Salomon Mony Levy

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS, PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE CONCRETO E ALVENARIA

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil

SÃO PAULO
Dezembro 2001

FICHA CATALOGRÁFICA

Levy, Salomon Mony

Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. São Paulo, 2001. p.194

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Concreto 2. Durabilidade 3. Agregado reciclado 4. Concreto reciclado. 5.Alvenaria reciclada I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. II Departamento de Engenharia de Construção Civil.

Agradecimentos

Aproveitando a conclusão de mais uma etapa deste infindável trabalho de permanente aperfeiçoamento técnico, gostaríamos de externar nossa mais profunda admiração e mais sinceros agradecimentos por todos os educadores que com seus ensinamentos colaboraram direta ou indiretamente para realização deste árduo trabalho. Em especial, ao amigo e orientador prof. Dr. Paulo Helene, pelo incentivo e estímulo dedicados que colaboraram e muito, mostrando-nos nossa verdadeira vocação.

Aos que realizaram os ensaios primordiais para realização da parte experimental deste trabalho, em particular aos amigos Prof. Lindolfo Soares do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP, Luiz Tsuguio Hamassaki e Pedro Carlos Bilesky do Laboratório de concreto do IPT, a Valdecir Ângelo Quarcioni, do laboratório de análises químicas de materiais da Divisão de Engenharia Civil do IPT, a Yushiro Kihara da ABCP, a todo a equipe do laboratório do CPqDDC do departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP e em especial a todos que nos ajudaram nesta caminhada.

Aos nossos pais, que cedo nos indicaram caminhos possíveis a serem trilhados e calmamente, respeitando nossa decisão, souberam sentar-se na arquibancada da vida e assistir ao nosso desfile por ela.

Incentivando sem bajular quando se acertou.

Corrigindo sem criticar quando se errou.

Expondo opiniões sem impor ideais quando se discordou.

Confortando sem impedir que se sentisse o gosto amargo da derrota quando não se alcançou a vitória.

Enfim, tornando-nos capazes de realizar nossos ideais, aceitando nossa limitações e superando as frustrações decorrentes de sonhos muitas vezes não realizados.

Mostraram-nos a força da fé e da esperança em um amanhã melhor tornando-nos otimistas incorrigíveis.

À esposa e filhos, que por diversas vezes abriram mão do direito de momentos tão aprazíveis destinados ao convívio familiar, para não comprometer o andamento deste trabalho.

Aos amigos, realmente amigos, que torceram por nosso sucesso, emocionando-se com nossas conquistas e entristecendo-se com nossas derrotas.

LEVY, S. M.; **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. p.199 tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC.USP

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **VI**
ÍNDICE DE TABELAS ..... **VIII**
RESUMO ..... **X**
ABSTRACT ..... **XII**

INTRODUÇÃO **1**
1. OBRAS EM CONCRETO PREPARADO COM AGREGADOS RECICLADOS 2
2. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO 12
3. PESQUISADORES E CENTROS DE PESQUISA (NO BRASIL E NO EXTERIOR) 14
4. ORIGINALIDADE 19
5. OBJETIVO 20
6. CONTEÚDO DO TRABALHO 21

CAPÍTULO 1.
PROPRIEDADES SELECIONADAS PARA ESTUDO DA DURABILIDADE DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM MATERIAIS RECICLADOS **22**
1.1 CONSUMO 24
1.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 26
1.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE 27
1.3.1 .... NB 1 da ABNT de 1978- item 8.2.5: *29*
1.3.2 .... Proposição de Helene para a NB 1 da ABNT *29*
1.3.3 .... ACI Building Code 318; ACI Manual of Concrete Practice Detroit 1999 ..... *29*
1.3.4 .... CEB /FIP Model Code 90, de 1993- item 2.1.4.2: *29*
1.3.5 .... Instituto Japonês de Arquitetura *30*
1.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS 31
1.5 CARBONATAÇÃO 33
1.5.1 .... As reações químicas *34*
1.5.2 .... A carbonatação em estruturas de concreto aparente *35*
1.6 DIFUSÃO DO CO_2 NO CONCRETO 37
1.6.1 .... Modelos matemáticos utilizados na previsão da profundidade de carbonatação *38*
1.7 PENETRAÇÃO DE CLORETOS 40
1.7.1 .... Mecanismos de penetração dos íons Cl^- *40*
1.8 RESISTIVIDADE 43
1.8.1 .... Fundamento teórico *43*
1.8.2 .... Fatores que interferem na resistividade e seus critérios de avaliação *44*

CAPÍTULO 2.
AGREGADOS RECICLADOS **46**
2.1 ESTÁGIO ATUAL DA NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL E DO PAÍS PARA AGREGADOS RECICLADOS 48
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS 49
2.2.1 ..... Quanto à origem *50*
2.2.2 ..... Quanto à forma e textura *52*
2.2.3 ..... Quanto a granulometria *54*
2.2.4 ..... Quanto à reação álcali-agregado *56*
2.3 POSSIBILIDADE E POTENCIALIDADE PARA PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS 61
2.4 VOLUMES DE RESÍDUOS COLETADOS NO PAÍS E NO EXTERIOR 66
2.4.1 .... No País *67*
2.4.2 .... No Exterior *68*
2.5 POR QUE A SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR RECICLADOS? 70
2.6 PRODUÇÃO DE CONCRETOS DURÁVEIS COM AGREGADOS RECICLADOS 72

CAPÍTULO 3.
PARTE EXPERIMENTAL **74**
3.1 DESENVOLVIMENTO E PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO 74
3.1.1 .... Variáveis Independentes *75*
3.1.2 .... Variáveis Intervenientes *78*
3.1.3 .... Variáveis dependentes *79*
3.2 METODOLOGIA ADOTADA NA REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO 82
3.2.1 .... Serviços preliminares *82*
3.2.2 .... Preparação de agregados reciclados *82*
3.2.3 .... Caracterização dos agregados naturais e reciclados *85*
3.2.4 .... Moldagem dos corpos de prova para realização do experimento *87*

CAPÍTULO 4.
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS **89**
4.1 CONSTRUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE DOSAGEM DOS CONCRETOS DE REFERÊNCIA E CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS 89
4.1.1 .... Exemplo de aplicação da metodologia adotada para o caso de concretos de 30 MPa. Com agregados REF., RCG 50-50%, e RAM 50-50% *93*
4.2 ANÁLISE DE PROPRIEDADES EM FUNÇÃO DO ACRÉSCIMO DO TEOR DOS AGREGADOS RECICLADOS UTILIZADOS NO CONCRETO 117
4.2.1 .... Consumo de cimento por m³ *117*
4.2.2 ..... Resistência à compressão *122*
4.2.3 ..... Módulo de elasticidade *125*
4.2.4 .... Absorção por imersão e índice de vazios. *137*
4.2.5 .... Carbonatação *145*
4.2.6 .... Difusão do CO_2 no interior do concreto *154*
4.2.7 .... Penetração de íons Cl- *162*
4.2.8 .... Resistividade *171*
4.2.9 .... Inter-relação entre as propriedades pesquisadas. *174*
4.3 CONCLUSÕES 179
4.3.1 .... Propriedades de um concreto X teor de agregados reciclados. *179*
4.3.2 .... Desempenho dos concretos com agregados reciclados *182*

CAPÍTULO 5.
CONSIDERAÇÕES FINAIS **184**
5.1 TRANSFERÊNCIA DO CONHECIMENTO AO MEIO TÉCNICO. 184
5.2 PROSSEGUIMENTO DOS ESTUDOS 185

CAPÍTULO 6.
BIBLIOGRAFIA **187**

ANEXO I RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO ..... **A**

ANEXO II DIAGRAMAS DE DOSAGEM PARA AS PROPRIEDADES PESQUISADAS ..... **B**

LEVY, S. M.; **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. p.199 tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC.USP

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO - 1.
PROPRIEDADES SELECIONADAS PARA ESTUDO DA DURABILIDADE DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM MATERIAIS RECICLADOS

Figura 1-1 - Distribuição relativa da incidência das manifestações patológicas das obras em território nacional. (HELENE -1992) 23
Figura 1-2 Diagrama de dosagem ilustrativo redução de consumo com acréscimo de resistência 25
Figura 1-3 Dependência entre corrosão e propriedades relativas a penetração de água.(BASHEER-1996)[27] 32
Figura 1-4 Distribuição das causas que teriam ocasionado a corrosão da armadura, manifestações constatadas nas diversas escolas vistoriadas 36
Figura 1-5 Principais causas da corrosão de armadura em escolas vistoriadas. Fotos 1 e 2, carbonatação; Foto 3, ninhos de concretagem; Foto 4, cobrimento deficiente; Foto 5, aeração diferencial. 36

CAPÍTULO - 3.
PARTE EXPERIMENTAL

Figura 3-1 Britador de mandíbula utilizado na preparação dos agregados reciclados. 84
Figura 3-2 Aspectos dos agregados reciclados de concreto e de alvenaria 84
Figura 3-3 Evolução das expansões com o tempo de cura em solução alcalina 86

CAPÍTULO -4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Figura 4-1 Diagrama dosagem Resistência à Compressão Concreto de Referência 93
Figura 4-2 Diagrama dosagem Resistência à Compressão Concreto de RCG 94
Figura 4-3 Diagrama dosagem Resistência à Compressão Concreto de RAM 95
Figura 4-4 Diagrama dosagem para Profundidade de Carbonatação, Concreto de REFE 96
Figura 4-5 Diagrama dosagem para Profundidade de Carbonatação, Concreto de RCG 97
Figura 4-6 Diagrama dosagem profundidade de carbonatação, Concreto de RAM 98
Figura 4-7 Diagrama dosagem para difusão de CO_2, Concreto REFE. 14 e 28 dias 99
Figura 4-8 Diagrama dosagem para difusão de CO2, Concreto RCG. 14 e 28 dias 100
Figura 4-9 Diagrama dosagem para difusão de CO_2, Concreto RAM. 14 e 28 dias 101
Figura 4-10 Diagrama dosagem Índice de Vazios e Absorção, Concreto REFE. 102
Figura 4-11 Diagrama dosagem Índice de Vazios e Absorção, Concreto RCG. 103
Figura 4-12 Diagrama dosagem Índice de Vazios e Absorção, Concreto RAM. 104
Figura 4-13 Diagrama dosagem resistividade, Concreto REFE. 105
Figura 4-14 Diagrama dosagem resistividade, Concreto RCG. 106
Figura 4-15 Diagrama dosagem resistividade, Concreto RAM. 107
Figura 4-16 Diagrama dosagem penetração de cloretos, Concreto REFE. 108
Figura 4-17 Diagrama dosagem penetração de cloretos, Concreto RCG. 109
Figura 4-18 Diagrama dosagem penetração de cloretos, Concreto RAM 110
Figura 4-19 Diagrama dosagem Módulo de Elasticidade, Concreto REFE. 111
Figura 4-20 Diagrama dosagem Módulo de Elasticidade, Concreto RCG. 112
Figura 4-21 Diagrama dosagem Módulo de Elasticidade, Concreto RAM. 113
Figura 4-22 Variação do consumo de cimento em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30 e 40 MPa. 121
Figura 4-23 Evolução do consumo de cimento em função do teor de reciclados para concretos de 20, 30 e 40 MPa respectivamente 121
Figura 4-24Variação do módulo de elasticidade em função do teor de reciclados para f_c=20, 30 e 40 MPa.. 127
Figura 4-25 Desenvolvimento do módulo de elasticidade de diferentes classes de concreto, em função do teor do agregado reciclado utilizado 127

Figura 4-26 Comparativo entre dos valores de E_c, determinados pelo modelo proposto e os obtidos experimentalmente..... 130
Figura 4-27 Comparação entre modelos matemáticos, resistência à compressão x módulo tangente inicial.. 131
Figura 4-28 Variação do módulo de elasticidade em função do teor do agregado e da relação a/c, para cimento tipo I (YANNAS –1977) 132
Figura 4-29 Variação do módulo de elasticidade em função do teor do agregado e da relação a/c, para cimento tipo III (YANNAS –1977)..... 132
Figura 4-30 Módulo de elasticidade (RAVINDRARAJAH et. al. –1987) 133
Figura 4-31 Módulo de elasticidade (B.C.S.J. –1978) 134
Figura 4-32 Módulo de elasticidade (RASHEEDUZZAFAR E KHAN – 1984)..... 134
Figura 4-33 Variação da absorção de água por imersão em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30 e 40 MPa. 140
Figura 4-34 Variação do índice de vazios em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30 e 40 MPa..... 141
Figura 4-35 Variação da absorção de água em função da classe do concreto e do teor de material reciclado 142
Figura 4-36 Variação do índice de vazios em função da classe do concreto e do teor de material reciclado. 143
Figura 4-37 Variação da profundidade de carbonatação em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30,40 MPa 151
Figura 4-38 Variação da profundidade de carbonatação em função da classe do concreto e do teor de material reciclado..... 152
Figura 4-39 Inter-relação entre profundidade de carbonatação e absorção total par os concretos de 30 MPa com agregados RCG 50%-50%e RAM 50%-50% 153
Figura 4-40 Representação esquemática do percurso de difusão do CO_2 no concreto. Canais de transporte do CO_2 são representados como os poros capilares de maior diâmetro, os poros capilares de menor diâmetro preenchidos com água, são indicados como os retardadores do processo de carbonatação (TUUTTI, K; -1982)[130]..... 154
Figura 4-41 Variação do coeficiente de difusão da carbonatação em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30,40 MPa..... 156
Figura 4-42 Variação do coeficiente de difusão do CO_2 para as classes de concreto e em função do teor de material reciclado..... 157
Figura 4-43 Ranking das dos concretos monitorados que apresentaram profundidades crescentes de carbonatação, observações experimentais elaboradas por realizado por DUNSTER – (2000)[129] ... 160
Figura 4-44 Variação do teor de cloretos encontrados na camada com espessura de 0- 1 cm para concretos de 20, 30 e 40 MPa. 163
Figura 4-45 Variação do teor de cloretos encontrados na camada com espessura de 1- 2 cm para concretos de 20, 30 e 40 MPa. 165
Figura 4-46 Variação do teor de cloretos encontrados na camada com espessura de 2- 3 cm para concretos de 20, 30 e 40 MPa. 166
Figura 4-47 Perfil de cloretos para concretos de 30 MPa, concretos REFE. x RCG e RAG. 167
Figura 4-48 Perfil de cloretos para concretos de 30 MPa, concretos REFE. x RCM e RAM..... 167
Figura 4-49 Variação da resistividade em função do teor de agregados reciclados e de sua granulometria, para concretos de 20 30 e 40 MPa respectivamente. 172
Figura 4-50 Variação da resistividade para as classes de concreto em função do teor de material reciclado. 173
Figura 4-51 Consumo em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RCG..... 175
Figura 4-52 Consumo em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RAM 175
Figura 4-53 Difusão do CO_2 em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RCG..... 176
Figura 4-54 Difusão do CO_2 em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RAM 176
Figura 4-55 Resistividade em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RAM 177
Figura 4-56 Resistividade em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RAM 177
Figura 4-57 Cloretos na camada 0-1cm, concreto 30 MPa agregado RCG..... 178
Figura 4-58 Cloretos na camada 0-1cm, 30 MPa agregado RAM 178

LEVY, S. M.; **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. p.199 tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC.USP

ÍNDICE DE TABELAS

INTRODUÇÃO

Tabela 1 Relação de algumas obras, executadas em concreto com agregados reciclados, na Comunidade Européia, a partir do pós guerra. 4

CAPÍTULO - 1

PROPRIEDADES SELECIONADAS PARA ESTUDO DA DURABILIDADE DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM MATERIAIS RECICLADOS

Tabela 1-1 Comparativo entre NBR 6118, ACI 224R 15 e CEB FIP Model 1993....28

Tabela 1-2 Coeficiente para cálculo do módulo de elasticidade em função da qualidade do agregado....30

Tabela 1-3 Proposta para classificação dos concretos segundo HELENE[28] de acordo com a porosidade e a absorção de água.* 32

Tabela 1-4. Critérios de avaliação da resistividade (CEB Bulletin nº192)....45

CAPÍTULO 2.

AGREGADOS RECICLADOS

Tabela 2-1 Pedra britada - pedrisco - pó de pedra 53

Tabela 2-2 Absorção de água em função dos britadores utilizados para produção do agregado reciclado B. C. S. J. 1978 54

Tabela 2-3 Porcentagem passante pelas peneiras, valores indicados pelas Normas ASTM C33-93 BS 882 1992 e pela NBR 7112/83, para agregados miúdos....56

Tabela 2-4 Situação em alguns dos municípios Nacionais sobre a política de Gestão dos resíduos sólidos da Capacidade instalada.(TARCISIO – 2001)....62

Tabela 2-5 Coleta dos resíduos sólidos de construção em municípios Nacionais.(diversas fontes)....67

Tabela 2-6 Quantidades de resíduos sólidos coletados na comunidade Européia (Construction and Demolition Waste Management Practices and their Economics Impacts- (ETN Recycling in construction 1999)....69

CAPÍTULO - 3.

PARTE EXPERIMENTAL

Tabela 3-1 Composição em massa dos agregados utilizados, ensaiados....76

Tabela 3-2 Agregados utilizados na preparação das 13 famílias de concreto....87

Tabela 3-3 Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina 86

Tabela 3-4 Traço, consistência e relação a/c dos concretos a serem ensaiados. 88

Tabela 3-5 Composição dos materiais utilizados no preparo das barras do ensaio de reatividade álcali-agregado. 88

CAPÍTULO -4.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tabela 4-1 Comparativo entre as propriedades utilizadas no estudo de durabilidade para concretos 20,30 e 40 MPa produzidos com diferentes teores de materiais reciclados....91

Tabela 4-2 Comparativo entre as propriedades utilizadas no estudo de durabilidade para concretos 20,30 e 40 MPa produzidos com diferentes teores de materiais reciclados....92

Tabela 4-3 Classe de resistência e consumo de concretos com 100% de agregados reciclados de alvenaria 119

Tabela 4-4 Evolução da resistência à compressão para concretos de 20, 30,40 MPa com diferentes teores de agregados 124
Tabela 4-5 Comparação entre evolução da resistência à compressão para concretos com 20, 50 e 100% de material reciclado..... 124
Tabela 4-6 Relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade..... 129
Tabela 4-7 Módulos de Elasticidade x Resistência à Compressão, para f_c = 30 MPa. 135
Tabela 4-8 Valores de a em função da característica e do teor dos reciclados utilizados no concreto. 137
Tabela 4-9 Comparação entre volume de pasta, absorção indicie de vazios em função do agregado utilizado 144
Tabela 4-10 Comparação entre volume de pasta, absorção indicie de vazios em função do agregado utilizado, valores relativos. 144
Tabela 4-11 Resultados comparativos de ensaios acelerados profundidades de carbonatação em (mm) . 148
Tabela 4-12 Incremento do consumo de cimento, para redução da profundidade de carbonatação 150
Tabela 4-13 Classificação dos concretos com base no coeficiente de carbonatação..... 159
Tabela 4-14 Tempo de equivalência entre câmara e atmosfera para concretos de cimento Portland..... 159
Tabela 4-15 Misturas utilizadas no ensaio para comparação de resultados em condições de exposição acelerada e em condições de exposição natural (DUNSTER - 2000)[129] 161
Tabela 4-16. Limite de normas para teor total de cloretos (HELENE-1993) [23]..... 168
Tabela 4-17 Teor de cloretos, resultados do modelo proposto e obtidos experimentalmente em corpos de prova expostos até 5 anos. (ONYEJEKWE O. O. & REDDY N. - 2000) 169
Tabela 4-18 Teor de Cloreto nas camadas de 0-1, 1-2, 2-3 cm. Valores calculados pela metodologia adotada no desenvolvimento desta tese para concretos de 30 MPa..... 170
Tabela 4-19. Critérios de avaliação da resistividade (CEB Bulletin nº192). 174
Tabela 4-20 Propriedades relativas para concretos de 30 MPa..... 183

LEVY, S. M.; **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. p.199 tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC.USP

RESUMO

Esta tese é um estudo sobre durabilidade de concretos produzidos com resíduos de alvenaria e de concreto endurecido. As técnicas empregadas para estudar a durabilidade dos concretos produzidos com materiais reciclados, foram as mesmas técnicas atualmente empregadas para o estudo de concretos produzidos com agregados convencionais.

Os agregados reciclados utilizados na elaboração deste trabalho foram quatro, dois graúdos e dois miúdos, provenientes de alvenaria e de concreto respectivamente. Para produção dos concretos ensaiados, utilizou-se três diferentes teores de cada agregado 20%;50%;100% em substituição aos agregados naturais. Os resultados obtidos foram comparados aos resultados obtidos para uma família de concreto produzida com agregados exclusivamente naturais, totalizando assim 13 diferentes famílias. Não foi elaborada uma análise pontual dos resultados, procedimento adotado com freqüência, pela maioria dos pesquisadores. Os resultados obtidos foram utilizados para construir diagramas de dosagem os quais possibilitaram adoção de modelos matemáticos que conduziram a uma análise criteriosa de diferentes classes de concreto com 20, 30, e 40 MPa sem que houvesse a necessidade de moldá-los em laboratório. O teor crescente de agregados reciclados resultou num comportamento distinto em função da granulometria e da qualidade, do agregado utilizado. A substituição de 50% dos agregados miúdos naturais, por reciclados de alvenaria miúdos (RAM), conduziu algumas das propriedades analisadas a um valor ótimo, todavia, quando foram substituídos agregados naturais por outros agregados reciclados, constatou-se uma tendência crescente ou decrescente da propriedade analisada.

Através dos resultados obtidos por meio das condições extremas alcançadas nos ensaios acelerados, pode-se afirmar que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram comportamento equivalente ou superior ao do concreto de referência nos ensaios de

carbonatação. Comparou-se a relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade obtida por alguns modelos matemáticos e chegou-se a conclusão que o modelo utilizado pela NB1 de 1978, conduz a valores superestimados. Propõe-se um modelo alternativo para a determinação da relação entre módulo e resistência à compressão para concretos preparados com agregados reciclados e naturais. Finalizando apresenta-se uma tabela na qual pode ser visualizado e desempenho relativo dos concretos com agregados reciclados e o de referência.

Nos anexos apresentam-se todos os resultados obtidos assim como os diagramas de dosagem elaborados a partir dos resultados pontuais.

LEVY, S. M.; **Contribution for Durability Studied Concretes produced with masonry and concrete wastes**.São Paulo, 2001. p.199 tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC.USP

ABSTRACT

This thesis studies the durability of concretes. These were studied with the same methods employed to study the durability of concretes made with traditional aggregates. In order to prepare these concretes, four different aggregates were employed, two of them coarse and the others fine, in 20%, 50% and 100% contents each. The results obtained were compared with a concrete reference family, produced exclusively with traditional aggregates. The punctual points results were utilized to design the mix proportion monogram, which allowed to meticulously analyze different concrete groups of 20, 30, 40 MPa, which did not need to be molded in laboratory. The recycled aggregates increased contents showed different behavior depending on the kind and on the granulometry of the aggregates employed. When 50% natural aggregates were replaced by masonry-recycled fine aggregate (RAM), an optimum value was obtained for almost all the properties analyzed. When different recycled aggregates were employed to replace natural aggregates, an increasing or decreasing tendency of the properties analyzed was observed.

The results obtained with accelerated tests show that concrete produced with recycled aggregates have an equivalent or better behavior than the reference concrete in carbonation tests. The compressive strength and the modulus were compared using mathematical models; the conclusion was that the model used by the standard NB1/78 yielded super estimated results, and thus an alternative model was proposed to determine the ratio between modulus and compressive strength. Finally a table shows the relative performance between concretes with recycled aggregates and natural aggregates, the attach show all effects got in the same way that the mix proportion monogram produced from the punctual point results.

INTRODUÇÃO

Antes de iniciar o estudo da durabilidade de concretos produzidos com materiais reciclados, seria importante estabelecer a relação entre uma longa vida útil e durabilidade. Sem qualquer esforço mental é possível concluir que trata-se de sinônimos.

Hoje em dia é usualmente aceito que, ao se projetar uma estrutura, as características de durabilidade dos materiais em questão devam ser avaliadas com o mesmo cuidado que outros aspectos, tais como propriedades mecânicas e custo inicial. Uma vez que durabilidade sob um conjunto de condições não significa necessariamente durabilidade, sob outro conjunto, costuma-se incluir uma referência geral ao ambiente ao se definir durabilidade (MEHTA - 1994)[1]. De acordo com o comitê 201 do ACI, durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, isto é, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto a determinado meio ambiente.

De forma geral, com os custos de manutenção se tornado cada vez mais elevados e com a ênfase crescente no custo do ciclo de vida ao invés do custo inicial, os engenheiros tem sido forçados a tomarem consciência dos aspectos de durabilidade, tal fato leva, a uma melhor avaliação das implicações sócio-econômicas e ao entendimento que existe uma estreita relação entre a durabilidade de materiais e ecologia. A conservação de recursos materiais através da produção de materiais mais duráveis é, além de tudo, um passo ecológico.

No projeto da NBR 6118-2000, atualmente em elaboração, nos capítulos, IX e X HELENE[2] (2000) sugere que, para produção de concretos duráveis sejam atendidos os seguintes aspectos:

---

[1] MEHTA, K. P & MONTEIRO P. J. M. **Concreto estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. PINI, 1994. 574 p.

[2] HELENE, P. R L. Projeto do texto proposto para revisão da NBR 6118/78

“As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob condições ambientais previstas na época do projeto, e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança estabilidade e aptidão em serviço durante um período mínimo de 50 anos, sem exigir medidas extras de manutenção e reparo”.

No intuito de contribuir com o desenvolvimento do estudo da durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, tendência das mais atuais entre os países da Comunidade Européia e nações evoluídas como Japão e Estadas Unidos, deu-se prosseguimento à pesquisa iniciada em 1994 que resultou na dissertação de mestrado deste autor “RECICLAGEM DO ENTULHO DE CONSTRUÇÃO CIVIL, PARA UTILIZAÇÃO COMO AGREGADOS DE ARGAMASSAS E CONCRETOS”

Na dissertação apresentada à época, optou-se por apresentar o estado da arte da reciclagem e elaborar um experimento com a finalidade de analisar a influência exercida pelos resíduos de alvenaria e argamassas endurecidas na produção de novas argamassas.

Para dar continuidade ao estudo iniciado em 1994, julgou-se oportuno, analisar a influência exercida pelos resíduos de concreto e de alvenaria na durabilidade de novos concretos e comparar os resultados obtidos a um concreto de referência produzido com agregados exclusivamente naturais. Objetivando alcançar tal finalidade, desenvolveu-se um trabalho experimental utilizando as técnicas tradicionalmente empregadas no estudo da durabilidade de concretos produzidos com agregados naturais aos concretos produzidos com agregados reciclados.

No próximo item apresenta-se uma relação de obras edificada na comunidade européia, executadas em concreto com agregados reciclados, as quais foram e continuam sendo monitoradas dentro de um programa de acompanhamento do comportamento do concreto ao longo do tempo, objetivando a detecção de eventuais manifestações patológicas que possam reduzir a vida útil ou comprometer a segurança e estabilidade das mesmas.

1. Obras em concreto preparado com agregados reciclados

Quanto a produção de concretos com agregados obtidos a partir de resíduos minerais reciclados, pode-se dizer que só a partir de 1928, começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática, para avaliar o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados, oriundos de alvenaria britada e de concreto. Porém, a primeira aplicação significativa de entulho reciclado, só foi registrada após o final da 2ª Guerra Mundial, na reconstrução das cidades européias, que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e o escombro ou entulho resultante, foi britado para produção de agregados visando atender à demanda na época (WEDLER; HUMMEL, 1946)[3]. Assim, pode-se dizer, que a partir de 1946 teve início o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem do entulho de construção civil.

Embora as técnicas de reciclagem dos resíduos minerais de construção civil tenham evoluído, não se pode afirmar com absoluta convicção, que a reciclagem tenha se tornado uma idéia amplamente difundida.

Na Europa, de acordo com dados de 1995, havia um desperdício equivalente a 200 milhões de toneladas anuais entre concreto, pedras e recursos minerais valiosos. Tal volume de materiais seria suficiente para se construir uma rodovia com seis faixas de rolamento interligando as cidades de Roma e Londres (LAGUETTE, 1995)[4].

Felizmente, nações tecnologicamente desenvolvidas como Estados Unidos, Holanda, Japão, Bélgica França e Alemanha entre outras, já perceberam a necessidade de reciclar as sobras de construção civil e tem pesquisado o assunto intensamente, visando atingir um grau de padronização dos procedimentos adotados para obtenção dos agregados, atendendo desta forma aos limites que permitem atingir um padrão mínimo de qualidade (LEVY, 1997)[5].

---

[3] WEDLER,B.; HUMMEL A. **Trümmerverwertung und ausbau von brandruinen**. Wilhelm Ernest & Sohn, Berlin, 1946.

[4] LAGUETTE, M. J. Reciclaje: la clave para la conservación de recursos. **CONSTRUCTION PAN-AMERICANA**, julho 1995.

[5] LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo 1997. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PCC/USP.

A partir de 1988 a C.E. (Comunidade Européia) executou um grande número de obras em concreto obtido a partir de agregados reciclados, de concreto, de alvenaria, assim como da mistura de ambos, algumas dessa obras e suas características são indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 Relação de algumas obras, executadas em concreto com agregados reciclados, na Comunidade Européia, a partir do pós guerra.

Características localização da obra e descrição	Volume (m³)	Local de aplicação	Ano em que foi desenvolvido
HOLANDA[6]			
Viaduto na rodovia RW-32 (próximo a Meppel)	500	Muretas laterais	1988
Eclusa da Hidrovia de Haandrick próximo à Almelo	2.000	Laje submersa	1988
Interligação entre barragem e eclusa em Nieuw Statenzijl	3.000	Laje submersa	1989
2º Viaduto na rodovia RW-32 (próximo a Meppel)	11.000 (20-80%)	Todos os componentes da estrutura	1990
Delftse Zoom Housing Project[7] Construção de um empreendimento residencial dotado de unidades de médio-padrão. Projeto desenvolvido para demonstrar a viabilidade da substituição de 100% do agregado natural por reciclado tomando-se as devidas precauções Este projeto tem sido usado para suporte do corpo regulamentador e autoridades visando a publicação de norma especificas para produção e concretos com agregados reciclado	272 unidades	Nos painéis pré moldados de concreto Observações gerais Agregado utilizado granulometria entre 4-16mm (50-50% concreto alvenaria), Isolamento acústico atende exigências preconizadas pelos órgãos competentes Painéis não apresentaram diferenças nos aspecto externo em relação aos painéis com agregados naturais	1997 – 1998

[6] COLENBRANDER, W; Rijkswaterstaat Demonstration Projects The Netherlands 1988-1992, **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

[7] MIJINSBERGEN, J.; The Delftse Zoom Housing Project **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

NA INGLATERRA[8]			
O edifício do meio ambiente do BRE; 1º edifício do Reino Unido a incorporar a tecnologia de concreto usinado com a utilização de agregados reciclados.	1.500 m³ Supervisão Eng Calculista Buro Happold e staff do BRE	**Fundações**, C-25 slump = 75 ± 10 mm **Lajes tipos e pilares**, C-35 slump = 75 ± 10 mm **Norma** BRE DIEGEST 363 C. min.= 330 kg/m³ a/c max. = 0,50 cimento utilizado C 25 com 70% escoria de alto forno C 35 com 50% escoria de alto forno	1996
Piso de alta resistência do Laboratório de Cardinton BRE Construído especialmente para analisar o efeito causado por substituição em massa de 20% de agregados reciclados de concreto e alvenaria de baixa qualidade	500	Foi utilizado um concreto bombeado e num único dia foram bombeados os 500 m³. Apesar de ter sido produzido com agregados reciclados que continham 50% de resíduos de alvenaria, apresentaram uma evolução da resistência à compressão similar a de um piso construído exclusivamente com agregados naturais, tendo atingido, f_c = 60 MPa aos 91 dias similar a um concreto natural	1996
Novo centro de operações para tratamento de água Neste projeto foi preparado concreto usinado com agregados britados , produzidos a partir de concreto de dormentes ferroviários	4.000	Aplicado em toda estrutura Normas utilizadas BRE Digest 433 Class RCA(II) (crushed concrete for use in concrete BS 882—aggregate for concrete[specification of physical characteristics only BRE Digest 330 – minimization of risks due to alkali silica reaction BS 5328 specification for concrete	1999-2000

[8] COLLINS, R BRE 1995-1996 **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

Na Bélgica[9]			
Casa da Reciclagem construída em conjunto pelas associações BBRI- CSTR- WTCB Trabalho desenvolvido com o intuito de: Promover a interação da larga faixa de materiais reciclados e reaproveitados, provenientes dos resíduos de demolição de construção civil com sub produtos de outras atividades industriais. Suprir a falta de informações tecnológicas dos arquitetos e construtores relutantes em utilizar materiais alternativos, uma vez que estes são responsáveis por sua aplicação durante 10 anos.	01 unidade	Materiais produzidos: Blocos de concreto nos quais foram substituídos parcialmente por agregados naturais por reciclados provenientes de resíduos de usinas de aço. Blocos de vedação com agregados obtidos através da britagem de monitores de TV e computadores. Janelas em PVC reciclado. Agregados para enchimento dos drenos de muros de contenção, obtidos a partir garrafas plásticas e látex.	1997- 2000
Eclusa de Berendrecht Para ampliação do porto de Antuérpia. Concepção da obra: demolição de antigas paredes de embocamento da eclusa de Zandvliet para possibilitar a construção do novo canal de acesso comum às eclusas de Berendrecht e de Zandvliet barragens. A presença de impurezas como finos, lama, argila e siltes mostraram ser de fundamental importância, na qualidade final, em conseqüência foram criadas recomendações para tolerância dos limites de filler e areia nos agregados reciclados. Para manter a trabalhabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados, similar a de concretos naturais, o pré-umedecimento mostrou grande eficiência. A quantidade de água necessária foi aferida e corrigida em função da consistência desejada[10].	650.000 m³ concreto lançado 80.000 m³ agregados reciclados proveniente s de demolição das paredes da antiga eclusa	Na construção das paredes de uma das maiores da eclusas do mundo, este empreendimento demonstrou ser viável a produção de concretos com f_{c28} = 35 MPa e retração por secagem < 150 µm/m Linhas mestras do estudo para aproveitamento do material de demolição: • Caracterização detalhada dos resíduos, • Otimização da instalação para processamento do entulho, • Desenvolvimento do sistema de controle e qualidade, Tecnologia para produção de concreto com agregados reciclados. Sem manifestações patológicas há 13 anos	1987-1988

[9] ROUSSEAU, E. **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

[10] Este empreendimento, deu novo alento à industria belga de reciclagem, hoje, na Bélgica.

Na Alemanha[11]			
Elementos decorativos fabricados com agregados reciclados de: • Concreto • Alvenaria de blocos cerâmicos • Combinação de ambos O Cimento utilizado branco ou preto conforme a tonalidade desejada para o acabamento superficial do elemento decorativo. Até o presente momento é muito cedo para conclusões quanto a questão da durabilidade, todavia não há qualquer expectativa sobre o surgimento de manifestações patológicas.		Grandes peças de concreto foram utilizados como elementos decorativos para adornar a área de exposição do Federal Gardenig Exhibition em Magdeburg	1999
Reconstrução das cidades alemãs O colapso de um edifício ocorrido em 1959, construído de acordo com a tecnologia de reciclagem, na cidade de Berlim, obrigou a uma extensa e delongada pesquisa que permitiu a avaliação da segurança dos demais edifícios existentes construídos com a mesma tecnologia. Grande número de amostras foi retirado, por vezes até paredes inteiras. Apenas um reduzido número de casas[12] apresentou necessidade de reforço estrutural, o qual foi executado por injeção de pasta de cimento ou graute	Milhares de condomínios em Berlim e milhares de conjuntos residenciais em outras grandes cidades	Produção de agregados reciclados provenientes de alvenaria de blocos cerâmicos - Para concretos normais - Para concretos leve - Para produção de blocos para alvenaria	1945 - 2000
Numa vila militar em Itzehoe a empresa Plate e Patner desenvolveu um projeto a título de demonstração para as modernas condições da vida urbana. Projeto pioneiro para conversão e reciclagem de materiais de	Na área de 200.000 m² foram construídas, 550 unidades, residenciais, comerciais e	Empregando material de demolição da vila militar, (500.000 t de resíduos de alvenaria e 20.000 m³ de resíduos de concreto) os quais forma processados imediatamente reutilizados	1996-1997

[11] KROPP, J. **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

[12] As propriedades do concreto produzido com agregados reciclado, os princípios construtivos, as medidas para garantia da qualidade e a posterior avaliação do comportamento das estruturas existentes determinadas por esta pesquisa, foram documentas em artigos técnicos, publicações regulares e apresentadas em eventos científicos.

construção Em conseqüência da detende na Europa, nos anos 90 ocorreu um drástico decréscimo no efetivo das forças armadas o que deixou grande números de instalações militares (como casernas) sem utilização próximos aos centros urbanos. Principal objetivo do projeto: conseguir habitações de baixo custo *.	escritórios com infra-estrutura para realização de eventos e convenções.	no próprio canteiro.	
• Resultado: 2000,00 DM/ m² → US $ 850,00 m² o que para os padrões brasileiros já é uma construção de alto padrão. Existem mais de 80 instalações operando comercialmente na cidade que muito em breve estarão processado 5 milhões de toneladas ano de resíduos de demolição. Benefícios imediatos: Preservação de recursos naturais e economia de 5000 viagens de caminhões truckes que teriam de transitar pelo centro da cidade, Criação de um documento específico, baseado nos rigorosos esquemas de controle de qualidade aplicada aos materiais em teste, para aceitação de concreto com material reciclado. Deve ser lembrado que a versão da época da norma DIN 1045 ainda não abrangia a reciclagem de materiais de construção. Resultados esperados: Não são esperadas manifestações patológicas por parte da estrutura uma vez que os elementos estruturais confeccionados com agregados reciclados não estão sujeitos a ação das intempéries.			

FINLÂNDIA [13]			
Na Finlândia, desde 1998 quando foi implantado um sistema de tributação sobre resíduos, ocorreu um rápido crescimento na produção de concreto reciclado. Os resíduos britados são disponibilizados no mercado sob o nome de Betoroc, apresenta granulometria entre 0-50 mm.	Atualmente, anualmente são geradas cerca de 500.000 a 1000.000 t. de resíduos de concreto, provenientes de trabalhos de demolição, das quais 350.000 t. são recicladas.	Base e sub bases de pavimentos rodoviários. Segundo a publicação consultada [9] o Betoroc, apresenta a ganho de resistência sem qualquer adição de cimento. [14] Permitido desta forma uma redução de cerca de 40% na espessura da base ou sub base do pavimento.	1998

[13] KIVEKÃS, L. **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

[14] Na opinião deste autor, não deveria haver ganho de resistência tão elevado, pois não haveria tanto cimento anidro a disposição para ser recuperado.

Na Noruega[15]			
Inauguração de novo aeroporto e demolição do aeroporto de Fornebu		Os resíduos desta demolição foram utilizados em outras construções.	1998
Programa de reciclagem em larga escala que vem sendo desenvolvido em Trondheim RIT 2000 consiste da demolição do Hospital Regional, Embora paralelamente será erguido um novo conjunto hospitalar não será possível utilizar os resíduos, uma vez que só poderá ser demolido uma unidade após a nova estar operando normalmente Desafios: Criar soluções para reaproveitamento dos resíduos de demolição de modo que o projeto já nos primeiros estágios seja reconhecido como exemplo de organização comprometida com o desenvolvimento sustentável com o foco para o emprego de materiais ecologicamente corretos Determinar qual seria o custo real dos materiais provenientes da demolição	RIT 2000 consiste da demolição do Hospital Regional, onde estão construídos 16 edifícios com um área construída de aproximadamente 50.000 m² cujos principais metas são: Quantidade de entulhos estimada como subproduto da demolição 85.000 a 100.000 t	Construção conjuntos residenciais nas imediações do antigo hospital. Aproveitando mais de 90% dos resíduos disponíveis, uma vez que mais de 80% serão resíduos de alvenaria ou de concreto.	1998-2003

Para o sucesso do programa, as casas construídas com material reciclado deverão ser tecnicamente, ecologicamente e economicamente equivalentes ou superiores às casas com agregados naturais.

O aspecto logístico evidentemente será um dos maiores problemas a ser resolvidos

A experiência Dinamarquesa com a construção de 3 residências com material reciclado comprovou a dificuldade em sincronizar a oferta de materiais reciclados com a demanda no processo construtivo.

Através da formação de grupos de trabalho na Noruega tem se procurado desenvolver a Competitividade no setor da construção para isso foram formados.

Um grupo de trabalho que atua em desenvolvimento sustentável e uma força tarefa em gerenciamento de resíduos de construção.

Em novembro de 1997 a comissão européia publicou um comunicado que ficou conhecido como “Competitividade no setor da construção”.

15 KARISSON, F. B. **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

O comunicado analisa e descreve os principais elementos que afetam o setor. Propõe 4 objetivos estratégicos para incrementar a competitividade • Melhoria da qualidade • Adaptação da regulamentação vigente • Incrementar educação e treinamento Reordenação das pesquisas e do desenvolvimento Tais objetivos estratégicos foram propostos como ações competitivas concatenadas e além do que foram desenvolvidas pela indústria, autoridades e por comissões especialmente formadas para o assunto.
Durante um seminário onde estiveram presentes industriais e representantes de autoridades oficialmente designadas em maio de 1999, três recomendações prioritárias para desenvolvimento da competitividade foram aprovadas, uma em desenvolvimento sustentável para o desenvolvimento de uma estratégia européia para o uso e a divulgação de materiais de construção de uma forma ambientalmente sustentável, outra para eficiência energética em edifícios e outra para gerenciamento de resíduos. Em junho de 2000 todas estas forças tarefas prepararam documentos com recomendações que foram discutidas pelo grupo de trabalho numa sessão plenária. O objetivo deste documento foi a formação de bases para a consolidação de um relatório final. Este relatório foi discutido e analisado em setembro de 2000 em Paris durante o 1º Workshop da ETNRecy.net

Embora, no Brasil ainda não seja habitual a produção de concreto com material reciclado, percebe-se uma tendência generalizada por parte da iniciativa privada e do poder público, em equacionar e gerenciar a geração de entulhos de construção, que vem se transformando em problema de grandes proporções nas maiores metrópoles do País.

A alternativa de produzir concreto com estes resíduos é sem dúvida uma solução que vem sendo largamente pesquisada e a sua viabilidade técnica já foi demonstrada em diversas pesquisas desenvolvidas nas várias universidades nacionais assim como no grande número de trabalhos técnicos apresentados nos quatro seminários realizados pelo CT206 do IBRACON (97, 99, 00 e 01).

