 2004.

TROIAN, A. **Avaliação da influência do agregado reciclado de concreto na penetração de íons cloreto.** 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, 2010.

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição.** 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

VENQUIARUTTO, S. D.; ISAÍIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Carbonatação do concreto estrutural com altos teores de adições minerais e diferentes finuras.** In: IX Encontro Nacional do Ambiente Construído, ENTAC, Foz do Iguaçu, Paraná, 2002.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. **Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, p. 47 – 63, 2004.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. **Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading.** Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1187 – 1194, 2005.

ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos.** 464p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

WANG, X. Y.; LEE, H. S. **A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash.** Construction and Building Materials, v. 23, p. 725 – 733, 2009.

WERLE, A. P.; KULAKOWSKI, M. P.; KAZMIERCZAK, C. S. Manual de montagem e operação de câmara de carbonatação. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, 2010.

WU, H.; SONG, S. **Study on recycled aggregate concrete durability.** Chinese Ready-Mixed Concrete, v. 4, p. 25 – 30, 2006 (in Chinese).

ANEXOS

ANEXO A

Dados de resistência à compressão e tração por compressão diametral

Traço	A/C INICIAL	FCAG (MPa)	TAG (%)	TPM(%)	ACF	Fc (MPa)	Fc Média (MPa)	Ft(MPa)	Ft Média (MPa)
T24/01	REF	200	0	0	0,64	32,7	32,4	6,8	9,3
T24/02	REF	200	0	0	0,64	32,1		10,4	
T24/03	REF	200	0	0	0,64	32,3		10,8	
T28/01	0,43	50,00	25,00	25,00	0,65	30,00	32,7	11,8	9,9
T28/02	0,43	50,00	25,00	25,00	0,65	33,20		8,1	
T28/03	0,43	50,00	25,00	25,00	0,65	34,90		10,0	
T31/01	0,43	50,00	25,00	75,00	0,64	21,10	25,8	9,7	8,8
T31/02	0,43	50,00	25,00	75,00	0,64	26,90		7,3	
T31/03	0,43	50,00	25,00	75,00	0,64	29,40		9,6	
T29/01	0,43	50,00	50,00	0,00	0,74	34,30	33,5	9,7	10,4
T29/02	0,43	50,00	50,00	0,00	0,74	31,80		11,1	
T29/03	0,43	50,00	50,00	0,00	0,74	34,40		10,6	
T32/01	0,43	50,00	50,00	50,00	0,67	33,50	34,3	9,1	8,8
T32/02	0,43	50,00	50,00	50,00	0,67	35,50		8,3	
T32/03	0,43	50,00	50,00	50,00	0,67	34,00		8,9	
T35/01	0,43	50,00	50,00	100,00	0,62	35,50	33,8	9,8	9,7
T35/02	0,43	50,00	50,00	100,00	0,62	36,10		8,5	
T35/03	0,43	50,00	50,00	100,00	0,62	29,90		10,9	
T33/01	0,43	50,00	75,00	25,00	0,66	28,30	28,2	8,2	7,9
T33/02	0,43	50,00	75,00	25,00	0,66	27,90		6,8	
T33/03	0,43	50,00	75,00	25,00	0,66	28,50		8,9	
T36/01	0,43	50,00	75,00	75,00	0,70	27,80	25,7	10,7	9,6
T36/02	0,43	50,00	75,00	75,00	0,70	20,50		8,8	
T36/03	0,43	50,00	75,00	75,00	0,70	28,70		9,4	
T34/01	0,43	50,00	100,00	0,00	0,81	32,50	31,1	7,4	8,3
T34/02	0,43	50,00	100,00	0,00	0,81	29,50		7,6	
T34/03	0,43	50,00	100,00	0,00	0,81	31,40		9,7	
T37/01	0,43	50,00	100,00	50,00	0,73	33,90	32,6	9,2	8,5
T37/02	0,43	50,00	100,00	50,00	0,73	30,50		8,8	
T37/03	0,43	50,00	100,00	50,00	0,73	33,40		7,3	
T38/01	0,43	50,00	100,00	100,00	0,63	27,80	28,8	9,7	9,4
T38/02	0,43	50,00	100,00	100,00	0,63	30,50		8,4	
T38/03	0,43	50,00	100,00	100,00	0,63	28,20		10,2	
T14/01	0,56	37,00	25,00	0,00	0,67	27,10	29,5	9,7	8,7
T14/02	0,56	37,00	25,00	0,00	0,67	30,90		7,5	
T14/03	0,56	37,00	25,00	0,00	0,67	30,50		8,8	
T17/01	0,56	37,00	25,00	50,00	0,67	37,30	35,4	11,5	10,7
T17/02	0,56	37,00	25,00	50,00	0,67	32,90		11,1	
T17/03	0,56	37,00	25,00	50,00	0,67	36,00		9,5	
T20/01	0,56	37,00	25,00	100,00	0,64	29,70	32,7	9,9	10,0
T20/02	0,56	37,00	25,00	100,00	0,64	34,50		11,1	
T20/03	0,56	37,00	25,00	100,00	0,64	33,80		9,1	
T18/01	0,56	37,00	50,00	25,00	0,71	32,30	31,6	10,1	10,8
T18/02	0,56	37,00	50,00	25,00	0,71	31,90		11,2	
T18/03	0,56	37,00	50,00	25,00	0,71	30,50		11,2	
T21/01	0,56	37,00	50,00	75,00	0,65	38,00	33,7	10,5	10,1
T21/02	0,56	37,00	50,00	75,00	0,65	30,90		11,0	