Segundo (PINTO, 2000)[16], a massa de resíduos de construção dos últimos 5 anos, tem obrigado as administrações municipais de maior porte a

16 PINTO, T.P. Bacias de Captação de Resíduos Sólidos –Instrumento Para Uma Gestão Sustentável Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção

adotar algum tipo de solução, o município de Belo Horizonte, cidades do interior paulista, assim como Londrina no Paraná, tem recorrido a reciclagem como forma de equacionar seus problemas. Algumas destas cidades recorreram simplesmente a instalação de equipamentos de britagem e outras já constituíram políticas especificas para o médio e longo prazo, potencializando resultados mais significativos. Como o reciclado já vem demonstrando muito bom desempenho numa série de usos em obras urbanas, com a obtenção de custos bastante vantajosos, seria possível viabilizar sua utilização em concretos para:

Base de pavimentos

Estruturas residenciais com fck_{28} = 18 a 24 MPa

Produção de artefatos pré-moldados em concreto (guias, sarjetas, tubos de concreto).

Ainda segundo (PINTO, 1999)[17] em Belo Horizonte encontra-se em implantação a primeira instalação para produção de artefatos com uso exclusivo de resíduos reciclados como substitutos dos agregados convencionais.

CAD com agregados reciclados

Trata-se de um tema dos mais atuais, na revisão bibliográfica localizou-se um trabalho (LIMBACHIYA M.C - 2000)[18] sobre o tema concreto de alto desempenho com agregados reciclados, as principais conclusões foram:

Agregados reciclados de concreto têm massa unitária inferior de 7 a 9 % e apresentaram um valor de absorção de água duas vezes superior aos agregados naturais utilizados no experimento. Em geral as propriedades

---

Urbana, In: III SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL junho 2000, São Paulo SP **ANAIS**, São Paulo, junho 2000 PCC/USP, IBRACON. p 25-34.

17 PINTO, T.P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo 1999. 189 p. tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil.

18 LIMBACHIYA M.C.; LEELAWAT, T. D. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures,** novembro-2000.

mecânicas destes agregados foram inferiores aos dos agregados naturais, porém atendem as especificações preconizadas pela BS.

Os resultados indicaram que até o teor de 30% de material reciclado não houve qualquer efeito na resistência à compressão do concreto nem na absorção de água. Entretanto, para teores crescente de agregados reciclados, há um decréscimo destas propriedades nas idades ensaiadas 7, 28, 60, 90 dias. As resistências alcançadas para concretos produzidos com estes agregados foram de 50 a 70 MPa. Embora seja um artigo atual, o fato dos autores terem concluído, que ajustes na relação água/cimento corrige eventual decréscimo na resistência de concretos produzidos com agregados reciclados, não apresenta qualquer novidade técnica, uma vez que se trata da lei de ABRAMS, há muito tempo conhecida e amplamente utilizada, no meio técnico.

2. Justificativa e Importância do trabalho

A justificativa para elaboração desta tese está no fato que, poderá ser adquirido conhecimento tecnológico necessário e suficiente para se produzir um concreto durável, utilizando-se material reciclado, e adequado às necessidades da maioria das obras usualmente executadas no território nacional, cuja resistência à compressão requerida varia de 18,0 a 30,0 MPa.

É interessante notar que embora tenham sido localizados, na literatura pesquisada, inúmeros trabalhos sobre dosagem, sobre propriedades mecânicas e sobre outras propriedades analisadas individualmente, que tratam de concretos produzidos com agregados obtidos a partir de resíduos minerais reciclados, não foram localizados trabalhos que avaliassem a durabilidade destes concretos de forma sistemática e abrangente relacionado as propriedades, tais como, absorção, índice de vazios e resistividade elétrica, com as propriedades que atuam diretamente na durabilidade de uma estrutura tais como a carbonatação e o teor de cloretos em diversas profundidades.

A importância, desta tese , está no fato de se tratar de uma tentativa de alterar o pensamento vigente na cultura brasileira, uma vez que o termo “entulho” é conferido a material inútil, e visto como sinônimo de material sem valor, o qual as pessoas procuram se desfazer, pagando para que o mesmo seja retirado.

A definição de entulho encontrada no Aurélio é apresentada a seguir “S. m. **1.** Caliça, pedregulhos, areia, terra tudo que sirva para entupir, aterrar, nivelar depressão de terreno, escavação, vala, fossa etc. **2.** Conjunto de fragmentos ou resto de tijolo, argamassa, madeira, etc. proveniente da construção de um prédio. **3.** Materiais inúteis provenientes de demolição; escombros, ruínas. **4.** Lixo **5.** Coisa(s) sem valor ou sem préstimo; bagulho **6.** Bras. Fam. comida que dá impressão de encher demasiado o estômago, pelo volume ou por ser pesada.”

Portanto, esta tese, também está sendo elaborada para:

Tentar modificar o pensamento vigente, por anos a fio, no Território Nacional dando lugar a outra definição para o termo “entulho” como por exemplo: **N.** resíduos minerais de construção civil, material de valor, útil para produção de agregados graúdos e miúdos utilizados em concreto, argamassas de revestimentos e sub base de pavimentos. [19]

Agregar algum valor aos resíduos minerais contribuindo desta forma para evitar que sejam depositados em locais não permitidos, causando não só poluição visual, mas também entupindo galerias e bueiros, causando enchentes e influenciando negativamente na qualidade de vida da sociedade.

Fornecer subsídios técnicos aos órgãos municipais e estaduais de forma a encorajá-los na implantação de políticas ecológicas e ambientalistas, para gerenciar a reciclagem dos resíduos minerais da construção civil, por exemplo criando incentivos para os construtores que utilizarem concretos com agregados reciclados em suas obras.

No item seguinte, será abordado um panorama atual sobre a reciclagem de resíduos minerais, indicando os principais centros de pesquisa no país e no exterior, assim como os aspectos mais relevantes que estão sendo pesquisados.

---

19 Com o intuito de colaborar na formação desta opinião, pretende-se estudar a influência que dois dos resíduos minerais da construção civil, encontrados com maior freqüência no entulho, exercem na durabilidade de concretos, com eles produzidos.

3. Pesquisadores e Centros de Pesquisa (no Brasil e no Exterior)

Não pairam mais dúvidas quanto ao fato que a reciclagem na indústria da construção civil é uma atividade em permanente evolução, tanto do ponto de vista das pesquisas realizadas, assim como pelas técnicas empregadas na obtenção de agregados.

Tal fato pode ser comprovado pelo número crescente de nações e de institutos de pesquisas que se dedicam ao estudo e a viabilização de alternativas, às consagradas práticas de dilapidação dos recursos minerais, do nosso planeta, e da pura e simples deposição de resíduos minerais em aterros.

A seguir indicam-se os principais centros de pesquisas internacionais e suas atividades na área de reciclagem na Indústria da Construção Civil.

- *Na América do Norte*

As pesquisas estão direcionadas para a normalização e aceitação da utilização de agregados reciclados por meio de britagem de concretos velhos, sendo que a grande área de aplicação destes agregados, tem sido a construção de pavimentos rodoviários.

Entidades como ASTM, o Corpo de Engenheiros do Exército Americano, e o Departamento de Transportes de Iowa tem se dedicado a produzir uma norma que especifique limites de tolerância para aceitação dos agregados reciclados a serem utilizados na produção de concretos novos.

Desde 1982 A ASTM-C33-82 no parágrafo 8.1 na definição de agregado graúdo, inclui os materiais obtidos a partir da britagem do concreto de cimento hidráulico. A ASTM C125-79 introduziu definições de termos relativos ao concreto de agregados graúdos e miúdos obtidos a partir da britagem de cimento Portland; analogamente o Corpo de Engenheiros do Exército Americano, alterou as especificações de forma a incentivar a reciclagem do concreto para obtenção de agregados a serem utilizados na produção de concretos (BUCK, comunicação interna)[20].

---

[20] BUCK, Original não localizado apud HANSEN T. C. RILEM Report 6 **Recycling of Demolished Concrete and Masonry,** London, E&FN SPON an imprint of Chapman & Hall, 1992. 316p.

- *Na Comunidade Européia*

A Comunidade Européia evoluiu muito nos últimos anos, em termos de adoção de políticas para gerenciamento de seus resíduos, assim como de aplicações propriamente ditas, em concretos na indústria da construção civil. Hoje dispõe de uma rede temática composta por 28 entidades atuando em parceria, algumas das quais são apresentadas a seguir:

Holanda:

Na Holanda O Centro de Normas e Pesquisas em Engenharia Civil (CUR). é uma organização independente e sem fins lucrativos. O CUR está engajado no desenvolvimento, aquisição e transferência de conhecimentos e experiência no extenso campo da engenharia civil. O CUR tem por objetivo a implantação e coordenação de projetos de pesquisa em parceria com entidades públicas e privadas no processo da construção. Os resultados são divulgados aos usuários através da publicação de relatórios, recomendações e normas com recomendações práticas e também através da realização de seminários. O CUR atua nos seguintes campos de pesquisa e desenvolvimento: construção, tecnologia de materiais, estruturas de concreto, alvenaria, construção sustentável, hidráulica e geotécnica e drenagem.

Em relação à pesquisa no campo da reciclagem a Faculdade de Engenharia Civil e Geociências da Universidade de Tecnologia de Delft é a maior universidade holandesa. O Departamento de Engenharia de Materiais é responsável pela pesquisa e educação na ciência dos materiais para engenharia civil. Aproximadamente 15 doutorandos estão pesquisando atualmente tópicos voltados para: análise do ciclo de vida de produtos aplicados à indústria da construção (LCA), determinação dos custos ambientais aplicados à indústria da construção (LCC), planejamento espacial (projetos de moradias), infra-estrutura viária sustentável, inertização de resíduos, plano de reciclagem para construção e facilidade de demolição, reutilização e reciclagem de resíduos específicos, cadeia integral de gerenciamento na indústria da construção, pesquisa relacionada ao Decreto Holandês dos Produtos de Construção (qualidade ambiental), controle de qualidade, retração do concreto e formação de micro fissuras no endurecimento do concreto. Os membros do Departamento desenvolvem regularmente pesquisas no campo dos resíduos

de construção e demolição, seu controle de qualidade e sobre os comitês nacionais e internacionais que tratam do assunto.

Bélgica:

O Instituto Belga de Pesquisas em Construção Belgian Building Research Instititue (BBRI-CSTC-WTCB) é um instituto da iniciativa privada que foi fundado em 1960 pela National Federetion of Belgiam Bulding. Desde então CSTC esteve envolvido em vários projetos de reciclagem na Bélgica e no exterior. O Instituto atualmente conduz atividades normativas nacionais e regionais sobre agregados reciclados como vistas a sua incorporação no padrão europeu para agregados.

Antwerp Recycling Companhia (ARCO). O Antwerp Recycling Companhia foi fundada como uma sociedade por tempo limitado entre as companhias Herbosch-Kiere (que atua em obras hidráulicas para o ultramar e fora da orla) e Aertssen (especialista em transporte e movimentos de terra). A ARCO processa aproximadamente 400,000 t/ano entre resíduos de demolição e desperdício de construção.

Gebr. De nv de Rycke. Gebr. é uma empresa cujas três atividades principais são produção concreto usinado, a produção de blocos de concreto leves para alvenaria e a comercialização de seus produtos à indústria da construção civil. Tem desenvolvido projetos para fornecimento e aplicação de concretos e blocos de concreto leves a partir de agregados reciclados.

Áustria

Hengl Schotter Asphalt Recycling GmbH. A empresa privada pertencente à Hengl foi fundada em 1918 e está localizada próximo a Viena.

Desde 1988 tem a companhia dispõe de seu próprio departamento de reciclagem que está coordenando os grupos de desperdício de C&D e produção de agregados reciclados da Áustria.

Alemanha

Hochschule Bremen (HSB). Universidade de Ciência Aplicada, esta universidade tem se dedicado ao ensino da engenharia a mais de um século. Hoje, 9 de seus departamentos oferecem cursos em arquitetura, engenharia

civil, mecânica e elétrica, construção de navios, economia, ciência social, tecnologia de informação e ciência natural para mais de 7000 estudantes. Seu Laboratório de Materiais de Construção no Departamento de Engenharia Civil atua em vários projetos de pesquisa a nível nacional e internacional para reciclagem de resíduos provenientes de demolição e desperdício e em testes de contaminação de resíduos.

Remex é um Parceiro de todas as federações de reciclagem influentes como também de algumas instituições de pesquisa e normalização.

Institut für Massivbau (TUD). O Instituto para Construção e Tecnologia é parte da Universidade de Darmstadt de Tecnologia. A Universidade de Darmstadt atua em educação e pesquisa no campo de engenharia civil e está equipado com um grande laboratório. Um dos principais resultados do trabalho de pesquisa desenvolvido até agora foi a criação de um padrão alemão para agregados reciclados, bem como a criação de uma norma para o uso de agregados reciclados para concreto de alta resistência.

Dinamarca

Danish Recycling Co-Operation (DRC). Instituto criado em 1989 através da formação de uma "joint venture" entre agências do governo e indústrias da iniciativa privada dinamarquesa. O objetivo da "joint venture" foi fornecer suporte técnico administrativo para gerenciamento dos resíduos de construção. Incluindo pareceres nos campos integrados de disposição, demolição, britagem e reutilização.

Durante os últimos anos, o DRC serviu como organização de intermediária para as atividades comerciais de seus membros. O DRC se tornou uma rede nacional na área relativa às práticas recomendadas no campo do desenvolvimento sustentável na construção civil.

DEMEX Consulting Enginneers A/S (DEMEX). Demex é uma empresa de consultoria dinamarquesa. Fundada 1978, durante os últimos anos, especializou-se nas áreas de demolição e reciclagem, recuperação de catástrofes, controle de vibrações, tecnologias mais limpa e proteção contra efeitos bélicos.

Espanha

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC.DEC.M). No Departamento de Construção da Universidade Politécnica da Catalunha, aproximadamente 60 professores qualificados e pesquisadores são contratados para atuarem em ensino e pesquisa. Na divisão de Materiais de Construção a pesquisa se concentrada principalmente nos aspectos da durabilidade de concreto e reciclagem de resíduos na indústria de construção. Várias tese s de doutorado na área de reutilização e reciclagem de resíduos estão atualmente em desenvolvimento. A divisão de Materiais de Construção, atua nos comitês normativos Catalão e Espanhol de agregados reciclados, como também no comitê técnico RILEM TC-SRM. É também o representante espanhol no comitê técnico CEN TC 154 grupo ad hoc para agregados reciclados.

Instituto Eduardo Torroja de Ciência da Construção (IETcc). O Instituto Eduardo Torroja de Ciência de la Construción é um dos institutos de pesquisa do Conselho espanhol para Pesquisa Científica (CSIC). O CSIC foi criado em 1939 e é organizado como um corpo autônomo dentro do Ministério de Educação e Cultura. A tarefa de IETcc é a elaboração de pesquisa científica e técnica no área de construção e materiais de construção. O IETcc contribui ao desenvolvimento de nacional e padrões internacionais (NBE, AENOR, CEN, EOTA) relacionados em geral a construção e aos materiais de construção, e especialmente àqueles relacionados ao uso de agregados reciclados. Durante os últimos anos, o IETcc foi envolvido em vários projetos no uso de materiais reciclados (resíduos de demolição e escória de alto forno) na indústria de construção.

Diante de tantos exemplos, de aplicações de concreto, produzidos com agregados reciclados, acredita-se que esteja comprovada a facilidade de produzir e de utilizar comercialmente este material ao invés de simplesmente depositá-lo em aterros ou simplesmente lançá-los em vias públicas e córregos como acontece com freqüência em nosso País.

Todavia, é importante frisar que na literatura foram localizados exemplos de insucessos como na Bélgica (De PAUW, C. et. all. 1996.)[21] duas pontes

---

[21] De PAUW, C.; DESMYTER, J.; DESSEL J. Van Reuse of construction and demolition waste as aggregates in concrete, technical and environmental aspects. In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND-INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT

tiveram quer ser totalmente demolidas devido a reações álcalis agregados. Ainda segundo De PAUW, o fato de uma instalação de reciclagem ter a probabilidade de processar entulhos minerais que contenham agregados potencialmente reativos, que devido a condições especiais no concreto original, ainda não desenvolveram a reação, e que no novo concreto teriam condições para tal, talvez esteja impedindo a aceitação de uma proposta de normalização pelo BBRI sobre agregados reciclados.

4. Originalidade

Hoje se encontram diversas pesquisas que foram elaboradas no País e no Exterior, nas quais dão suporte à produção e à utilização de concreto com agregado reciclado do ponto de vista técnico econômico,

Porém, como ocorreu na Bélgica, no exemplo das pontes mencionadas anteriormente, ficou caracterizado que em face à falta de conhecimento técnico sobre os fenômenos que regem a durabilidade do concreto produzido com agregados reciclados, podem ocorrer danos materiais de grande monta além da redução de vida útil das estruturas construídas.

Portanto, a originalidade deste estudo está justamente em analisar e conhecer a influência que os dois resíduos de construção civil, encontrados em maior quantidade no entulho, resíduos de concreto e resíduos de alvenaria, exercem na durabilidade de novos concretos produzidos com agregados reciclados, uma vez que este é um aspecto ainda que não pesquisado adequadamente nem a nível nacional nem a nível internacional.

A parte experimental desta tese realizada de acordo com critérios comprovadamente técnicos é um assunto inédito e de suma importância, que terá por finalidade evitar a repetição de erros cometidos no passado recente. Tais erros ocorreram na produção de concreto com agregados naturais, largamente utilizado desde o início do século, quando estruturas de concreto foram produzidas sem o devido conhecimento dos fenômenos que interferiam em sua durabilidade, e em diversas ocasiões ocorreu a redução da vida útil de

---

ENHANCEMENT AND PROTECTION, Dundee - Escócia junho 1996. **Proceedings**. Ravindra & Thomas Grã Bretanha -1996 p. 131- 140.

grandes obras de engenharia, levando a graves prejuízos materiais e algumas vezes, lamentavelmente, até vítimas fatais.

5. Objetivo

Entre os objetivos desta tese, devem ser destacados alguns aspectos relevantes tais como:

O desenvolvimento de um trabalho amplo que forneça subsídios e que colabore com o avanço da fronteira atual do conhecimento sobre os efeitos dos agregados reciclados de alvenaria e de concreto na durabilidade de novos concretos, utilizando-se para tal as técnicas atualmente empregadas para o estudo da durabilidade de concretos produzidos a partir de agregados naturais, ou seja, estabelecer um paralelo entre a durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados e dos concretos produzidos com agregados convencionais.

Realizar um trabalho experimental, cujos dados permitam determinar a influência do teor crescente dos agregados reciclados de concreto e de alvenaria, uma vez que estes são os materiais encontrados com maior freqüência no entulho de obras, na durabilidade de novos concretos.

Adotar uma metodologia que avalie os resultados, não de forma pontual mas de uma forma abrangente, através da analise da curva de tendência de determinada propriedade para famílias de concreto com teores crescentes de agregados reciclados, evitando-se assim, equívocos decorrentes de análises pontuais e desta forma determinar qual a influência de teores crescentes de agregados reciclados nas propriedades que serão utilizadas para o desenvolvimento do estudo da durabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados.

Apresentar as pesquisas e os principais centros de pesquisas do País e do exterior que atualmente estão desenvolvendo trabalhos na área de desenvolvimento sustentável e reciclagem na construção civil, descrevendo-se sucintamente suas atividades, assim como alguns de seus projetos e obras realizadas.

6. Conteúdo do trabalho

Este trabalho é composto por uma introdução, cinco capítulos, e dois anexos. Na introdução apresenta-se uma relação de algumas obras em concreto, produzidas com agregados reciclados, edificadas na Europa na última década. Na seqüência, aborda-se a importância e justificativa do tema, são relacionados os principais centros de pesquisas do exterior e aborda-se a originalidade do tema, em seguida expõe-se o objetivo da tese e apresenta-se seu conteúdo resumidamente.

No primeiro capítulo, justifica-se a escolha das propriedades escolhidas para desenvolvimento do estudo de durabilidade de concretos produzidos com resíduos de alvenaria e de concreto.

O segundo capítulo aborda o estágio atual normalização Internacional e as proposições nacionais, trata também da classificação dos agregados reciclados quanto a origem, forma, granulometria, e sobre o ponto de vista da reação álcali-agregado assim como a possibilidade de produção dos mesmos de forma industrial.

No terceiro capítulo, apresenta-se o desenvolvimento, o planejamento e a descrição de todas as etapas da parte experimental. São apresentados os métodos utilizados na realização do trabalho experimental, os resultados da caracterização dos agregados, assim como, a sistemática adotada para moldagem e cura dos corpos de prova.

No quarto capítulo, são discutidos os resultados e apresenta-se um exemplo de aplicação de uma metodologia proposta estudo da durabilidade de concretos preparados com agregados reciclados. A referida metodologia consiste em analisar as linhas de tendência das propriedades pesquisadas. Estas linhas foram obtidas por meio dos diagramas de dosagem e indicam a variação da propriedade pesquisada em função do teor de reciclados existentes no concreto, comparam-se os resultados aos encontrados na literatura consultada. Nas considerações finais aborda-se a transferência do conhecimento ao meio técnico, assim como os planos para prosseguimento da pesquisa. Por fim é apresentada a bibliografia utilizada.

CAPÍTULO 1.

PROPRIEDADES SELECIONADAS PARA ESTUDO DA DURABILIDADE DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM MATERIAIS RECICLADOS

Para iniciar este capítulo, julgou-se importante definir alguns termos anteriormente mencionados os quais serão empregados inúmeras vezes no desenvolvimento deste estudo e por mais que pareçam óbvios e elementares, são importantes para o perfeito entendimento da metodologia adotada no desenvolvimento da parte experimental desta tese .

Agregados reciclados, de alvenaria ou de concreto, devem ser considerados todos materiais granulares obtidos por processos mecânico de desintegração, (britagem) e utilizáveis com meio cimentantes para formação de concretos ou argamassa, dependendo de sua granulometria são classificados em agregados graúdos ($D_{máx}$.> 4,8 mm) ou miúdos (4,8 < Dmáx < 0,75 μm) são provenientes resíduos de concreto e ou de alvenaria respectivamente.

Família de concreto, trata-se de uma série de concretos moldados com um teor de argamassa constante, quando se realiza um estudo de determinada propriedade, só há sentido em comparar a tendência apresentada pela família de concreto, com outra família evitando-se erros de interpretação.

Para o estudo de durabilidade para concretos produzidos com material reciclado, optou-se pela escolha das propriedades que contribuem diretamente na redução da vida útil de uma estrutura, pois segundo MEHTA[22] (1994) durabilidade é definida como a vida útil de um material sob dadas condições ambientais.

Uma vez que as manifestações patológicas em estruturas de concreto, podem ser de diferentes origens, causas e natureza e entre as mais freqüentes

---

[22] MEHTA K. P.; MONTEIRO Paulo J. M. **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo. PINI, 1994. 574 p.

estão indicadas na Figura 1-1 conforme observado por HELENE (1992) [23] em pesquisa realizada em nosso país. Depreende-se que as principais causas que levam a deterioração de uma estrutura, analisando-se o gráfico Figura 1-1, são: corrosão de armadura, manchas superficiais, degradação química, flechas excessivas e as fissuras ativas e passivas perfazendo estes itens um total de cerca de 80% das patologias constatadas. As outras 20 % advém de falhas construtivas as quais não são função da qualidade do concreto e sim da qualidade da execução da obra, portanto estão fora do objetivo desta tese.

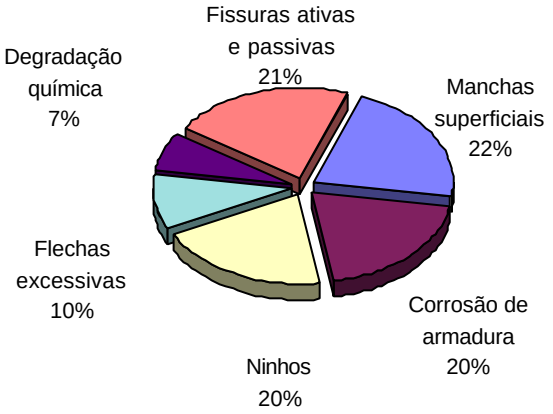


Figura 1-1 - Distribuição relativa da incidência das manifestações patológicas das obras em território nacional. (HELENE -1992)

Uma vez que os mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura são:

a) despassivação por carbonatação, ou seja, por ação do gás carbônico da atmosfera, que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto, reduzindo o pH dessa solução, permitindo a

[23] HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo. PINI; Brasília, DF : SENAI, 1992.

despassivação da armadura, possibilitando desta forma o inicio da reação de corrosão[24].;

b) despassivação por elevado teor de íons cloro (cloreto), ou seja, por penetração dos Cl^- através de processos de difusão, de impregnação ou de absorção capilar de águas contendo teores de cloreto, que ao superarem, na solução dos poros do concreto, um certo limite em relação à concentração de hidroxílas, despassivam a superfície do aço e instalam a corrosão.

Portanto, a carbonatação, a difusão do CO_2 assim como a penetração de cloretos são fenômenos extremamente importantes a serem estudados num estudo que propõe a analisar a durabilidade de concretos.

Além das propriedades acima, julgou-se importante para caracterizar a durabilidade de um concreto, produzido com material reciclado, tentar determinar a influência do teor de reciclados sobre:

Consumo, de cimento por m^3 de concreto

Resistência à compressão

Módulo de elasticidade (tangente inicial à origem)

Absorção de água por imersão e índice de vazios

Penetração de cloretos nas camadas superficiais até 3 cm de espessura

Reação alcali-agregados

Resistividade

Na seqüência, justifica-se a escolha de cada uma das propriedades selecionadas para o desenvolvimento do trabalho descrevendo-se como as mesmas se desenvolvem em concretos convencionais.

1.1 Consumo

Analisar o consumo de cimento por m^3 sem qualquer cuidado, pode levar a falsas conclusões. Por exemplo, um pesquisador desatento poderia afirmar

---

24 A despassivação só terá conseqüências significativas em ambientes de umidade relativa abaixo de 98% e acima de 65%, ou em ambientes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, possibilitando a instalação da corrosão.

que a resistência cresce sempre com o aumento do consumo. Isso pode até ser verdade, mas só quando estiverem sendo analisados concretos de uma mesma família, uma vez que, concretos de consistências diferentes, podem apresentar redução no consumo com aumento da resistência.

A título de exemplo, no diagrama da Figura 1-1, apresenta-se um caso típico de redução de consumo de C_1 para C_2 com acréscimo de resistência à compressão de $f_{c28\ (1)}$ para $fc_{28\ (2)}$. É importante notar que para alcançar tal acréscimo na resistência foi necessário reduzir o slump de 70 ± 10 mm para 50 ±10 mm, portanto, só existe sentido utilizar o consumo de cimento como parâmetro avaliador de um concreto quando se trabalha com a mesma família, pois, só desta forma a comparação terá sentido. Por isso na parte experimental desta tese , resolveu-se analisar a variação do consumo de 12 famílias de concreto e comparar os resultados obtidos, aos resultados de uma 13ª família produzida exclusivamente com agregados naturais. Para cada uma das famílias analisadas a consistência foi sempre mantida constante, variando-se apenas o teor de agregado reciclado e sua qualidade.

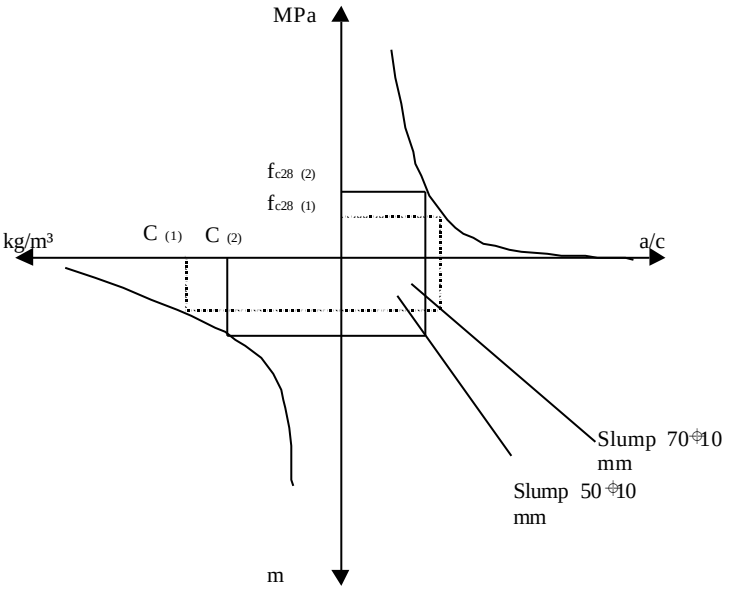


Figura 1-1 Diagrama de dosagem ilustrativo redução de consumo com acréscimo de resistência

O monitoramento do consumo de cimento por m³ de concreto é fundamental num estudo de durabilidade, uma vez que, além do ponto de vista econômico, tecnicamente falando, consumos superiores a 500 kg/m³ sempre serão problemáticos, uma vez que implicam na adoção de delicadas operações de cura para prevenção de fissuras devidas a retração, procedimento que nem sempre é adotado na maioria das obras nacionais, sabe-se que a não adoção destas medidas certamente levaria a redução da vida útil da estrutura.

1.2 Resistência à compressão

Segundo NEVILLE [25](1997), a resistência à compressão é considerada a propriedade mais importante, embora em muitos casos práticos, outras características como durabilidade e permeabilidade sejam de fato as mais importantes quando se quer prever a vida útil de uma estrutura inserida em determinado meio ambiente.

Além do mais, a resistência à compressão, a qual indiretamente pode ser utilizada como parâmetro para avaliação da durabilidade de um concreto é a grandeza largamente conhecida pelo meio técnico e, universalmente aceita como parâmetro para avaliação da qualidade, sendo seu controle facilmente exeqüível por um laboratório devidamente equipado para tal finalidade.

Segundo HELENE[23] (1992) a resistência à compressão é a propriedade do concreto geralmente adotada por ocasião do dimensionamento da estrutura. Portanto, está diretamente ligada com a segurança estrutural, devendo a obra ser construída em concreto com resistência superior ou igual a adotado para elaboração do projeto. Sem dúvida, a propriedade do concreto que melhor o qualifica é a resistência à compressão. Desde que em sua dosagem e proporção tenham sido considerados também os aspectos de durabilidade, optando-se por determinada curva granulométrica tipo e classe de cimento, e relação a/c resultando conseqüentemente em determinada resistência.

Segundo METHA (1994), muitas propriedades do concreto como módulo de elasticidade, estanqueidade, impermeabilidade e resistência às intempéries, incluindo águas agressivas, são diretamente relacionadas com a resistência à

---

[25] NEVILLE A.M. **Propriedades do Concreto**, São Paulo, PINI. 1997. 828 p.

compressão e, portanto podem ser deduzidas dos dados da resistência à compressão.

Ainda se tem a vantagem de que a resistência à compressão aos 28 dias, determinada através de um ensaio padrão (compressão axial), hoje é um parâmetro aceito universalmente como índice de referência de um concreto.

Portanto, torna-se amplamente justificado o estudo da resistência à compressão no desenvolvimento de um trabalho sobre durabilidade de concreto, visto que resistência e durabilidade estão estritamente relacionadas.

1.3 Módulo de elasticidade

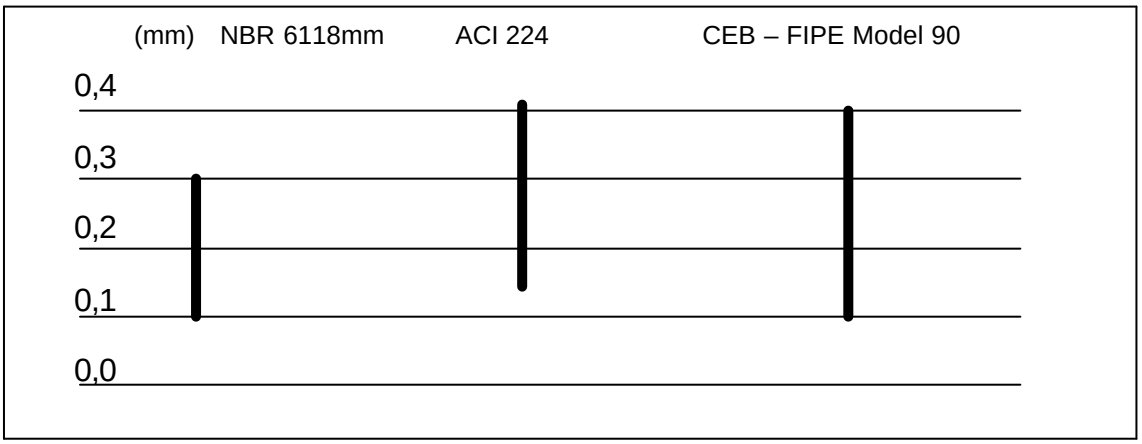
Segundo METHA (1994), o significado do limite de elasticidade em um projeto estrutural é devido ao fato dele representar a deformação máxima permitida antes do material adquirir deformação permanente.

Portanto, o engenheiro deve conhecer o módulo de elasticidade do material uma vez que este influi no cálculo estrutural; conhecido o módulo, será possível calcular as flechas máximas admissíveis, ou seja, as flechas que não provocarão fissuras além de determinados limites.

A Tabela 1-1 apresenta os limites máximos de fissuras tolerados por normas nacionais e internacionais. Evidentemente quando estes limites são ultrapassados, a armadura será despassivada rapidamente, devido a presença dos agentes agressivos encontrados no meio ambiente (Cl^-, SO_4^{--}), os quais passarão a ter contato com ela.

Uma vez despassivada a armadura, esta apresentará propensão às indesejáveis reações de corrosão, que em última análise, serão responsáveis pela redução da vida útil da estrutura.

Tabela 1-1 Comparativo entre NBR 6118, ACI 224R 15 e CEB FIP Model 1993



São definidos pelo menos três módulos de elasticidade, para o concreto em compressão uniaxial sem confinamento;

módulo de elasticidade, **estático e instantâneo, tangente à origem**, também conhecido por módulo de elasticidade**, estático e instantâneo, inicial**, que do ponto de vista prático de ensaio corresponde ao módulo de elasticidade, estático e instantâneo, **cordal entre 0,5 MPa e 0,3f_c**, e ao módulo de elasticidade, **estático e instantâneo, secante a 0,3f_c**. Este valor pode ser obtido de várias formas, pelo método de ensaio brasileiro descrito na NBR 8522 1 1984 da ABNT, para carregamento tipo III, que é praticamente equivalente ao valor obtido através do carregamento tipo I descrito no mesmo método, o qual foi utilizado na parte experimental desta tese e que por sua vez é equivalente ao método de ensaio descrito na ISO 6784:82 e na Norma MERCOSUL 05:03-0124 de 1997. Convenciona-se indicar este módulo de elasticidade por Eci, geralmente expressando-o em GPa.

módulo de elasticidade, **estático e instantâneo, secante a qualquer porcentagem de f_c**. Em geral trabalha-se com o módulo de elasticidade, estático e instantâneo, cordal entre 0,5 MPa e 0,4f_c, que é equivalente ao módulo de elasticidade, estático e instantâneo, secante a 0,4f_c, pois esta é normalmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto. Este valor pode ser obtido de várias formas, uma delas descritas na NBR8522 1 1984 da ABNT, para carregamento tipo III, que é praticamente equivalente ao valor obtido através do carregamento tipo II descrito no mesmo método, que por sua vez é

equivalente ao método de ensaio descrito na ASTM C 469. Convenciona-se indicar este módulo de elasticidade por Ec, geralmente expressando-o em GPa.

módulo de elasticidade, **estático e instantâneo, cordal entre quaisquer intervalos de tensão ou deformação específica**. Do ponto de vista prático de projeto é pouco utilizado. Além destes, é possível definir outros módulos, tais como modulo dinâmico, módulo sob carga de longa duração, módulo sob impacto, etc., em geral todos de pouca utilidade prática.

Há vários modelos para previsão do módulo de elasticidade, para o desenvolvimento desta tese, cinco modelos serão apresentados.

Segundo os diferentes códigos e normas, os modelos podem ser dos tipos indicados nos itens 1.3.1 a 1.3.5

1.3.1 NB 1 da ABNT de 1978- item 8.2.5:

$E_{ci} = 6600?f_c^{\ 0,5}$ em MPa

para $f_c = f_{ck} + 3,5$ MPa

1.3.2 Proposição de Helene para a NB 1 da ABNT

$E_C = 4700?f_{ck}^{0,5}$ em MPa; sendo $E_c = 0,9?E_{ci}$

1.3.3 ACI Building Code 318; ACI Manual of Concrete Practice Detroit 1999

$E_c = 43?\ \gamma_c^{1,5} * f_c^{O,5}\ ?10^{-6}$ em GPa

Onde: γ_c = massa unitária do concreto em t/m³

1.3.4 CEB /FIP Model Code 90, de 1993- item 2.1.4.2:

$Eci = (\propto_E * 21500*[(f_c)/10]^{1/3}$

onde $\propto_E$ depende da natureza do agregado, a saber

Tabela 1-1 Coeficiente para cálculo do módulo de elasticidade em função da qualidade do agregado

Natureza	$\propto_E$
basalto e diabásico	1,2
granito e gnaisse	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

1.3.5 Instituto Japonês de Arquitetura

Segundo TAKIZAKI et. al. [26](1998) o Instituto Japonês de Arquitetura propõe o modelo apresentado a seguir:

$$Ec = 2,1*[(\gamma_c /2,3)]^{3/2} * (f_c /200)^{0,5}$$

onde:

Ec em MPa em kg /m³

γ_c é a massa unitária do concreto em kg /m³

Embora, no meio técnico ainda não exista consenso sobre o modelo matemático que relaciona Eci com f_c (módulo de elasticidade e resistência à compressão), admite-se, como pode ser visto pelos modelos apresentados, que existe uma relação entre estas propriedades e que se trata de uma função crescente, função de uma raiz quadrada ou raiz cúbica, mais uma constante, que depende do agregado utilizado entre outros fatores.

Uma vez que 11 % das manifestações patológicas detectas nas obras nacionais podem ser atribuídas a fissuras e deformações excessivas, julgou-se dentro deste contexto que o Módulo de Elasticidade deveria ser outra das variáveis a ser monitorada durante o desenvolvimento da parte experimental deste estudo. Os resultados obtidos experimentalmente foram utilizados para criação de um modelo matemático, que relacione E_{ci} com $f_{cj,}$ das várias famílias

---

[26] TAKIZAKI M et al.; Strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY 2. v2 **PROCEEDINGS.** Reuse of Demolition Waste ed. Y.Kasai Nihon Daigaku Kailan, Tokyo, Japan, Chapman & Hall, London. 1988. p.557- 564.

de concreto ensaiadas. No desenvolvimento desta tese, o modelo determinado experimentalmente foi comparado aos modelos apresentados e o resultado obtido foi sempre inferior ao preconizado pela NBR 6118, maior similaridade foi alcançada quando se comparou o resultado obtido através do modelo experimental com o resultado obtido através do modelo do CEB/ FIP Model Code 90 de 1993.

1.4 Absorção de água por imersão e índice de vazios

Segundo MEHTA (1994), outro aspecto importante em relação à durabilidade do concreto é a água, pois sendo a água um agente primário, capaz de criar e degradar materiais da natureza pode e deve ser entendido como fator central para maioria dos problemas de durabilidade do concreto.

Não resta dúvida que a água funciona como veículo de transporte dos íons agressivos, quer dizer, a água funcionará como causa de muitos processos físicos de degradação ou como fonte de processos químicos.

Existem outros autores que ressaltam a importância de se atrelar o estudo de durabilidade ao transporte de fluidos através do concreto e conseqüentemente colocam a permeabilidade a porosidade e absorção de água como propriedades para análise da durabilidade.

Alguns destes autores (BASHER et all -1996)[27] relacionaram a corrosão de armadura com as propriedades referentes a penetração de fluidos no concreto em um trabalho que apresenta modelos utilizados para previsão da deterioração de concreto como indicado na Figura 1-1, analisando-se esta figura, percebe-se a importância atribuída por seu autor à permeabilidade, uma vez que, todos os fenômenos que provocam redução da vida útil de uma estrutura, de alguma forma estão atrelados à permeabilidade.

---

[27] BASHEER P.A.M; CHIDIAC S.E.; LONG A. E. Predictive models for deterioration of concrete structures. **Constructions and Buildings Materials** v. 10 n.1 p. 27-37, 1996

HELENE[28] 1983 propôs, com base em critérios gerais de durabilidade, uma classificação para concretos em função da porosidade e da absorção de água, a qual é apresentada na Tabela 1-1.

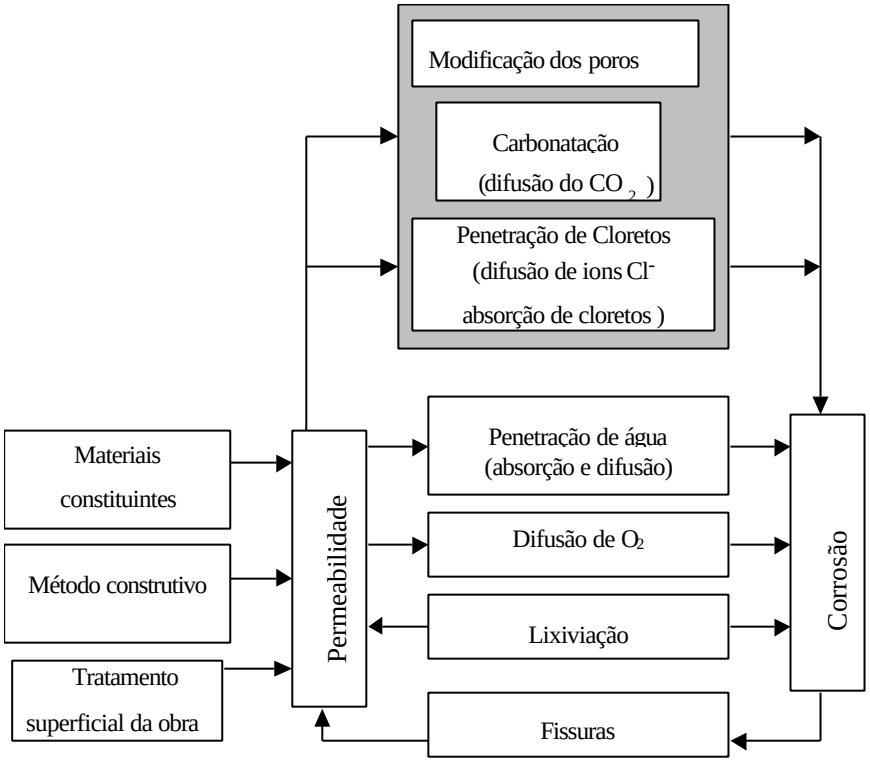


Figura 1-1 Dependência entre corrosão e propriedades relativas a penetração de água.(BASHEER- 1996)[27]

Tabela 1-1 Proposta para classificação dos concretos segundo HELENE[28] de acordo com a porosidade e a absorção de água.*

Propriedade	Qualidade do concreto	< 10%	10 a 15%	> 15%
Porosidade	Concretos duráveis			
	Concretos normais			
	Concretos deficientes			
		< 4,2%	4,2 a 6,3%	> 6,3%
Absorção de água	Concretos duráveis			
	Concretos normais			
	Concretos deficientes			

*Observação: Para concretos sem aditivos

[28] HELENE, P. R.L. **La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón**. Hormigón, AATH, n. 10 p. 25-35, ago. 1983.