T21/03	0,56	37,00	50,00	75,00	0,65	32,10		8,8	
T19/01	0,56	37,00	75,00	0,00	0,83	31,40	30,8	7,8	9,0
T19/02	0,56	37,00	75,00	0,00	0,83	32,90		10,3	
T19/03	0,56	37,00	75,00	0,00	0,83	28,20		9,1	
T22/01	0,56	37,00	75,00	50,00	0,71	30,00	29,3	9,3	9,3
T22/02	0,56	37,00	75,00	50,00	0,71	28,50		8,6	
T22/03	0,56	37,00	75,00	50,00	0,71	29,40		10,1	
T25/01	0,56	37,00	75,00	100,00	0,64	28,50	27,1	9,1	9,1
T25/02	0,56	37,00	75,00	100,00	0,64	27,80		9,2	
T25/03	0,56	37,00	75,00	100,00	0,64	24,90		8,8	
T23/01	0,56	37,00	100,00	25,00	0,78	30,70	26,7	9,5	8,5
T23/02	0,56	37,00	100,00	25,00	0,78	18,60		6,6	
T23/03	0,56	37,00	100,00	25,00	0,78	30,70		9,4	
T26/01	0,56	37,00	100,00	75,00	0,67	31,30	30,7	7,0	7,4
T26/02	0,56	37,00	100,00	75,00	0,67	31,60		8,8	
T26/03	0,56	37,00	100,00	75,00	0,67	29,20		6,6	
T3/01	0,85	18,00	25,00	25,00	0,64	28,10	32,0	11,1	11,5
T3/02	0,85	18,00	25,00	25,00	0,64	29,30		11,9	
T3/03	0,85	18,00	25,00	25,00	0,64	38,50		11,6	
T6/01	0,85	18,00	25,00	75,00	0,64	24,10	27,2	10,5	10,3
T6/02	0,85	18,00	25,00	75,00	0,64	29,70		9,6	
T6/03	0,85	18,00	25,00	75,00	0,64	27,90		10,7	
T4/01	0,85	18,00	50,00	0,00	0,73	27,70	29,9	9,6	9,6
T4/02	0,85	18,00	50,00	0,00	0,73	32,60		9,4	
T4/03	0,85	18,00	50,00	0,00	0,73	29,40		9,8	
T7/01	0,85	18,00	50,00	50,00	0,64	30,50	30,4	9,3	8,8
T7/02	0,85	18,00	50,00	50,00	0,64	31,60		9,5	
T7/03	0,85	18,00	50,00	50,00	0,64	29,00		7,6	
T10/01	0,85	18,00	50,00	100,00	0,59	28,00	28,5	8,6	8,8
T10/02	0,85	18,00	50,00	100,00	0,59	28,20		8,5	
T10/03	0,85	18,00	50,00	100,00	0,59	29,20		9,3	
T8/01	0,85	18,00	75,00	25,00	0,73	27,90	27,9	8,8	8,7
T8/02	0,85	18,00	75,00	25,00	0,73	27,40		9,0	
T8/03	0,85	18,00	75,00	25,00	0,73	28,50		8,3	
T11/01	0,85	18,00	75,00	75,00	0,64	27,90	26,6	9,4	9,1
T11/02	0,85	18,00	75,00	75,00	0,64	25,60		9,2	
T11/03	0,85	18,00	75,00	75,00	0,64	26,20		8,7	
T9/01	0,85	18,00	100,00	0,00	0,86	25,60	26,8	8,9	8,5
T9/02	0,85	18,00	100,00	0,00	0,86	26,60		7,9	
T9/03	0,85	18,00	100,00	0,00	0,86	28,20		8,7	
T12/01	0,85	18,00	100,00	50,00	0,72	26,50	25,5	7,1	7,3
T12/02	0,85	18,00	100,00	50,00	0,72	24,00		9,4	
T12/03	0,85	18,00	100,00	50,00	0,72	26,00		5,3	
T15/01	0,85	18,00	100,00	100,00	0,55	25,60	25,6	5,4	6,8
T15/02	0,85	18,00	100,00	100,00	0,55	24,90		6,9	
T15/03	0,85	18,00	100,00	100,00	0,55	26,40		8,1	

ANEXO B

Teores de pré-molhagem, relação a/c e teor de umidade dos concretos com ARC a/c 0,43.

a/c inicial = 0,64							
Traço	a/c ag	%AG	%PM	a/c PM	a/c final	a/c total	H%
T24/01	REF	0	0	0.000	0.64	0.64	8,20
T24/02	REF	0	0	0.000	0.64	0.64	8,20
T24/03	REF	0	0	0.000	0.64	0.64	8,20
T28/01	0.43	25	25	0.013	0.65	0.66	8.50%
T28/02	0.43	25	25	0.013	0.65	0.66	8.50%
T28/02	0.43	25	25	0.013	0.65	0.66	8.50%
T31/01	0.43	25	75	0.040	0.64	0.68	8.60%
T31/02	0.43	25	75	0.040	0.64	0.68	8.60%
T31/02	0.43	25	75	0.040	0.64	0.68	8.60%
T29/01	0.43	50	0	0.000	0.74	0.74	9.30%
T29/02	0.43	50	0	0.000	0.74	0.74	9.30%
T29/01	0.43	50	0	0.000	0.74	0.74	9.30%
T32/01	0.43	50	50	0.053	0.67	0.72	9.20%
T32/02	0.43	50	50	0.053	0.67	0.72	9.20%
T32/02	0.43	50	50	0.053	0.67	0.72	9.20%
T35/01	0.43	50	100	0.106	0.62	0.73	9.00%
T35/02	0.43	50	100	0.106	0.62	0.73	9.00%
T35/01	0.43	50	100	0.106	0.62	0.73	9.00%
T33/01	0.43	75	25	0.040	0.66	0.70	8.70%
T33/02	0.43	75	25	0.040	0.66	0.70	8.70%
T33/02	0.43	75	25	0.040	0.66	0.70	8.70%
T36/01	0.43	75	75	0.119	0.70	0.82	10.00%
T36/02	0.43	75	75	0.119	0.70	0.82	10.00%
T36/01	0.43	75	75	0.119	0.70	0.82	10.00%
T34/01	0.43	100	0	0.000	0.81	0.81	9.90%
T34/02	0.43	100	0	0.000	0.81	0.81	9.90%
T34/01	0.43	100	0	0.000	0.81	0.81	9.90%
T37/01	0.43	100	50	0.106	0.73	0.84	10.30%
T37/02	0.43	100	50	0.106	0.73	0.84	10.30%
T37/01	0.43	100	50	0.106	0.73	0.84	10.30%
T38/01	0.43	100	100	0.212	0.63	0.84	10.30%
T38/02	0.43	100	100	0.212	0.63	0.84	10.30%
T38/01	0.43	100	100	0.212	0.63	0.84	10.30%

ANEXO C

Teores de pré-molhagem, relação a/c e teor de umidade dos concretos com ARC a/c 0,56.

a/c inicial = 0,64							
Traço	a/c ag	%AG	%PM	a/c PM	a/c final	a/c total	H%
T14/01	0.56	25	0	0.000	0.67	0.67	8.50%
T14/02	0.56	25	0	0.000	0.67	0.67	8.50%
T14/01	0.56	25	0	0.000	0.67	0.67	8.50%
T17/01	0.56	25	50	0.031	0.67	0.70	8.90%
T17/02	0.56	25	50	0.031	0.67	0.70	8.90%
T17/01	0.56	25	50	0.031	0.67	0.70	8.90%
T20/01	0.56	25	100	0.062	0.64	0.70	8.90%
T20/02	0.56	25	100	0.062	0.64	0.70	8.90%
T20/01	0.56	25	100	0.062	0.64	0.70	8.90%
T18/01	0.56	50	25	0.031	0.71	0.74	9.30%
T18/02	0.56	50	25	0.031	0.71	0.74	9.30%
T18/01	0.56	50	25	0.031	0.71	0.74	9.30%
T21/01	0.56	50	75	0.092	0.65	0.74	9.30%
T21/02	0.56	50	75	0.092	0.65	0.74	9.30%
T21/01	0.56	50	75	0.092	0.65	0.74	9.30%
T19/01	0.56	75	0	0.000	0.83	0.83	10.30%
T19/02	0.56	75	0	0.000	0.83	0.83	10.30%
T19/01	0.56	75	0	0.000	0.83	0.83	10.30%
T22/01	0.56	75	50	0.092	0.71	0.80	9.90%
T22/02	0.56	75	50	0.092	0.71	0.80	9.90%
T22/01	0.56	75	50	0.092	0.71	0.80	9.90%
T25/01	0.56	75	100	0.185	0.64	0.82	10.20%
T25/02	0.56	75	100	0.185	0.64	0.82	10.20%
T25/01	0.56	75	100	0.185	0.64	0.82	10.20%
T23/01	0.56	100	25	0.062	0.78	0.84	10.30%
T23/02	0.56	100	25	0.062	0.78	0.84	10.30%
T23/01	0.56	100	25	0.062	0.78	0.84	10.30%
T26/01	0.56	100	75	0.185	0.67	0.86	10.50%
T26/02	0.56	100	75	0.185	0.67	0.86	10.50%
T26/01	0.56	100	75	0.185	0.67	0.86	10.50%

ANEXO D

Teores de pré-molhagem, relação a/c e teor de umidade dos concretos com ARC a/c 0,85.

a/c inicial = 0,64							
Traço	a/c ag	%AG	%PM	a/c PM	a/c final	a/c total	H%
T3/01	0.85	25	25	0.023	0.64	0.66	8.40%
T3/02	0.85	25	25	0.023	0.64	0.66	8.40%
T3/01	0.85	25	25	0.023	0.64	0.66	8.40%
T6/01	0.85	25	75	0.064	0.64	0.70	8.90%
T6/02	0.85	25	75	0.064	0.64	0.70	8.90%
T6/01	0.85	25	75	0.064	0.64	0.70	8.90%
T4/01	0.85	50	0	0.000	0.73	0.73	9.20%
T4/02	0.85	50	0	0.000	0.73	0.73	9.20%
T4/01	0.85	50	0	0.000	0.73	0.73	9.20%
T7/01	0.85	50	50	0.086	0.64	0.73	9.20%
T7/02	0.85	50	50	0.086	0.64	0.73	9.20%
T7/01	0.85	50	50	0.086	0.64	0.73	9.20%
T10/01	0.85	50	100	0.172	0.59	0.76	9.70%
T10/02	0.85	50	100	0.172	0.59	0.76	9.70%
T10/01	0.85	50	100	0.172	0.59	0.76	9.70%
T8/01	0.85	75	25	0.064	0.73	0.79	9.90%
T8/02	0.85	75	25	0.064	0.73	0.79	9.90%
T8/01	0.85	75	25	0.064	0.73	0.79	9.90%
T11/01	0.85	75	75	0.193	0.64	0.83	10.30%
T11/02	0.85	75	75	0.193	0.64	0.83	10.30%
T11/01	0.85	75	75	0.193	0.64	0.83	10.30%
T9/01	0.85	100	0	0.000	0.86	0.86	10.60%
T9/02	0.85	100	0	0.000	0.86	0.86	10.60%
T9/01	0.85	100	0	0.000	0.86	0.86	10.60%
T12/01	0.85	100	50	0.172	0.72	0.89	10.90%
T12/02	0.85	100	50	0.172	0.72	0.89	10.90%
T12/01	0.85	100	50	0.172	0.72	0.89	10.90%
T15/01	0.85	100	100	0.343	0.55	0.89	10.90%
T15/02	0.85	100	100	0.343	0.55	0.89	10.90%
T15/01	0.85	100	100	0.343	0.55	0.89	10.90%