Diante da impossibilidade de estudar simultaneamente todos os fenômenos relacionados ao transporte de fluidos e as demais propriedades escolhidas para desenvolvimento desta tese , pois se procedendo assim, estar-se-ia diante de um vasto campo de pesquisa, o qual poderia ser objeto de outra tese , optou-se por analisar a absorção, assim como o índice de vazios, índices que fornecem subsídios para avaliar a durabilidade dos concretos ensaiados, uma vez que estes índices representaram a estrutura dos poros do concreto.

Como pela estrutura de poros, penetram, se difundem, ou percolam todos os agentes agressivos do meio ambiente, será importante então estudar a absorção de um concreto num estudo de durabilidade. Considerou-se que a absorção por imersão caracterizaria melhor a estrutura dos poros, uma vez que permite avaliar a quantidade total de água absorvida ao contrário da absorção capilar que só ocorre em casos especiais em que o concreto não esteja saturado.

Analisando-se esta propriedade, pretende-se também constatar quem tem maior influência sobre a porosidade e a absorção do concreto, o tipo de agregado utilizado, ou a quantidade ou a qualidade da pasta existente no concreto.

1.5 Carbonatação

Segundo CASTRO et. al [29] (2000), a penetração do CO_2 no concreto conduz a despassivação da armadura permitindo que tenha início o processo de corrosão da mesma. O conhecimento dos parâmetros que afetam o avanço da frente de carbonatação, permitirá a definição dos traços com melhor capacidade de prover o concreto de uma durabilidade adequada.

Em síntese, a carbonatação nada mais é do que uma reação química entre hidróxidos de sódio potássio e cálcio com ácido carbônico, o produto final desta reação será um carbonato e a conseqüente redução do pH da solução dos poros do concreto, enquanto o concreto apresentar um pH superior a 11 dificilmente a armadura correrá algum risco de iniciar o processo de corrosão.

---

[29] CASTRO, P.; SANJUÁN, M.A.; GENESCÁ J. Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. **Building and Environment** n.35, p.145-149, 2000.

Embora a carbonatação por si só não constitui uma forma de degradação do concreto nem de sua deterioração, todavia tem a capacidade de permitir a despassivação da armadura[30], dando início ao processo de corrosão que termina por reduzir a vida útil da estrutura e, conseqüentemente, sua durabilidade.

1.5.1 As reações químicas

As reações de carbonatação do concreto ocorrem de acordo com as equações a seguir:

⇒ Reação de carbonatação para os álcalis do cimento mais solúveis; hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de sódio (NaOH): (quantidades menores no cimento).

1ª Reação : $CO_2 + H_2O$? $H^+ + HCO_3^-$

2ª Reação : $2\ K^+ + 2OH^- + H^+ + HCO_3^-$? $K_2CO_3 + 2\ H_2O$

1ª Reação : $CO_2 + H_2O$? $H^+ + HCO_3^-$

2ª Reação : $2\ Na^+ + 2OH^- + H^+ + HCO_3^-$? $Na_2CO_3 + 2H_2O$

⇒ Reação de carbonatação para o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ presentes nos poros da matriz:

1ª Reação : $CO_2 + H_2O$? $H^+ + HCO_3^-$

2ª Reação : $Ca^{++} + 2OH^- + H^+ + HCO_3^-$? $CaCO_3 + 2H_2O$

---

[30] Um dos produtos formados na hidratação do C3S e do C2 S é o $Ca(OH)_2$, este composto dissolvido na água dos poros confere elevada alcalinidade à pasta endurecida, elevando o pH do meio a valores da ordem de 12 a 13. Nesta condição o filme óxido existente sobre a superfície da armadura e que impede o desenvolvimento do processo de corrosão é preservado por tempo indeterminado.

1.5.2 A carbonatação em estruturas de concreto aparente em escolas estaduais em São Paulo

Na cidade de São Paulo, assim como País existe inúmeras estruturas em concreto armado com problemas de corrosão de armadura, tão visíveis que chamam a atenção até mesmo de leigos.

Segundo LEVY e HELENE[31] (2000) que participaram de um convênio de cooperação técnica, celebrado entre o PCC/USP e a FDE, foi constatado que, em uma amostra de 27 Escolas Estaduais de São Paulo com problemas patológicos, 96% apresentaram carbonatação do concreto além da espessura de cobrimento da armadura. Além do mais, detectou-se que em 57% das escolas que apresentavam problemas de corrosão das armaduras, a carbonatação do concreto deu origem à patologia.

"...procurou-se no transcorrer do convênio e a cada vistoria realizada detectar as causas que permitiram o desenvolvimento deste processo nas 27 escolas vistoriadas. A representação gráfica do resultado do levantamento é apresentado na Figura 1-1.

É interessante observar que praticamente todas as escolas visitadas (96%) apresentaram problemas de carbonatação do concreto, todavia, este fenômeno deu mostras que não ocorre de forma uniforme, ou seja, a carbonatação ocorre de forma diferenciada até num mesmo elemento estrutural em seções distanciadas apenas por alguns centímetros, como mostrado na Foto1 da Figura 1-2, a seguir.

As outras causas mais freqüentes de corrosão das armaduras podem ser atribuídas à aeração diferencial devido à falta de pingadeira nas vigas da fachada ou por fatores que dificilmente poderiam ser previstos na fase de elaboração de projeto, como alagamento de áreas por falta de drenagem adequada.

---

[31] LEVY, S. M.; HELENE P. R. Restauração e recuperação de estruturas de concreto armado de escolas estaduais no Estado de São Paulo. **Téchene**. n. 47 p. 53-58 julho/agosto. PINI. São Paulo. 2000.

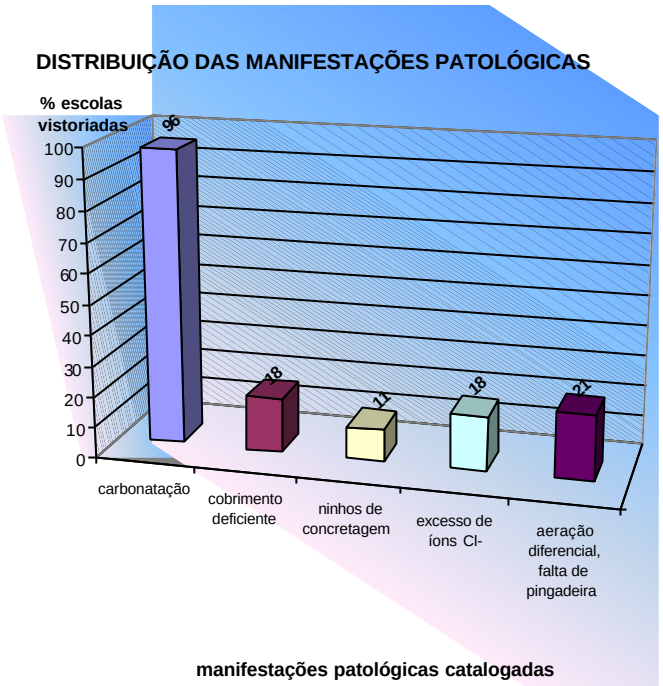


Figura 1-1 Distribuição das causas que teriam ocasionado a corrosão da armadura, manifestações constatadas nas diversas escolas vistoriadas

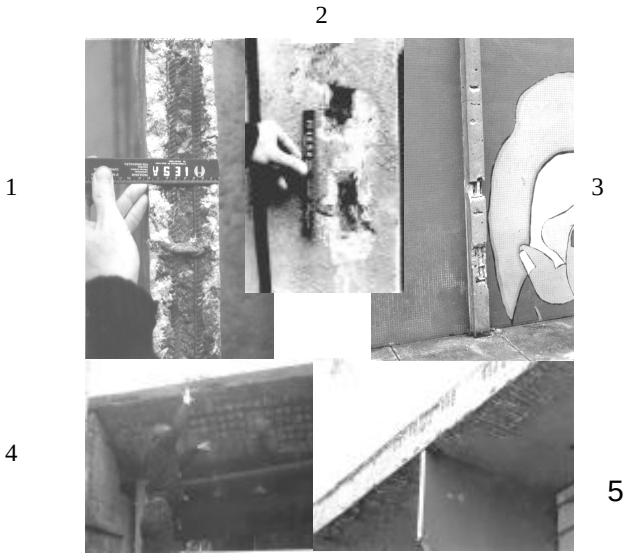


Figura 1-2 Principais causas da corrosão de armadura em escolas vistoriadas. Fotos 1 e 2, carbonatação; Foto 3, ninhos de concretagem; Foto 4, cobrimento deficiente; Foto 5, aeração diferencial.

Também pode ser observado que ninhos de concretagem e cobrimento deficiente foram constatados em 29% das escolas vistoriadas, e que nas

escolas edificadas em elementos pré-moldados havia presença excessiva de íons Cl^- [32], representando estas um total de 18% das escolas vistoriadas".

Uma vez constatado que 96% das escolas vistoriadas apresentavam patologias relativas a carbonatação do concreto, embora as escolas estaduais de São Paulo não possam ser entendidas como o universo das obras com problemas patológicos, sem dúvida, podem ser consideradas como uma amostra significativa, o que caracteriza como fato irrefutável que esta propriedade deva ser monitorada quando se pretende desenvolver um estudo sobre a durabilidade de concretos.

Uma vez concluído que a carbonatação do concreto é uma das propriedades de maior incidência e que é responsável pela despassivação da armadura, a qual a partir deste momento, se torna vulnerável ao processo de corrosão, evidentemente que esta será uma das propriedades a ser monitorada.

Na seqüência viria a pergunta: qual a velocidade com que se desenvolve esta reação?

Para responder esta pergunta será necessário estudar o mecanismo através do qual a frente de CO_2 se propaga no concreto.

1.6 Difusão do CO_2 no concreto

Como o intuito de responder à pergunta formulada no final do item anterior, procurou-se identificar qual seria o mecanismo preponderante de penetração do CO_2 no concreto. Segundo HELENE (1993)[40], a penetração de gás carbônico no concreto dá-se preponderantemente por um mecanismo de difusão. Os mecanismos de absorção capilar e migração de íons raramente se aplicam ao caso. Na maioria das vezes, só a concentração de CO_2 no ambiente externo junto a estrutura, comparativamente à concentração de CO_2 nos poros capilares do concreto influirá no mecanismo de propagação do o CO_2 no interior do concreto, em poros excessivamente secos ou em poros saturados não haverá condições para propagação do CO_2.

---

32 O limite médio, para o teor de cloretos, tolerado pelas normas internacionais é 0,4 % (EH – 88 espanhola, CEB –FIP européia, e ACI – 222, 261 americanas) em relação ao cimento.

No item anterior, 1.5, explicou-se a influência da carbonatação sobre uma estrutura de concreto e sobre sua vida útil, justificando-se o porque de sua escolha como uma das propriedades para estudo da durabilidade de uma estrutura, logicamente, na seqüência deve-se estudar a forma e a velocidade através da qual o CO_2 poderá se difundir numa estrutura de concreto. Isto posto, passa a ser importante determinar qual a velocidade que a reação de carbonatação deverá se desenvolver, pois uma vez que se quer prever redução de vida útil, nada mais lógico do que se dispor de conhecimento para quantificar o período de tempo necessário ao avanço da frente de carbonatação. Para isto será necessário entender a forma pela qual se o CO_2 se difunde no interior do concreto.

1.6.1 Modelos matemáticos utilizados na previsão da profundidade de carbonatação

Foram encontrados dois modelos matemáticos que representam o fenômeno da difusão do CO_2 numa estrutura de concreto, o primeiro deles, trata-se do modelo clássico, função da raiz do tempo representado pela equação a seguir:

$$e_{co_2} = k_{co_2} \bullet \sqrt{t}$$ Equação 1-1

onde:

t = tempo de exposição ao CO_2 geralmente em (anos)

K_{CO2} = constante que depende da difusividade do CO_2[33], do gradiente de concentração do CO_2[34] e da quantidade retida de CO_2, em (mm/ano1/2)

---

[33] Que por sua vez depende do grau de umidade dos poros do concreto, ou seja, variável em função da umidade relativa do ambiente.

[34] É a quantidade de CO_2 que reagiu com produtos alcalinos da hidratação do cimento Portland formando carbonatos. Dessa forma para concretos de mesma permeabilidade e porosidade da pasta submetidos ao mesmo gradiente de pressão ou concentração de CO_2, quanto maior a reserva alcalina, menor a profundidade de carbonatação.

O segundo modelo representado pela Equação 1-2, mais complexa, baseia-se em observações experimentais de SCHIESS (1991) [35], apesar de ser uma contribuição para entendimento do fenômeno da carbonatação, não parece apresentar grande utilidade prática face a sua complexidade.

$$t = \frac{A}{B}\left[e_{co_2} + \frac{Def_{co_2} \bullet \Delta C_{c0_2}}{B} \bullet \ln\left(1 - \frac{e_{co_2}}{\frac{Def_{co_2} \bullet \Delta C_{c0_2}}{B}} \right) \right] \qquad \text{Equação 1-2}$$

onde:

t = tempo de exposição ao CO_2 (s)

e_{CO2} = espessura ou profundidade de carbonatação em (m)

A = quantidade de CO_2 que fica retida formando carbonatos (kg/m³)

B = fator ambiental de retardamento (kg/m²?s)

D_{efco2} = coeficiente efetivo de difusividade do CO_2 (m² / s)

?Cco_2 = diferença de concentração de CO_2 na superfície do concreto e na frente de carbonatação (kg/m³)

Sem dúvida, o primeiro modelo se torna de maior utilidade prática pela sua simplicidade e facilidade de aplicação, enquanto que o segundo, embora traga importantes contribuições para o entendimento do fenômeno, na realidade sua constante B por depender das condições ambientais, dosagem e composição do concreto e das dimensões dos elementos da estrutura, termina por se tornar de determinação complexa.

Na parte experimental aborda-se apenas o modelo representado pela Equação 1-1 e os valores de k_{co2} encontradas no ensaio acelerado, foram comparados a valores encontrados por outros pesquisadores.

É interessante observar que se diferentes CPs de um mesmo concreto forem ensaiados em meio ambiente interno e externos, deverá apresentar maior profundidade de carbonatação o CP que permaneceu em ambiente

---

[35] SCHIESSL Apud CAMPBELL-ALLEN, D., RPER, H. **Concrete structures: materials, maintenance and reaper**. New York, John Wiley, 1991 p.108.

interno, segundo MEHTA, SCHIESSL e RAUPACH[36] esta relação seria 1 : 0,7 : 0.2 (ambiente interno: ambiente externo protegido : ambiente externo sujeito a ação das intempéries)

1.7 Penetração de cloretos

Os íons Cl^- diferentemente do CO_2, são agentes que causam reações deletérias à superfície do concreto[37] e também provocam a despassivação da armadura, conseqüentemente permitem o desenvolvimento da reação de corrosão da armadura tão prejudicial às estruturas de concreto. Por tanto, é necessário num estudo sobre durabilidade de concretos com agregados reciclados ou naturais, conhecer o comportamento destes em relação à facilidade oferecida aos íons Cl^- de penetrarem até determinadas profundidades.

Quanto ao mecanismo pelo qual os cloretos despassivam o aço, não será abordado nesta tese, uma vez que seu objetivo não é o estudo da corrosão das armaduras e sim a comparação entre a durabilidade de concretos produzidos com materiais reciclados e com agregados convencionais.

1.7.1 Mecanismos de penetração dos íons Cl^-

HELENE (1993)[40] afirma que a penetração dos íons Cl^- no concreto pode ocorrer por permeabilidade, absorção capilar, difusão iônica, migração iônica gravidade vento e energia cinética, dependo exclusivamente de sua porosidade, e apresenta as leis que regem alguns destes fenômenos da forma a seguir:

---

[36] METHA, P. K. ; SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. Performance and durability of concrete systems. In: INTERNACIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 9. New Delhi, Nov.1992 **Procedings**.

[37] Em situações onde ocorre a molhagem e secagem do concreto e, simultaneamente, há a presença e penetração de sais, como por exemplo, cloreto de sódio (NaCl) típico de atmosferas marinhas, outro fenômeno de deterioração superficial pode ocorrer, agravando o problema de corrosão das armaduras. Os ciclos de molhagem e secagem podem propiciar a cristalização do sal no interior do concreto dando origem à manifestação patológica conhecida por " pele tipo cebola cortada". Por sorte, a penetração é superficial, assim como uma elevada concentração que permita a recristalização desses sais, com pressões da ordem de 60 MPa, também só é viável nos primeiros milímetros superficiais, o que reduz a possibilidade de danos expressivos à estrutura. (HELENE –1993)

- *Penetração por absorção capilar*

A ascensão capilar modelada pela Lei de Jurin

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{2} \cdot \mathrm{n}}{\mathbf{r} \cdot \mathrm{g}} \qquad \text{Equação 1-1}$$

onde:

h = altura da penetração da água no capilar

? = tensão superficial da água em kg/m (˜ 75 •10^{-4})

r = raio do capilar em m

? = massa especifica da água, em kg/m³ (˜ 1)

- *Penetração por difusão*

Modeladas pelas Leis de Fick

1ª lei aplicada a difusão em estado estacionário

$$\mathbf{Qs} = -\mathbf{Def}_{Cl} \frac{d\mathbf{C}}{d\mathbf{e}_{Cl}} \qquad \text{Equação 1-1}$$

onde:

Qs = fluxo de íons na direção x

Def_{Cl} = coeficiente efetivo de difusão, difusividade

dC/de_{Cl} = gradiente de concentração

C = concentração de íons na solução

e_{Cl} = profundidade considerada

2ªlei para condição transiente, não estacionária, descrita em função do tempo de exposição aos cloretos.

$$\frac{d\mathbf{Ce}_{Cl}}{d\mathbf{t}} = \frac{d}{d\mathbf{e}_{Cl}}\left(\mathbf{Def}_{Cl} \frac{d\mathbf{Ce}_{Cl}}{d\mathbf{e}_{Cl}}\right) \qquad \text{Equação 1-2}$$

onde:

Ce_{cl} = concentração dos cloretos na profundidade e_{Cl}

e_{Cl} = profundidade considerada geralmente em m

t = duração de tempo considerada, geralmente em s

Def_{Cl}= coeficiente efetivo de difusão, ou difusividade, variável com a temperatura, geralmente em m²/s

♦ *Penetração por permeabilidade*

Regime laminar estacionário e não turbulento, Lei de Darcy

$$\mathbf{V} = \mathbf{k}\frac{\mathbf{H}}{\mathbf{x}} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{S}} \qquad \text{Equação 1-1}$$

onde:

V = velocidade de percolação da água em m/s

K = coeficiente de permeabilidade da água no concreto em m/s

H = pressão de água em m.c.a.

x = espessura do concreto percolado pela água em m

Q = vazão da água percolada em m³/s

Uma vez que esta tese tem por objetivo fundamental estabelecer um paralelo entre a durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados e com agregados convencionais e não estabelecer qual o mecanismo predominante de penetração dos íons Cl^-, optou-se por não discutir nem exemplificar tais mecanismos.

A justificativa para se adotar o teor de cloretos totais como uma das variáveis representativas para um estudo da durabilidade de concretos baseia-se no fato de existir no território Nacional, 8 mil quilômetros de costa, fato que por si só já é uma justificativa. Também deve ser considerado que nas fachadas de condomínios de luxo, são revestidas com pastilhas e tradicionalmente por recomendação dos fabricantes, a remoção do papel aderente a este revestimento, bem como sua limpeza periódica, normalmente é executada com ácido muriático, que nada mais é do que ácido clorídrico.

Também é praxe em condomínios residenciais, executar limpeza de pisos do térreo com produtos alvejantes à base de hipo-clorito de sódio (água sanitária). Sendo assim, de alguma forma os cloretos existentes nestas soluções terão contato com o concreto da estrutura, o que forçosamente levará a redução de vida útil.

1.8 Resistividade

A resistividade elétrica controla o fluxo de íons que se difundem através da solução aquosa presente nos poros de um concreto, sendo altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e a temperatura, reduzindo-se com o aumento desta. A resistividade de basaltos é da ordem de 10^4 Om, de calcários densos $29*10^6$ Om de granitos $88*10^6$ Om e de concretos de boa qualidade em equilíbrio com ambientes de baixa UR, da ordem de 10^4 a 10^5 [38] [39].

1.8.1 Fundamento teórico

Qual a importância de conhecer a resistividade como parâmetro para avaliação da durabilidade de um concreto?

HELENE (1993)[40] afirma que a resistividade elétrica do concreto, é um dos parâmetros, que juntamente com a disponibilidade de oxigênio, é considerado decisivo no controle da velocidade da reação de corrosão da armadura, como a corrosão da armadura, sem dúvida, é uma das fontes de maior incidência das causas de redução da vida útil de uma estrutura, si torna importante o estudo da resistividade para a avaliação da durabilidade de um concreto.

---

[38] PETROCOKINO, M.D Les Divers Aspects de la Corrosión des Armatures dans les Ouvrages en Béton Armé e Précontraint**. Annales de L' Institute Technique du Bâtiment et des Travois Publics** v. 13 n. 153, p. 915 –36, 1960.

[39] MONFORE, G.E. **The electrical resistivity of concrete**. Skokie, Portland Cement Association, May 1968. (Bulletin, 224).

[40] HELENE Paulo R. L. **Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto Armado** São Paulo tese (Livre Docência) Escola Politécnica. 1993 241p

Além do mais, segundo GARBOCZI[41], (1990) a resistividade servirá como parâmetro que possibilitará prever o comportamento da permeabilidade e os fenômenos de difusão no concreto.

A vantagem de monitorar a resistividade fundamenta-se na facilidade de execução deste ensaio e no fato de não ser um destrutivo, fato que viria causar danos maiores às estruturas de concreto.

Portanto, num estudo sobre a durabilidade de concretos com materiais reciclados, torna-se amplamente justificado o fato de tentar estabelecer uma correlação entre variação da resistividade e o teor de agregados reciclados utilizado na sua preparação.

1.8.2 Fatores que interferem na resistividade e seus critérios de avaliação

Segundo HUNKELER, (1996)[42] a resistividade é fortemente influenciada pelo teor de umidade da argamassa ou do concreto e, afirma ainda, que reduzindo a fração volumétrica da pasta de 1 (para pasta pura) para cerca de 0,2 a 0,3 para argamassa comum ou concreto, observa-se um incremento da resistividade de 10 a 20 vezes. A relação entre resistividade do concreto/argamassa e da água de poro na pasta é de 900 a 5000, finalmente conclui que o teor de umidade é mais importante para a taxa de corrosão que o teor de cloretos sendo este fato extremamente importante na concepção de projetos de proteção catódica. Embora não tenham sido localizados outros trabalhos nesta linha a primeira vista a afirmação parece inovadora e foi citada com a finalidade de abrir nova linha de pesquisa para os que tiverem interesse em confirmar o assunto. Afinal de contas não é uma realidade que se consta facilmente.

A resistividade elétrica superficial é a grandeza que indicará a maior ou menor probabilidade do início da reação de corrosão da armadura.

---

[41] GARBOCZI, E.J. Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review. **Cement Concrete Research**. p.591-601, 1990.

[42] HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. **Constructions and Building Materials.** v. 10 n. 5, p.381-389,1996.

O *Comite Euro-International du Beton* (CEB 192, 1989)[43] apresenta critérios de avaliação quanto à resistividade do concreto. Os resultados são apresentados na Tabela 1-4.

Tabela 1-1. Critérios de avaliação da resistividade (CEB Bulletin nº192).

RESISTIVIDADE DO CONCRETO	PROBABILIDADE DE CORROSÃO
< 5 kΩ.cm	Muito alta
5 a 10 kΩ.cm	Alta
10 a 20kΩ.cm	Baixa
> 20 kΩ.cm	Desprezível

[43] Bulletin d`Information, Paris n. 192

CAPÍTULO 2.
AGREGADOS RECICLADOS

Além de monitorar as propriedades mencionadas no item anterior, julgou-se necessário para elaboração de um estudo da durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, analisar isoladamente os agregados que devem ser utilizados na produção dos concretos, uma vez que as propriedades dos agregados afetam as proporções de dosagem ou o comportamento do concreto fresco ou endurecido, ou seja, em última análise sua durabilidade.

MEHTA[1] (1994), sugere que seja mais apropriada a divisão das propriedades dos agregados nos seguintes grupos:

- *Características dependentes da porosidade:*

  Massa especifica, absorção de água resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade.

- *Características dependentes das condições de exposição prévia e condicionante de fabricação*

  Tamanho forma e textura das partículas.

- *Características dependentes da composição química e mineralógica*

  Resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

Com a finalidade de possibilitar que esta tese também se tornasse um trabalho prático, que pudesse ser utilizado não exclusivamente em laboratórios extremamente aparelhados, mas que tivesse utilidade a qualquer usina de reciclagem, optou-se por determinar apenas algumas características básicas dos agregados reciclados utilizados na preparação dos concretos ensaiados, procedimento efetuado através de ensaios simples e de fácil repetibilidade.

Assim sendo, optou-se por trabalhar com as seguintes características dos agregados reciclados:

- Dmax,
- Módulo de finura,

- Absorção,
- Massa específica aparente,
- Teor de materiais pulverulentos
- Impurezas orgânicas,

caracteristicas capazes de influir diretamente na trabalhabilidade do concreto. Não foram monitoradas resistência, dureza, módulo de elasticidade e outras caracteristicas dos agregados, pois acredita-se que as diferenças existentes entre os resíduos de construção, encontrados no territórrio nacional não comprometam a durabilidade do concreto tanto quanto a estrutura da pasta adotada para produção do concreto poderá vir a fazê-lo.

A importância de estudar os agregados isoladamente, reside no fato, que 75% do volume do concreto é ocupado pelos agregados, não sendo surpreendente o fato de sua qualidade ser de considerável importância. O agregado não só pode influenciar a resistência do concreto, pois agregados com propriedades indesejáveis podem não apenas produzir um concreto pouco resistente, mas também podem comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto. Portanto, este fato por si só, justifica a preocupação com a influência dos agregados na durabilidade do concreto. Assim sendo redigiu-se este capítulo exclusivamente dedicado aos agregados reciclados, abrangendo o estágio atual da normalização, sua caracterização, analisou-se também os atuais volumes diários coletados e a capacidade de processamento de alguns municípios nacionais.

Segundo NEVILLE (1997) o agregado antes era tido como material inerte, disperso por entre a pasta de cimento, utilizado principalmente por razões econômicas e técnicas. No entanto, para estudar a durabilidade de forma tecnicamente correta deverá ser adotado um ponto de vista oposto considerando-se o agregado como um material de construção ligado a um todo coesivo por meio de uma pasta de cimento, como os elementos de vedação de uma parede de alvenaria. Na verdade, o agregado não é inerte na exata acepção da palavra e suas propriedades físicas, térmicas e, às vezes, também químicas, têm influência no desempenho e na durabilidade do concreto.

Uma vez que os agregados custam menos do que o cimento o concreto se tornará mais econômico à medida que contiver mais agregados e a menor quantidade de cimento possível, mas certamente a economia não é a única razão para utilização dos agregados: eles conferem vantagens técnicas consideráveis ao concreto, que passa a ter maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura.

Além dos agregados naturais, existe uma série de outros agregados, tais como os leves, os pesados, os de escoria de alto-forno, os de cinza volante, os de concreto reciclado e os de alvenaria reciclados, estes dois últimos serão objeto de estudo especifico desta tese .

2.1 Estágio atual da normalização Internacional e do País para agregados reciclados

Em termos de normalização Internacional, para agregados reciclados existem: a proposta japonesa de normalização BCSJ[44] de (1977), a Norma Britânica 6543, a Norma Holandesa CUR[45] (1986), o adendo à Norma dinamarquesa DIF [46] (1989), as diretrizes da RILEM TC 121 DRG apresentadas no 3º Simpósio Internacional sobre Demolição e Reutilização de Concreto e Alvenaria (1993),[47] o relatório que está sendo concluído pelo comitê CEN 154 AHG- Recycled Aggregates, este grupo já tem pronta a lista dos ensaios necessários para cada aplicação que permite descobrir a necessidade de se

---

[44]JAPAN BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN B.C.S.J. **Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete.** Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste 1977.

[45]Commissie voor Uitvoering van Research CUR **Betonpuingranulaaten Metselwerkpuins Granulaat alls Toeslagsmaterial van Beton**. Commissie voor Uitvoering van Research ingesteld door de Betonvereniging, Rapport 125, 1986

[46] DIF Proposed amendment to the Danish concrete code: use of recycled demolition rubble - 1989 **Dansk Beton**, 6, n°4.

[47] RILEM TC 121-DRG RILEM RECOMMENDATION Specifications for concrete with recycled aggregates **Materials and Structures.** 27, p. 557 – 559. 1994.

pesquisar determinadas propriedades além de criar certos ensaios específicos. (VAZQUEZ, 1997)[48].

No âmbito nacional, ainda não se tem oficialmente qualquer texto ou documento pronto nem consagrado pelo uso, todavia em dissertação de mestrado apresenta à Escola de Engenharia de São Carlos da USP, LIMA[49] (1999) apresenta algumas sugestões e alguns vetos a determinados usos, para regulamentação dos agregados provenientes da reciclagem.

Também em 2001, foram constituídos dois Grupos de Trabalho[50] para preparação de textos básicos visando a elaboração de documentos intitulados "práticas recomendadas para a utilização de agregados reciclados" um em pavimentação e o outro em concreto.

2.2 Caracterização de agregados reciclados

Segundo LEVY[5] (1997), produzir agregados reciclados bem graduados e limpos, não será suficiente para garantir a qualidade do processo de reciclagem. O material deverá ser adequado à finalidade específica para a qual se destina, ou seja, fisicamente, sua granulometria deverá enquadrar-se dentro e determinados limites e, quimicamente, só poderá conter níveis mínimos toleráveis de contaminação, para que, desta forma, o concreto produzido possa ser durável e haja garantia da estabilidade das estruturas construídas.

A utilização de agregados que atendam a determinada finalidade, bem como para produção de concreto, está baseada em critérios granulométricos preestabelecidos, sendo importante também considerar a forma de seus grãos e sua textura, uma vez que as formas mais angulares, ou seja, menos

---

[48] VAZQUEZ, Enric Utilización de residuos en la C.E.E. aspectos políticos y ambientales. In: RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONOMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL (SEMINÁRIO), São Paulo 1997. **ANAIS** São Paulo CT 206 IBRACON p 64 –66.

[49] LIMA, J.A. Ribeiro**; Proposição de Diretrizes para Produção e Normalização de Resíduo de Construção Reciclado e suas Aplicações em Argamassas e Concretos.** São Paulo, 1999 240p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo.

[50] Os dois Grupos de Trabalho contam com apoio do SINDUSCON e do IBRACON através do Comitê Técnico CT 206 Meio Ambiente.

arredondadas, assim como texturas mais porosas são responsáveis por maior consumos de água em argamassas e concretos.

O material a ser reciclado terá que ser britado peneirado e quando necessário descontaminado, após o que poderá ser aplicado para vários propósitos como aterros, drenagens de grandes áreas, materiais para base ou sub-base de pavimentos rodoviários e produção de novos concretos.

Como se percebe, a qualidade dos agregados na durabilidade dos concretos, será extremamente importante, portanto justifica-se a necessidade e a preocupação em apresentar uma forma de classificação para os mesmos, para isso, serão apresentados critérios de classificação, baseados na origem, na forma e textura, assim como na granulometria.

2.2.1 Quanto à origem

A procedência dos resíduos de construção destinados à produção de agregados reciclados deve ser considerada fator relevante, uma vez que dependo da sua origem, ao passarem por um determinado britador estes resíduos darão origem a agregados com forma totalmente diferentes entre si. Em determinadas condições podem levar a um consumo de cimento extremamente elevado, tornado inviável técnica e economicamente a produção de concretos de classes com resistências superiores a 30 MPa.

O segredo para obtenção de concretos duráveis muitas vezes reside no rigoroso controle dos componentes, portanto recomenda-se que os agregados utilizados na produção de concretos sejam selecionados dependendo de sua origem, alvenaria ou concreto, evitando-se a mistura, uma vez que ambos apresentam características diferenciadas.

A seguir, apresentam-se as definições de: agregado reciclado proveniente de resíduos de alvenaria, de agregado reciclado proveniente de resíduos de concreto, bem como agregados reciclados provenientes de resíduos compostos. No entender deste autor, o simples fato de um agregado reciclado se enquadrar em qualquer destas categorias não o credencia para utilização incondicional na produção de novos concretos. Reconhece-se que na prática a maioria dos resíduos de construção será proveniente de resíduos compostos. Porém, tentar estudar a durabilidade de concretos com resíduos

compostos seria complicado, uma vez que até a presente data, dezembro de 2001, o meio técnico não dispõe de conhecimento consolidado sobre a influência na durabilidade de concretos dos resíduos de construção civil individualmente. Portanto mesmo tendo definido agregados reciclados proveniente de resíduos compostos, os mesmos não foram utilizados para elaboração dos concretos utilizados no desenvolvimento da parte experimental desta tese.

- *Agregados provenientes de resíduos de alvenaria.*

São agregados obtidos da britagem de fragmentos de materiais minerais, provenientes de demolição, ou resíduos de construção, são materiais que podem ou não estar contaminados com resíduos de tinta, gipsita e outras substâncias em menor ou maior teor. Normalmente sua resistência à compressão será inferior a resistência à compressão de agregados naturais e poderão, ou não, conforme sua qualidade e sua granulometria, desenvolver reação pozolânica, (LEVY-1997).[51]

- *Agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto*

São agregados obtidos da britagem de fragmentos de materiais minerais, provenientes da demolição de estruturas de concreto, assim como concretos frescos, endurecidos e rejeitados, conforme o caso, estes materiais poderão estar contaminados por agentes agressivos como cloretos e ou sulfatos, dependendo única e exclusivamente da origem destes fragmentos. São materiais que podem ou não estar contaminados com resíduos de tinta. Normalmente sua resistência à compressão dependerá da resistência à compressão dos agregados naturais utilizados na produção do concreto original.

- *Agregados reciclados provenientes de resíduos compostos*

São agregados obtidos da britagem de fragmentos de materiais minerais, provenientes de demolição de obras convencionais, estruturas de concreto e vedações de alvenaria revestida ou aparente, em blocos de

---

[51] LEVY, S.M.; HELENE P. R. L. **Reciclagem do Entulho de Construção Civil, para Utilização como Agregado de Argamassas e Concretos**. São Paulo 1997. P. 148 Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Departamento de Engenharia de Construção Civil PCC/USP.

concreto ou cerâmico ou mesmo em tijolos maciços. Conforme o caso, estes materiais poderão estar contaminados por agentes agressivos como cloretos e ou sulfatos, dependendo única e exclusivamente da origem destes fragmentos. São materiais que podem ou não estar contaminados com resíduos de tinta. Normalmente sua resistência à compressão dependerá da resistência à compressão dos agregados naturais utilizados na produção do concreto original.

2.2.2 Quanto à forma e textura

- *A forma*

A forma dos grãos tem influência no volume total de pasta necessário para garantir a plasticidade especificada de determinado concreto, de acordo com estudo realizado por RAVINDRARAJAH e TAM[52] – (1985) a forma das partículas dos agregados reciclados é mais angular que a dos agregados naturais.

Com base em pesquisas executadas por HANSEN e NARUD[53] – (1983) pode-se concluir que os agregados miúdos reciclados provenientes de processo de britagem, apresentam forma maiores e mais angulosas do que seria desejável para produção de boas misturas.

Uma vez que os agregados miúdos reciclados contêm um grande número de partículas angulares, não constitui surpresa o fato de que concretos elaborados exclusivamente com estes agregados, sejam mais consistentes e conseqüentemente apresentem, menor trabalhabilidade do que concretos preparados com agregados naturais utilizando-se com o mesmo traço. (HUISMAN e BRISTON – 1981)[54].

---

[52] RAVINDRARAJAH, R.S.; TAM, T.C. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. **Magazine of Concrete Research**. v. 37 n. 130 march 1985 p.29-38.

[53] HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate **Concrete International- Design and Construction**, 5 n.1 p. 79-83,1983.

[54] HUISMAN, C.L.; BRISTON, R.A. Recycled Portland cement concrete specifications and control in Federal Highway Administration (FHWA) in: National Seminar on PCC Pavement recycling and rehabilitation, St Louis, Missouri USA 1981. Federal Highway Administration .**Proceedings.** Report FHWA- TS -82-208 -1981. p. 140-143.

♦ *Relações entre comprimento e largura dos grãos dos agregados*

Pelo fato de não existir uma norma específica para agregados reciclados, serão adotadas as mesmas definições adotadas pela NBR 7225 /93[55] em relação à forma dos grãos ou fragmentos de agregados, como indicado na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 Pedra britada - pedrisco - pó de pedra NBR 7225/93

Pedra britada -pedrisco - pó de pedra	Relação
Alongado	C / l > 2 - l / c = 2
Cúbico	C / l = 2 - l / c = 2
Lamelar	C / l > 2 - l / c > 2
Quadrático (a)	C / l = 2 - l / c > 2

onde: c = comprimento distância de dois planos paralelos que possam conter o agregado em sua maior dimensão.

l = largura diâmetro da menor abertura circular através da qual o agregado possa passar.

♦ *A textura*

METHA (1994)[1], define a textura superficial pelo grau de quanto a superfície do agregado é lisa, áspera ou celular, e a forma indicada para determinação é baseada em avaliação visual. Areia e pedregulho são lisos no seu estado natural. Pedras britadas de granito, basalto e calcário apresentam uma textura áspera. Agregados com superfície celular e áspera apresentaram maior absorção de água que agregados de superfície lisa.

Para agregados reciclados, o B. C. S. J. apresenta uma série de dados transcritos na Tabela 2-2 que relacionam a absorção do agregado com o tipo de britador utilizado para sua produção.

[55] NBR 7225/93 Materiais de pedra e agregados naturais -Terminologia

Tabela 2-1 Absorção de água em função dos britadores utilizados para produção do agregado reciclado B. C. S. J. 1978[56]

Tipo de britador	Concreto	Absorção de água (%)	
		Agregado miúdo	Agregado graúdo
Mandíbula	a/c = 0,45	11,0	5,8
	a/c= 0,55	11,3	6,2
	a/c= 0,68	11,1	6,4
Horizontal	Não mencionado	10,5	5,3
Moinho continuo	Não mencionado	8,7	4,6

♦ *Influência sobre a demanda de água*

Formatos cúbicos e texturas impermeáveis (lisas) apresentam menor demanda de água para atingir determinada plasticidade. Tal fato deve ser considerado sempre que se realizar um estudo dosagem. Com a utilização de agregados reciclados não haveria de ser diferente, portanto a utilização de resíduos provenientes de alvenaria para produção de agregados a serem utilizados no preparo de novos concretos deve ser analisada com cautela, uma vez que tal solução sempre apresentará como produto final, agregados mais angulosos e mais absorventes que os agregados provenientes de resíduos de concreto.

2.2.3 Quanto a granulometria

O tamanho do agregado usado no concreto se estende de dezenas de milímetros até partículas com seção transversal menor do que um décimo de milímetro. O tamanho máximo realmente usado varia, mas, em cada mistura, incorporam-se partículas com diversos tamanhos; a distribuição desses tamanhos se denomina granulometria. Quando se fazem concretos com menor exigência de qualidade, se usam, às vezes, agregados provenientes de jazidas que contêm uma variedade completa de tamanhos, desde o menor até o maior; esses agregados são denominados bica corrida ou brita graduada. A alternativa sempre usada no preparo de concretos de boa qualidade consiste

---

[56] Building Contractors Society of Japan B.C.S.J. Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete,. Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste summary in **Concrete Journal**, Japan, 16, n. 7, p.18-31, 1978.

em obter o agregado em pelo menos dois grupos de tamanhos, sendo as principais divisões entre agregado miúdo, que compreende material não maior do que 5 mm, ou 4,8 mm, muitas vezes denominado areia (por exemplo, na BS 882:1992), e agregado graúdo, que compreende material igual ou maior do que 5 mm, ou 4,8 mm. (NEVILLE-1997)[25] .

♦ *A curva granulométrica ideal*

A determinação da curva granulométrica de um agregado é tarefa corriqueira e não apresenta qualquer dificuldade, porém decidir se a granulometria do agregado natural ou reciclado pode ser considerada aceitável ou não para produção de concreto, é uma tarefa mais complexa e ainda nos dias atuais o meio técnico não apresenta consenso sobre o assunto.

Como inúmeros outros conceitos, o de granulometria ideal foi se modificando com o tempo, na década de 70 o meio técnico advogava que o ideal para produção de concreto seria utilizar areia grossa, no estado de São Paulo esta areia normalmente era encontrada na região de Jacareí.

Atualmente, com a dificuldade crescente de localizar este tipo de areia, entre as concreteiras a utilização de areia fina assim como areias compostas artificialmente com finos de pedreiras[57] têm sido normalmente utilizadas na produção de concretos, sem qualquer restrição por parte dos consumidores.

Portanto, a utilização da curva granulométrica como parâmetro para seleção de um agregado a ser utilizado na produção de concreto, não pode ser adotado como critério absoluto. Ao invés disso, deve ser entendido, como critério orientativo para prever a trabalhabilidade do concreto a ser produzido com determinado agregado.

Na Tabela 2-1 a seguir, são apresentadas as especificações granulométricas para agregados miúdos preconizadas pela ASTM C 33-93, BS882:1992 e NBR 7112-83.

---

[57] TERRA, L.. E. Finos de pedreira para confecção de concreto estrutural – práticas recomendadas. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2. São Paulo 1999. **ANAIS.** IBRACON CT- 206 p.65-71,1999.

Tabela 2-1 Porcentagem passante pelas peneiras, valores indicados pelas Normas ASTM C33-93 BS 882 1992 e pela NBR 7112/83, para agregados miúdos

Abertura da peneira (mm)	ASTM C33-93	BS 882 1992			NBR 7112/83			
		Grossa	Média	Fina	Muito Fina	Fina	Média	Grossa
9,6	-	0	0	0	0	0	0	0
4,8	-		0	0-5	0-5	0-10	0-11	0-12
2,4	0-20	0 -40	0-35	0-20	0-5	0-15	0-25	5-40
1,2	-	10- 70	0-55	0-30	0-10	0-25	10-45	30-70
0,6	40-75	46-85	20-75	0-45	0-20	21-40	41-65	26-85
0,3	70-90	60-95	52-95	30-45	50-85	60-88	70-92	80-95
0,15	90-98	100	100	100	85-100	90-100	90-100	90-100
<0,15	100							

2.2.4 Quanto à reação álcali-agregado

Por que a preocupação com a reação álcali agregados?