ANEXO E

Dados de absorção de água por capilaridade

Traço	A/C INICIAL	FCAG (MPa)	TAG (%)	TPM(%)	ACF	ABS (g/cm ²)
T24/01	REF	200	0	0	0,64	0,541
T24/02	REF	200	0	0	0,64	0,609
T24/03	REF	200	0	0	0,64	0,599
T28/01	0,43	50,00	25,00	25,00	0,65	0,615
T28/02	0,43	50,00	25,00	25,00	0,65	0,578
T28/03	0,43	50,00	25,00	25,00	0,65	0,561
T31/01	0,43	50,00	25,00	75,00	0,64	0,617
T31/02	0,43	50,00	25,00	75,00	0,64	0,596
T31/03	0,43	50,00	25,00	75,00	0,64	0,548
T29/01	0,43	50,00	50,00	0,00	0,74	0,636
T29/02	0,43	50,00	50,00	0,00	0,74	0,578
T29/03	0,43	50,00	50,00	0,00	0,74	0,566
T32/01	0,43	50,00	50,00	50,00	0,67	0,657
T32/02	0,43	50,00	50,00	50,00	0,67	0,604
T32/03	0,43	50,00	50,00	50,00	0,67	0,646
T35/01	0,43	50,00	50,00	100,00	0,62	0,768
T35/02	0,43	50,00	50,00	100,00	0,62	0,699
T35/03	0,43	50,00	50,00	100,00	0,62	0,689
T33/01	0,43	50,00	75,00	25,00	0,66	0,825
T33/02	0,43	50,00	75,00	25,00	0,66	0,801
T33/03	0,43	50,00	75,00	25,00	0,66	0,785
T36/01	0,43	50,00	75,00	75,00	0,70	0,724
T36/02	0,43	50,00	75,00	75,00	0,70	0,754
T36/03	0,43	50,00	75,00	75,00	0,70	0,744
T34/01	0,43	50,00	100,00	0,00	0,81	0,744
T34/02	0,43	50,00	100,00	0,00	0,81	0,761
T34/03	0,43	50,00	100,00	0,00	0,81	0,783
T37/01	0,43	50,00	100,00	50,00	0,73	0,791
T37/02	0,43	50,00	100,00	50,00	0,73	0,815
T37/03	0,43	50,00	100,00	50,00	0,73	0,865
T38/01	0,43	50,00	100,00	100,00	0,63	0,778
T38/02	0,43	50,00	100,00	100,00	0,63	0,819
T38/03	0,43	50,00	100,00	100,00	0,63	0,825
T14/01	0,56	37,00	25,00	0,00	0,67	0,535
T14/02	0,56	37,00	25,00	0,00	0,67	0,591
T14/03	0,56	37,00	25,00	0,00	0,67	0,625
T17/01	0,56	37,00	25,00	50,00	0,67	0,512
T17/02	0,56	37,00	25,00	50,00	0,67	0,475
T17/03	0,56	37,00	25,00	50,00	0,67	0,465
T20/01	0,56	37,00	25,00	100,00	0,64	0,704
T20/02	0,56	37,00	25,00	100,00	0,64	0,766
T20/03	0,56	37,00	25,00	100,00	0,64	0,782
T18/01	0,56	37,00	50,00	25,00	0,71	0,702
T18/02	0,56	37,00	50,00	25,00	0,71	0,689
T18/03	0,56	37,00	50,00	25,00	0,71	0,671
T21/01	0,56	37,00	50,00	75,00	0,65	0,726
T21/02	0,56	37,00	50,00	75,00	0,65	0,736
T21/03	0,56	37,00	50,00	75,00	0,65	0,755
T19/01	0,56	37,00	75,00	0,00	0,83	0,592
T19/02	0,56	37,00	75,00	0,00	0,83	0,639

T19/03	0,56	37,00	75,00	0,00	0,83	0,661
T22/01	0,56	37,00	75,00	50,00	0,71	0,730
T22/02	0,56	37,00	75,00	50,00	0,71	0,801
T22/03	0,56	37,00	75,00	50,00	0,71	0,772
T25/01	0,56	37,00	75,00	100,00	0,64	0,813
T25/02	0,56	37,00	75,00	100,00	0,64	0,833
T25/03	0,56	37,00	75,00	100,00	0,64	0,862
T23/01	0,56	37,00	100,00	25,00	0,78	0,820
T23/02	0,56	37,00	100,00	25,00	0,78	0,855
T23/03	0,56	37,00	100,00	25,00	0,78	0,800
T26/01	0,56	37,00	100,00	75,00	0,67	0,801
T26/02	0,56	37,00	100,00	75,00	0,67	0,866
T26/03	0,56	37,00	100,00	75,00	0,67	0,879
T3/01	0,85	18,00	25,00	25,00	0,64	0,527
T3/02	0,85	18,00	25,00	25,00	0,64	0,529
T3/03	0,85	18,00	25,00	25,00	0,64	0,492
T6/01	0,85	18,00	25,00	75,00	0,64	0,776
T6/02	0,85	18,00	25,00	75,00	0,64	0,750
T6/03	0,85	18,00	25,00	75,00	0,64	0,655
T4/01	0,85	18,00	50,00	0,00	0,73	0,787
T4/02	0,85	18,00	50,00	0,00	0,73	0,794
T4/03	0,85	18,00	50,00	0,00	0,73	0,808
T7/01	0,85	18,00	50,00	50,00	0,64	0,675
T7/02	0,85	18,00	50,00	50,00	0,64	0,721
T7/03	0,85	18,00	50,00	50,00	0,64	0,721
T10/01	0,85	18,00	50,00	100,00	0,59	0,730
T10/02	0,85	18,00	50,00	100,00	0,59	0,790
T10/03	0,85	18,00	50,00	100,00	0,59	0,796
T8/01	0,85	18,00	75,00	25,00	0,73	0,704
T8/02	0,85	18,00	75,00	25,00	0,73	0,729
T8/03	0,85	18,00	75,00	25,00	0,73	0,697
T11/01	0,85	18,00	75,00	75,00	0,64	0,758
T11/02	0,85	18,00	75,00	75,00	0,64	0,857
T11/03	0,85	18,00	75,00	75,00	0,64	0,862
T9/01	0,85	18,00	100,00	0,00	0,86	0,804
T9/02	0,85	18,00	100,00	0,00	0,86	0,861
T9/03	0,85	18,00	100,00	0,00	0,86	0,854
T12/01	0,85	18,00	100,00	50,00	0,72	0,759
T12/02	0,85	18,00	100,00	50,00	0,72	0,780
T12/03	0,85	18,00	100,00	50,00	0,72	0,811
T15/01	0,85	18,00	100,00	100,00	0,55	0,759
T15/02	0,85	18,00	100,00	100,00	0,55	0,832
T15/03	0,85	18,00	100,00	100,00	0,55	0,823

ANEXO F

Médias das profundidades de carbonatação ao longo do tempo

FCAG (MPa)	TAG (%)	TPM(%)	ACF	DIAS	Tempo (RAIZ(dias))	ecarb (mm)	Coef Kc
REF	0	0	0,64	1	1	0,6	0,600
REF	0	0	0,64	3	2	1,2	0,600
REF	0	0	0,64	7	3	1,4	0,466
REF	0	0	0,64	28	5	4,4	0,880
REF	0	0	0,64	63	8	6,2	0,775
REF	0	0	0,64	91	10	6,9	0,690
REF	0	0	0,64	147	12	8,8	0,733
50	1,25	1,25	0,65	1	1	0,7	0,700
50	1,25	1,25	0,65	3	2	1,4	0,808
50	1,25	1,25	0,65	7	3	1,4	0,529
50	1,25	1,25	0,65	28	5	4,4	0,832
50	1,25	1,25	0,65	63	8	6,9	0,869
50	1,25	1,25	0,65	91	10	7,7	0,807
50	1,25	1,25	0,65	147	12	10,5	0,866
50	1,25	1,75	0,64	1	1	1,2	1,200
50	1,25	1,75	0,64	3	2	1,8	1,039
50	1,25	1,75	0,64	7	3	2,0	0,756
50	1,25	1,75	0,64	28	5	3,8	0,718
50	1,25	1,75	0,64	63	8	7,1	0,895
50	1,25	1,75	0,64	91	10	8,5	0,891
50	1,25	1,75	0,64	147	12	8,8	0,726
50	1,50	1,00	0,74	1	1	0,6	0,600
50	1,50	1,00	0,74	3	2	1,4	0,808
50	1,50	1,00	0,74	7	3	1,7	0,643
50	1,50	1,00	0,74	28	5	4,5	0,850
50	1,50	1,00	0,74	63	8	7,4	0,932
50	1,50	1,00	0,74	91	10	8,6	0,902
50	1,50	1,00	0,74	147	12	10,5	0,866
50	1,50	1,50	0,67	1	1	0,8	0,800
50	1,50	1,50	0,67	3	2	1,3	0,751
50	1,50	1,50	0,67	7	3	1,4	0,529
50	1,50	1,50	0,67	28	5	4,2	0,794
50	1,50	1,50	0,67	63	8	6,1	0,769
50	1,50	1,50	0,67	91	10	7,7	0,807
50	1,50	1,50	0,67	147	12	8,7	0,715
50	1,50	2,00	0,62	1	1	0,6	0,600
50	1,50	2,00	0,62	3	1	1,3	1,300
50	1,50	2,00	0,62	7	3	1,3	0,491

50	1,50	2,00	0,62	28	5	3,5	0,661
50	1,50	2,00	0,62	63	8	5,5	0,693
50	1,50	2,00	0,62	91	10	7,4	0,776
50	1,50	2,00	0,62	147	12	8,8	0,726
50	1,75	1,25	0,66	1	1	0,7	0,700
50	1,75	1,25	0,66	3	2	1,5	0,866
50	1,75	1,25	0,66	7	3	1,6	0,605
50	1,75	1,25	0,66	28	5	4,4	0,832
50	1,75	1,25	0,66	63	8	6,6	0,832
50	1,75	1,25	0,66	91	10	8,1	0,849
50	1,75	1,25	0,66	147	12	9,7	0,800
50	1,75	1,75	0,70	1	1	0,9	0,900
50	1,75	1,75	0,70	3	2	1,4	0,808
50	1,75	1,75	0,70	7	3	1,6	0,605
50	1,75	1,75	0,70	28	5	4,3	0,813
50	1,75	1,75	0,70	63	8	6,0	0,756
50	1,75	1,75	0,70	91	10	7,9	0,828
50	1,75	1,75	0,70	147	12	8,8	0,726
50	2,00	1,00	0,81	1	1	0,7	0,700
50	2,00	1,00	0,81	3	2	1,3	0,751
50	2,00	1,00	0,81	7	3	1,5	0,567
50	2,00	1,00	0,81	28	5	4,2	0,794
50	2,00	1,00	0,81	63	8	6,2	0,781
50	2,00	1,00	0,81	91	10	7,5	0,786
50	2,00	1,00	0,81	147	12	8,9	0,734
50	2,00	1,50	0,73	1	1	0,8	0,800
50	2,00	1,50	0,73	3	2	1,5	0,866
50	2,00	1,50	0,73	7	3	1,6	0,605
50	2,00	1,50	0,73	28	5	4,1	0,775
50	2,00	1,50	0,73	63	8	6,4	0,806
50	2,00	1,50	0,73	91	10	7,9	0,828
50	2,00	1,50	0,73	147	12	10,3	0,850
50	2,00	2,00	0,63	1	1	1,0	1,000
50	2,00	2,00	0,63	3	2	1,3	0,751
50	2,00	2,00	0,63	7	3	1,8	0,680
50	2,00	2,00	0,63	28	5	4,7	0,888
50	2,00	2,00	0,63	63	8	6,8	0,857
50	2,00	2,00	0,63	91	10	8,8	0,922
50	2,00	2,00	0,63	147	12	9,7	0,800
37	1,25	1,00	0,67	1	1	0,6	0,600
37	1,25	1,00	0,67	3	2	1,0	0,577
37	1,25	1,00	0,67	7	3	1,3	0,491
37	1,25	1,00	0,67	28	5	3,7	0,699

37	1,25	1,00	0,67	63	8	5,9	0,743
37	1,25	1,00	0,67	91	10	7,5	0,786
37	1,25	1,00	0,67	147	12	9,3	0,767
37	1,25	1,50	0,67	1	1	0,6	0,600
37	1,25	1,50	0,67	3	2	0,8	0,462
37	1,25	1,50	0,67	7	3	1,3	0,491
37	1,25	1,50	0,67	28	5	3,3	0,624
37	1,25	1,50	0,67	63	8	5,5	0,693
37	1,25	1,50	0,67	91	10	7,3	0,765
37	1,25	1,50	0,67	147	12	9,7	0,800
37	1,25	2,00	0,64	1	1	1,1	1,100
37	1,25	2,00	0,64	3	2	1,1	0,635
37	1,25	2,00	0,64	7	3	1,2	0,454
37	1,25	2,00	0,64	28	5	3,7	0,699
37	1,25	2,00	0,64	63	8	6,2	0,781
37	1,25	2,00	0,64	91	10	7,2	0,755
37	1,25	2,00	0,64	147	12	8,4	0,693
37	1,50	1,25	0,71	1	1	0,9	0,900
37	1,50	1,25	0,71	3	2	1,2	0,693
37	1,50	1,25	0,71	7	3	1,3	0,491
37	1,50	1,25	0,71	28	5	4,1	0,775
37	1,50	1,25	0,71	63	8	6,4	0,806
37	1,50	1,25	0,71	91	10	8,4	0,881
37	1,50	1,25	0,71	147	12	11,3	0,932
37	1,50	1,75	0,65	1	1	0,7	0,700
37	1,50	1,75	0,65	3	2	1,3	0,751
37	1,50	1,75	0,65	7	3	1,6	0,605
37	1,50	1,75	0,65	28	5	3,5	0,661
37	1,50	1,75	0,65	63	8	6,7	0,844
37	1,50	1,75	0,65	91	10	7,9	0,828
37	1,50	1,75	0,65	147	12	10,3	0,850
37	1,75	1,00	0,83	1	1	0,8	0,800
37	1,75	1,00	0,83	3	2	1,2	0,693
37	1,75	1,00	0,83	7	3	1,4	0,529
37	1,75	1,00	0,83	28	5	4,0	0,756
37	1,75	1,00	0,83	63	8	6,3	0,794
37	1,75	1,00	0,83	91	10	8,0	0,839
37	1,75	1,00	0,83	147	12	11,4	0,940
37	1,75	1,50	0,71	1	1	0,7	0,700
37	1,75	1,50	0,71	3	2	1,3	0,751
37	1,75	1,50	0,71	7	3	1,5	0,567
37	1,75	1,50	0,71	28	5	3,7	0,699
37	1,75	1,50	0,71	63	8	6,8	0,857