Pelo simples motivo de haver sido registrado o desenvolvimento de manifestações patológicas constatadas na Bélgica, levando à necessidade de demolição de duas pontes conforme relato de De PAUW, C. et. all. (1996.)[21]

E como esta reação trata-se de uma manifestação patológica que se desenvolve no longo prazo, não poderia deixar de ser abordada no desenvolvimento de um estudo da durabilidade.

- *A reatividade potencial de agregados para concreto*

Uma das primeiras descrições do fenômeno apresenta o seguinte quadro patológico: expansão e fissuração levando à perda de consistência, elasticidade e durabilidade. São de autoria de STATON (1940)[58] e remontam à década de 40, a partir de investigações de estruturas de concreto fissuradas na Califórnia.

---

[58] STATON apud MEHTA K. P & MONTEIRO Paulo J. M. ; **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo PINI 1994. 574 p.

De acordo com o relatório técnico elaborado pelo laboratório de Engenharia Civil da CESP[59], a reação dos álcalis do cimento com certos minerais, constituintes dos agregados, afeta a durabilidade do concreto. Ela tem caráter expansivo e degenerativo e se processa lentamente.

Os estudos desta reação são recentes. A partir dos anos 70 cresceu o interesse pelo problema, em razão dos relatos de anomalias surgidas em estruturas de concreto de vários países.

Atualmente, as pesquisas sobre o fenômeno têm indicado a potencialidade de diversos materiais, até então considerados inertes, e resultado no desenvolvimento de novos métodos de ensaios eficientes, expeditos e confiáveis.

Quanto ao desenvolvimento desta reação em concretos produzidos com agregados reciclados, é importante frisar que na literatura foram localizados exemplos de insucessos como na Bélgica (De PAUW, C. et. all. 1996.)[60] nas quais duas pontes tiveram quer ser totalmente demolidas devido a reações álcalis agregados. Ainda segundo De PAUW, o fato de uma instalação de reciclagem ter a probabilidade de processar entulhos minerais que contenham agregados potencialmente reativos, que devido a condições especiais no concreto original, não desenvolveram a reação, e que no novo concreto teriam condições para tal, talvez esteja impedindo a aceitação de uma proposta de normalização pelo BBRI[61] sobre agregados reciclados.

---

[59] Brasil. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO CESP-COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO LABORATÓRIO CESP DE ENGENHARIA CIVIL, ILHA SOLTEIRA SÃO PAULO. **A Reatividade Potencial de Agregados para Concreto**, (em CD ROOM) 2000.

[60] De PAUW, C.; DESMYTER, J.; DESSEL J. Van Reuse of construction and demolition waste as aggregates in concrete, technical and environmental aspects. In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND. -INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION, Dundee - Escócia junho 1996 **Proceedings**. Ravindra & Thomas Grã Bretanha p. 131- 140, 1996.

[61] Belgian Buildin Research Institue Instituto Belga de pesquisa em construção, fundado em 1960, atualmente uma das principais atividades do Instituto é a formulação de normas nacionais e regionais sobre agregados reciclados com vistas à sua incorporação a um padrão europeu para agregados reciclados.

♦ *Os fundamentos da reação*

Na seqüência, apresenta-se resumidamente a forma pela qual teoricamente se desenvolve a reação álcali-agregado:

As variações de volume do concreto devidas ao fenômeno conhecido como reação álcali-agregado são originárias do produto expansivo que se forma quando os álcalis ativos, presentes nas soluções contidas nos poros do concreto, entram em contato com certos tipos de agregados que contém mineral reativo. A reação se processa de forma lenta e complexa e se manifesta por expansão e conseqüente fissuração, deslocamento e queda da resistência do concreto.

O fenômeno expansivo depende da interação entre a quantidade de álcalis solúveis presentes na mistura, da natureza, da granulometria e do teor dos agregados reativos, da umidade e da variação de temperatura do concreto (KIHARA- 1997)[62].

Os elementos alcalinos do cimento provêm das matérias primas utilizadas na sua fabricação, principalmente dos feldspatos, micas e minerais argilosos presentes no clínquer sob vários estados de combinação (PAULON – 1981)[63].

A reação está mais correlacionada com a quantidade de álcalis solúveis, expressa em teor equivalente de $Na_2 0$, do que com as quantidades em separado de óxidos de sódio e potássio.

Em função da composição mineralógica dos agregados, as reações com os álcalis, provenientes do cimento, classificam-se em três tipos[64], descritos a seguir:

---

[62] KYHARA, Y. The Influence of carbonation of the alkali-aggregate reaction mechanism. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT 10 **PROCEEDINGS. v.4** p.331-334, 1997.

[63] PAULON, V. A; **Reações álcali-agregado em concreto**. São Paulo 1981. p.114 dissertação (mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

[64] KUPERMAN,S.C.;SBRIGHI NETO, C. Reação álcalis-agregado:visão atual e a situação brasileira. In SIMPÓSIO SOBRE DURABILIDADE DO CONCRETO. **ANAIS.** p.100-124, 1998.

Álcali-silica

A reação entre soluções alcalinas presentes nos poros do concreto e a sílica ativa proveniente de minerais, existentes nos agregados utilizados no preparo do concreto causam sua deterioração (KUPERMAN –1998)[65].

Dentre as reações expansivas esta é a mais rápida e a mais conhecida.

Álcali-silicato

Basicamente a diferença entre esta e a reação anterior é a presença de quartzo tencionado ou não, por processos metamórficos, ou de minerais expansivos da classe dos filossilocatos, como vermiculita, ilita, clorita, e montmorilonita expansiva [62]

Álcali-carbonato

A deterioração do concreto pela reação álcali-carbonato é devida à reação da dolomita com a solução alcalina, com conseqüente desdolomitização do calcário e enfraquecimento da ligação pasta-agregado.

- *Fatores que influenciam a reação*

Aos álcalis disponíveis somam-se a quantidade e granulometria dos materiais reativos e a relação entre o equivalente alcalino e a porcentagem de material reativo.

A intensidade e velocidade das reações de expansão dependem da natureza e concentração da fase reativa do agregado [62]

O teor de álcalis presente em mistura de concreto é proveniente da composição de: teor de álcalis do cimento, teor de álcalis disponíveis (ativos) nas soluções dos poros e da quantidade de álcalis, que é incorporada ao concreto por fontes adicionais, como alguns agregados, pozolanas, aditivos e água.

Em face da reação álcali-agregado, as condições ambientais a que está exposto o concreto, dado pelas variações de temperatura e umidade, têm significativa influência no seu comportamento.

---

[65] Estes minerais normalmente são: opala, calcedônia, cristobalita e tridimita, vidros naturais(vulcânicos) e vidros artificiais (pirex)

- *Inibidores da reação*

O controle do conteúdo de álcalis por m³ de concreto, o uso de adições ativas (pozolanas e escórias de alto forno), a prática de diluição dos agregados reativos, a limitação da circulação de água no concreto e a execução de um concreto denso, impermeável e com ar incorporado contribuem para minimizar a reação álcali-agregado.

Segundo PAULON (1981)[63] algumas características do concreto como: misturas muito pobres, adensamento insuficiente, concreto sem finos e concreto com agregados leves, que efetivamente inibem a reação.

A existência de vazios em quantidade, pelo menos 8% em volume, que acomodem os produtos expansivos, também funciona como inibidor da expansão.

A aplicação no concreto de alguns materiais tem efeito sobre o processo reativo, a saber:

a) Escórias de alto-forno

O cimento CP-III tem se mostrado eficiente no combate à reação, dependendo do teor de escória presente no produto.

b) Pó mineral

O mineral reativo tornado pó pode ser usado em diferentes proporções sem causar expansão, podendo até ter efeito pozolânico.

c) Material pozolânico

As pozolanas exercem influência em todas as reações álcali-agregado.

As substituições de parte do cimento por pozolana ou fly ash em teores superiores a 15% tem mostrado resultados satisfatórios para inibir o processo reativo e expansivo das misturas.

Finalmente, visando conhecer se os agregados oriundos das maiores fontes nacionais de matéria-prima para produção de agregados reciclados, resíduos de alvenaria e de concreto proveniente de obras novas[66], são

---

[66] No entender do autor os entulhos provenientes de desperdício ou sobras de materiais ainda constituem a grande parcela do entulho nacional, uma vez que em nosso país ainda não

suscetíveis à reação álcali–agregado, resolveu-se analisar os resíduos utilizados na parte experimental desta tese, de acordo com o preconizado pela norma ASTM C 1260/94[67].

2.3 Possibilidade e potencialidade para produção de agregados reciclados.

Julgou-se que haveria necessidade de avaliar a potencialidade existente no país para produção de agregados reciclados, pois no entender deste pesquisador, não haveria qualquer sentido analisar a influência de agregados reciclados na durabilidade de novos concretos se não houver matéria prima em quantidade suficiente e em condições técnicas, para produção destes agregados.

A bem da verdade, se trata de um ciclo vicioso, pois se houver matéria prima em quantidade suficiente, a iniciativa privada juntamente com o meio técnico, acaba por criar condições para sua utilização e vice versa, havendo condições técnicas para utilização dos resíduos, a cultura vigente termina por se modificar, possibilitando desta forma a criação dos meios técnicos necessários à sua utilização.

No Brasil, neste primeiro ano do novo milênio, a utilização de agregados reciclados em escala industrial, ainda não constitui prática largamente difundida entre nossos municípios, ou seja, a implantação de usinas de reciclagem com produção diária e padrões de qualidade definidos, ainda não se transformou em rotina adotada pelas prefeituras de nossas cidades, nem pela iniciativa privada, porém alguns municípios estão procurando se organizar no sentido de adotar uma política de gerenciamento de seus resíduos sólidos, afim de transformá-los, de forma empresarial em agregados reciclados.

Na Tabela 2-4, apresenta-se a situação de alguns dos municípios nacionais, em posição de vanguarda, seja pela adoção de políticas municipais para gerenciamento dos resíduos sólidos, seja por sua capacidade instalada.

---

existem demolições de porte das demolições existentes no continente europeu repleto de obras mais antigas, as quais têm sido sistematicamente reformadas para se tornarem mais funcionais e adequar-se às necessidades atuais dos usuários.

[67] ASTM C1260/94 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates

Política para gerenciamento de resíduos sólidos deve ser entendida como a adoção ou estabelecimento de regras práticas capazes, de transformar a postura municipal, ou seja, esta postura deixa de ser uma atitude meramente corretiva[68] para, através de ações e idéias inovadoras, alcançar resultados positivos, os quais contribuirão com a redução dos gastos públicos e minimizarão o impacto ambiental, ocasionado pela deposição dos resíduos sólidos, gerados pela sociedade.

Tabela 2-1 Situação em alguns dos municípios Nacionais sobre a política de Gestão dos resíduos sólidos da Capacidade instalada.(TARCISIO – 2001)[69]

MUNICÍPIO	POLÍTICA	INSTALAÇÃO
Salvador	Existe	Primeiro projeto concluído
Brasília	Não existe	Existem duas instalações com capacidade nominal para 240 ton/dia. Uma em operação normal e outra em vias de entrar em operação,.
Uberlândia	Existe	Não existe
Belo Horizonte	Existe	Estoril capacidade 120 ton/dia. Pampulha capacidade 240 ton/dia BR 040 -cap. 380 ton/dia em licitação. Atero Cap. Eduardo cap. 380 ton/dia projeto concluído
Ribeirão Preto	Existe	capacidade 240 ton /dia
São José dos Campos	Não existe	capacidade de 240 ton/dia - parada
São Paulo	Em desenvolvimento	Capacidade 800 ton/dia, totalmente reformada; inicio de operação prevista para outubro 2001.
Guarulhos	Em desenvolvimento	cap. 120 ton em fase de implantação
Ribeirão Pires	Existe	cap. 120 ton em fase de implantação
Diadema	Em desenvolvimento	Não existe
Santo André	Existe	Não existe
Vinhedo	Não existe	52 ton /dia usina pioneira na comercialização de material reciclado.
Piracicaba	Em desenvolvimento	Capacidade170 ton/dia, totalmente reformada, início da operação, previsto para novembro de 2001.
Londrina	Não existe	Capacidade 100ton /dia encontra-se paralisada.

[68] O contribuinte suja, a Prefeitura limpa, o contribuinte obstrui, a prefeitura desobstrui e assim sucessivamente.

[69] TARCISIO, P. Pinto Comunicação Pessoal - Informações transmitidas via Fax Outubro 2001.

Na seqüência apresentam-se informações sobre os municípios citados na tabela anterior.

- *Belo Horizonte*

Segundo CHENNA[70] (2001) vem sendo desenvolvido desde de 1993, um programa para correção das deposições clandestinas e para reciclagem de entulho, cujo objetivo geral é promover a correção dos problemas ambientais, gerados pela deposição indiscriminada de resíduos em Belo Horizonte. A opção pela implementação deste Programa partiu da constatação de que os resíduos da construção civil, por corresponderem a aproximadamente 50% dos resíduos coletados diariamente na cidade, demandam investimentos específicos para equacionar os problemas ambientais que acarretam, especialmente quando inadequadamente dispostos. O programa de gestão compõe-se de uma rede de Unidades de Recebimento de Pequenos Volumes –URPVs destinada a receber materiais como entulho, objetos volumosos e poda em pequenos volumes e, de uma rede de Estações de reciclagem de entulho. Duas estações estão em operação processando cerca de 360 toneladas/dia e oito URPVs atendem diversas regiões do município. Como resultado oriundo da adoção da política de gerenciamento dos resíduos, a Prefeitura obteve um material (agregado reciclado) o qual tem sido utilizado em obras de manutenção de instalações de apoio à limpeza urbana, em obras de vias públicas e, ainda, em obras de infra-estrutura em vilas e favelas. Em 2000 foram recicladas 95.212 toneladas de entulho e registradas 49.065 entregas voluntárias de resíduos nas URPVs.

A reciclagem deste material foi conseguida por meio da implantação de áreas para Reciclagem de Resíduos de Construção - Estações de Reciclagem de Entulho tem por finalidade:

- Receber resíduos de construção considerados recicláveis após verificação na portaria.

---

[70] CHENA, S. I.M.; O Manejo e a reciclagem de entulhos em Belo Horizonte. In: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. São Paulo 2001 **ANAIS.** CT 206 IBRACON p. 3-10. 2001

- Proceder à classificação, britagem e expedição do material.
- Funcionar, sempre que possível e viável, como local de entrega voluntária do projeto de coleta seletiva de materiais recicláveis (papel, metal, vidro e plástico).

Para a instalação das Estações de Reciclagem, são previstas áreas de pelo menos 6.000 metros quadrados, murados ou cercados, preparo de barreira vegetal para proteção acústica e contenção do material particulado, edificação de instalações de apoio (administração, sanitário e vestiário) e execução de bases e pontos de água e energia para instalação do conjunto reciclador, conforme projetos específicos. Duas Estações de Reciclagem estão instaladas e em funcionamento nas Regionais, Oeste e Pampulha, as quais recebem resíduos diretamente em seu pátio assim como das URPVs. Oito URPVs foram instaladas entre 1996 e 2000. (CHENNA –2001)[70]

♦ *Salvador*

O município de Salvador através da LIMPURB local está procurando implantar e operar um plano de Gestão Diferenciada do Entulho na cidade. Como resultado deste trabalho, no ano de 2000 foram registrados:

- uma coleta de 508.732 t/ano, realizada pelo próprio gerador, resultando tal fato numa economia de R$ 10.528.717,00,
- redução da disposição clandestina de entulho em 61,66%, passando de 420 pontos em 1966 para 161 em 2000,
- aumento da participação do entulho no montante total do lixo coletado, transformando-se em seu maior componente, com uma média de 2.746 t/dia, correspondendo a 50% do total,
- aumento da participação do gerador na coleta e transporte do entulho, com evolução de 3% em 1996 para 61% em 2000.

Um dos próximos objetivos almejados pela LIMPURB local é a implantação da Fábrica de Componentes para Construção Civil, cujo projeto

executivo se encontra concluído e os equipamentos necessários estão com implantação prevista para 2001 (QUADROS& OLIVEIRA – 2001).[71]

- *Vinhedo*

Este município embora sem uma política de gestão de resíduos sólidos, dispõe de uma Central de triagem e Reciclagem de Resíduos Sólidos, usina que entrou em operação em Janeiro de 2001, e em menos de um ano de funcionamento já consegue comercializar parte de sua produção, a outra parte é utilizada para execução de obras viárias cuja execução se encontra a cargo do Município.

Seu maior problema é a garantia da qualidade de fornecimento, pois é abastecida diretamente com material das caçambas sem qualquer triagem preliminar, recebe em média 28 ton/dia de resíduos sólidos compostos por 20% de resíduos cimentícios, 70% de materiais cerâmicos e 10% por outros materiais.

O processo de operação é relativamente simples sendo constituído de uma britagem primária e posterior peneiramento, o material produzido de acordo com os padrões da NBR 7112 pode ser classificado em areia, pedrisco, Brita 1 e Brita 4. Os agregados oriundos de materiais cimentícios são comercializados a razão de R$ 60,00 cada 5m^3 posto obra[72], os resíduos cerâmicos a R$ 12,00/ m^3 a cada 5 m^3. A maioria dos consumidores são sitiantes que tem intenção de estabilizar sub-bases de estradas vicinais que levam às suas propriedades. Os dados apresentados referem-se a media dos meses de julho, agosto e setembro de 2001[73]

---

[71] QUADROS, C.E.B.; OLIVEIRA A.M. V. Reciclagem de Entulho para Produção de Materiais de Construção. **Projeto Entulho Bom**. Salvador Bahia. EUFBA 2001, p. 116-141.

[72] A valores atuais, este preço se torna extremamente competitivo se comparado aos valore praticados pelo mercado para os agregados naturais em torno de R$ 28,00/m^3.

[73] NETO, H. Lopes Encarregado da Central de Triagem e Reciclagem do Município de Vinhedo. Comunicação pessoal via telefônica Outubro 2001.

♦ *São Paulo*

O município de São Paulo em setembro 2001 estava em vias de concluir a reforma de sua antiga usina, com capacidade de processamento de 800 ton/dia o início de sua operação foi previsto para outubro de 2001.

Em São Paulo, a atividade de coleta dos resíduos sólidos é regulamentada pela Prefeitura Municipal através do Decreto nº 37952 de maio de 1999, que autoriza empresas dotadas de poliguindastes e caçambas estacionarias a efetuar a coleta, transportar e dar destinação final aos materiais não abrangidos pela coleta regular, além de encaminhá-los a um aterro de inertes localizado na cava da antiga pedreira Itaquera. Existem, hoje, aproximadamente 400 empresas cadastradas e estima-se que este número possa ser majorado em 70% se forem considerados os coletores clandestinos. Para organizar e diminuir os custos de transporte algumas empresas se organizaram em associações com o objetivo de viabilizar a deposição final dos resíduos 'inertes' em Itaquera, para tanto constituíram as estações de classificação e transbordo, onde todo o material coletado é segregado e encaminhado para reutilização e reciclagem e a fração 'inerte' segue em caminhões de grande porte para Itaquera. (FERRAZ et al. 2001)[74]

2.4 Volumes de resíduos coletados no País e no Exterior

Diversos dados são apresentados quando se procura totalizar a produção de resíduos sólidos gerados atualmente pela construção civil. São números que mostram a importância de se criar uma política para gerenciamento dos resíduos de construção, uma vez que a humanidade está desperdiçando recursos minerais valiosos e ocupando áreas nobres indevidamente, para exemplificar a ordem de grandeza dos volumes em questão, citam-se os dados dos principais municípios do país e no exterior,

---

[74] FERRAZ, G.R.; MASSUDA, O.; ASSIS, C. S.; OLIVEIRA, M. J. E.; ZAMATARO, R.S.; PIRES, M. A. F.; OLIVEIRA, M. C. B.; AMORIM, A. S. Estações de classificação e de transbordo na cidade de São Paulo. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. 4. São Paulo 2001. **ANAIS** CT 206 IBRACON p.75-86. 2001.

2.4.1 No País

Com o intuito de apresentar um panorama sobre a geração de resíduos sólidos que ocorrem nos maiores municípios nacionais, foram mantidos contatos pessoais e consultados os dados publicados pelos serviços de limpeza urbana de diversos municípios de nosso país e desta forma pode ser elaborada a Tabela 2-1, muitos dos dados apresentados nesta tabela foram obtidos diretamente nas fontes.

Um dos maiores problemas enfrentados em todos os municípios de nosso território é o fato de que: o procedimento usual dos munícipes, ao efetuarem uma construção nova, uma reforma ou demolição é, ao final de uma determinada etapa ou ao fim da obra, dependendo do tamanho da mesma, chamar uma caçamba e depositar todos os rejeitos. Observa-se, no entanto, que as caçambas recebem toda sorte de rejeitos, desde resíduos de construção propriamente dito até rejeitos de podas e objetos indesejados como sofás e armários quebrados.

Tabela 2-1 Coleta dos resíduos sólidos de construção em municípios Nacionais.(diversas fontes)

MUNICÍPIO	Média Mensal, Massa de Resíduos de construção Coletados, Estimativas Oficiais. (ton/dia)	OBSERVAÇÕES
Salvador	2746[71]	Base (2001)
Uberlândia	958[75]	Base (2000)
Belo Horizonte	1500[70]	Base (1993)
Ribeirão Preto	1.043[75]	Base (1995)
São José dos Campos	733[75]	Base (1995)
São Paulo	2.050[76]	Base (2001)
Guarulhos	1.308[75]	Base (2001)
Diadema	458[75]	Base (2001)
Santo André	1.013[75]	Base (1997)
Vinhedo	28[73]	Base (2001) Usina de reciclagem

[75] TARCISIO, P. Pinto; Comunicação Pessoal E mail outubro 2001 I&T

[76] MOCHE Dan; Comunicação Pessoal E mail outubro 2001 LIMPURB S.P.

Especificamente no Município de São Paulo, a diversidade de materiais recebida pelas caçambas além das exigências na recepção no aterro motivou a organização dos transportadores a formarem associações, com o objetivo de criar estações de classificação e transbordo.

Existem, atualmente, duas associações de transportadores de entulho na Cidade de São Paulo: a associação que congrega as empresas das regiões noroeste e oeste e se situa no bairro da Freguesia do Ó e a associação que congrega as empresas das regiões central e norte e se situa no Bairro do Jaçanã.[74]

2.4.2 No Exterior

A tarefa de tabular os dados sobre resíduos sólidos coletados fora do território nacional, aparentemente deveria ser mais complexa do que tabular os dados sobre resíduos sólidos coletados nos municípios do território nacional. Todavia, a primeira informação foi localizada com maior facilidade uma vez que a mesma foi publicada em boletim especializado sobe o tema[77], e é apresentada na Tabela 2-6, enquanto que a segunda, foi obtida através de diversos contatos pessoais citados anteriormente na Tabela 2-1.

A comparação destes dados, com os valores publicados pela Environmental Resources Limited (1980) em que foi previsto que os 55 milhões de toneladas coletados naquela época, facilmente ultrapassariam a casa dos 162 milhões de toneladas até o final do ano de 2000, permiti concluir que a previsão estava correta.

---

[77] **Use of Recycled Materials as Aggregates in the Construction Industry** v1 Bruxelas ETN Recycling in construction March/September 1999.

Tabela 2-1 Quantidades de resíduos sólidos coletados na comunidade Européia (Construction and Demolition Waste Management Practices and their Economics Impacts- (ETN Recycling in construction 1999)

Nação da Comunidade Européia	Resíduos de C&D em massa, (milhões ton /ano)	% reutilizada ou reciclada	% incinerada ou depositada em aterros
Alemanha	59	17	83
Reino Unido	30	45	55
França	24	15	85
Itália	20	9	91
Espanha	13	<5	>95
Holanda	11	90	10
Bélgica	7	87	13
Áustria	5	41	59
Portugal	3	<5	>95
Dinamarca	3	81	19
Grécia	2	<5	>95
Suécia	2	21	79
Finlândia	1	45	55
Irlanda	1	<5	>95
Luxemburgo	0	N/a	N/a
Comunidade Européia	181	28	72

Segundo AJDUKIEWICZ, B.A. & KLISZCZEWICZ, T.A [78] (1996) durante os anos da década de 90 o total de resíduos de concreto produzidos no mundo já suplantava a marca de 1000 milhões de toneladas / ano. Comparando-se este valor com os dados atuais (2000/2001) da Europa e parte do território nacional conclui-se que as previsões estavam corretas e que realmente o problema de gerenciar todos os resíduos de construção não é só um ato de cidadania mas poderá ser um negócio economicamente rentável desde que seja tecnicamente viável. Por isso desenvolveu-se esta tese, através da qual pretende-se demonstrar que o concreto, material largamente empregado na

[78] AJDUKIEWICZ,B.A.; KLISZCZEWICZ, T.A. Properties of structural concrete with rubble aggregate from demolition of RC/ PC structures. In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND. -INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION, Dundee- Escócia junho 1996. **Proceedings** Ravindra & Thomas Grã Bretanha -1996 p. 115 a 120.

construção civil, tem durabilidade compatível com a durabilidade de concretos produzidos com agregados naturais.

2.5 Por que a substituição de agregados naturais por reciclados?

Por ironia do destino, muitas vezes a mineração de agregados, responsável pela expansão urbana, acaba sendo vítima da própria expansão, haja vista os diversos exemplos de minerações de brita e areia que tiveram de ser fechadas, na medida em que a urbanização as alcançou. Pelo fato das pedreiras e portos de areia localizarem-se dentro ou no entorno dos grandes centros urbanos, já que devido ao grande volume extraído e o baixo preço unitário, grandes distâncias de transporte, entre consumidor e centro produtor, tornam-se inviáveis do ponto de vista econômico, fato que acaba por gerar a grande parte dos problemas enfrentados pelo setor. Como exemplo, podem ser mencionados, na região Metropolitana de São Paulo[79]; os casos da Pedreira Itaquera, Largo do Sacomã, parte da Vila das Mercês, e na região metropolitana de Curitiba.[80]

Com uma produção bruta da ordem de 200 milhões de toneladas anuais a produção de agregados ocupa, em quantidade, o primeiro lugar entre as substâncias minerais produzidas, superando, inclusive, o minério de ferro.

Os agregados minerais – areia e pedra britada – constituem hoje o segmento do setor mineral mais explorado e comercializado no país. Porém, a importância dos agregados no cenário nacional não é definida somente pela quantidade produzida. Areia e brita exploradas, praticamente, em todo território brasileiro são absolutamente indispensáveis para a indústria da construção civil.

A melhoria das condições de vida da população, base de qualquer programa de desenvolvimento econômico e social, deve prever a construção de infra-estrutura, moradias, vias de transporte, geração de energia elétrica,

---

[79] Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. **AREIA & BRITA** n. 9 Jan/Fev/Mar 2000 p 9

[80] Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil **AREIA & BRITA** n. 5 Jan/Fev/Mar 1999 p 8-10.

saúde e educação, em síntese todos os quesitos fundamentais para o desenvolvimento econômico e social requerem areia e brita, insumos praticamente insubstituíveis.

Nos Estados Unidos, estudo feito pela National Aggregates Association, indica que se houver um aumento na distância de transporte, por caminhão, de cerca de 24 milhas, das pedreiras aos pontos de produção, duplica o preço posto obra. Na França, segundo a Union Nationale des Producteurs des Granulats, considera-se que o custo do transporte de pedra britada por 50 km equivale ao preço na origem, isto é, ao custo total da extração, beneficiamento e comercialização, acrescido do lucro.

O uso do transporte ferroviário, teoricamente mais barato, demanda altos investimentos em linha férrea, em terminais de carga e descarga e exige produção concentrada em poucos grandes produtores, isto, mesmo no Canadá, onde o transporte ferroviário é largamente utilizado. Em São Paulo, existem produtores que utilizam a ferrovia para transportar areia do Vale do Paraíba para São Paulo. Entretanto, os problemas técnicos existentes, acrescidos de excessiva burocracia, desanimam o possível usuário.

Esses exemplos mostram a razão da maioria das pedreiras e portos de areia localizarem-se próximos das grandes aglomerações urbanas. Esta proximidade, como já comentamos, acabou sendo um problema tanto para as minerações como para os habitantes das cidades. [81]

Diante do exposto anteriormente, torna-se evidente que as minerações enfrentam fortes resistências para operarem comercialmente junto aos centros consumidores.

A opção pela implantação de usinas recicladoras implantadas junto aos centros consumidores desponta como solução política e ecologicamente correta.

Todavia, não se deve esquecer de levar em consideração certos cuidados, como por exemplo:

---

[81] VALVERDE, F.M. Mineração de areia e brita e a preservação ambiental. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL 2, São Paulo SP 1999. **ANAIS** CT 206 IBRACON, São Paulo, 1996 p. 87-101.

Integrar totalmente a usina à paisagem para não causar qualquer espécie de poluição visual. A combinação de taludes com distintas inclinações e arbustos, pode constituir uma barreira eficiente capaz de separar uma usina de reciclagem e seus estoques de matéria-prima do ambiente que a circunda.

Caso haja necessidade de controle da poluição química, este poderá ser efetuado através da retirada do entulho contaminado por madeira impregnada, plásticos, tecidos, cabos elétricos, metais não ferrosos, aço (excetuando-se pequenas quantidades existentes nos concretos armados), solo, barro, gesso, além de outros materiais deletérios, como óleo, graxa, e outros componentes capazes de apresentarem contaminação química (HANSEN – 1992)[82].

Entretanto, esse controle acaba elevando o custo dos métodos de demolição, reduzindo sensivelmente a quantidade de material que poderá ser reciclado, encarecendo assim, o custo final dos agregados obtidos.

2.6 Produção de concretos duráveis com agregados reciclados

Agora fica a pergunta: se forem utilizados os critérios apresentados para seleção de agregados reciclados, estará garantida a produção de concretos duráveis?

Respondendo à questão anterior, o leitor deve ter em mente que a reciclagem de resíduos de construção para produção de concretos, ainda é um campo emergente, no qual por receio e até certo preconceito dos próprios usuários não foram cometidos erros que pudessem servir de lição ao meio técnico. A própria comunidade européia, até o presente momento, continua refinando a legislação específica e normalizando os ensaios necessários para seleção dos agregados adequados à produção de concretos duráveis. Apesar de todo este aparato, as nações do continente europeu, mais desenvolvidas na área de reciclagem de resíduos de construção, continuam construído obras piloto com finalidade de monitorar o desenvolvimento de manifestações patológicas e demonstrar o potencial de utilização destes resíduos, algumas destas obras são apresentadas na Introdução desta tese, na Tabela 1.

---

[82] HANSEN T. C. RILEM Report 6 **Recycling of Demolished Concrete and Masonry,** London, E&FN SPON an imprint of Chapman & Hall, 1992. 305p.

Assim sendo, acredita-se que em primeira instância se a regulamentação da produção de agregados reciclados viesse a ser controlada através da seleção da procedência e origem dos resíduos, antes do envio para a britagem, e na fase posterior à britagem fosse realizado um acompanhamento da forma e textura e análises granulométricas, seria o primeiro passo em direção à produção seriada de agregados reciclados com vistas a produção de concretos duráveis.

Com o intuito de demonstrar tecnicamente está afirmação, será apresentada no capítulo seguinte, a parte experimental desta tese, na qual foram produzidos agregados selecionados de acordo com padrões técnicos pré –estabelecidos e com estes agregados foram produzidas as famílias de concreto que serviram de base para o desenvolvimento deste estudo.

CAPÍTULO 3.
PARTE EXPERIMENTAL

Com a finalidade de dar embasamento técnico e científico à esta tese de doutorado, optou-se por realizar um amplo trabalho experimental que permitisse analisar as curvas de tendência dos resultados obtidos e não seu valor pontual. As variáveis monitoradas para desenvolver o trabalho foram:

o consumo de cimento

a resistência à compressão

o módulo de elasticidade

a profundidade de carbonatação e coeficiente de difusão do CO_2,

a absorção de água e o índice de vazios,

a resistividade elétrica do concreto,

a penetração de cloretos,

a justificativa para seleção destas propriedades, encontra-se amplamente detalhada no capítulo anterior.

3.1 Desenvolvimento e planejamento do experimento

Para realização e desenvolvimento deste projeto, houve necessidade de adquirir uma série de equipamentos, preparar o espaço físico onde seriam estocados os materiais e realizados os ensaios, assim como elaborar toda a logística para desenvolvimento dos trabalhos e estabelecer os contatos com os demais departamentos da USP, IPT e com Grupos ligados à iniciativa privada, que manifestaram interesse em apoiar o projeto.

Antes de iniciar o planejamento propriamente dito realizou-se um levantamento das variáveis a serem analisadas, as quais são apresentadas a seguir:

3.1.1 Variáveis Independentes

São as variáveis, que uma vez definidas, serão mantidas fixas até o final do experimento, ou seja, as variáveis que são funções dos materiais a serem utilizados, das famílias de concreto a serem moldadas e da idade dos corpos de prova a serem ensaiados assim como das demais condições previas estabelecidas para realização de cada ensaio.

- *Cimento:*

O cimento escolhido para elaboração deste experimento, foi o CP II - E - 32[83], encontrado em abundância na praça de São Paulo.

- *Traços e consistência:*

Traços 1:3, 1:4,5; 1:6, e consistência 70 ± 10 mm, posteriormente moldaram-se mais dois traços 1:4,5 com a consistência variável com relações a/c do traço 1:3 e do traço 1:6. (consistência seca e consistência fluida)

- *Teor de argamassa seca:*

Adotado = 56%, para todas as famílias de concreto ensaiadas, calculado pela formula indicada as seguir:

$$a = \frac{1+\mathbf{a}}{1+\mathbf{a}+\mathbf{p}} \qquad \text{Equação 3-1}$$

onde:

a = proporção de agregados miúdos reciclados e ou naturais

p = proporção de agregados graúdos reciclados e ou naturais.

- *Agregados utilizados na preparação dos concretos e sua composição*

A nomenclatura e a forma de preparação dos agregados é apresentada a seguir:

REF. agregados graúdos[84] e miúdos[85] naturais,

---

[83] Cimento utilizado Barroso doado pela HOLDERCIN.

[84] Brita nº1 e nº2 Granito Natural procedente da pedreira da Cantareira

RCG agregados reciclados de concreto, graúdos

RAG agregados reciclados de alvenaria, graúdos

RCM agregados reciclados de concreto, miúdos

RAM agregados reciclados de alvenaria, miúdos

Tabela 3-1 Composição em massa dos agregados utilizados, ensaiados.

CONCRETO	COMPOSIÇÃO DO AGREGADO UTILIZADO	
1ª família Referência	Agregados graúdos e miúdos: 100% naturais	
2ª família RCG 20%-80%	Agregado graúdo:	20% reciclados de concreto + 80% naturais
	Agregado miúdo:	100% natural
3ª família RCG 50%-50%	Agregado graúdo:	50% reciclados de concreto + 50% naturais
	Agregado miúdo:	100% natural
4ª família RCG 100%-0%	Agregado graúdo:	100% reciclados de concreto + 0% naturais
	Agregado miúdo:	100% natural
5ª família RCM 20%-80%	Agregado graúdo:	100% natural
	Agregado miúdo:	20% reciclados de concreto + 80% naturais
6ª família RCM 50%-50%	Agregado graúdo:	100% natural
	Agregado miúdo:	50% reciclados de concreto + 50% naturais
7ª família RCM 100%-0%	Agregado graúdo:	100% natural
	Agregado miúdo:	100% reciclados de concreto + 0% naturais
8ª família RAG 20%-80%	Agregado graúdo:	20% reciclados de alvenaria + 80% naturais
	Agregado miúdo:	100% natural
9ª família RAG 50%-50%	Agregado graúdo:	50% reciclados de alvenaria + 50% naturais
	Agregado miúdo:	100% natural
10ª família RAG 100%-0%	Agregado graúdo:	100% reciclados de alvenaria + 0% naturais
	Agregado miúdo:	100% natural
11ª família RAM 20%-80%	Agregado graúdo:	100% natural
	Agregado miúdo:	20% reciclados de alvenaria + 80% naturais
12ª família RAM 50%-50%	Agregado graúdo:	100% natural
	Agregado miúdo:	50% reciclados de alvenaria + 50% naturais
13ª família RAM 100%-0%	Agregado graúdo:	100% natural
	Agregado miúdo:	100% reciclados de alvenaria + 0% naturais

[85] Areia média lavada de rio, proveniente da bacia de Jacareí.

Para obtenção dos agregados reciclados de concreto e de alvenaria, o material foi passado num britador de mandíbulas e o produto obtido, posteriormente peneirado.

As frações correspondentes a agregados miúdos e graúdos, após sua caracterização, foram utilizadas na produção de 12 famílias de concreto contendo teores crescente destes agregados, sempre na condição superfície seca ao ar.

Seis destas famílias continham exclusivamente agregados reciclados provenientes de alvenaria e outras seis, agregados reciclados provenientes de concreto.

Os dados obtidos foram comparados àqueles obtidos para uma 13ª família de concreto produzida exclusivamente com agregados naturais.

Para analisar a influência do teor de umidade dos agregados, foram moldados mais cinco traços com os agregados na condição S.S.S (saturado superfície seca). Na

Tabela 3-1, apresenta-se a composição dos agregados, bem como das famílias de concreto utilizadas na realização do experimento.

- *Idade dos ensaios:*

módulo de elasticidade tangente inicial, ensaios aos 28, 91 e 182 dias

resistência à compressão, ensaios aos 28, 91 e 182 dias

carbonatação, 14 e 28 dias[86] na câmara de carbonatação (BARRA-1996)[87] em corpos de prova com 182 dias

resistividade realizado em corpos de prova com 182 dias

absorção por imersão realizado em corpos de prova com 182 dias

teor de cloretos 75 dias[88] na câmara salina, idade dos CPs. 60 dias.

---

86 O tempo de permanência na câmara de carbonatação foi definido no fato de se ter observado na literatura consultada, que após os 28 dias não havia mais um acréscimo significativo na profundidade da frente de carbonatação.

87 BARRA, M. **Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Armado**. Barcelona 1996. p. 223 tese (Doutorado) - Escola Tècnica Superior d' Enginyers de Camins, Canals i Ports, Universidade Politècnica de Catalunya.

- *Cura:*

14 dias, em câmara úmida, posteriormente em ambiente do laboratório até a data do ensaio.

- *Concentração de CO_2 na câmara de concentração:*

Fixada em 12%, temperatura 28 ± 2 ºC e umidade relativa do ar nas condições do laboratório 60 ± 15%.

- *Concentração de NaCl da névoa da câmara salina:*

Solução de NaCl em diluição de 5% para produção da névoa salina

3.1.2 Variáveis Intervenientes

- *Ar aprisionado:*

Determinado com a finalidade de analisar qual dos agregados utilizados levaria a produção de concretos mais compactos e possibilitar a avaliação do consumo de cimento em cada um dos traços ensaiados. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 11686[89].

- *Massa específica:*

Foi determinada de acordo com os procedimentos preconizados na norma NBR 9833[90] com a finalidade de avaliar o consumo de cimento/ m³ e a capacidade de adensamento do concreto em função do agregado utilizado na moldagem.

---

88 Foi escolhida em função do tamanho físico da câmara salina, uma vez que seu tamanho limitaria o número de corpos de prova que poderia ser colocado no interior da câmara.

89 NBR 11686 Concreto fresco - Determinação do teor de ar aprisionado pelo método pressométrico *Método de ensaio* 1990.

- *Relação a/c:*

Para os traços plásticos, foi determinada experimentalmente de modo a se obter a consistência da mistura 70 ± 10 mm

Para o traço fluido, foi utilizada a relação a/c do traço pobre 1: 6

Para o traço seco, foi utilizada a relação a/c do traço rico 1: 3

- *Consumo de cimento/m^3:*

Determinado por meio de cálculos utilizando-se a expressão indicada a seguir:

$$C = \frac{g}{1 + m + a/c}$$ Equação 3-1

Onde:

γ = massa especifica do concreto fresco (kg/m³)

m =Traço do concreto

a/c = relação água cimento

- *Teor de umidade dos agregados:*

Os agregados para confecção do concreto foram secos ao ar, ou saturados, superfície seca.

3.1.3 Variáveis dependentes

- *Resistência à compressão:*

Foi medida a resistência à compressão aos 28, 91 e 182 dias, adotando-se a metodologia preconizada pela NBR 5739[91]. Desta forma se conhecerá a

---

90 NBR 9833 Concreto fresco - determinação da massa específica e do teor de ar aprisionado pelo método gravimétrico * Método de ensaio* 1987.

[91] NBR 5739 Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto *Método de ensaio* 1994.

influência que teores crescentes de diferentes agregados reciclados exercem sobre esta propriedade mecânica.

- *Módulo de elasticidade:*

Determinado aos 28, 91 e 182 dias, segundo os procedimentos preconizados na NBR 8522[92] com carregamento tipo I para determinação do módulo tangente inicial a origem.

- *Carbonatação:*

Não tendo sido encontrado um procedimento normalizado pela ABNT para realização deste ensaio, para assegurar repetibilidade do mesmo, procurou-se fixar uma série de condições laboratoriais relacionadas a seguir: dimensões do corpo de prova, cubos com 10 cm de aresta, tempo de permanência na câmara 14 e 28 dias, teor de CO_2 12%, temperatura da câmara 29 ± 3 °C. Os corpos foram fatiados e determinou-se a profundidade de carbonatação com aplicação de uma solução de fenolftaleina. Anotando-se os valores médios nas quatro faces de cada corpo de prova, calculando-se assim a média das quatro leituras.

- *Teor de cloretos*

Como no caso da carbonatação, não foram encontradas normas nacionais a respeito do assunto, adotou-se os procedimentos preconizados na norma ASTM-C- 1152[93] para coleta e preparo das amostras. A coleta das amostras foi realizada nas profundidades de 1, 2 e 3 cm, com o auxílio de uma furadeira de impacto, a cada nova profundidade foi utilizada um broca de diâmetro inferior ao da broca utilizada anteriormente, para evitar contaminação entre camadas. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos para serem encaminhadas a um laboratório químico que realizou as análises

---

[92] NBR 8522 Determinação do módulo de deformação estática e diagrama - Tensão deformação *Método de ensaio* 1984.

quantitativas que permitiu determinar o teor de cloretos nas profundidades coletadas. Neste ensaio visando padronizar as condições foram adotados cubos de aresta = 10 cm os quais foram levados à câmara salina após 60 dias. Permanecendo sob ação de névoa obtida através de uma câmara de Salt Spray por meio de uma solução de cloreto de sódio com concentração de 5%, durante um período de 75 dias corridos.

Após este período foram retirados para coleta de amostras da forma descrita anteriormente.

- *Resistividade:*

Para determinação desta propriedade existe uma norma brasileira a NBR 09204[94], que não foi utilizada, pois o laboratório do CPqDCC dispunha de um aparelho Wenner de 4 pinos o qual foi disponibilizado e neste caso, a norma americana ASTM-G57[95] adaptada, foi considerada mais adequada. Para cumprir o preconizado nesta norma, os corpos de prova foram submersos durante 72 horas antes das leituras.