37	1,75	1,50	0,71	91	10	7,8	0,818
37	1,75	1,50	0,71	147	12	10,2	0,841
37	1,75	2,00	0,64	1	1	1,1	1,100
37	1,75	2,00	0,64	3	2	1,5	0,866
37	1,75	2,00	0,64	7	3	1,6	0,605
37	1,75	2,00	0,64	28	5	4,3	0,813
37	1,75	2,00	0,64	63	8	7,2	0,907
37	1,75	2,00	0,64	91	10	7,9	0,828
37	1,75	2,00	0,64	147	12	9,8	0,808
37	2,00	1,25	0,78	1	1	0,7	0,700
37	2,00	1,25	0,78	3	2	1,1	0,635
37	2,00	1,25	0,78	7	3	1,4	0,529
37	2,00	1,25	0,78	28	5	3,3	0,624
37	2,00	1,25	0,78	63	8	5,6	0,706
37	2,00	1,25	0,78	91	10	7,4	0,776
37	2,00	1,25	0,78	147	12	10,5	0,866
37	2,00	1,75	0,67	1	1	0,7	0,700
37	2,00	1,75	0,67	3	2	1,3	0,751
37	2,00	1,75	0,67	7	3	1,6	0,605
37	2,00	1,75	0,67	28	5	4,4	0,832
37	2,00	1,75	0,67	63	8	7,2	0,907
37	2,00	1,75	0,67	91	10	8,7	0,912
37	2,00	1,75	0,67	147	12	11,4	0,940
18	1,25	1,25	0,64	1	1	0,9	0,900
18	1,25	1,25	0,64	3	2	1,0	0,577
18	1,25	1,25	0,64	7	3	1,4	0,529
18	1,25	1,25	0,64	28	5	3,1	0,586
18	1,25	1,25	0,64	63	8	4,8	0,605
18	1,25	1,25	0,64	91	10	7,2	0,755
18	1,25	1,25	0,64	147	12	10,6	0,874
18	1,25	1,75	0,64	1	1	0,9	0,900
18	1,25	1,75	0,64	3	2	1,3	0,751
18	1,25	1,75	0,64	7	3	1,4	0,529
18	1,25	1,75	0,64	28	5	3,0	0,567
18	1,25	1,75	0,64	63	8	3,9	0,491
18	1,25	1,75	0,64	91	10	7,0	0,734
18	1,25	1,75	0,64	147	12	8,4	0,693
18	1,50	1,00	0,73	1	1	1,1	1,100
18	1,50	1,00	0,73	3	2	1,2	0,693
18	1,50	1,00	0,73	7	3	1,4	0,529
18	1,50	1,00	0,73	28	5	2,6	0,491
18	1,50	1,00	0,73	63	8	5,4	0,680
18	1,50	1,00	0,73	91	10	7,2	0,755

18	1,50	1,00	0,73	147	12	8,3	0,685
18	1,50	1,50	0,64	1	1	0,9	0,900
18	1,50	1,50	0,64	3	2	0,9	0,520
18	1,50	1,50	0,64	7	3	1,1	0,416
18	1,50	1,50	0,64	28	5	3,2	0,605
18	1,50	1,50	0,64	63	8	4,2	0,529
18	1,50	1,50	0,64	91	10	6,8	0,713
18	1,50	1,50	0,64	147	12	9,3	0,767
18	1,50	2,00	0,59	1	1	0,6	0,600
18	1,50	2,00	0,59	3	2	1,0	0,577
18	1,50	2,00	0,59	7	3	1,4	0,529
18	1,50	2,00	0,59	28	5	3,2	0,605
18	1,50	2,00	0,59	63	8	4,7	0,592
18	1,50	2,00	0,59	91	10	8,2	0,860
18	1,50	2,00	0,59	147	12	11,0	0,907
18	1,75	1,25	0,73	1	1	0,8	0,800
18	1,75	1,25	0,73	3	2	1,0	0,577
18	1,75	1,25	0,73	7	3	1,3	0,491
18	1,75	1,25	0,73	28	5	4,0	0,756
18	1,75	1,25	0,73	63	8	5,8	0,731
18	1,75	1,25	0,73	91	10	8,1	0,849
18	1,75	1,25	0,73	147	12	11,6	0,957
18	1,75	1,75	0,64	1	1	0,6	0,600
18	1,75	1,75	0,64	3	2	1,0	0,577
18	1,75	1,75	0,64	7	3	1,3	0,491
18	1,75	1,75	0,64	28	5	3,5	0,661
18	1,75	1,75	0,64	63	8	5,9	0,743
18	1,75	1,75	0,64	91	10	8,2	0,860
18	1,75	1,75	0,64	147	12	11,9	0,981
18	2,00	1,00	0,86	1	1	0,6	0,600
18	2,00	1,00	0,86	3	2	0,8	0,462
18	2,00	1,00	0,86	7	3	1,0	0,378
18	2,00	1,00	0,86	28	5	4,4	0,832
18	2,00	1,00	0,86	63	8	7,2	0,907
18	2,00	1,00	0,86	91	10	9,8	1,027
18	2,00	1,00	0,86	147	12	13,1	1,080
18	2,00	1,50	0,72	1	1	0,6	0,600
18	2,00	1,50	0,72	3	2	0,8	0,462
18	2,00	1,50	0,72	7	3	1,1	0,416
18	2,00	1,50	0,72	28	5	4,4	0,832
18	2,00	1,50	0,72	63	8	7,3	0,920
18	2,00	1,50	0,72	91	10	10,1	1,059
18	2,00	1,50	0,72	147	12	11,8	0,973

18	2,00	2,00	0,55	1	1	0,6	0,600
18	2,00	2,00	0,55	3	2	1,1	0,635
18	2,00	2,00	0,55	7	3	1,3	0,491
18	2,00	2,00	0,55	28	5	4,3	0,813
18	2,00	2,00	0,55	63	8	6,6	0,832
18	2,00	2,00	0,55	91	10	9,3	0,975
18	2,00	2,00	0,55	147	12	12,1	0,998

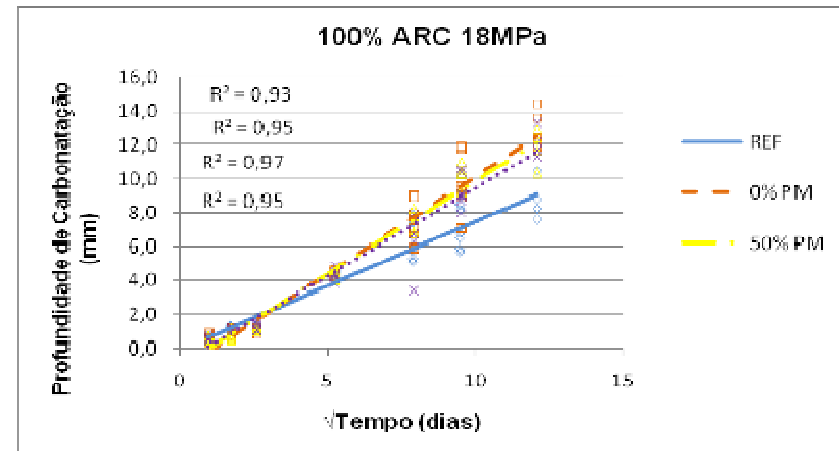
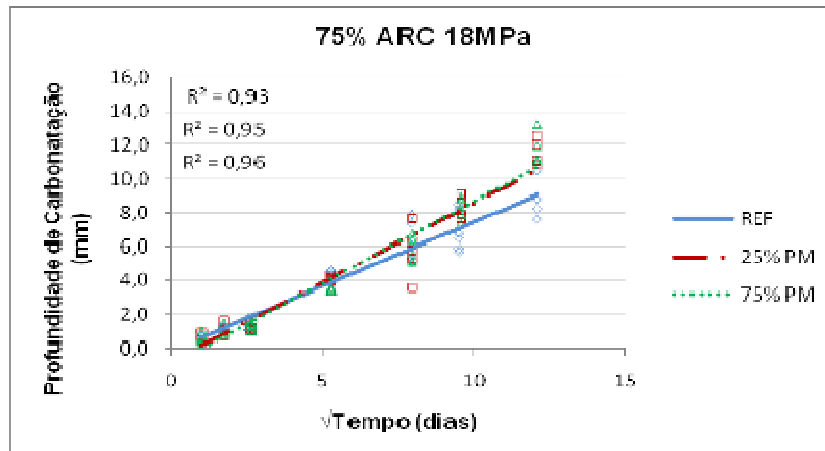
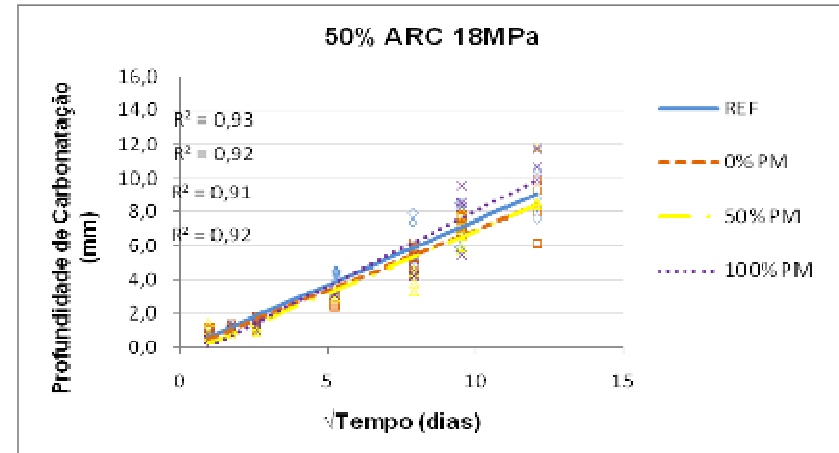
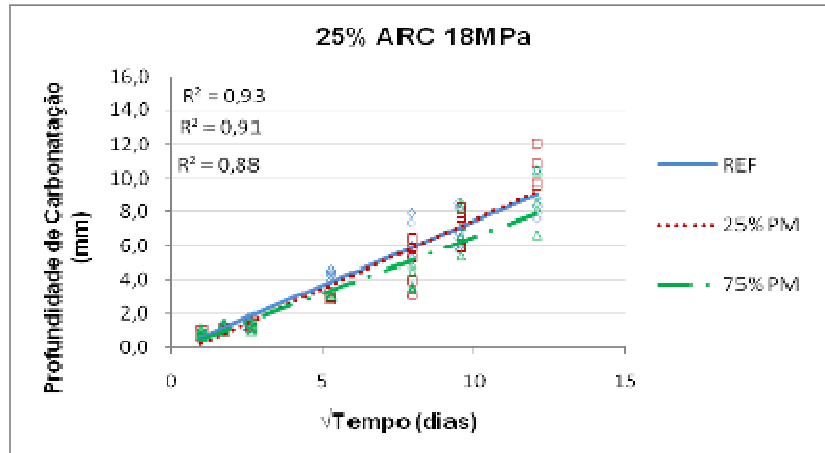
ANEXO G

Profundidades de carbonatação com 90% de confiança (Médias para 60 pontos de cada combinação)