- *Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real:*

Estes ensaios foram realizados de acordo com o preconizado pela norma brasileira NBR 9778[96] sem fervura, ou seja, após terem completado 182 dias de idade foram colocados em uma estufa na temperatura de 105 ± 5 º C por 72 horas, confirmada a constância de massa, posteriormente, foram inseridos numa câmara seca por 24 horas, na seqüência, foram imersos para posterior pesagem, em balança hidrostática.

---

[93] AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS- ASTM 1152 Standard test method for acid chloride in mortar concrete 1990

[94] NBR 09204 Concreto endurecido - determinação da Resistividade Elétrica Volumétrica *Método de Ensaio* 1985

[95] AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS- ASTM G57 Standard Method for Field Measurement. Using the Werner Four -Electrode Method.

[96] NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa especifica 1987

3.2 Metodologia adotada na realização do experimento

Neste item descrevem-se as principais etapas adotadas na realização do experimento desde os contatos com iniciativa privada, com a Poli Minas com a Poli Construção Civil e com o IPT.

3.2.1 Serviços preliminares

Elaboração do projeto de pesquisa e busca de apoio junto à iniciativa privada para doações de materiais.

3.2.2 Preparação de agregados reciclados

- *De concreto:*

Optou-se por utilizar um concreto perfeitamente caracterizado para posteriormente britá-lo, pois desta forma, minimizou-se a influência da variável: qualidade do material reciclado. Embora, na prática tal medida seja complexa para ser realizada e controlada, em laboratório não foi tarefa difícil e possibilitou a análise e a interpretação dos dados obtidos.

Preparação do concreto a ser reciclado, foram moldados 320 corpos de prova de 10 x 20 cm. A moldagem ocorreu em quatro betonadas, moldou-se 80 CPs por vez. Os agregados utilizados para produção do concreto reciclado, foram os mesmos agregados naturais utilizados na preparação do concreto de referência.

As 4 betonadas utilizadas na confecção dos corpos de prova foram preparadas com as seguintes características:

traço 1:6.0, teor de argamassa = 56%, a/c $\Rightarrow$ 0,66

Os 320 corpos de prova, após a moldagem foram curados em câmara úmida por 14 dias e mais 14 dias no ambiente de laboratório, para posteriormente serem encaminhados para o britador. Este concreto aos 28 dias apresentou f_c = 25 MPa.

- *De alvenaria:*

Paralelamente painéis de alvenaria revestida com argamassa industrializada foram demolidos e conduzidas à PMI/USP para serem britados. Os materiais utilizados na confecção dos painéis de alvenaria são descritos e caracterizados a seguir.

As características dos painéis de alvenaria assim como a dos elementos utilizados na produção de agregados são descritas a seguir:

Painéis de alvenaria: composta por blocos cerâmicos revestidos com massa única em uma face.

Elementos de vedação: blocos cerâmicos sem função estrutural fabricados com argila da região de Itú (SP) preparada com as seguintes proporções:

Taguá (argila sem beneficiamento com alto teor de óxido de ferro)	± 80%
Varvito (argila terciária muito compacta, com altos teores de sílica e feldspato)	± 15%
Chamota (reaproveitamento de blocos quebrados, material já queimado)	± 5%

Argamassa de assentamento e revestimento: argamassa industrializada, fabricada pela Serrana, composta por calcário calcítico e dolomítico, cimento Portland mais aditivos.

- *Britador utilizado na operação de britagem:*

Na Figura 3-1, são mostrados detalhes do britador de mandíbula onde foram britados os resíduos minerais para produção dos agregados reciclados usados neste experimento.

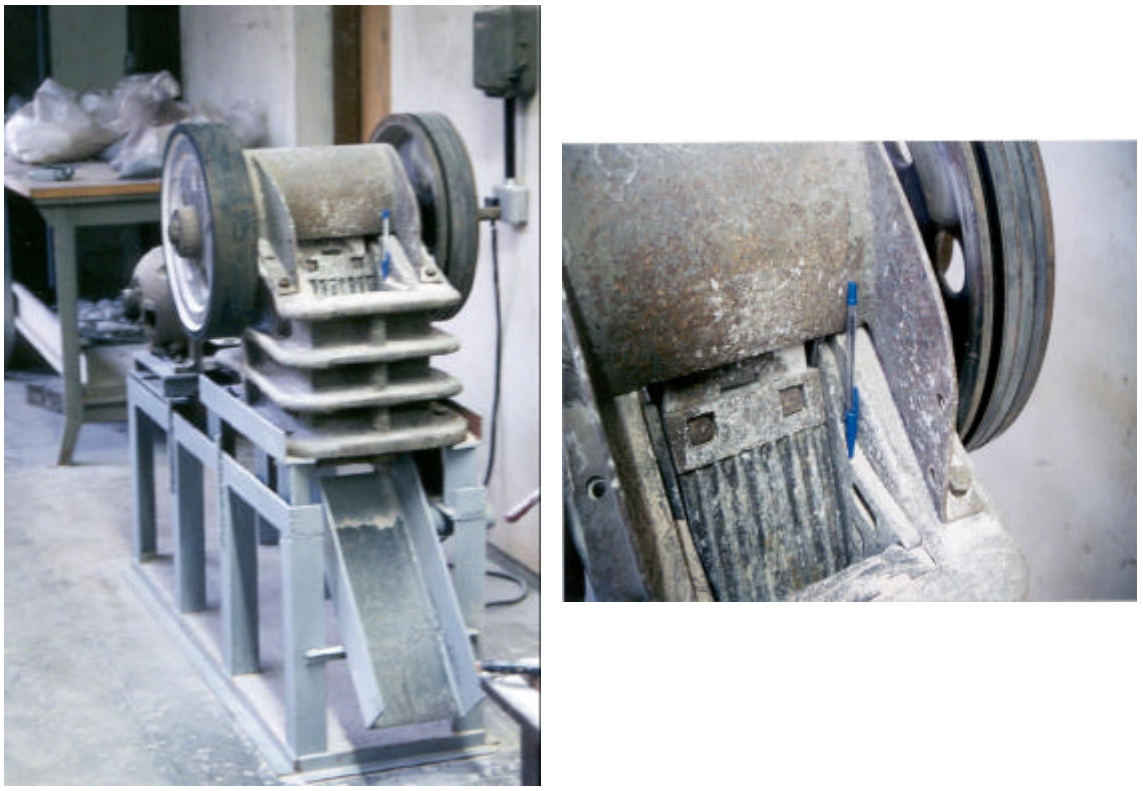


Figura 3-1 Britador de mandíbula utilizado na preparação dos agregados reciclados.

Figura 3-2 Aspectos dos agregados reciclados de concreto e de alvenaria

- *Peneiramento e seleção dos agregados reciclados:*

Após a britagem, efetuou-se o peneiramento do material obtido com a finalidade de classificá-lo de forma a atender as prescrições granulométricas especificadas na NBR 7217[97], para isto utilizou-se a série de peneiras # 25,0 mm # 19,0 mm, # 9,5 mm, # 4,8 mm; neste experimento, foi considerada agregado miúdo a fração inferior a 4,8mm, pedra 1 a fração entre 9,5 e 19 mm e pedra 2 a fração entre 19,0 e 25,0 mm assim prepararam-se os agregados reciclados.

O peneiramento dos agregados reciclados foi realizado no laboratório do CPqDCC[98], Após a conclusão deste processo, os agregados devidamente selecionados foram acondicionadas em caixas plásticas como mostrado na Figura 3-2, e posteriormente transportados até o laboratório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas onde efetivamente ocorreu a moldagem.

Ainda na Figura 3-2, pode ser visualizado o aspecto dos agregados reciclados após o peneiramento e a respectiva seleção.

3.2.3 Caracterização dos agregados naturais e reciclados

Após a seleção e preparação dos agregados naturais e reciclados a serem utilizados, os mesmos foram caracterizados para elaboração do trabalho experimental que serviu de embasamento para o desenvolvimento desta tese .

- *Reatividade álcali-agregado dos agregados reciclados.*

Para constatar a potencialidade do desenvolvimento da reação álcali agregado dos agregados utilizados, foram realizados ensaios pelo método ASTM C 1260/94[99], baseado no teste acelerado do NBRI, África do Sul.

O método é geralmente utilizado para avaliar a reatividade de agregados frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, através do monitoramento das expansões dimensionais de barras de argamassa. A expansão média aos

---

[97] NBR 7217 Agregado-Determinação da composição granulométrica *Método de Ensaio* 1987

[98] CPqDCC laboratório do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Construção Civil do Departamento de Construção Civil da E.P.U.S.P

[99] ASTM C 1260/94 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates

14 dias de cura em solução alcalina é tomada como valor de referência para estimativa da reatividade potencial do agregado com os álcalis. Expansões superiores a 0,20 % aos 14 dias indicam que o agregado é reativo, necessitando de ensaios complementares para decisão quanto ao seu uso expansões abaixo de 0,10% indicam que o agregado é inócuo.

No ensaio realizado para determinação da reatividade álcali-agregado dos agregados reciclados, foram realizadas leituras praticamente diárias, todavia na Tabela 3-1, estão indicados apenas os valores aos 14 e 28 dias, porém, na Figura 3-1 é possível visualizar o comportamento da variação dimensional das barras através do resultados obtidos.

Tabela 3-1 Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina

Idade de Cura (dias)	Variações dimensionais	
	Alvenaria reciclada	Concreto Reciclado
14	0,034	0,053
28	0,052	0,098

Como se percebe, nenhum dos agregados reciclados ensaiados, apresentou comportamento potencialmente reativo, uma vez que os valores médios da expansão das barras das amostras de concreto e de alvenaria reciclados aos 14 dias foram de 0,34% e 0,53% respectivamente, indicando que os materiais são inócuos com relação à reatividade álcali-agregado, segundo os critérios estabelecidos pela ASTM C 1260/94.

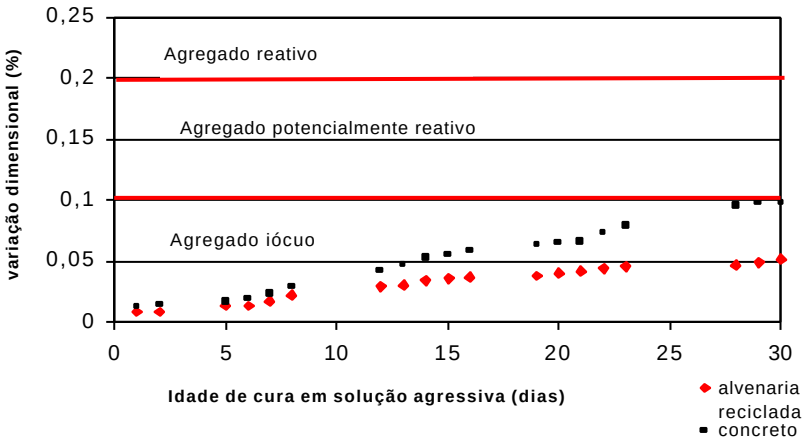


Figura 3-1 Evolução das expansões com o tempo de cura em solução alcalina

Uma vez que os ensaios realizados, demonstraram que os agregados utilizados neste trabalho são inócuos, não será dedicado um espaço maior para tratar desta propriedade, todavia fica a recomendação de sempre analisar os agregados reciclados sobre este ponto de vista, pois já foram mencionados os problemas que agregados potencialmente reativos poderão vir a causar quando utilizados na produção de concretos.

♦ *Características físicas dos agregados utilizados*

Na Tabela 3-2 estão indicadas as características individuais dos agregados naturais e reciclados usados no experimento, assim como as normas utilizadas para determinação destas características.

Tabela 3-1 Agregados utilizados na preparação das 13 famílias de concreto

Caracteristicas dos materias	Unid	Valores obtidos para os agregados grudos e miudos									Metodologia de Ensaio
		Agregados Naturais			Agregados Alvenaria			Agregados Concreto			
		Areia	B1	B2	Areia	B1	B2	Areia	B1	B2	
Modulo de finura	*	2,60	6,40	7,70	3,13	6,64	7,65	3,54	7,68	6,94	NBR 7217
Massa específica aparente	Kg/ dm^3	1,375	1,430	1,410	1,317	0,984	0,987	1,340	1,208	1,285	NBR 7251
Absorção	%	*	0,8	0,8	7,9	13,0	12,4	10,35	5,6	3,7	NBR 9937
Pulverulentos	%	1,85	0,54	0,55	2,4	4,1	2,3	0,6	0,3	0,2	NBR 7219
Impureza orgânica	ppm	< 300	*	*	*	*	*	*	*	*	NBR7220

3.2.4 Moldagem dos corpos de prova para realização do experimento

Sendo o objetivo básico do projeto analisar a influência que agregados reciclados teriam na durabilidade de concretos produzidos com eles, moldaram-se cerca de 1500[100] corpos de prova, no período de 22-07-99 a 26-11-99 com diferentes dimensões e formas para permitir a realização dos ensaios específicos necessários à determinação de cada uma das propriedades pesquisadas.

---

[100] (14 famílias de concreto, com 5 traços/família, perfazendo um total de 70 traços e 22 corpos de prova por traço = 1554 copos de prova)

Moldaram-se as 13 famílias de concreto e mais 5 traços com agregados totalmente saturados superfície seca, como previsto originalmente no projeto, com teores crescentes de agregados reciclados graúdos e miúdos segundo as proporções especificados na

Tabela 3-1. O valor de 20 % foi adotado por se tratar do limite preconizado pela norma holandesa (CUR - 1984), que permite sua utilização em massa de agregado reciclado sem qualquer restrições, pois de acordo com esta norma os resultados apresentados são praticamente os mesmos.

Os traços indicados na Tabela 3-1 foram utilizados na preparação de cada família de concreto a ser ensaiada e os corpos de prova foram moldados de acordo com os procedimentos preconizados na NBR 05738.[101]

Para determinação da potencialidade da reação álcali-agregado dos agregados, foram preparadas barras de argamassa de acordo com a ASTM C227, utilizando-se o traço 1:2,25 (cimento: agregado)com a/c =0,47.

A composição dos materiais utilizados na preparação das barras de argamassa está indicada na Tabela 3-5.

Tabela 3-1 Traço, consistência e relação a/c dos concretos a serem ensaiados.

Traço	1:3	1:4,5	1:6	1:4,5	1:4,5
Slump	70 ± 10 mm	70 ± 10 mm	70 ± 10 mm	< 20 mm	> 230 mm
a/c	A determinar	A determinar	A determinar	do traço 1:3 (seco)	do traço 1:6 (úmido)

Tabela 3-2 Composição dos materiais utilizados no preparo das barras do ensaio de reatividade álcali-agregado.

Abertura nominal das peneiras (mm)		Massa (g)
Agregado	4,8 - 2,4	99,0
	2,4 - 1,2	247,5
	1,2 – 0,6	247,5
	0,6 - 0,3	247,5
	0,3 – 0,15	148,5
Cimento		440,0
Água destilada (a/c= 0,47)		206,8

[101] NBR 05738 Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos 1994 *Procedimentos*

CAPÍTULO 4.
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como mencionado anteriormente, com os resultados pontuais obtidos, foram elaborados dos diagramas de dosagem e a partir destes diagramas, analisou-se a tendência apresentada pelas propriedades pesquisadas para cada uma das 13 famílias de concreto ensaiadas.

4.1 Construção dos diagramas de dosagem dos concretos de referência e concretos com agregados reciclados

Para análise dos resultados, será utilizado um estudo comparativo entre o concreto de referência, e as famílias de concreto produzidas com agregados reciclados, ou seja, serão construídos os diagramas de dosagem para todas as propriedades monitoradas, e tais diagramas serão comparados entre si.

A partir da resistência à compressão, determinou-se a relação a/c para conseguir um concreto com resistência desejada, no caso desta análise, foram escolhidos os concretos de 20, 30 e 40 MPa por serem os concretos normalmente utilizados na maioria das obras executada no território nacional.

O fato de adotar esta metodologia permitirá, sem moldar qualquer outro concreto, prever o desenvolvimento da propriedade que está sendo analisada e desta forma, atender às especificações para produção de um concreto durável inserido em determinado meio ambiente.

Determinado o valor de a/c para obter o concreto desejado, utilizou-se esta mesma relação para determinar a propriedade analisada, isto significa que foi possível todas as propriedades pesquisadas para concretos com resistência 20, 30 e 40 MPa.

A seguir apresenta-se o roteiro de aplicação para metodologia posposta visando a interpretação dos resultados obtidos.

1º passo Construção dos diagramas de dosagem das propriedades selecionadas para o desenvolvimento deste estudo que foram:

Resistência à compressão, profundidade de carbonatação, difusão da carbonatação, absorção de água por imersão, índice de vazios, resistividade, penetração de cloretos, módulo de elasticidade tangente inicial à origem, estes diagramas são apresentados no Anexo II.

A partir do diagrama de dosagem da resistência a compressão x a/c (lei de Abrams) determinou-se a equação que permiti calcular os valores de a/c para concretos de 20, 30 e 40 MPa.

2º passo Com as relações a/c anteriormente determinadas, calculou-se as propriedades selecionadas para o estudo da durabilidade, utilizando-se as equações dos modelos matemáticos representados pelos demais diagramas apresentados no Anexo II.

Ou seja, com a utilização desta metodologia, foi possível prever para concretos com resistência especificada de 20, 30, e 40 MPa, a profundidade de carbonatação eCO_2 (mm), a constante de difusão do CO_2 k (mm/ano $^{1/2}$), a absorção e índice de vazios (%), a resistividade ? (k?.cm), a concentração de cloretos (% kg/kg de concreto) nas camadas de 0-1, 1-2 e 2-3 cm de espessura e o módulo de elasticidade tangente inicial à origem E_{ci} (GPa).

Evidentemente que as condições do experimento não serão exatamente as mesmas encontradas no meio ambiente no qual estará inserida a estrutura a ser executada, todavia os resultados obtidos deverão ser interpretados como uma indicação de qual entre os concretos apresentará maior ou menor facilidade ao desenvolvimento de manifestações patológicas.

Na seqüência, apresenta-se um exemplo de aplicação da metodologia par os concretos REFE., RCG 50-50% e RAM 50-50%.

O **1º passo** construção dos diagramas de dosagem é apresentado após as tabelas Tabela 4-1 e Tabela 4-2, nas quais estão os valores de todas as propriedades calculadas através dos procedimentos indicados, para concretos de 20, 30 e 40 MPa.

Tabela 4-1 Comparativo entre as propriedades utilizadas no estudo de durabilidade para concretos 20,30 e 40 MPa produzidos com diferentes teores de materiais reciclados.

	a/c para			Consumo (Kg/m³)			eCO_2 (mm)			$KeCO_2$ (mm/ $t^{1/2}$)		
família	**20 MPa**	**30 MPa**	**40 MPa**	**20 MPa**	**30 MPa**	**40 MPa**	**20 MPa**	**30 MPa**	**40 MPa**	**20 MPa**	**30 MPa**	**40 MPa**
REFER.	**0,91**	**0,68**	**0,52**	**179**	**291**	**397**	**9,6**	**6,0**	**3,5**	**40,5**	**25,8**	**15,4**
20-80 RCG	**0,79**	**0,63**	**0,51**	**269**	**341**	**407**	**5,5**	**3,9**	**2,7**	**27,3**	**18,9**	**13,0**
50-50 RCG	**0,85**	**0,65**	**0,52**	**231**	**329**	**422**	**5,0**	**3,4**	**2,3**	**34,6**	**22,3**	**13,5**
100-0 RCG	**0,93**	**0,71**	**0,56**	**190**	**293**	**392**	**7,7**	**5,2**	**3,4**	**33,8**	**22,7**	**14,8**
20-80 RAG	**0,95**	**0,69**	**0,50**	**200**	**333**	**476**	**7,0**	**4,2**	**2,2**	**33,0**	**20,1**	**10,9**
50-50 RAG	**0,89**	**0,63**	**0,44**	**279**	**417**	**569**	**7,6**	**3,4**	**0,4**	**34,9**	**15,8**	**2,3**
100-0 RAG	**0,90**	**0,58**	**0,35**	**326**	**522**	**852**	**4,3**	**0,2**	**0,0**	**21,0**	**6,5**	**0,1**
20-80 RCM	**0,80**	**0,66**	**0,57**	**239**	**325**	**404**	**6,0**	**4,6**	**3,6**	**26,4**	**19,9**	**15,3**
50-50 RCM	**0,92**	**0,69**	**0,52**	**216**	**330**	**445**	**6,5**	**4,6**	**3,3**	**32,3**	**22,2**	**15,1**
100-0 RCM	**0,87**	**0,68**	**0,54**	**266**	**366**	**461**	**6,7**	**4,9**	**3,6**	**31,0**	**22,2**	**15,9**
20-80 RAM	**0,86**	**0,65**	**0,50**	**220**	**329**	**434**	**6,4**	**4,3**	**2,8**	**31,2**	**21,0**	**13,8**
50-50 RAM	**0,95**	**0,73**	**0,57**	**191**	**300**	**407**	**5,8**	**4,0**	**2,7**	**30,3**	**20,6**	**13,7**
100-0 RAM	**1,03**	**0,76**	**0,56**	**217**	**332**	**455**	**9,0**	**5,8**	**3,5**	**44,8**	**27,8**	**15,7**

Tabela 4-2 Comparativo entre as propriedades utilizadas no estudo de durabilidade para concretos 20,30 e 40 MPa produzidos com diferentes teores de materiais reciclados

	Absorção (%)			Vazios (%)			Resitividade (KW. cm)			Cl^- (% kg/kg concreto) 0 -1cm			Eci (GPa)		
família	20 MPa	30 MPa	40 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa
REFER.	7,3	6,6	6,1	16,0	14,6	13,6	13,3	17,0	20,4	0,50	0,41	0,35	24,2	27,0	29,1
20-80 RCG	6,9	6,3	5,9	14,5	13,5	12,9	16,3	17,9	19,3	0,53	0,47	0,42	23,5	26,6	29,1
50-50 RCG	7,5	7,0	6,7	17,5	17,3	17,2	14,8	16,9	18,6	0,89	0,67	0,51	22,8	25,7	28,0
100-0 RCG	7,3	8,0	8,4	15,3	16,8	17,8	10,1	12,1	13,9	0,44	0,37	0,32	22,5	25,1	27,1
20-80 RAG	7,8	7,6	7,4	14,9	13,5	12,5	15,6	18,0	20,3	0,55	0,45	0,38	21,3	23,6	25,3
50-50 RAG	11,2	9,5	8,4	20,4	19,5	18,9	15,4	15,8	16,1	0,54	0,51	0,48	18,7	21,7	24,2
100-0 RAG	12,0	11,7	11,5	23,1	22,8	22,5	15,0	11,0	6,5	0,56	0,52	0,50	16,0	19,6	22,6
20-80 RCM	7,3	7,2	7,1	15,8	15,7	15,6	14,2	15,0	15,8	0,61	0,48	0,38	22,0	25,4	28,1
50-50 RCM	9,7	9,0	8,5	20,2	19,0	18,1	11,7	10,7	9,8	0,63	0,57	0,53	17,3	21,0	24,1
100-0 RCM	11,4	10,7	10,1	22,9	21,7	20,9	7,2	7,4	7,5	0,59	0,60	0,60	12,6	17,3	21,6
20-80 RAM	7,5	6,9	6,5	15,9	15,1	14,4	19,3	18,3	17,3	0,49	0,43	0,40	21,9	25,0	27,5
50-50 RAM	8,0	7,6	7,3	16,7	16,2	15,8	30,6	26,8	23,3	0,54	0,47	0,41	18,8	22,3	25,2
100-0 RAM	8,2	8,9	9,4	19,0	18,6	18,3	26,6	23,9	21,3	0,61	0,56	0,52	21,0	23,7	25,9

Na seqüência apresenta-se um exemplo da metodologia para concretos moldados com agregados naturais (REFR), RCG 50%-50% e RAM 50%-50%

4.1.1 Exemplo de aplicação da metodologia adotada para o caso de concretos de 30 MPa. Com agregados REF., RCG 50-50%, e RAM 50-50%

1º passo Construção dos diagramas de dosagem a partir dos resultados experimentais obtidos para as propriedades pesquisadas.

Diagramas de dosagem, resistência compressão f_c x a/c (Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinari)

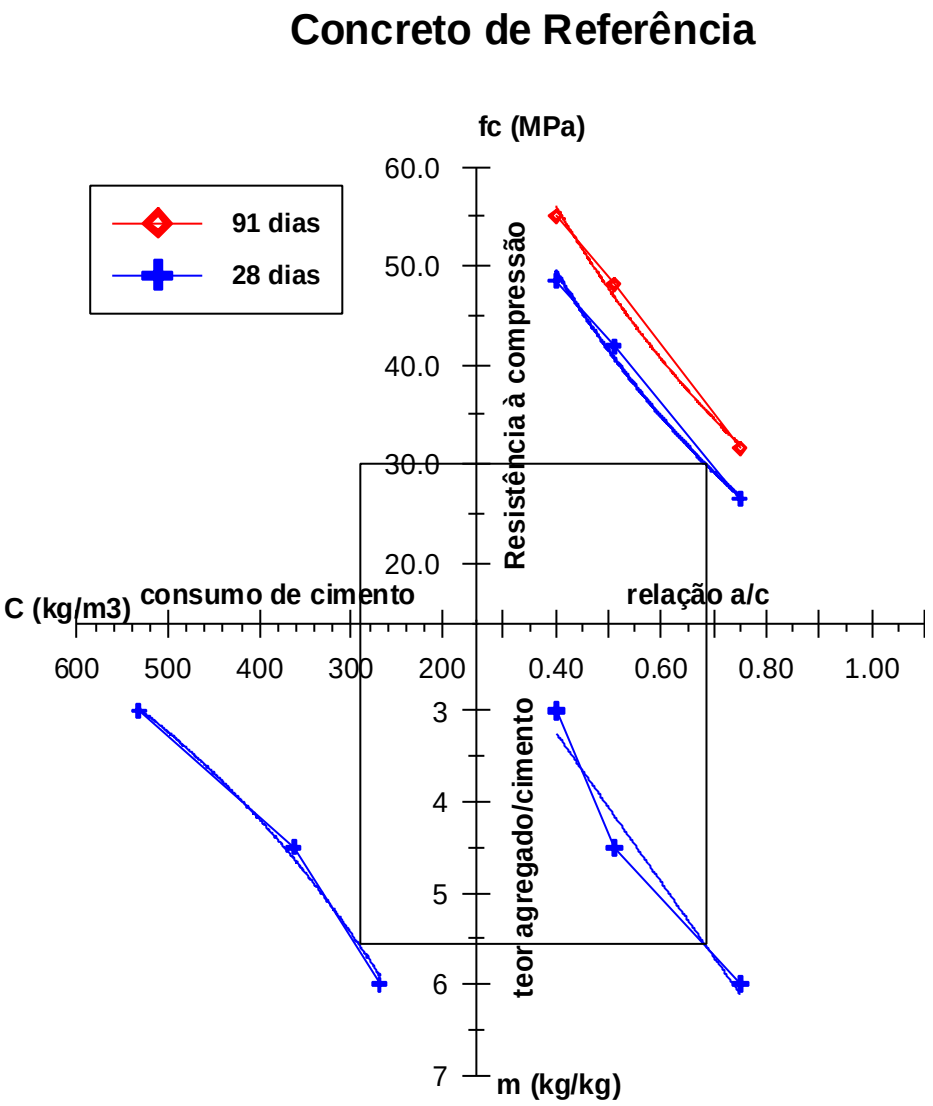


Figura 4-1 Diagrama dosagem Resistência à Compressão Concreto de Referência

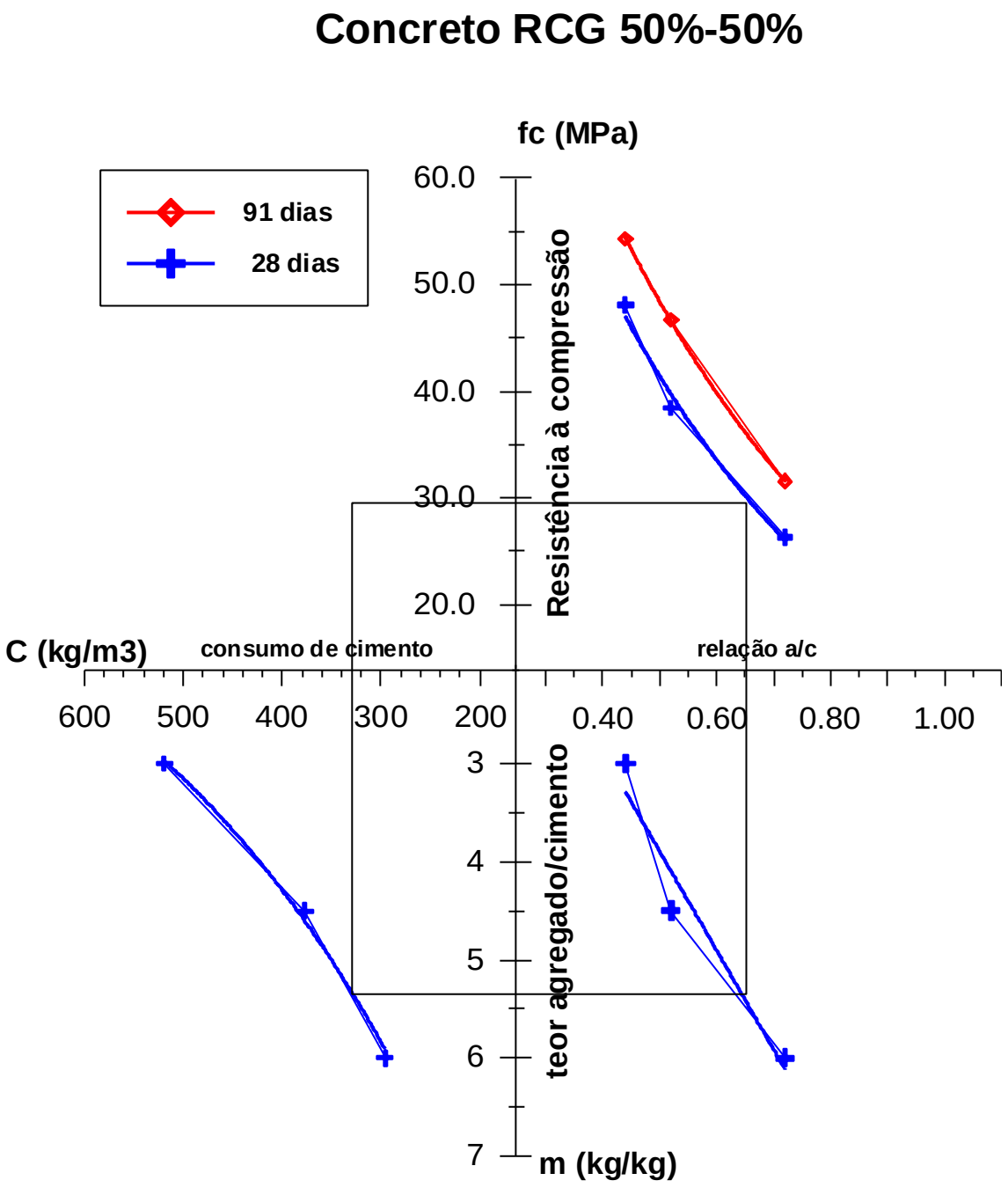


Figura 4-2 Diagrama dosagem Resistência à Compressão Concreto de RCG

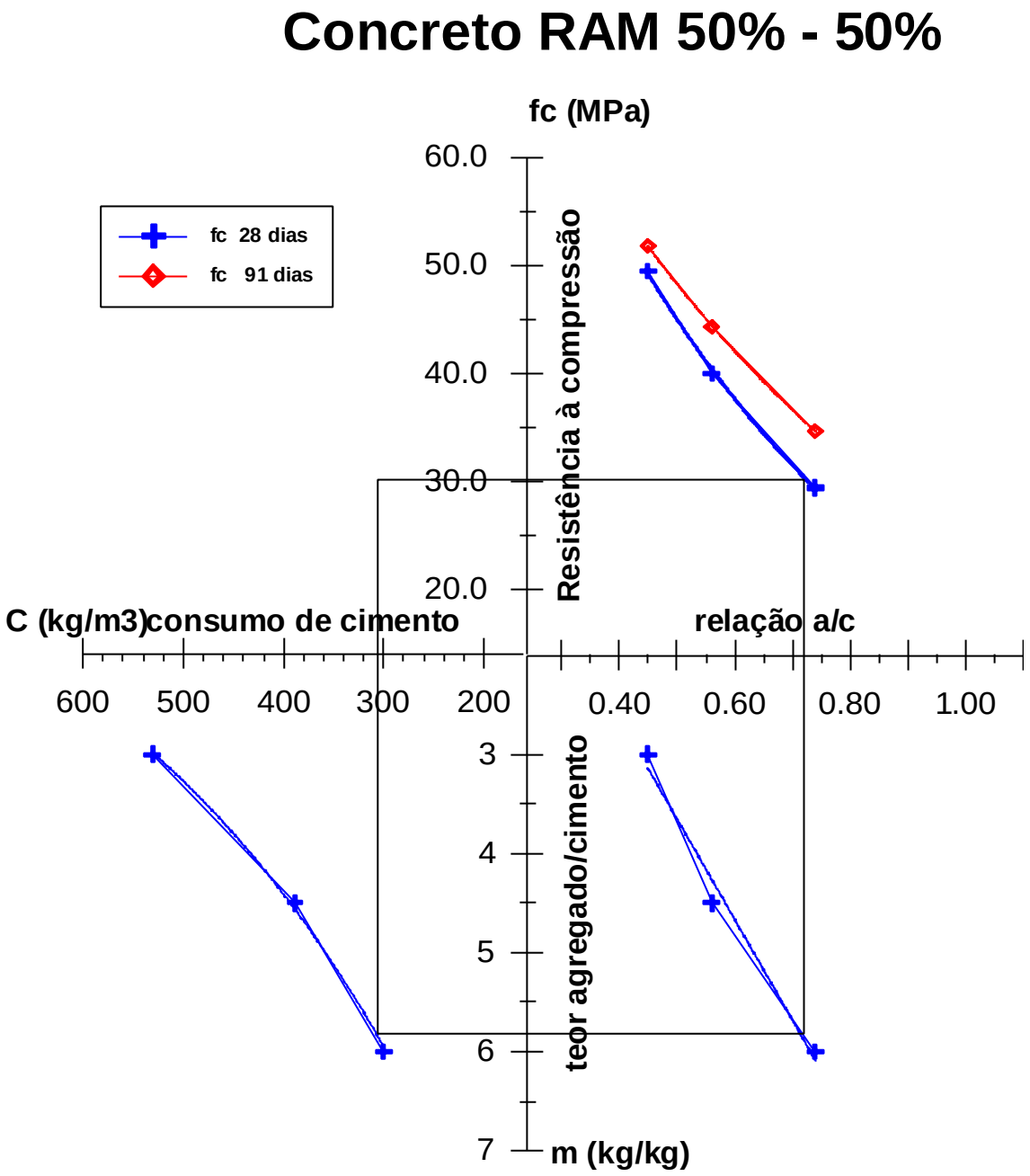


Figura 4-3 Diagrama dosagem Resistência à Compressão Concreto de RAM

Diagramas de dosagem, carbonatação eCO_2 x a/c (Trabalho experimental, Lei de Lyse e Lei de Molinari).

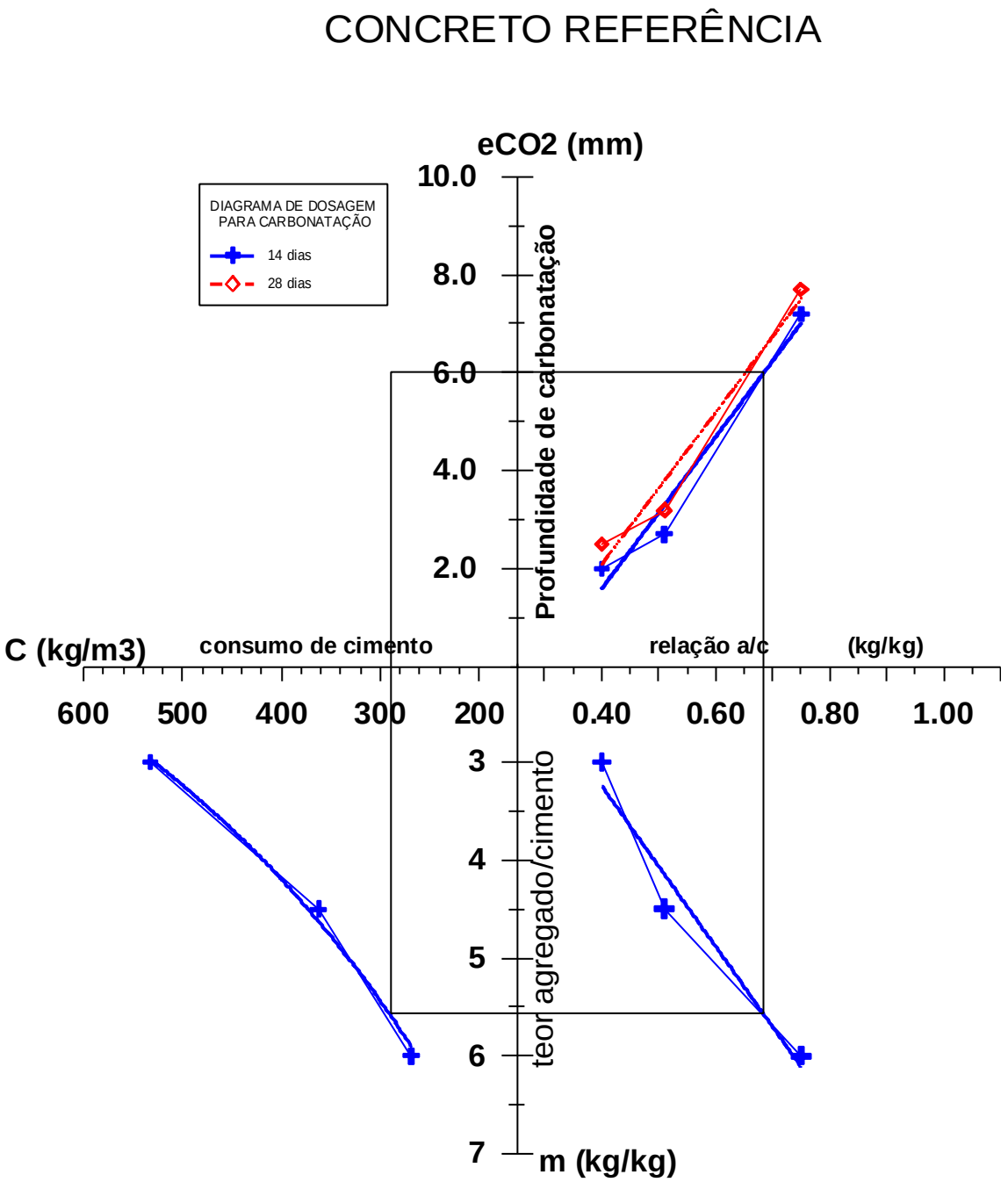


Figura 4-4 Diagrama dosagem para Profundidade de Carbonatação, Concreto de REFE

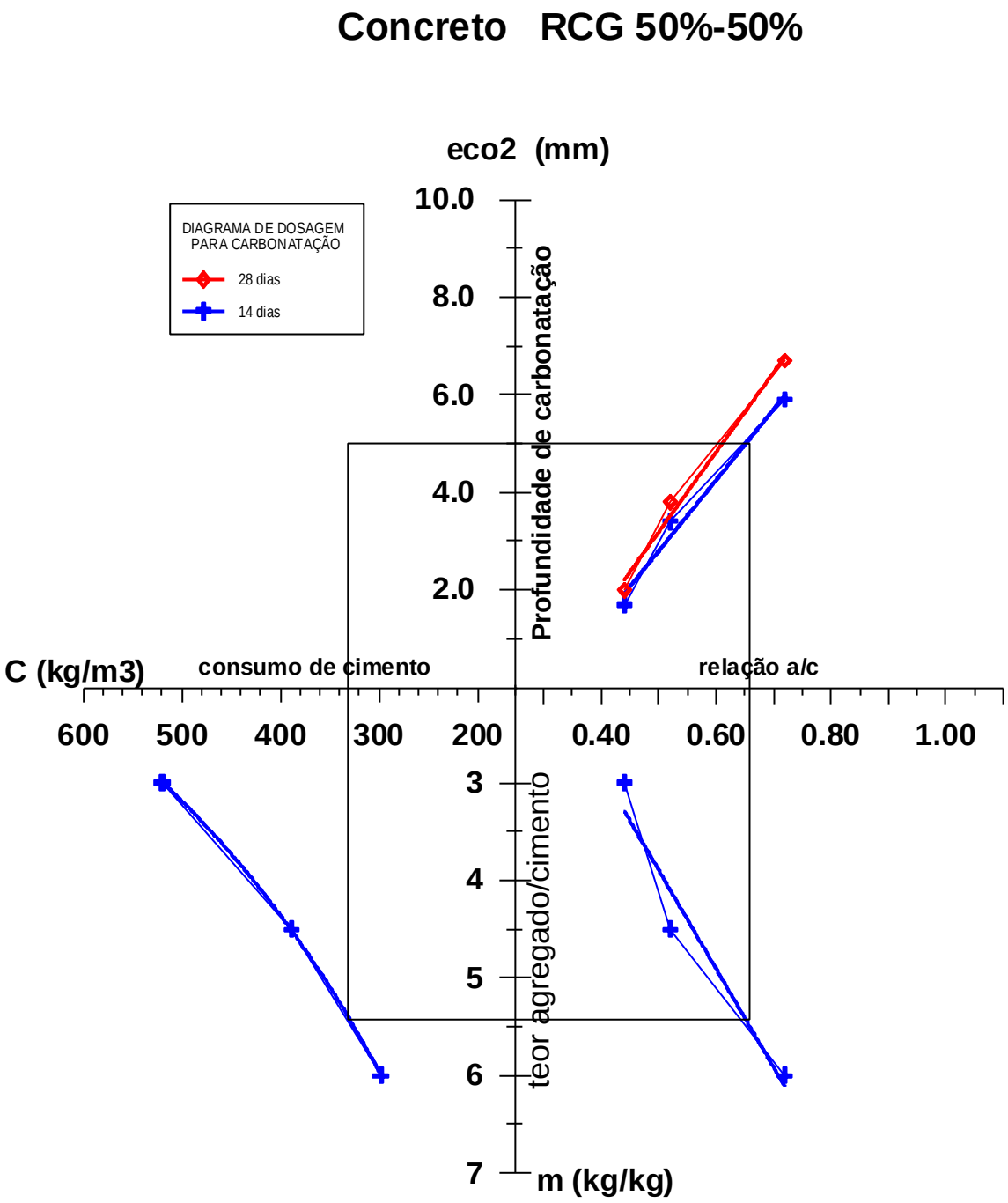


Figura 4-5 Diagrama dosagem para Profundidade de Carbonatação, Concreto de RCG

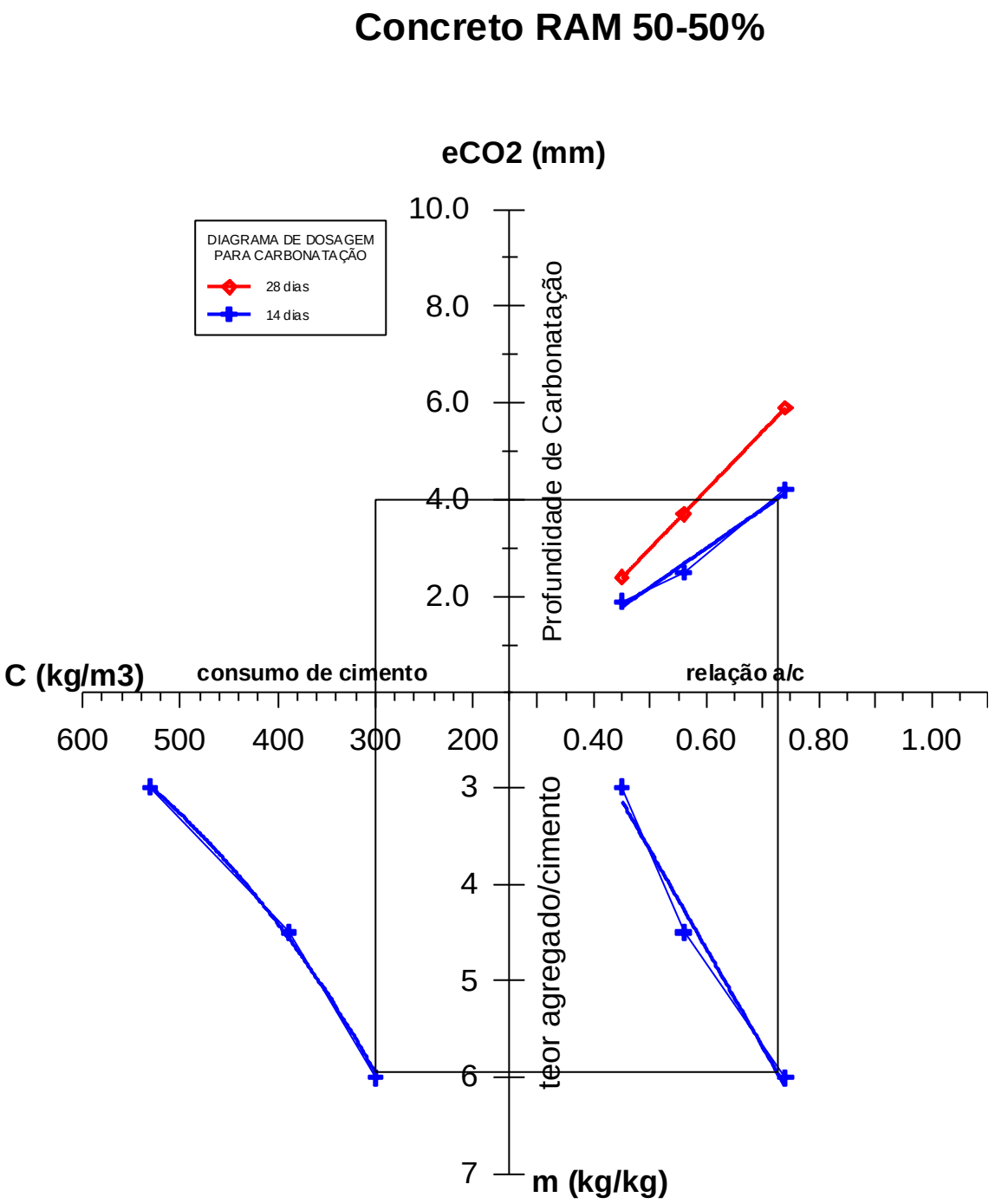


Figura 4-6 Diagrama dosagem profundidade de carbonatação, Concreto de RAM

Diagramas de dosagem, difusão do CO_2 x a/c (Trabalho experimental, Lei de Lyse e Lei de Molinari),