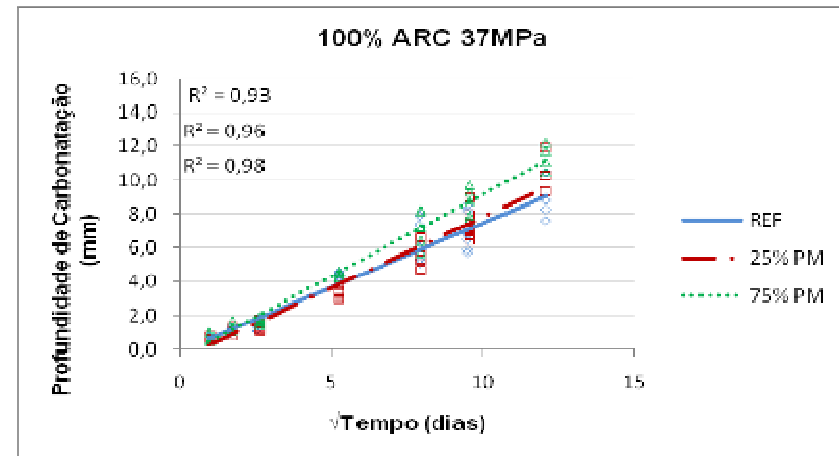
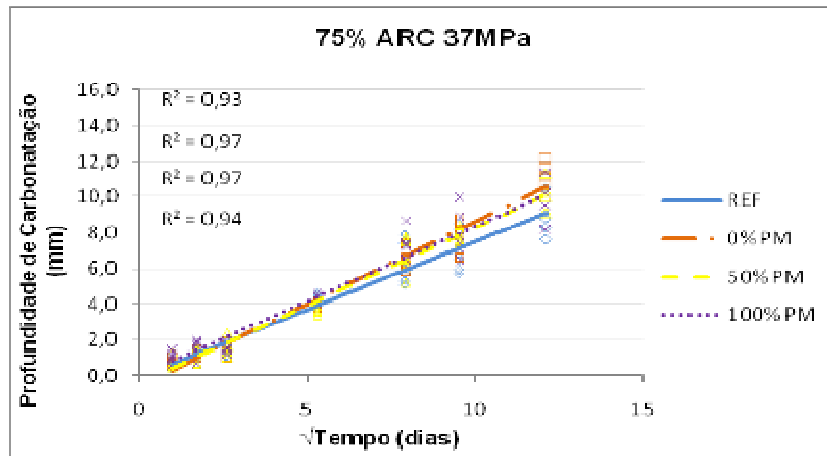
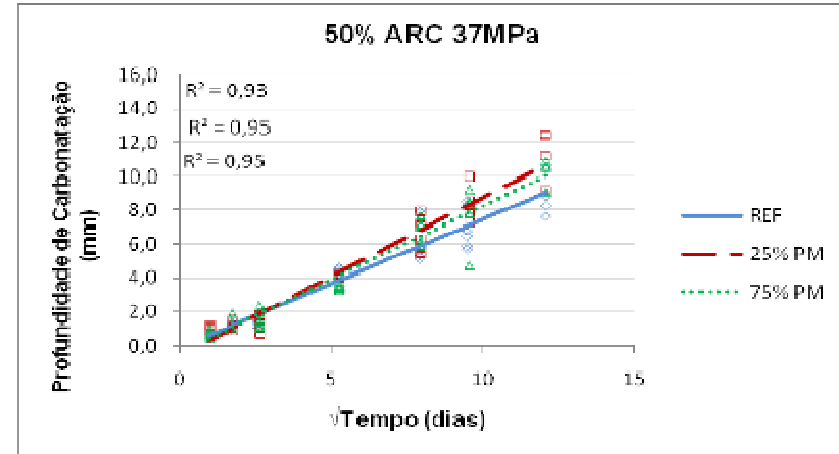
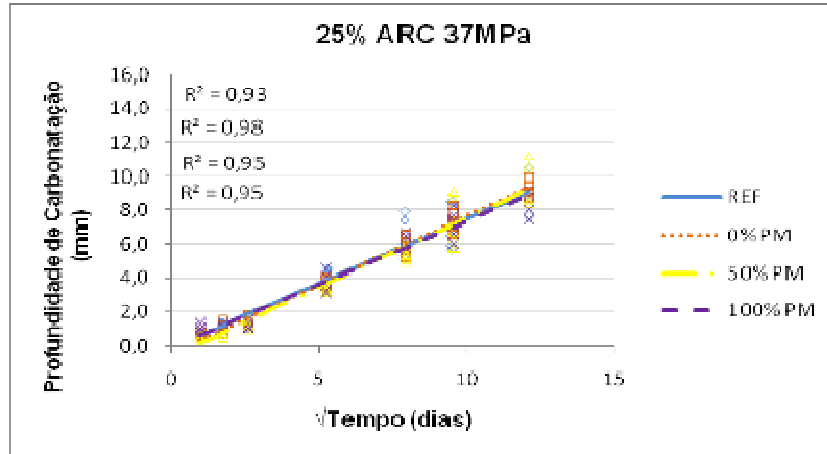
FCAG	TAG	TRAÇOS	Média	DPAD	$\alpha = 0,1$
ARC 18MPa	25% ARC	T3	11,39	1,5	13,313
		T6	11,1	2,3	14,0486
	50% ARC	T4	11,6	1,3	13,2666
		T7	10,6	1,9	13,0358
		T10	12,8	1,1	14,2102
	75% ARC	T8	14,2	1,8	16,5076
		T11	14,7	1,3	16,3666
	100% ARC	T9	16,8	1,4	18,5948
		T12	16,9	1,5	18,823
		T15	16	2,2	18,8204
ARC 37MPa	25% ARC	T14	11	1	12,282
		T17	10,8	1,5	12,723
		T20	10,6	1,8	12,9076
	50% ARC	T18	13,7	1,3	15,3666
		T21	12,1	1,3	13,7666
	75% ARC	T19	13	1	14,282
		T22	11,2	1,4	12,9948
		T25	12,8	1,4	14,5948
	100% ARC	T23	11,9	2	14,464
		T26	13,4	1,5	15,323
ARC 50MPa	25% ARC	T28	12,1	1,2	13,6384
		T31	10,3	2,1	12,9922
	50% ARC	T29	12,8	1,7	14,9794
		T32	11,1	1,8	13,4076
		T35	10,9	1,8	13,2076
	75% ARC	T33	11,5	1,7	13,6794
		T36	11	1,3	12,6666
	100% ARC	T34	10,5	1,6	12,5512
		T37	11,4	2,6	14,7332
		T38	12,7	1,7	14,8794
		REF	11	1,7	13,1794

ANEXO H

Profundidades de carbonatação ao longo do tempo ARC 18 MPa



Profundidades de carbonatação ao longo do tempo ARC 37 MPa



Profundidades de carbonatação ao longo do tempo ARC 50 MPa