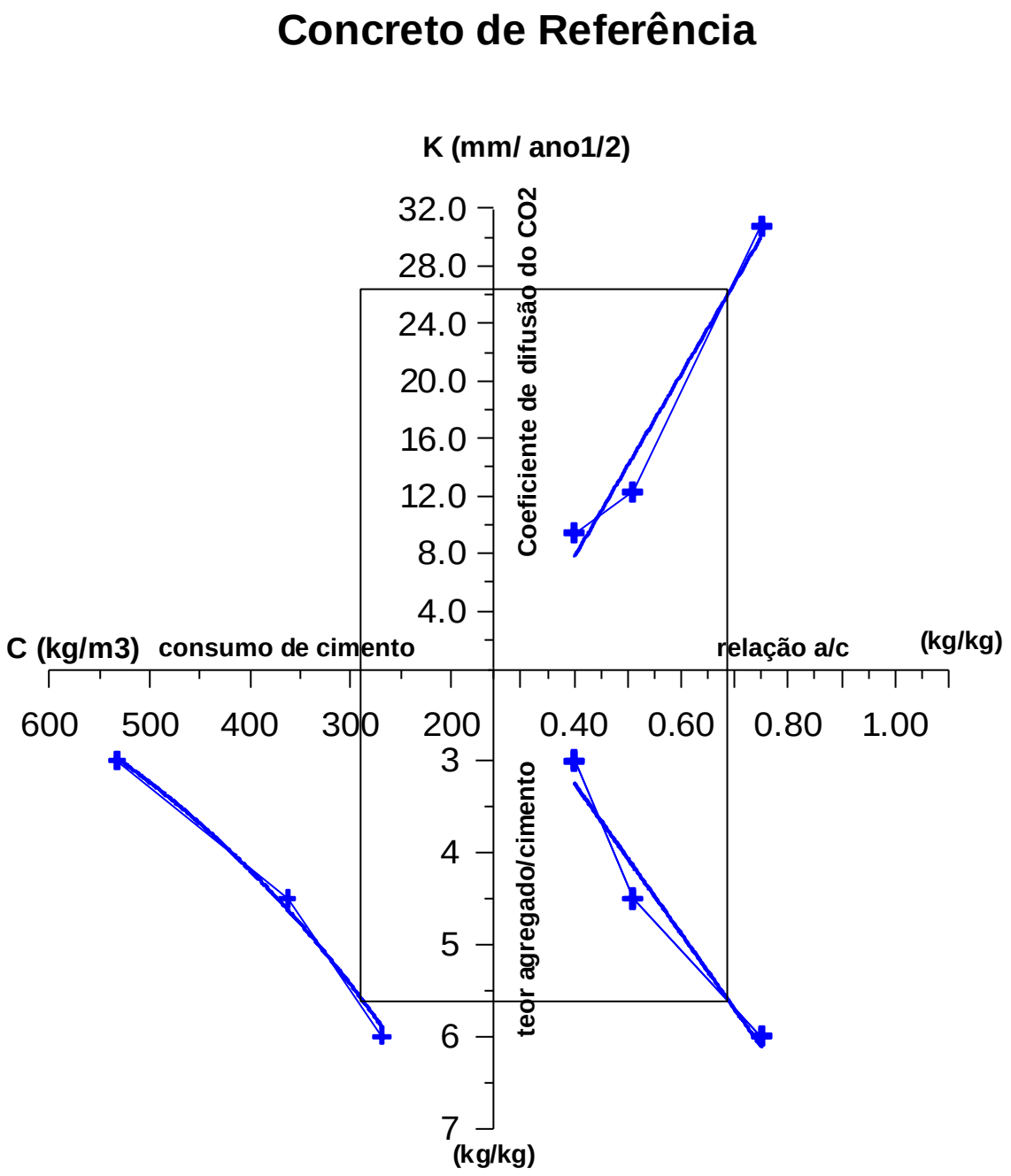


Figura 4-7 Diagrama dosagem para difusão de CO_2, Concreto REFE. 14 e 28 dias.

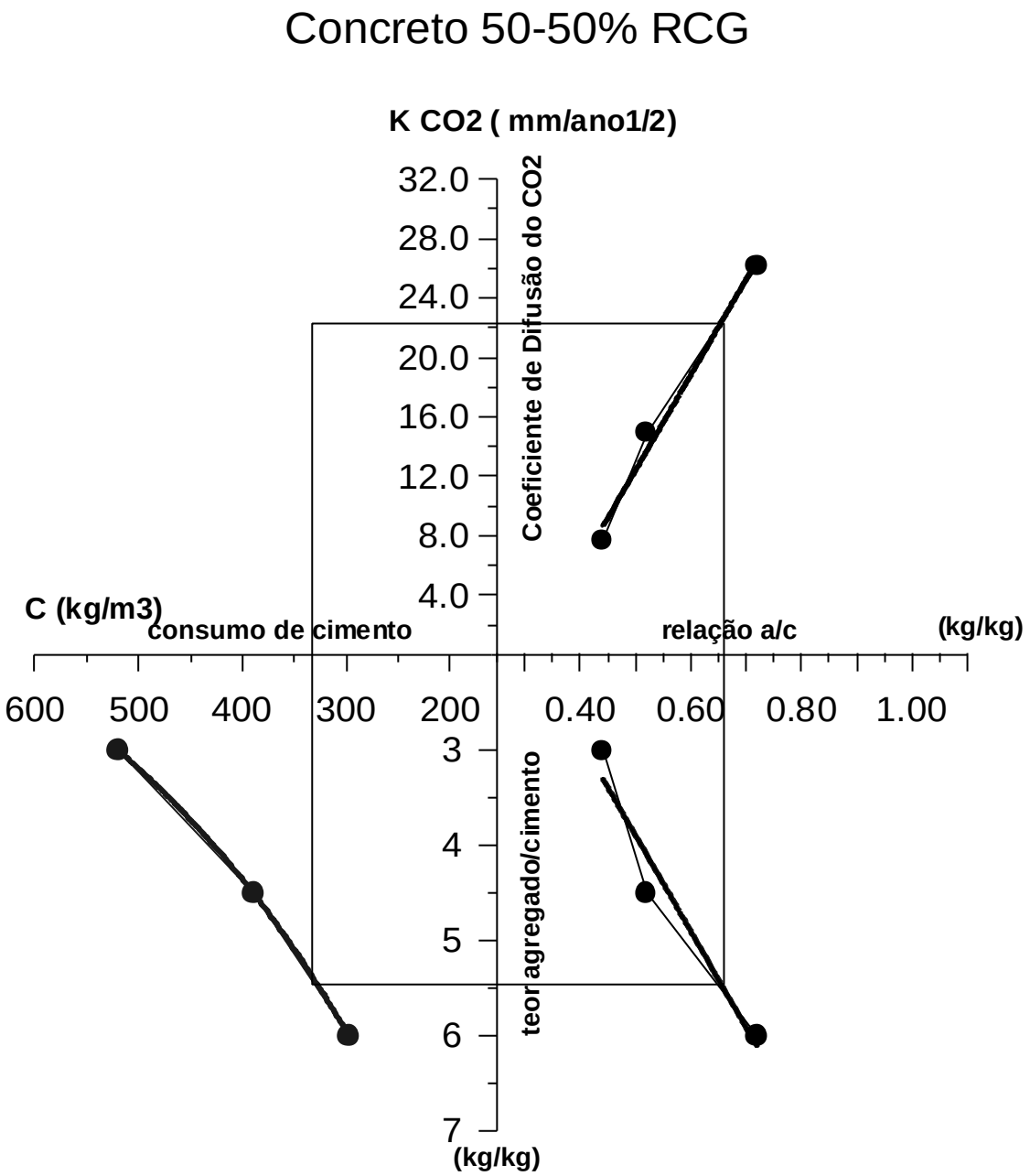


Figura 4-8 Diagrama dosagem para difusão de CO2, Concreto RCG. 14 e 28 dias.

Concreto 50-50% RAM

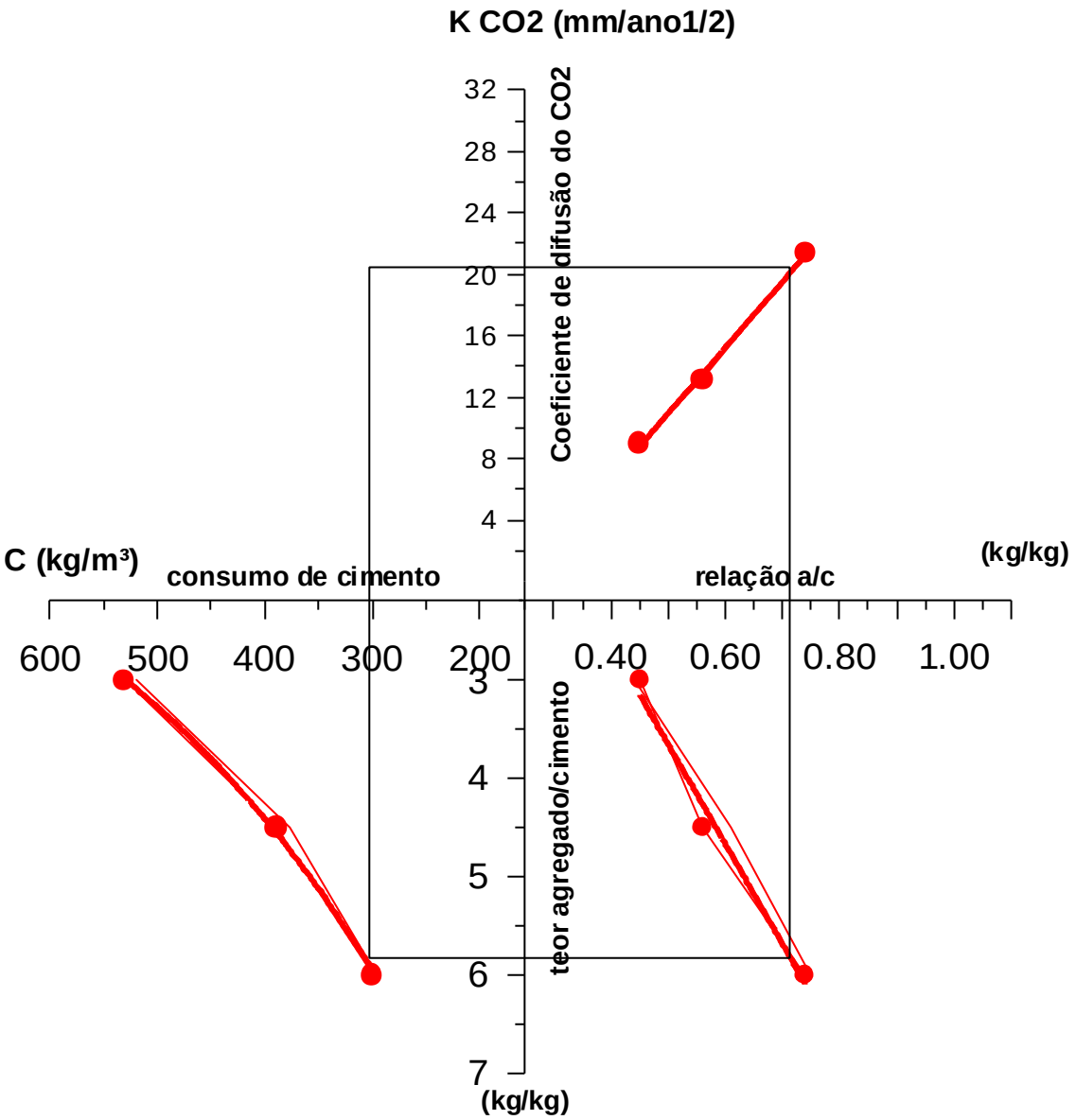


Figura 4-9 Diagrama dosagem para difusão de CO_2, Concreto RAM. 14 e 28 dias.

Diagramas de dosagem, Absorção e Índice de vazios x a/c (Trabalho experimental, Lei de Lyse e Lei de Molinari),

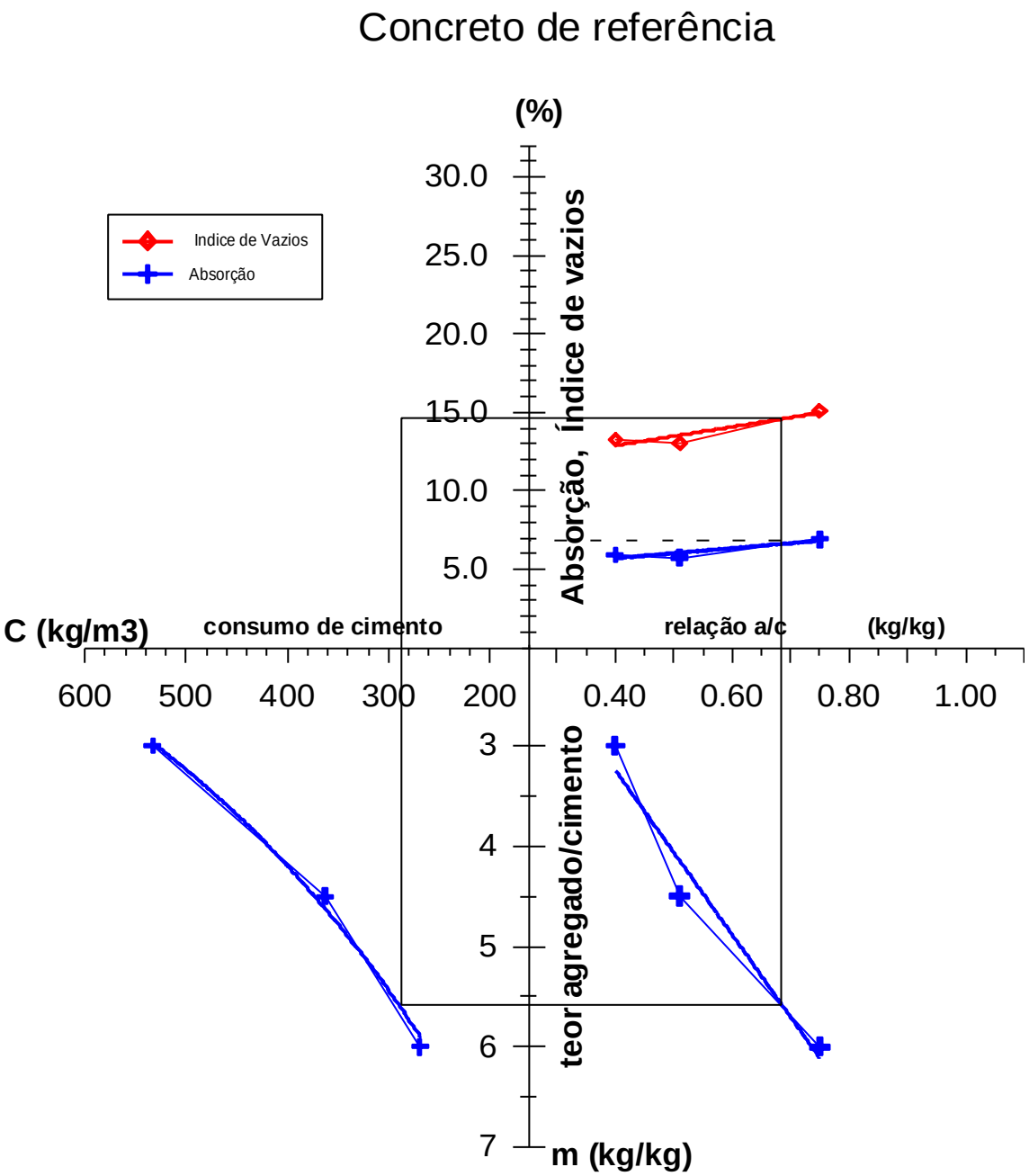


Figura 4-10 Diagrama dosagem Índice de Vazios e Absorção, Concreto REFE.

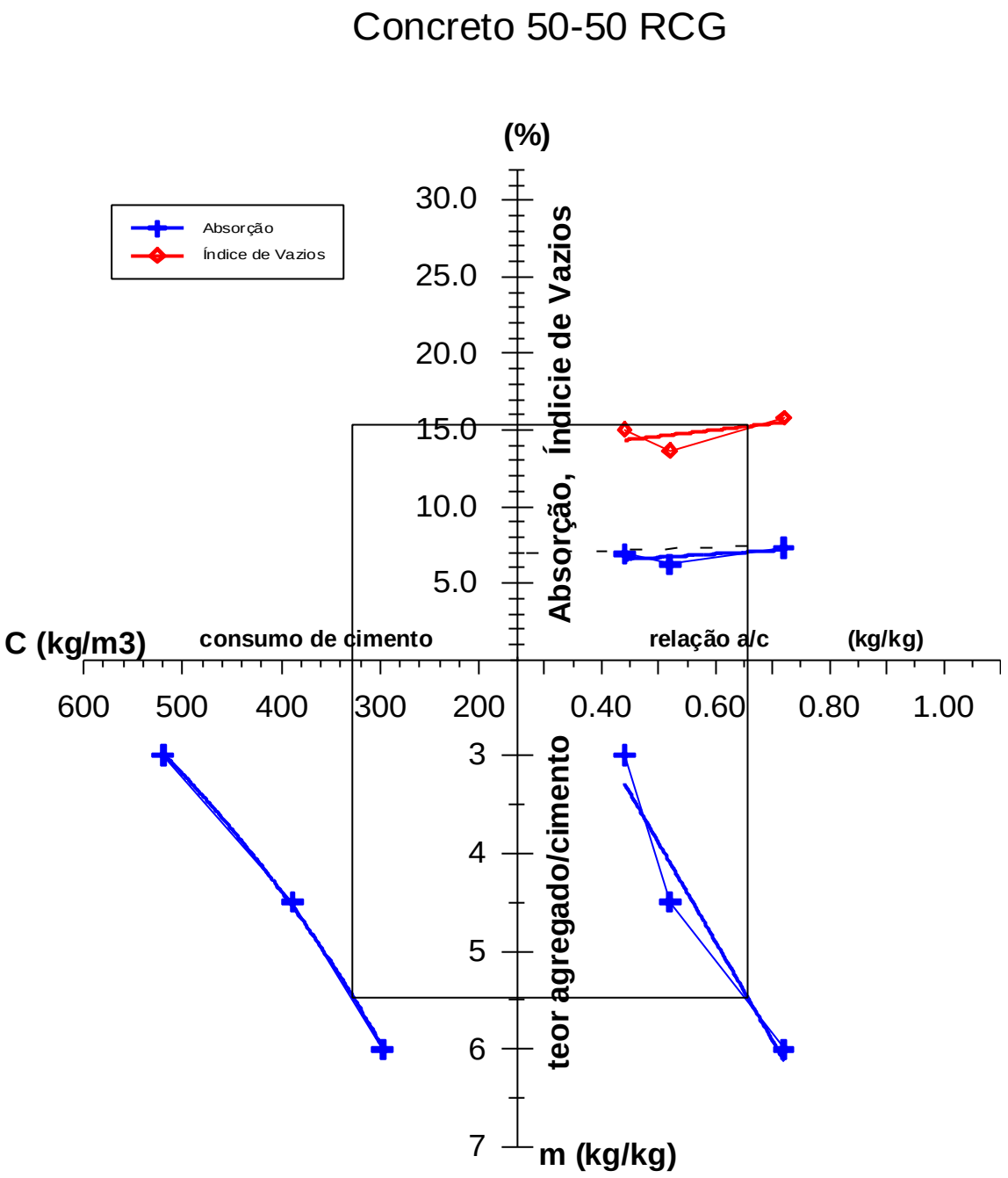


Figura 4-11 Diagrama dosagem Índice de Vazios e Absorção, Concreto RCG.

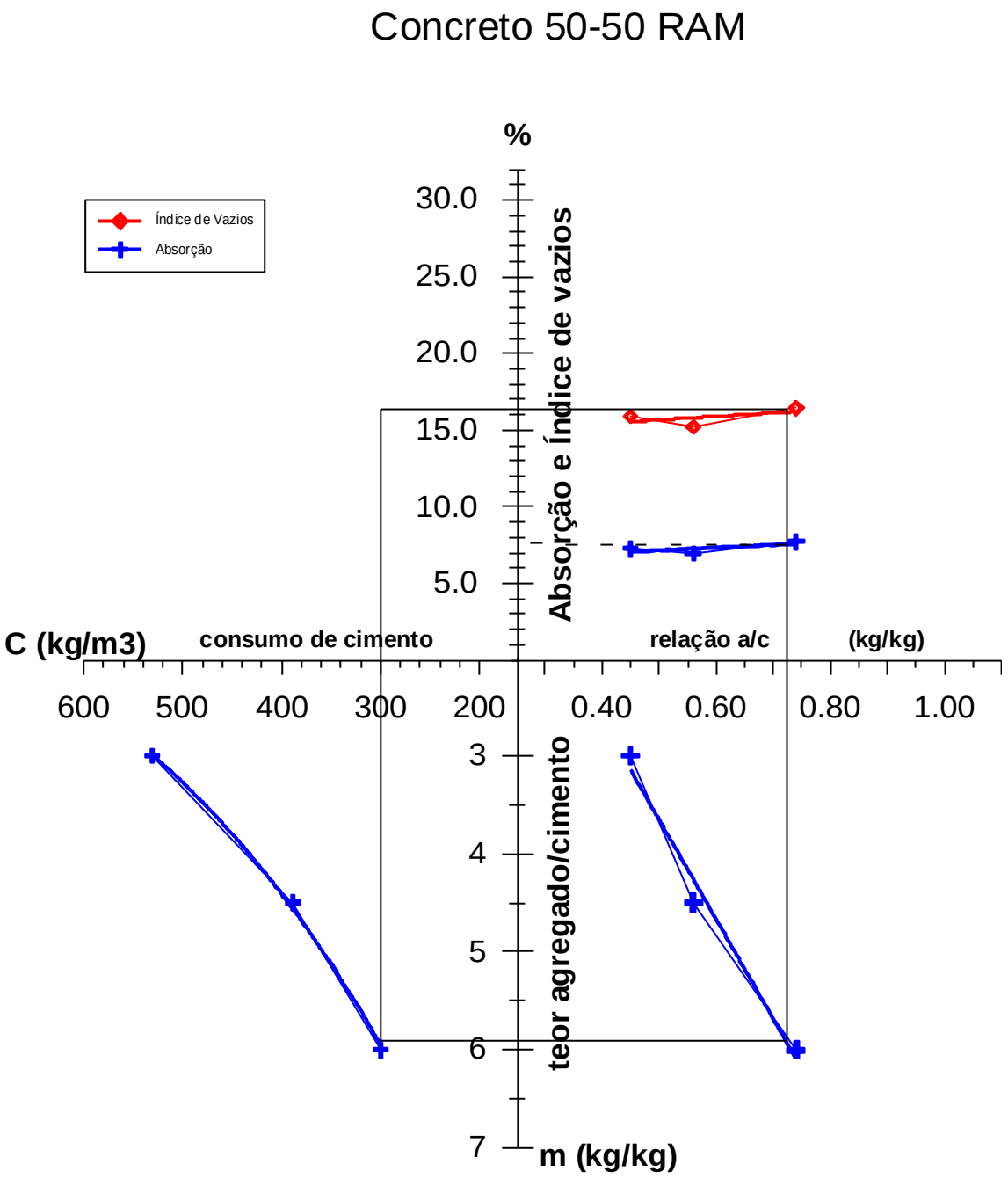


Figura 4-12 Diagrama dosagem Índice de Vazios e Absorção, Concreto RAM.

Diagramas de dosagem, Resistividade x a/c (Trabalho experimental, Lei de Lyse e Lei de Molinari),

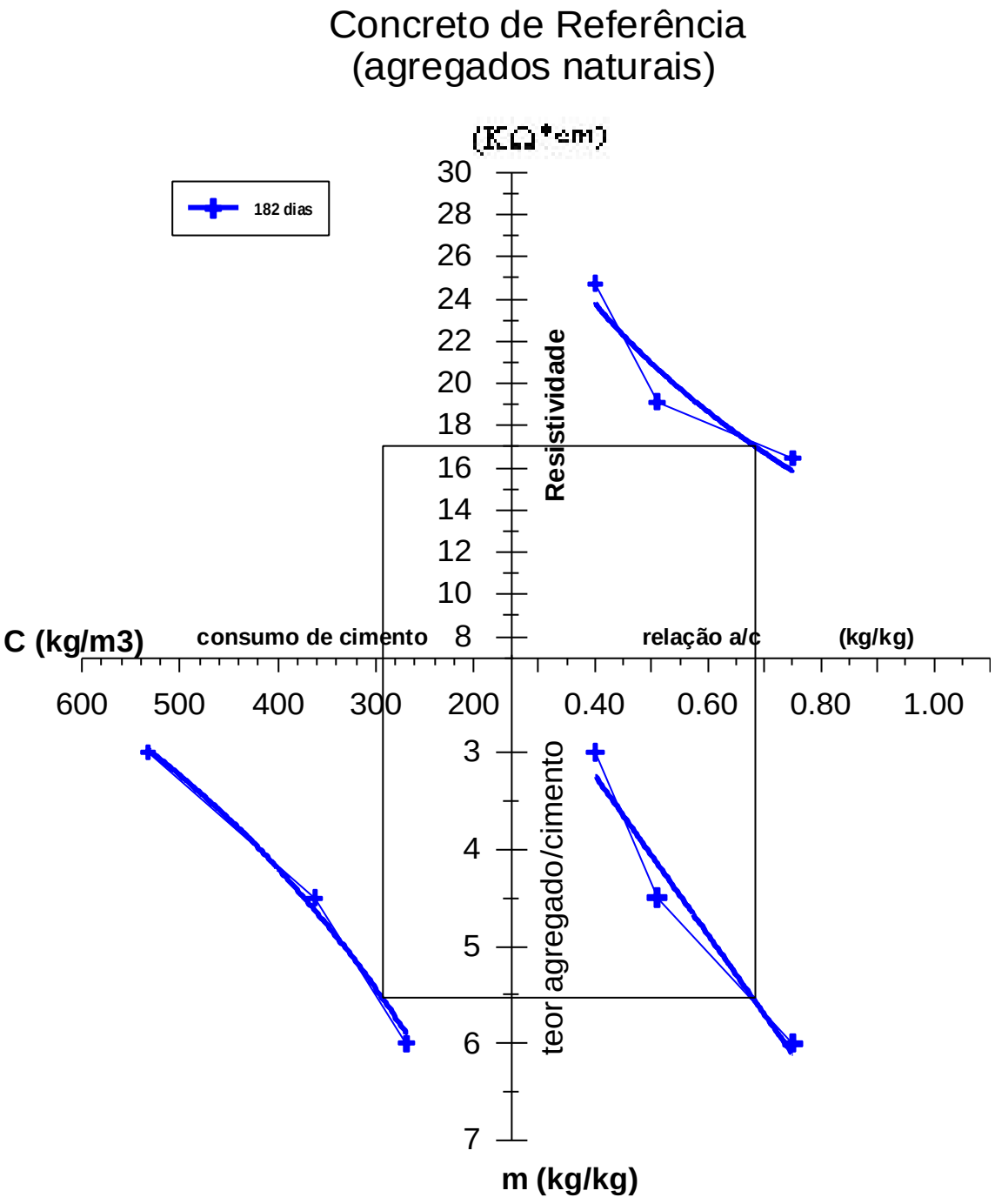


Figura 4-13 Diagrama dosagem resistividade, Concreto REFE.

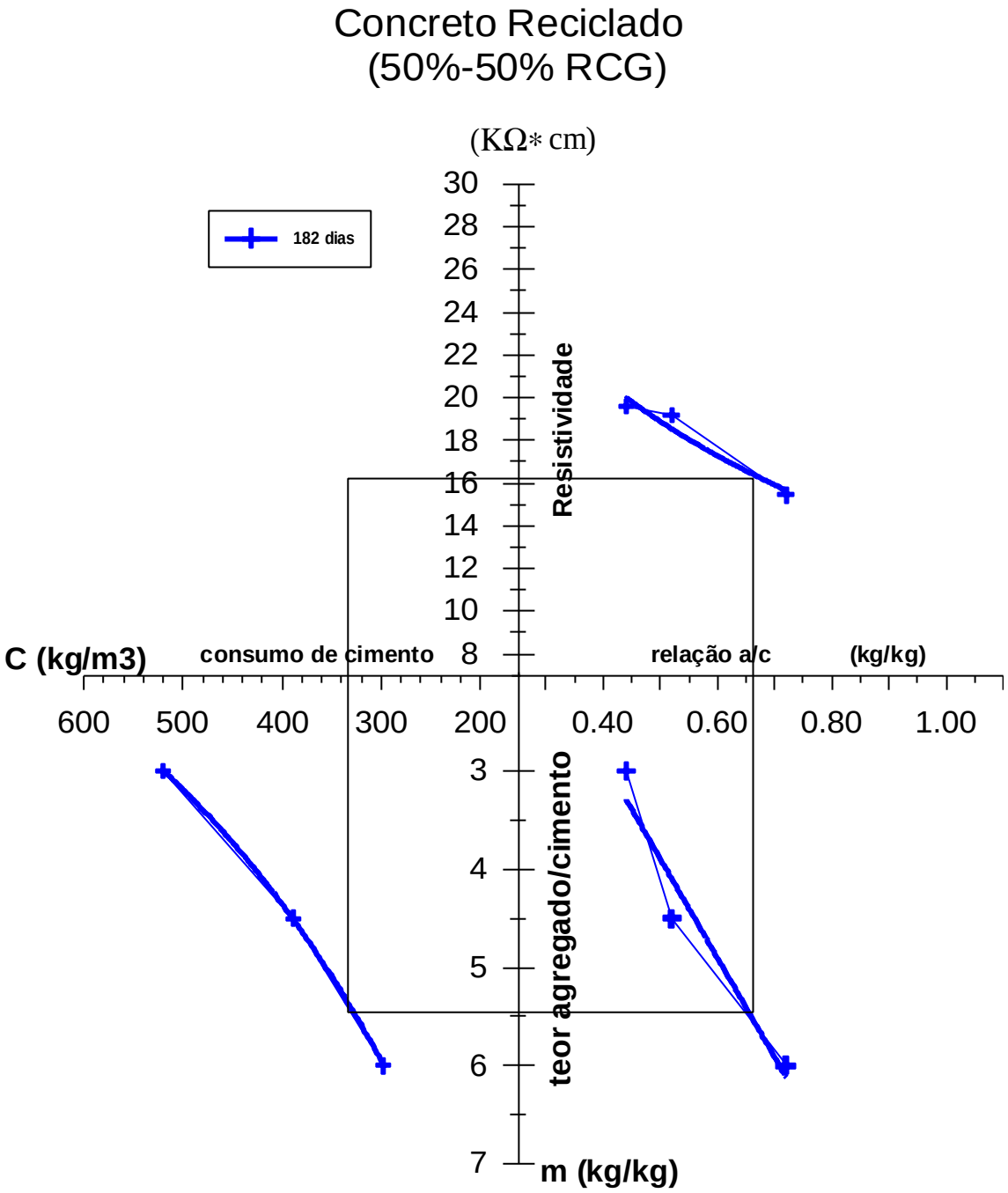


Figura 4-14 Diagrama dosagem resistividade, Concreto RCG.

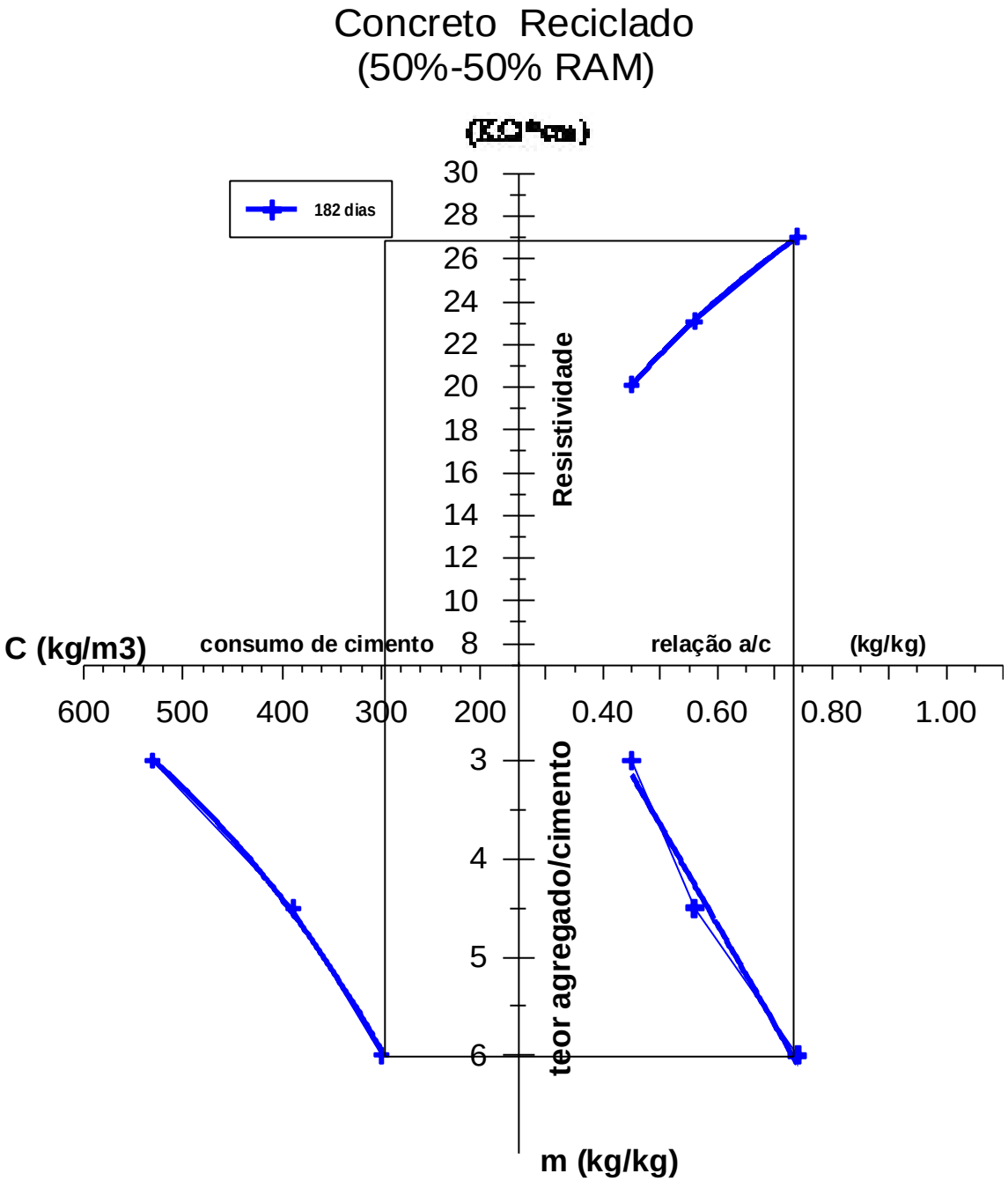


Figura 4-15 Diagrama dosagem resistividade, Concreto RAM.

Diagramas de dosagem, penetração de cloretos x a/c (Trabalho experimental, Lei de Lyse e Lei de Molinari),

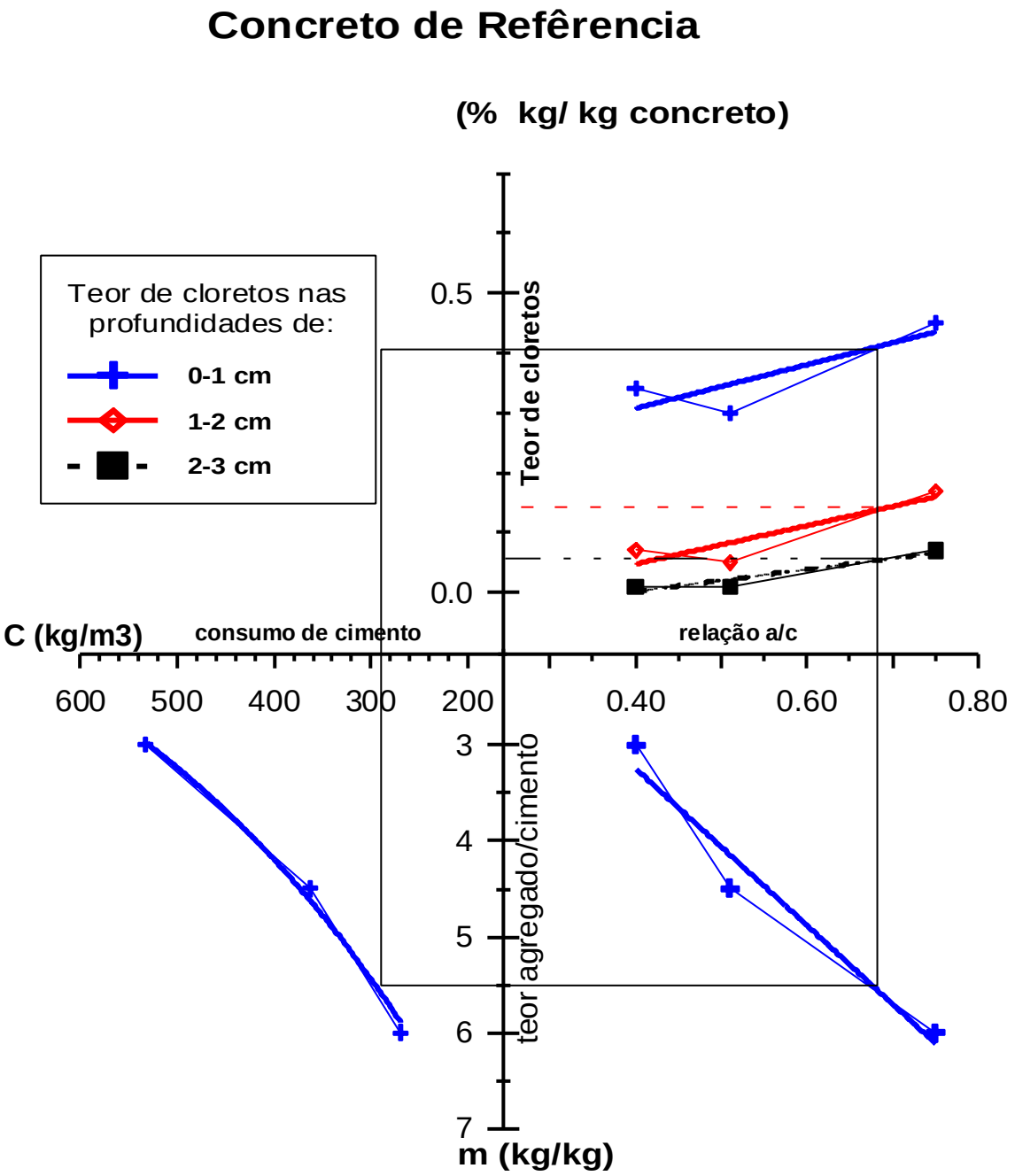


Figura 4-16 Diagrama dosagem penetração de cloretos, Concreto REFE.

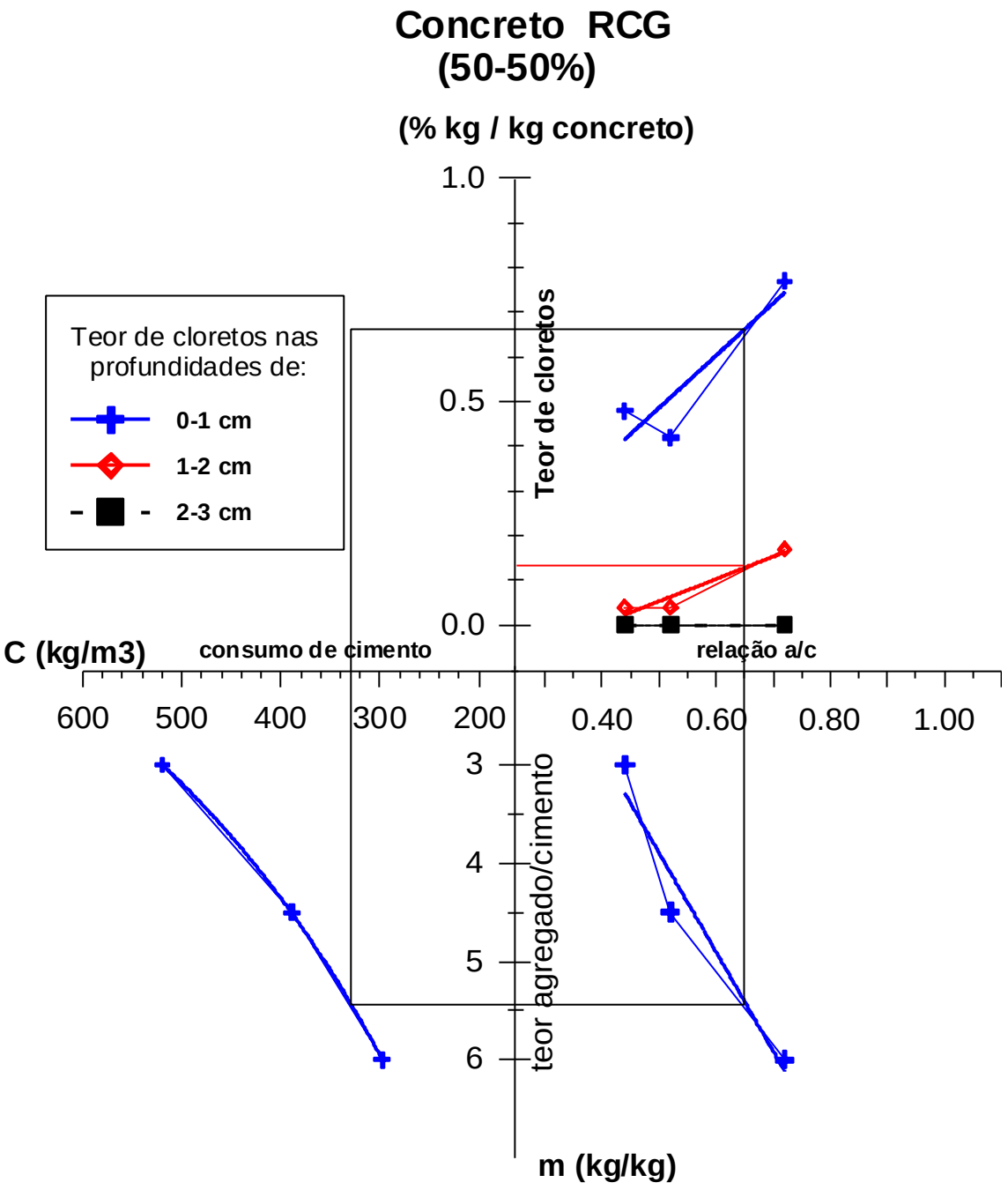


Figura 4-17 Diagrama dosagem penetração de cloretos, Concreto RCG.

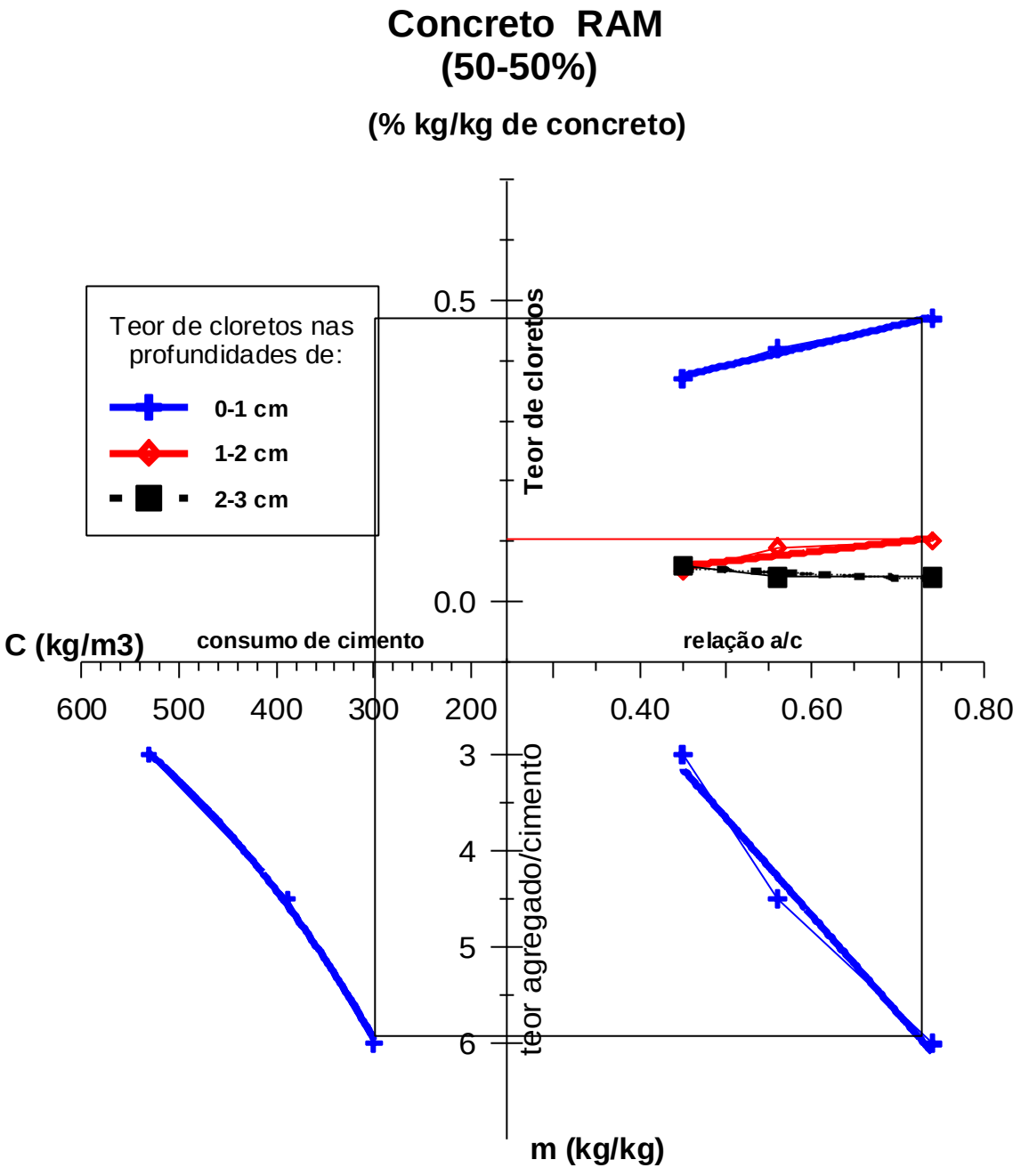


Figura 4-18 Diagrama dosagem penetração de cloretos, Concreto RAM.

Diagramas de dosagem, Módulo de Elasticidade x a/c (Trabalho experimental, Lei de Lyse e Lei de Molinari),

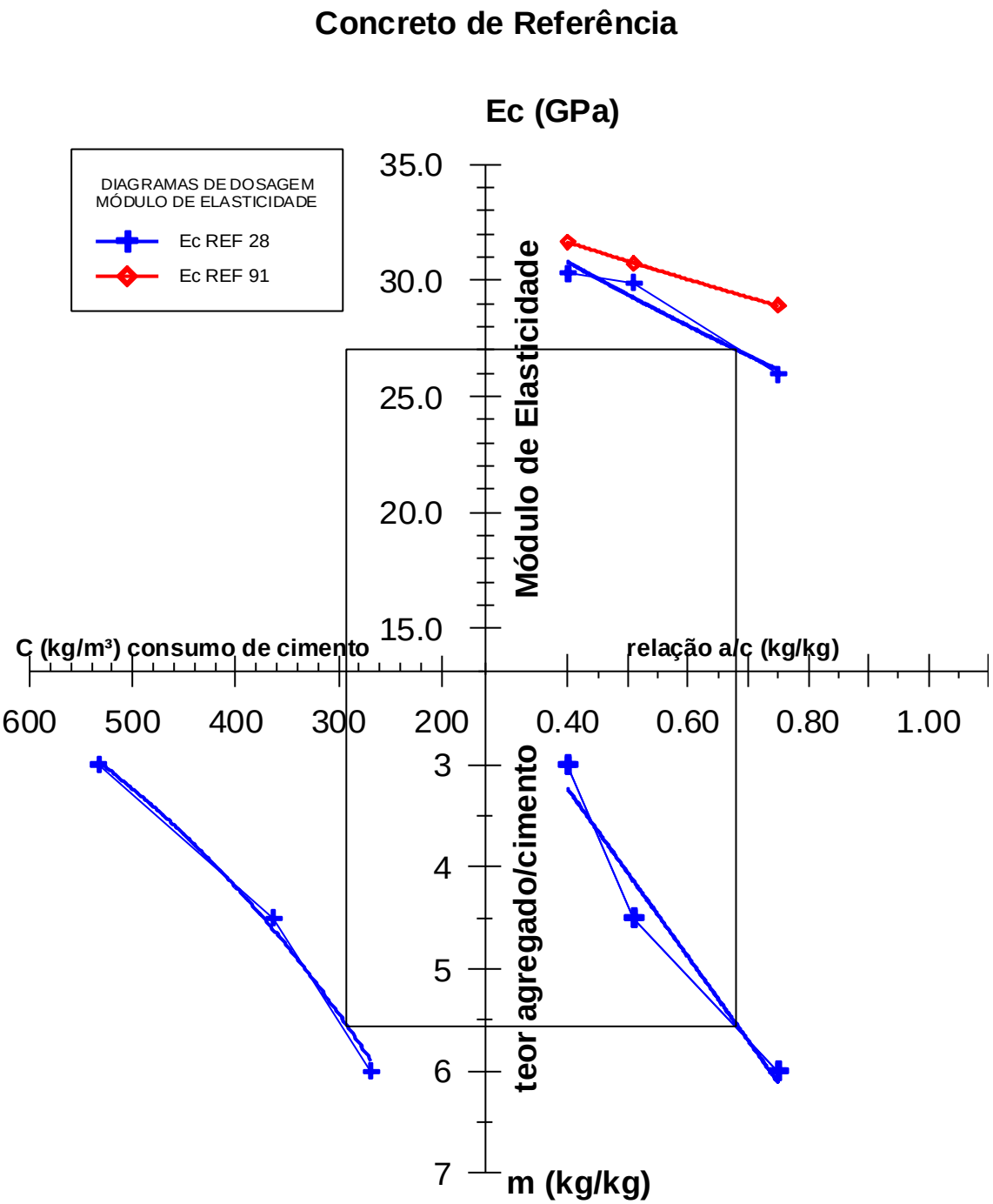


Figura 4-19 Diagrama dosagem Módulo de Elasticidade, Concreto REFE.

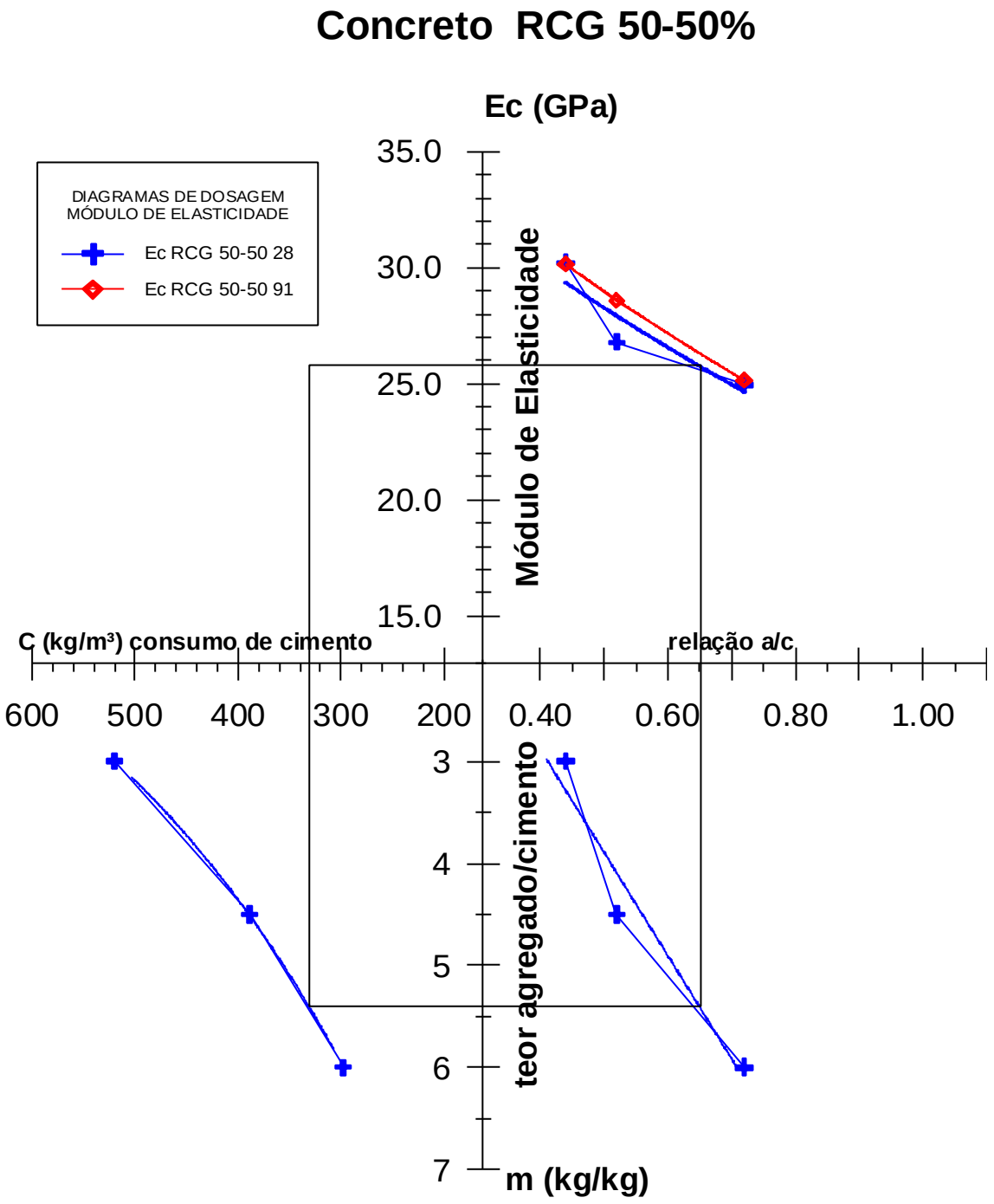


Figura 4-20 Diagrama dosagem Módulo de Elasticidade, Concreto RCG.

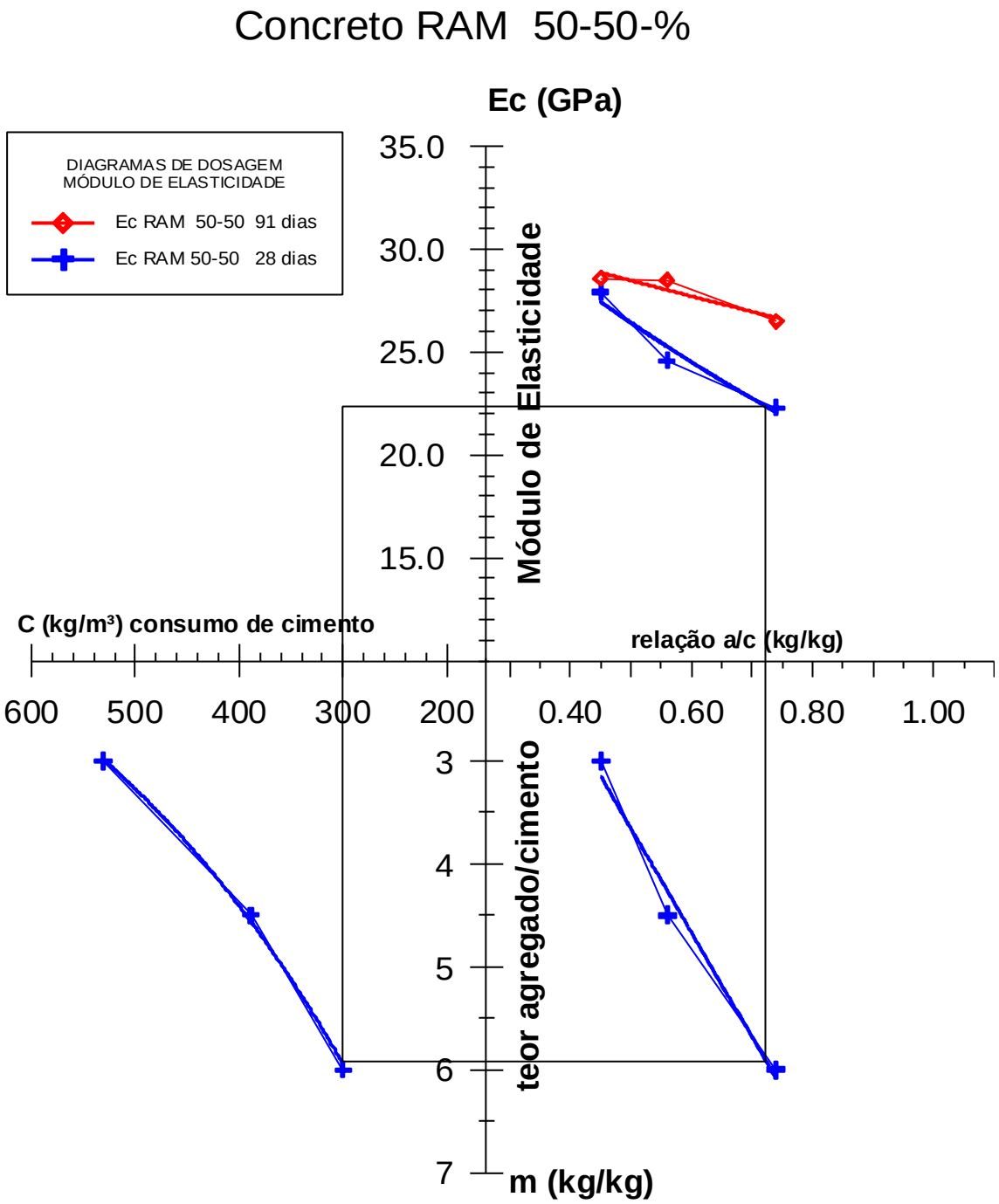


Figura 4-21 Diagrama dosagem Módulo de Elasticidade, Concreto RAM.

Uma vez construídos todos os diagramas de dosagem, obteve-se as equações dos modelos matemáticos que representam a propriedade analisada.

São as equações exponenciais que representam a Lei de Abrahms, com estas equações foram determinados os valores de a/c, que possibilitarão a obtenção de concretos de 30 MPa.

- *Determinação das equações, das propriedades pesquisadas concretos de 30 MPa com agregados REF., RCG 50-50%, e RAM 50-50%*

Resistência à compressão em função de a/c

REFE $$f_{c28} = \frac{99{,}98}{e^{1{,}76\,a/c}}$$

RCG 50-50% $$f_{c28} = \frac{118{,}70}{e^{2{,}105\,a/c}}$$

RAM 50-50% $$f_{c28} = \frac{110{,}12}{e^{1{,}79\,a/c}}$$

Nas equações acima, impondo-se f_{c28} = 30 MPa, resultou: a/c = 0,684 para concreto REFE, a/c = 0,653 para concreto RCG 50-50% e a/c = 0,726 para concreto RAM 50-50%.

Determinado o valor de a/c para concretos de 30 MPa, calculou-se o valor das propriedades analisadas, que teoricamente deve ser atingido. As equações utilizadas para cada propriedade são indicadas na seqüência:

Traço

Conhecida a relação a/c para se obter um concreto de 30 MPa, através da Lei de Lyse foi possível determinar seu traço de acordo com as equações a seguir:

$m_{REFE.}$	= 8.195 ? a/c - 0.034	m = 5,57
$m_{RCG\ 50\text{-}50\%}$	= 10.096 ? a/c - 1.154	m = 5,44
$m_{RAM\ 50\text{-}50\%}$	= 10.148 ? a/c - 1.419	m = 5,95

Consumo

Determinado o traço **m** e utilizando-se a Lei de Molinari, determinou-se o consumo de cimento por m³ para os concretos de 30 MPa, no exemplo que está sendo apresentado, são indicadas as equações para os concretos preparados com agregados REFE, RCG 50-50% e RAM 50-50% e com f_{c28} = 30 MPa.

C REFE.	= [2.473 - ln(m)] / 0.0026	⇒	291 kg/m³
$C_{RCG\ 50\ -50\%}$	= [2.720 - ln (m)] / 0.0031	⇒	329 kg/m³
$C_{RAM\ 50\ -50\%}$	= [2.680 - ln(m)] / 0.0030	⇒	300 kg/m³

Carbonatação aos 14 dias

Determinado o valor de a/c, para os concretos de 30 MPa, o mesmo foi substituído nas equações que representam a evolução da profundidade de carbonatação em função da relação a/c e obteve-se os valores indicados a seguir:

$eCO_{2\ REFE}$	= 15.489 ? a/c - 4.604	⇒	6,0 mm
$eCO_{2RCG\ 50-50}$	= 14.519 ? a/c - 4.464	⇒	5,0 mm
$eCO_{2\ RAM\ 50-50}$	= 8.079 ? a/c - 1.846	⇒	4,0 mm

Difusão do CO_2

Determinado o valor de a/c, o mesmo foi substituído nas equações que representam a evolução do coeficiente de difusão do CO_2 em função da relação a/c e obteve-se os valores indicados a seguir:

K_{REEFE}	=63.6435 *a/c -17.7136	⇒	25,8 mm/ $ano^{1/2}$
$K_{RCG\ 50\ -50}$	=64.0585 * a/c -19.6029	⇒	22,3 mm/ $ano^{1/2}$
$K_{RAM\ 5050}$	=42.8382 * a/c + -10.4817	⇒	20,6 mm/ $ano^{1/2}$

Absorção

Determinado o valor de a/c, o mesmo foi substituído nas equações que representam a evolução da absorção em função da relação a/c e obteve-se os valores indicados a seguir:

$Abs._{REEFE}$	= 3.185 ? a/c + 4.434	⇒	6,6%
$Abs._{RCG\ 50\ 50}$	= 2.240 ? a/c + 5.562	⇒	7,0%
$Abs._{RAM\ 50-50}$	= 1.782 ? a/c + 6.270	⇒	7,6%

Índice de Vazios

Determinado o valor de a/c, o mesmo foi substituído nas equações que representam a evolução do índice de vazios em função da relação a/c e obtém-se os valores indicados a seguir:

I_{REEFE}	= 5.951 ? a/c + 10.514	⇒	14,6%
$I_{RCG\ 50\ 50}$	= 4.183 ? a/c + 12.501	⇒	15,2%
$I_{RAM\ 50\text{-}50}$	= 2.234 ? a/c+ 14.5601	⇒	16,2%

Resistividade

Determinado o valor de a/c, o mesmo foi substituído nas equações que representam a evolução do índice de vazios em função da relação a/c e obteve-se os valores indicados a seguir:

ρ_{REEFE}	= 12.216 - 12.604 ? ln(a/c)	⇒	17,0 kΩ. cm
$\rho_{RCG\ 50\ 50}$	= 12.777 - 8.8158 ? ln(a/c)	⇒	16,9 kΩ. cm
$\rho_{RAM\ 50\text{-}50}$	= 31.231 + 13.966? ln(a/c)	⇒	26,8 kΩ. cm

Penetração de cloretos na camada de 0-1 cm

Determinado o valor de a/c, o mesmo foi substituído nas equações que representam a evolução do teor de cloretos na camada superficial de 0-1 cm em função da relação a/c e obteve-se os valores indicados a seguir:

Teor Cl^-_{REFE}	= 0.365 ? a/c + 0.162	⇒	0,41%
Teor $Cl^-_{RCG\ 50\text{-}50\%}$	= 1.173 ? a/c - 0.100	⇒	0,67%
Teor $Cl^-_{RAM\ 50\text{-}50\%}$	= 0.338 ? a/c + 0.223	⇒	0,47%

Módulo de elasticidade

Determinado o valor de a/c o mesmo foi substituído nas equações que representam a evolução do Módulo de Elasticidade em função da relação a/c e obteve-se os valores indicados a seguir:

Eci_{REFE}	= 37.0724 / $e^{0.466\ ?\ a/c}$	⇒	27,0 GPa
$Eci_{RCG\ 50\ –50\%}$	= 38.5896 / $e^{0.622\ ?\ a/c}$	⇒	25,7 GPa
$Eci_{RAM\ 50\text{-}50\%}$	= 38.4605 / $e^{0.751\ ?a/c}$	⇒	22,3 GPa

4.2 Análise de propriedades em função do acréscimo do teor dos agregados reciclados utilizados no concreto.

Sem dúvida, soluções tecnicamente brilhantes têm que ser economicamente viáveis, portanto, não é possível analisar a viabilidade econômica da execução de concretos sem analisar o consumo de cimento /m³ de concreto.

Com os dados apresentados nas tabelas Tabela 4-1 e Tabela 4-2 foi possível à construção de gráficos, que permitiram avaliar o desenvolvimento das propriedades selecionadas para análise da durabilidade dos concretos produzidos com materiais reciclados, assim como do concreto de referência.

Através deste procedimento foi possível avaliar a forma pela qual determinada propriedade evolui com o incremento do teor de agregados reciclados, sejam eles de concreto, sejam de alvenaria, e compará-la à mesma propriedade apresentada pelo concreto de referência. Os gráficos a seguir, indicam o desenvolvimento da linha de tendência da propriedade que está sendo analisada, através de um estudo comparativo elaborado para três categorias de concreto 20, 30 e 40 MPa respectivamente.

4.2.1 Consumo de cimento por m³

Comparar os valores obtidos a outros encontrados na literatura, trata-se de uma tarefa bastante delicada, pois seria necessário localizar trabalhos realizados com famílias de concreto iguais às ensaiadas e, ainda hoje nos inúmeros trabalhos internacionais existentes, os autores insistem em comparar concretos pelo consumo de cimento e não pela resistência. Mesmo assim, conseguiu-se selecionar alguns trabalhos com o objetivo de comparar os dados relativos ao consumo.

Diversos pesquisadores japoneses KIKUCHI et al. (1988)[102]; KASHINO e TAKAHASHI (1988)[103]; YANAGI (1988)[104] e YAMAMOTO (1988)[105] concordam

---

[102] KIKUCHI, M.; MUKAI, T.; KOZUMI, H. Properties of products containing recycled aggregate. In INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2° Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988. **Proceedings.** Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. p 595-604.

que a substituição de 30% dos agregados graúdos naturais não altera significativamente as propriedades dos concretos produzidos, portanto a substituição de 30 % de agregados naturais por reciclados, de acordo com estes pesquisadores seria uma forma simples e econômica para produção de concretos destinados a usos gerais.

Os resultados de outro trabalho realizado especificamente com agregados reciclados de alvenaria, desenvolvido por AKHTARUZZAMAN E HASNAT-(1983)[106] são sintetizados na Tabela 4-3 e comparados aos valores obtidos para concretos produzidos com agregados RAG 100%.

Embora os autores não citaram o fato nominalmente, está claro que a variação da relação a/c ocorreu para poder manter fixa a consistência, a qual não foi especificada.

A grande diferença encontrada entre os resultados apresentados deve ser atribuída a granulometria do agregado reciclado utilizado, embora os dois agregados reciclados apresentaram D_{max} e módulos de finura similares, a diferença fundamental entre ambos foi que, o primeiro trata-se de um agregado angular e o segundo de um agregado lamelar e como foi visto, agregados lamelares induzem a um maior consumo de cimento quando se pretende manter determinada consistência.

---

[103] KASHINO, N.; TAKAHASHI,Y. Experimental studies on placement of recycled aggregate concrete. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2° Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988. **Proceedings**. Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. p. 557-564.

[104] YAMAMOTO, T.; EMOTO Y. SOEDA, M.; SAKAMOTO, Y.; Some properties of recycled aggregate concrete. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2° Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988. **Proceedings**. Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. p 643-651.

[105] YANAGI, K.; HISAKA, M.; KASAI, Y Effect of impurities in recycled coarse aggregate up on a few properties of the concrete produced with it. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2° Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988. **Proceedings.** Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. pp 613- 620

[106] AKHTARUZZAMAN, A. A.; HASNAT, A.; Properties of concrete using crushed brick as aggregate. **Concrete International.** Feb. - 1983 p 58-63.

Tabela 4-1 Classe de resistência e consumo de concretos com 100% de agregados reciclados de alvenaria

Resistência	AKHTARUZZAMAN E HASNAT-(1983)[106]		Resultados calculados a partir de dados obtidos na parte experimental desta tese , agregados RAG 100%	
F_{c28} (MPa)	a/c	Cimento (kg)	a/c	Cimento (kg)
40,0			0,35	852
38,0	0,54	334		
30,0	0,61	288	0,57	522
25,0	0,70	256		
20,0			0,90	326
16,0	0,88	202		

Como resultado geral os ensaios realizados levaram aos seguintes resultados:

? os concretos de 20, 30 e 40 MPa, produzidos com agregados RCG, gerarão novos concretos que apresentarão um pico de consumo, para o teor de 20% e uma tendência decrescente a partir deste teor,

? os concretos de 20, 30 e 40 MPa, produzidos com agregados RAG, apresentarão uma tendência crescente do consumo com o incremento do teor de reciclados,

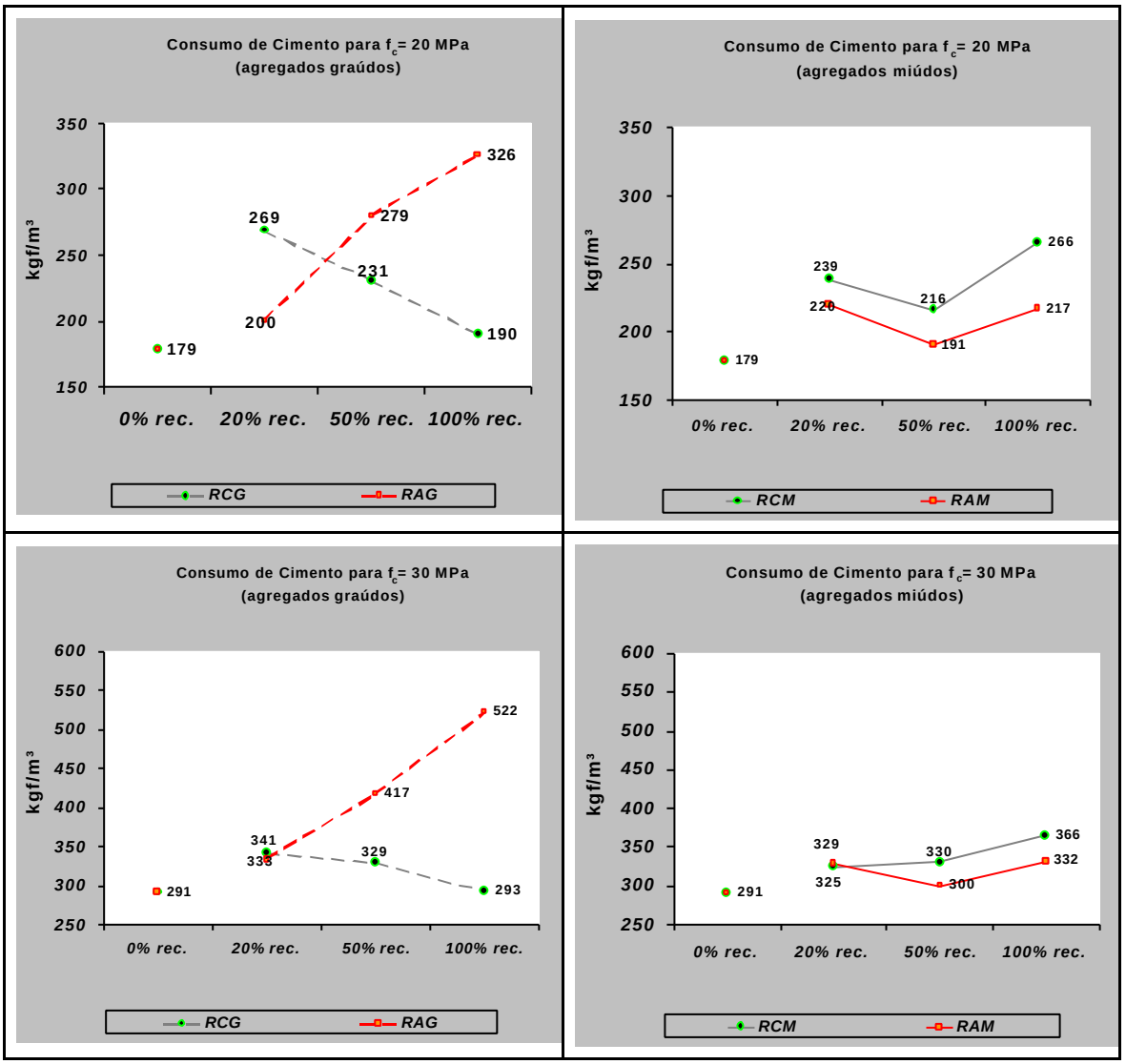
? os concretos de 20, 30 e 40 MPa, produzidos com agregados RCM, apresentarão um tendência crescente com o aumento do teor de agregados reciclados,

? os concretos de 20, 30 e 40 MPa, produzidos com agregados RAM apresentarão um consumo mínimo quando for substituído 50% do agregado miúdo natural.

Ainda deve ser observado que, no caso dos concretos de 40 MPa a tendência decrescente observada quando foram substituídos os agregados graúdos naturais por agregados reciclados graúdos de concreto, praticamente desaparece e a tendência crescente observada quando foram utilizados os agregados reciclados de alvenaria torna inviável, técnica e economicamente, a produção de concretos com fc = 40 MPa, uma vez que haverá necessidade de utilizar mais de 550 kg de cimento por m³ para alcançar esta resistência caso de

se pretenda utilizar agregados RAG 50-50% e 854 kg de cimento/m³ caso se pretenda substituir todo agregado graúdo natural, por agregado graúdo reciclado de alvenaria (RAG).

Para melhor visualização de como se desenvolve o consumo de cimento em função do teor de agregados reciclados para as categorias de concreto 20, 30 e 40 MPa respectivamente, são apresentados a seguir os diagramas da Figura 4-1 e assim torna-se fácil perceber que o consumo de cimento na produção de concreto tem comportamento similar para cada classe especificada de concreto.



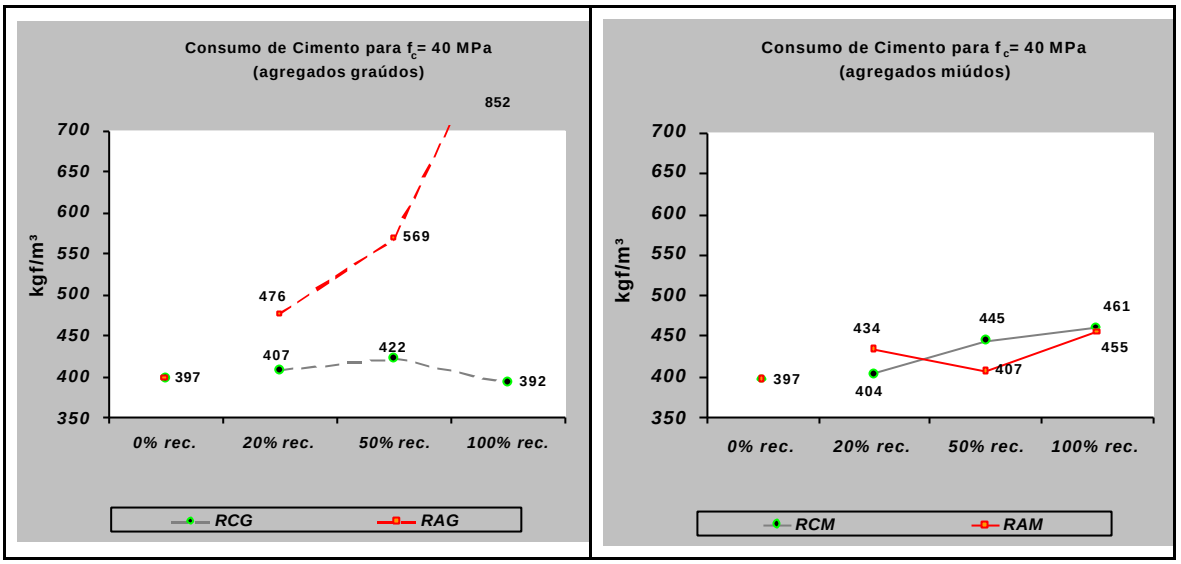


Figura 4-1 Variação do consumo de cimento em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30 e 40 MPa.

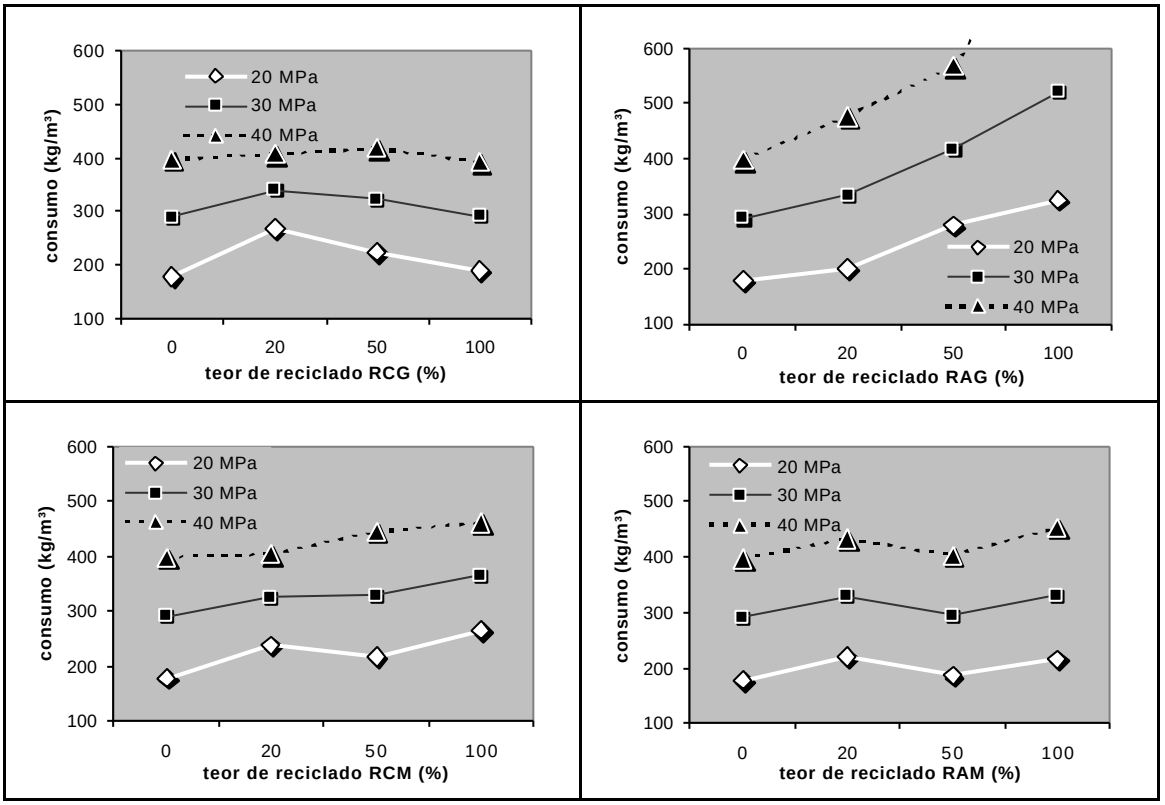


Figura 4-2 Evolução do consumo de cimento em função do teor de reciclados para concretos de 20, 30 e 40 MPa respectivamente

Explicação para os fatos constatados:

Aumento do consumo com aumento do teor de reciclados RAG, o aumento do teor de agregados reciclados de alvenaria graúdos (Agregados lamelares com absorção em torno de 13 %) implica em aumento do consumo de cimento para manter a consistência especificada, uma vez que a pasta vai funcionar como lubrificante evitando o travamento entre os agregados lamelares.

Aumento do consumo com aumento do teor de reciclados RCM, o aumento do teor de agregados reciclados de concreto miúdos (Agregados mais lamelares que os agregados naturais e com absorção em torno de 10 %) implica em aumento do consumo de pasta para manter a plasticidade, este aumento do consumo não é tão acentuado como para o caso dos agregados de alvenaria, mas é nítido.

Aumento do consumo com aumento do teor de reciclados RAM, a explicação para o consumo passar por um mínimo com substituição de 50 % do agregado miúdo natural por reciclado de alvenaria miúdo, está no fato de se ter atingido melhor empacotamento havendo necessidade de menor quantidade de pasta para preenchimento dos vazios entre os grãos o que evidentemente implica em menor consumo de cimento.

4.2.2 Resistência à compressão

Resistência à compressão como sempre é a propriedade mais pesquisada quando se trata de tecnologia do concreto, independentemente do que se estiver querendo provar, esse ensaio normalmente é executado, pois está diretamente ligado a relação a/c e esta relação, sempre está relacionada à propriedade pesquisada através de algum modelo matemático.

Por vezes tais modelos, já são bem conhecidos e de uso consagrado[107] pelo meio técnico, enquanto outros ainda não foram universalmente adotados, porém, já existem alguns modelos matemáticos adotados para prever o

[107] Como no caso do diagrama de dosagem as Leis de Abrams, Lyse, e Molinari

desenvolvimento da propriedade pesquisada, como é o caso da profundidade de carbonatação e penetração de íons cloretos entre outras[108].

Os dados existentes na Tabela 4-1, representam a evolução relativa (f_{cj}/f_{c28}) da resistência à compressão dos concretos especificados de 20, 30 e 40 MPa.

HELENE[23], (1992) propôs um modelo matemático para previsão da evolução da resistência à compressão considerando para os diversos cimentos nacionais produzidos entre 1990 e 1991, e representado pela Equação 4-1

$$fc_j/fc_{28} = K_1/(K_2)^{1/\sqrt{t}} \qquad \text{Equação 4-1}$$

onde:

K_1 e K_2 são constantes que dependem dos materiais utilizados no amassamento da argamassa ou concreto.

Uma vez que os agregados nacionais ao longo desta década não devem ter apresentados diferenças significativas quanto a sua textura, granulometria e forma, as diferenças surgidas na evolução da resistência à compressão, devem ser atribuídas à variação da finura do cimento que através de um maior grau de moagem estaria se hidratando num tempo menor diferentemente do que acontecia com os cimentos nacionais da década passada.

Com a finalidade de tornar mais didáticas estas considerações apresentam-se as tabelas e gráficos a seguir:

---

[108] Tais modelos foram abordados no CAPÍTULO 1. no qual foi justificada a escolha das propriedades selecionadas para o desenvolvimento do estudo da durabilidade dos concretos com agregados reciclados.

Tabela 4-1 Evolução da resistência à compressão para concretos de 20, 30,40 MPa com diferentes teores de agregados

	28 dias			91 dias			182 dias			
MPa	20	30	40	20	30	40	20	30	40	
REFER.	1,00	1,00	1,00	1,22	1,18	1,15	1,34	1,24	1,18	REFERENCIA
20-80 RCG	1,00	1,00	1,00	1,25	1,20	1,16	1,27	1,21	1,17	20-80 RCG
50-50 RCG	1,00	1,00	1,00	1,24	1,20	1,17	1,27	1,22	1,18	50-50 RCG
100-0 RCG	1,00	1,00	1,00	1,20	1,16	1,14	1,43	1,24	1,11	100-0 RCG
20-80 RAG	1,00	1,00	1,00	1,20	1,17	1,15	1,25	1,24	1,24	20-80 RAG
50-50 RAG	1,00	1,00	1,00	1,29	1,13	1,03	1,32	1,22	1,15	50-50 RAG
100-0 RAG	1,00	1,00	1,00	1,17	1,12	1,08	1,28	1,27	1,27	100-0 RAG
20-80 RCM	1,00	1,00	1,00	1,24	1,18	1,13	1,33	1,26	1,15	20-80 RCM
50-50 RCM	1,00	1,00	1,00	1,19	1,14	1,12	1,20	1,16	1,14	50-50 RCM
100-0 RCM	1,00	1,00	1,00	1,14	1,10	1,07	1,10	1,07	1,04	100-0 RCM
20-80 RAM	1,00	1,00	1,00	1,20	1,16	1,14	1,32	1,22	1,15	20-80 RAM
50-50 RAM	1,00	1,00	1,00	1,54	1,34	1,22	1,37	1,26	1,18	50-50 RAM
100-0 RAM	1,00	1,00	1,00	1,29	1,17	1,10	1,22	1,22	1,15	100-0 RAM

Tabela 4-2 Comparação entre evolução da resistência à compressão para concretos com 20, 50 e 100% de material reciclado.

HELENE (1992) a/c = 0,68 e cimento CPII 32	Refe.	20-80 RCG	20-80 RAG	20-80 RCM	20-80 RAM	idade
1,00	1	1	1	1	1	28
1,25	1,18	1,2	1,17	1,18	1,16	91
1,35	1,24	1,21	1,24	1,26	1,22	182
0,68	0,68	0,63	0,69	0,66	0,65	a/c
HELENE (1992) a/c = 0,68 e cimento CPII 32	Refe.	50-50 RCG	50 -50RAG	50-50 RCM	50-50 RAM	idade
1,00	1	1	1	1	1	28
1,25	1,18	1,2	1,13	1,14	1,17	91
1,35	1,24	1,22	1,22	1,16	1,26	182
0,68	0,68	0,65	0,63	0,69	0,73	a/c
HELENE (1992) a/c = 0,68 e cimento CPII 32	Refe.	100-0 RCG	100-0 RAG	100-0 RCM	100-0 RAM	idade
1,00	1	1	1	1	1	28
1,25	1,18	1,16	1,12	1,1	1,12	91
1,35	1,24	1,24	1,27	1,07	1,22	182
0,68	0,68	0,712	0,578	0,681	0,758	a/c

Analisando-se da tabela anterior é fácil confirmar que a evolução da resistência à compressão é maior com o tempo, nos concretos de resistência reduzida, fato que está em concordância com o modelo matemático de HELENE.

Embora a relação a/c não seja exatamente a mesma em todos os casos, os valores são muito próximos (0,68 ± 0,05), portanto a comparação não é inviável, uma vez que a consistência foi mantida (70±10 mm).

De forma geral, pode-se afirmar que o aumento do teor de reciclados graúdos (RCG e RAG) leva um acréscimo percentual da resistência à compressão e o aumento de reciclados miúdos de concreto (RCM) leva a um decréscimo da resistência à compressão enquanto que o aumento de reciclados miúdos de alvenaria (RAM) não apresenta tendência definida.

4.2.3 Módulo de elasticidade.

Trata-se de uma propriedade estudada por inúmeros pesquisadores, (KAKIKAZKI, M. et al. 1988)[109] (BARRA –1996)[87] (DILLMANN –1998)[110] e entre os resultados obtidos existe o consenso quanto a redução do valor do módulo com o incremento do teor de reciclados. RAVINDRARAJAH (1988)[111] afirma que o módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados é menor do que o módulo dos concretos com agregados naturais e além do mais esta diferença é maior para resistências à compressão mais elevadas.

Como o módulo de elasticidade é uma propriedade que permite prever as deformações de uma estrutura e, indiretamente possibilita prever o valor da abertura de fissuras que surgirão em estruturas de concreto, ou seja, conhecido o módulo de elasticidade, será possível prever se uma estrutura em função do carregamento ao qual está submetido permitirá o surgimento de fissuras além dos limites toleradas por normas nacionais ou estrangeiras.

---

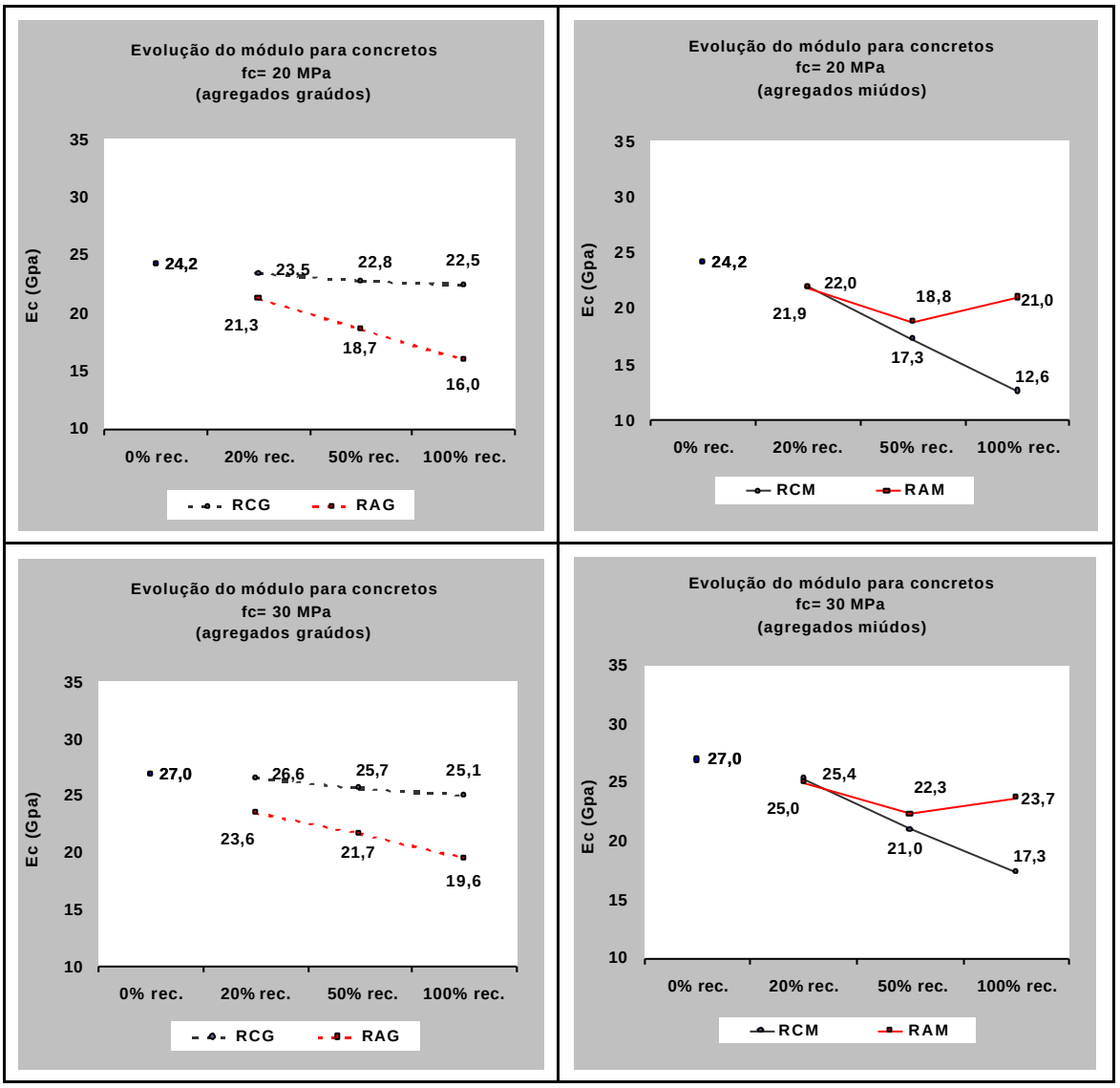
[109] KASHINO, N.; TAKAHASHI,Y. Strength and elastic modulus of recycled aggregate. in: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2° Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988 **Proceedings**. Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. P. 557- 564.

[110] DILLMANN, R. Concrete with recycled concrete aggregate In INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION: Use of recycled concrete aggregate **Proceedings** Ravindra K. Dhir, Neil a Henderson and Mukesh C. Limbachiya. London THOMAS TELFORD 1998 p. 239-254.

[111] RAVINDRADRJAH, R.S.; LOO,Y.H.; TAM, C.T. Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in-situ tests **Materials and Structures** v.21 p. 289-295

Em última análise, conhecendo-se a dimensão das possíveis fissuras e as características do meio ambiente no qual está inserida uma estrutura de concreto, será possível estimar sua durabilidade.

Na Figura 4-1 apresenta-se os resultados do estudo da variação do módulo de elasticidade para concretos de 20, 30 e 40 MPa, em função do teor de agregados reciclados.



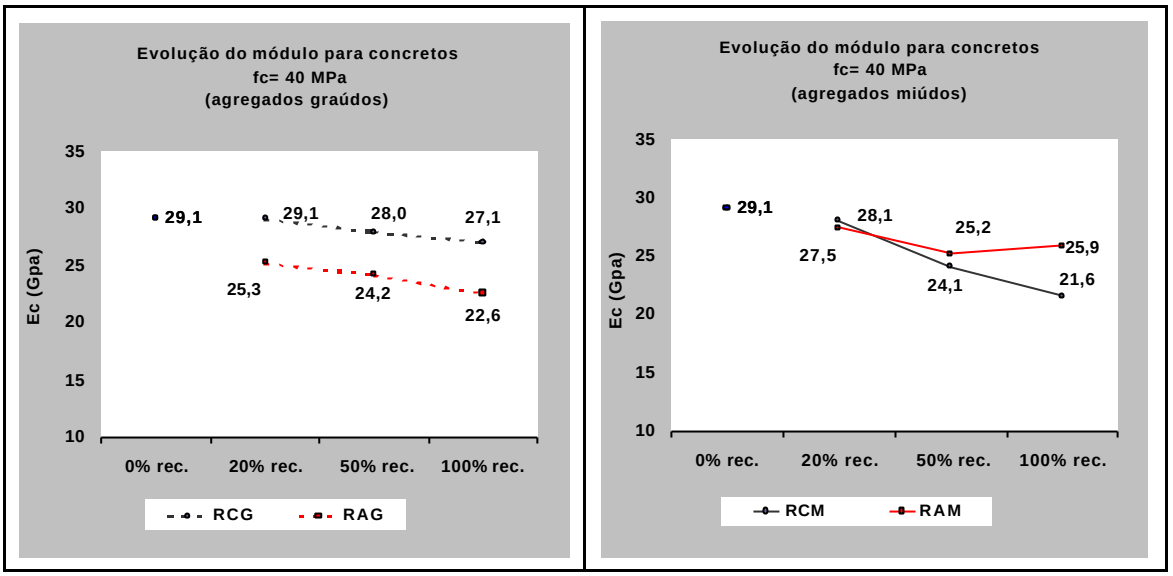


Figura 4-1Variação do módulo de elasticidade em função do teor de reciclados para f_c=20, 30 e 40 MPa.

Novamente, com o intuito de visualizar o comportamento da propriedade analisada, neste caso o Módulo de Elasticidade dos concretos de 20, 30 e 40 MPa apresenta-se os diagramas da Figura 4-2.

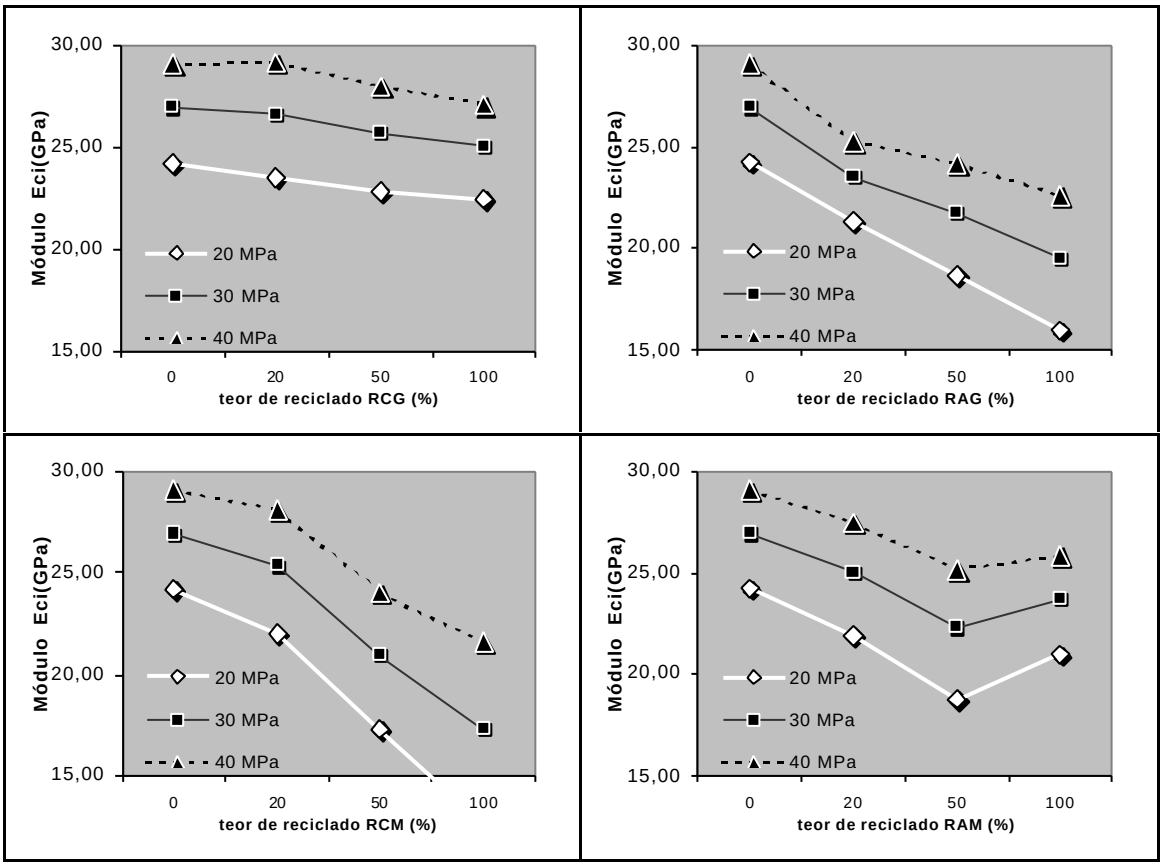


Figura 4-2 Desenvolvimento do módulo de elasticidade de diferentes classes de concreto, em função do teor do agregado reciclado utilizado.

Analisando-se estes diagramas, percebe-se nitidamente a tendência decrescente do valor do módulo em função do acréscimo do teor de agregados reciclados.

Quando foi substituido 50% do agregado miúdo natural por agregado RAM na proporção de 50%, o módulo apresentou tendência diferente passando por um mínimo e voltando a crescer. Este fato deve ser analisado em paralelo com outras propriedades que apresentaram um ponto de inflexão na tendência da propriedade, como ocorreu com o consumo absorção índice de vazios, carbonatação e resistividade.

O fato do módulo de elasticidade passar por um mínimo quando 50% do agregado reciclado miúdo natural e substituído por 50% de agregado reciclado miúdo de alvenaria RAM pode ser explicado pelo raciocínio a seguir: o consumo mínimo de cimento levou a um volume mínimo de pasta e maior consumo de agregado reciclado RAM, este agregado tendo módulo inferior ao da areia natural, contribui para que o módulo de elasticidade do concreto passe por um valor mínimo.

A avaliação das deformações que uma estrutura de concreto estará sujeita, é obtida através do módulo de elasticidade do concreto e de seu carregamento.

O módulo de elasticidade pode ser determinado teoricamente através de modelos matemático que o relacionam com a resistência à compressão como indicado na Figura 4-3, da analise desta figura, percebe-se que o modelo preconizado atualmente pela NBR 6118 apresenta resultados muito maiores do que aqueles obtidos experimentalmente e do que os obtidos através da adoção de outros modelos matemáticos existentes.

Foram selecionados na bibliografia alguns trabalhos e seus resultados obtidos confirmam a tendência detectada, ou seja, $E_{ci\ NBR6118} > E_{ci\ real}$.

DI NIRO; at all[112] (1998) realizaram um trabalho experimental utilizando agregados RCG, essa tendência ficou evidente sendo confirmada pelos resultados apresentados na Tabela 4-1 nas colunas 1 e 2.

---

[112] Di NIRO, G.; DOLARA E. ; CAIRNS R. Properties of hardened RAC for structural purposes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION: USE OF RECYCLED

Tabela 4-1 Relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade

Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	CONCRETOS UTILIZADOS
30[113]	25,1[113]	Cimento CP II 32 com agregados RCG 100%
30[113]	17,3[113]	Cimento CP II 32 com agregados RCM 100%
30[113]	27,0[113]	Cimento CP II 32 com agregados naturais 100%
40[113]	27,1[113]	Cimento CP II 32 com agregados RCG 100%
40[113]	22,6[113]	Cimento CP II 32 com agregados RCM 100%
40[113]	29,1[113]	Cimento CP II 32 com agregados naturais 100%
46,25[112]	25,53[112]	Cimento CP 52,5 Com agregados 100% reciclados
47,85[112]	25,43[112]	Cimento CP 52,5 Com agregados 100% reciclados
62,26[112]	26,75[112]	Cimento CP 40 Com agregados naturais 100% naturais
32,5[114]	25,29[114]	Cimento CP I 45 (Espanhol) Com agregados 100% reciclados de concreto
41,2[114]	26,06[114]	Cimento CP I 45 (Espanhol) Com agregados 100% reciclados de concreto
40,1[114]	26,20[114]	Cimento CP I 45 (Espanhol) Com agregados naturais 60% reciclados de concreto e 40% alvenaria
38,1[114]	29,42[114]	Cimento CP I 45 (Espanhol) Com agregados naturais 100% naturais

CONCRETE AGGREGATE. **Proceedings** Ravindra K. Dhir, Neil a Henderson and Mukesh C. Limbachiya. London THOMAS TELFORD 1998. p. 176 –187.

[113] Resultados obtidos aplicando-se a metodologia para determinação da linha de tendência, metodologia desenvolvida para interpretar os resultados obtidos experimentalmente nesta tese

[114] BARRA (1996)[87]

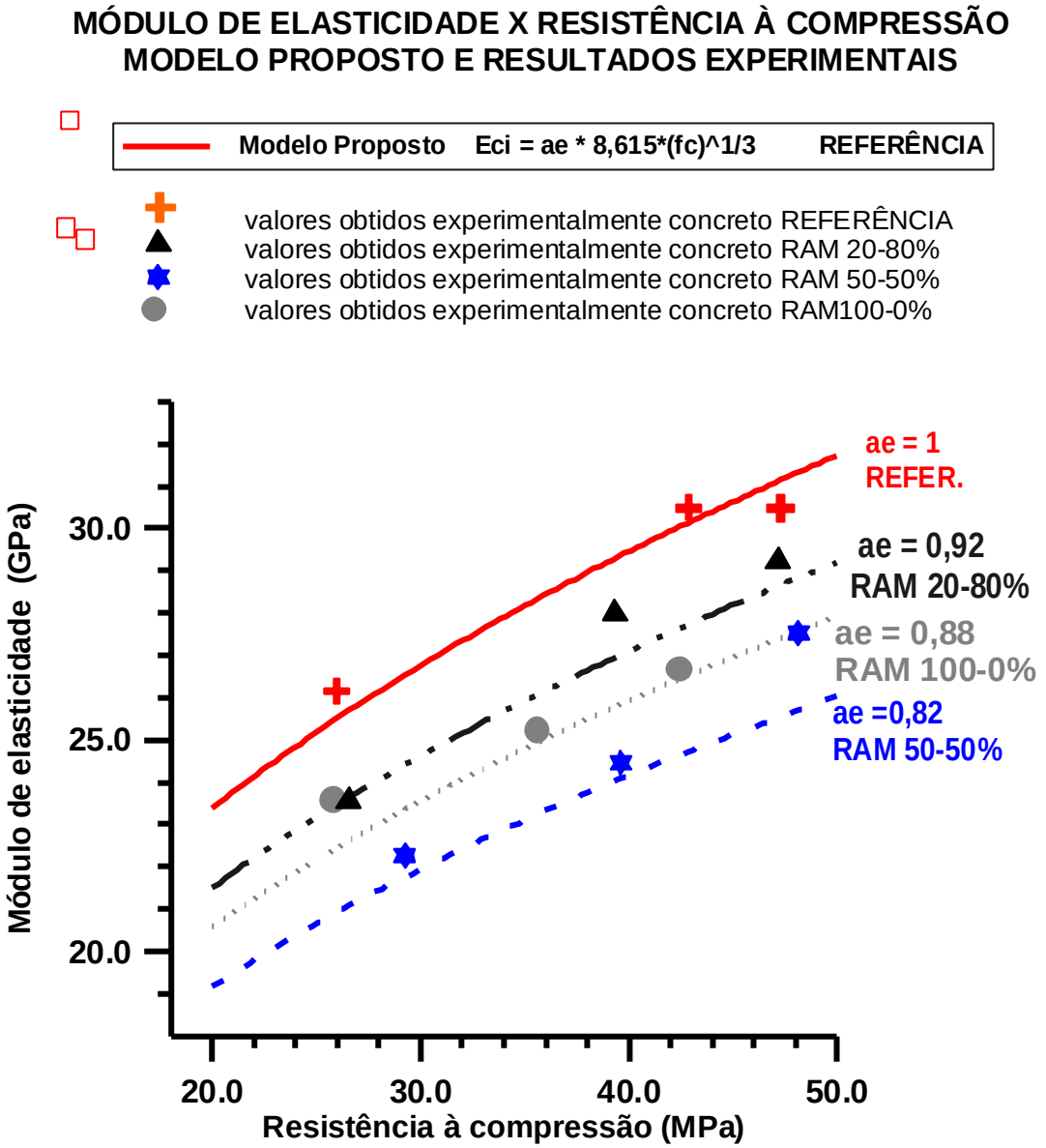


Figura 4-3 Comparativo entre dos valores de E_c, determinados pelo modelo proposto e os obtidos experimentalmente.

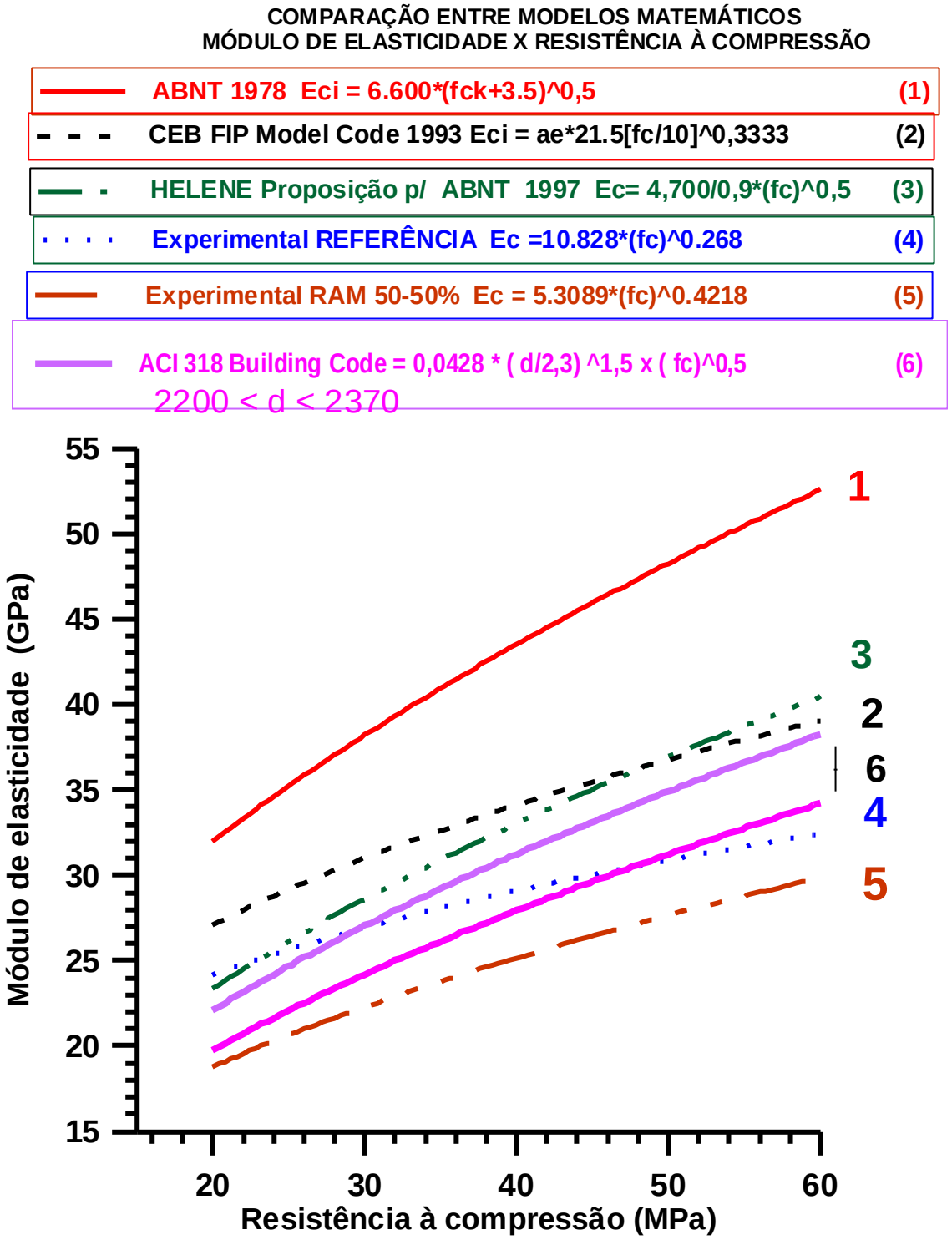


Figura 4-4 Comparação entre modelos matemáticos, resistência à compressão x módulo tangente inicial.

Segundo YANNAS (1977)[115] que em uma pesquisa também estudou o módulo de elasticidade de concretos com agregados reciclados, concluiu que este apresentava módulo inferior, entre 10 a 40%, aos concretos preparados só com agregados naturais e os resultados obtidos por ela estão indicados graficamente na Figura 4-3 e na Figura 4-4.

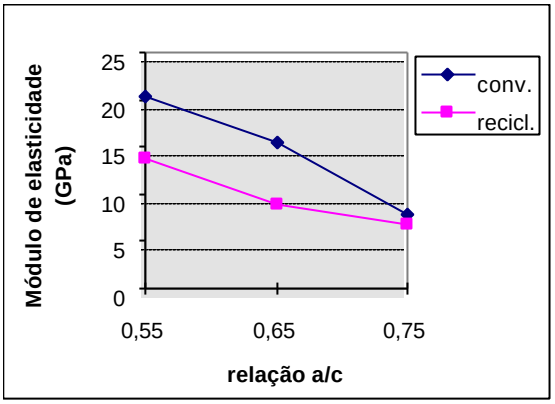


Figura 4-5 Variação do módulo de elasticidade em função do teor do agregado e da relação a/c, para cimento tipo I (YANNAS –1977)

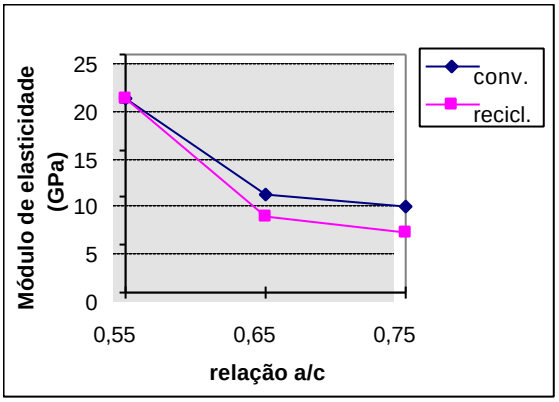


Figura 4-6 Variação do módulo de elasticidade em função do teor do agregado e da relação a/c, para cimento tipo III (YANNAS –1977)

Para o cimento do tipo I (ASTM C-150) equivalente ao CP-I nacional, com o crescimento da relação a/c, ocorre uma redução considerável entre a diferença dos valores do módulo de elasticidade do concreto de referência e do concreto com agregados reciclados, tornado-se nula para relações a/c=075, fenômeno que se desenvolveu de forma inversa quando foi utilizado o cimento do tipo III (ASTM C-150) equivalente ao cimento CPV ARI nacional.

Já no estudo elaborado por (KAKIZAKI et al.-1988) os resultados obtidos indicam que concretos executados com material reciclado apresentaram o módulo de elasticidade inferior 25 a 40% ao dos concretos de referência preparados com agregados convencionais.

---

[115] FRONDISTON-YANNAS, S.; Waste concrete as aggregate for new concrete **ACI Journal** pp 373-376.

Para corpos de prova cúbicos, os resultados obtidos por (RAVINDRARAJAH et.al.-1987)[116] são indicados na Figura 4-7 e confirmam a tendência diferença existente entre o módulo de elasticidade existente entre concretos preparados com agregados naturais e reciclados variando de 20 a 30 MPa, que é a mesma faixa de valores encontradas por este pesquisador.

ZAGURSSKIJ E ZHADANOVISKI - 1985[117]; e a B.C.S.J.-1978[118] concluíram que o módulo de elasticidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados e areia natural foi de 10 a 30 % inferior ao concreto de referência. Quando o concreto ensaiado foi produzido com a totalidade dos agregados reciclados, a diferença encontrada entre módulos de elasticidade elevou-se para a faixa de 25 a 40%. Os resultados alcançados pelos japoneses estão indicados na Figura 4-8.

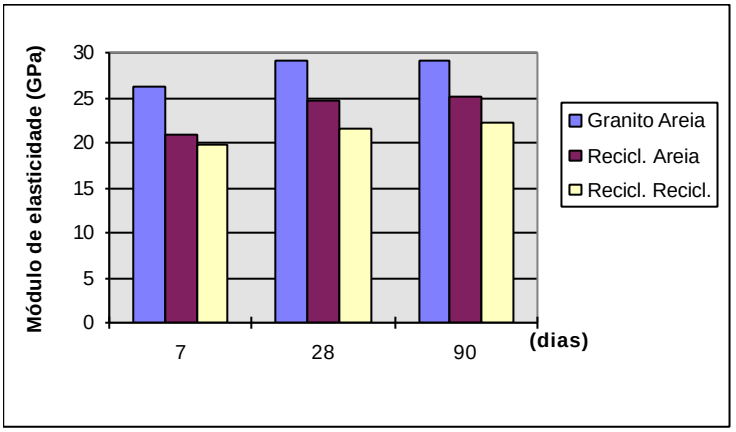


Figura 4-7 Módulo de elasticidade (RAVINDRARAJAH et. al. –1987)

---

[116] RAVINDRARAJAH, R.S.; LOO, Y. H.; TAM, T.C. Recycled aggregate as fine and coarse aggregates in concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 39 n.141 December 1987 p. 214-220.

[117] ZAGURSKIJ, V. A.; ZHADANOVSKIJ, B. V. Breaking reinforced concrete and recycled crushed materials. **Research Institute for Concrete (GISSTROY)** Moscow- 1985. Special Technical Report.

[118] JAPAN. BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN BSJ. Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Disposal and reuse of construction waste summary **Concrete Journal**, 16 n. 7 p.18-31 Japan,1978.

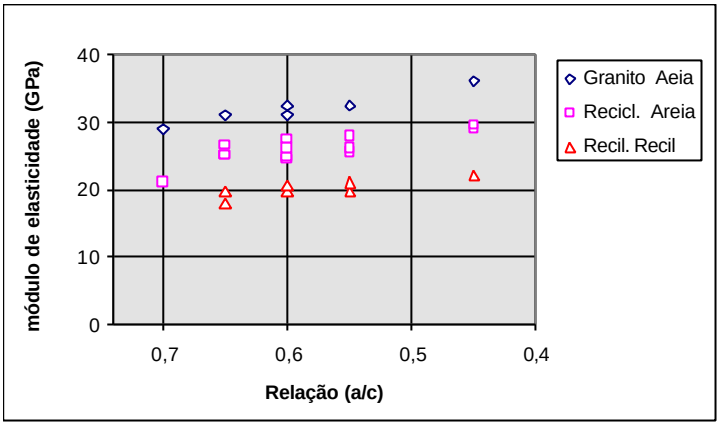


Figura 4-8 Módulo de elasticidade (B.C.S.J. –1978)

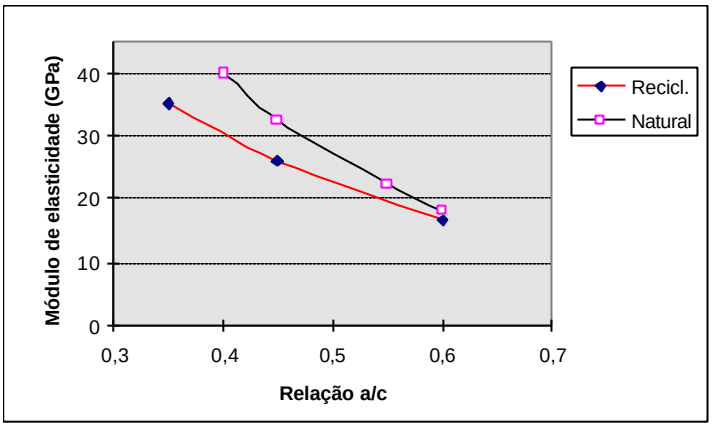


Figura 4-9 Módulo de elasticidade (RASHEEDUZZAFAR E KHAN – 1984)

(RASHEEDUZZAFAR E KHAN –1984)[119] praticamente constatou a mesma tendência observada por (YANNAS –1977)[115] para diferenças entre o módulo de elasticidade dos concretos preparados com agregados graúdos reciclados e areia fina e o dos concretos preparados com agregados graúdos de rocha calcária e areia fina como está indicado na Figura 4-9.

Da análise dos gráficos anteriores, percebe-se que:

O modelo proposto pela NBR que relaciona o módulo de elasticidade com a resistência à compressão para concretos de 20 a 60 MPa apresenta o valores superior a todos os demais modelos analisados e a àqueles obtidos experimentalmente e ainda não apresentados.

---

[119] RASHEEDUZZAFAR & KHAN A.; Recycled concrete - a source for new aggregate. **Cement Concrete, and Aggregates** (ASTM), v. 6, n.1, 1984 p. 17-27

O modelo obtido experimentalmente para o concreto de referência, embora seja função de uma raiz (^{4}), praticamente coincide com o do CEB que é função de uma raiz (^{3}), quando for aplicado o fator de redução a_e = 0,8 recomendado para calcário/arenitos[120],. na Figura 4-4 pode ser constatado que as curvas (2) e (4) se sobrepõe.

Tabela 4-2 Módulos de Elasticidade x Resistência à Compressão, para f_c = 30 MPa.

	Modelos matemáticos	Equação (valores em GPa)	E_{ci}
Modelos teóricos	ABNT NB1 1978 item 8.2.5	$E_{ci} = 6.6 * (f_{ck} + 3{,}5)^{0,5}$	38,2
	CEB FIPE MODEL Code 90 de 1993 item 2.1.4.2	$E_{ci} = a_E * 21.5 * [(f_{ck} + 8{,}0)/10]^{1/3}$	33,5 a 26,8
	HELENE, Proposição à ABNT-1997	$E_{ci} = \frac{4{,}70}{0{,}9} * f_{ck}^{0,5}$	28,6
	ACI 318 Building Code 1999	$E = 0{,}04289 \bullet (\frac{g}{2{,}3})^{1,5} \bullet \sqrt{f_c}$	26,5 a 23,5
Modelos experimentais	Referência	$E_{ci} = 10{,}828 * f_c^{0,268}$	27,0
	RCG 20-80%	$E_{ci} = 8{,}5296 * f_c^{0,3438}$	27,5
	RCG 50-50%	$E_{ci} = 9{,}1106 * f_c^{0,3044}$	25,6
	RCG 100-0%	$E_{ci} = 5{,}9078 * f_c^{0,402}$	23,2
	RAG 20-80%	$E_{ci} = 10{,}164 * f_c^{0,2472}$	23,6
	RAG 50-50%	$E_{ci} = 5.9214 * f_c^{0,3825}$	21,7
	RAG 100-0%	$E_{ci} = 3{,}5684 * f_c^{0,5006}$	19,6
	RCM 20-80%	$E_{ci} = 7{,}5515 * f_c^{0,3560}$	25,3
	RCM 50-50%	$E_{ci} = 4{,}1766 * f_c^{0,4746}$	21,0
	RCM 100-0%	$E_{ci} = 1{,}6332 f_c^{0,7178}$	18,8
	RAM 20-80%	$E_{ci} = 7{,}7484 f_c^{0,3435}$	25,0
	RAM 50-50%	$E_{ci} = 5{,}3089 * f_c^{0,4218}$	22,3
	RAM 100-0%	$E_{ci} = 8{,}7654 * f_c^{0,2934}$	23,7

[120] O Texto do CEB / FIP Model Code 90 de 1993 no seu item 2.1.4.2 preconiza que a_e é um fator variável 0,7 a 1,2 em função da Natureza do agregado

Na Tabela 4-2, apresenta-se as equações de alguns dos modelos matemáticos encontrados na literatura, assim como a dos modelos matemáticos obtidos experimentalmente tanto para o concreto de referência, bem como para aqueles preparados diferentes teores de agregados reciclados. Adotando-se f_c = 30 MPa e substituindo-se nas equações que representam estes modelos, obtêm-se a última coluna da Tabela 4-2, na qual estão indicados os valores de E_{ci} para concretos de 30 MPa.

Analisando-se a Tabela 4-2, depreende-se, que o modelo preconizado pela NB1 superestima E_{ci} quando comparado aos demais modelos utilizados. Como este valor é largamente utilizado no cálculo de deformações de estruturas pelos projetistas no território nacional, certamente está se cometendo o equívoco de permitir que estruturas deformem mais que o recomendável ao se adotar tal modelo, que conduz a um valor muito maior que a realidade.

Os valores determinados para o módulo de elasticidade, foram relacionados com os valores de resistência à compressão possibilitando a proposição do modelo que melhor se adequou aos resultados obtidos, este modelo é representado pela Equação 4-2 a seguir:

$$E_{ci} = a * K * \sqrt[3]{f_{c28}} \qquad \text{(Equação 4-1)}$$

onde:

a ? é o coeficiente de redução do módulo de elasticidade e varia em função das características e do teor do agregado reciclado utilizado na composição do concreto.

K ? é uma constante que deve estar ligada ao tipo de cimento e do agregado utilizado na produção do concreto, no caso deste trabalho, o valor de ***K*** foi determinado empiricamente através de tentativas, tendo sido adotado o modelo que melhor representava o experimento desenvolvido, o valor encontrado foi = 8,615.

Os valores de *a* apresentados na Tabela 4-3 foram obtidos pela relação entre os valores observados para as 13 famílias de concreto ensaiadas.

Tabela 4-3 Valores de a em função da característica e do teor dos reciclados utilizados no concreto.

Concreto/ Agregados	REFERENCIA	20-80	50-50	100-0
RCG	1	1	0,95	0,85
RCM	1	0,92	0,78	0,75
RAG	1	0,85	0,80	0,72
RAM	1	0,92	0,82	0,88

Analisando-se a Tabela 4-3, conclui-se que o aumento do teor de reciclados na produção de concretos, conduz a uma redução de 12 a 28 % no valor do módulo de elasticidade, número perfeitamente de acordo com as diversas pesquisas apresentadas.

4.2.4 Absorção por imersão e índice de vazios.

Quando se monitora a absorção de água, na realidade está se procurando determinar o total dos poros permeáveis na estrutura de concreto, já o índice de vazios está relacionado a todos os poros existentes na estrutura de concreto e de uma forma indireta o conhecimento desta estrutura de poros, permiti prever a durabilidade de um concreto, uma vez que possibilita o conhecimento da forma pela qual os agentes agressivos se difundirão ou penetrarão através do interior da massa de concreto.

Conhecendo-se esta estrutura de poros é possível prever o tempo que os agentes agressivos levarão para alcançar a armadura, desencadeando assim o inicio do processo de corrosão.

WIRQUIN et all. (2000)[121] realizaram um estudo de absorção d'água por capilaridade[122], em concretos com agregados reciclados, cujas principais

---

[121] WIRQUIN, E. ; HAHDJEVA-ZAHAARIEVA, R.; BUYLE-BODIN F.; Utilisation de l'absortion d´eau des bétons comme critères de leur durabilité- Aplication aux bétons de granulats recyclés**.** **Materials and Strucutres/ materiaux et Constructions.** v.33, p. 403-408, julho de 2000.

[122] Este estudo está sendo citado mesmo não tratando da absorção por imersão, uma vez que a absorção por capilaridade também representa a estrutura de poros do concreto e o como se busca conhecer a influência dos agregados reciclados na estrutura de poros do concreto, julgou-

conclusões foram que: *o processo de absorção de água e nos concretos com agregados reciclados e nos concretos com agregados naturais é análogo e obedecem às mesmas leis.*

Todavia, os concretos com agregados reciclados se caracterizam por uma maior capacidade de absorção de água. Fato que pode ser atribuído ao maior diâmetro dos poros capilares maiores e à proporção em volume mais importante dos capilares de menor diâmetro, o que os tornará a priori mais suscetíveis à ação dos agentes agressivos.

O estudo da influência dos parâmetros que atuam sobre a absorção deixou evidente a importância da relação a/c e da areia reciclada. A cura também apresenta certa influência, mas sensivelmente, menos importante.[123]

Todavia, a cura prolongada em água é favorável à hidratação e colmatação progressiva da porosidade inicial dos concretos de agregados reciclados.

No experimento desenvolvido para dar embasamento técnico a tese que está sendo apresentada, determinou-se a absorção de água e o índice de vazios com o intuito de avaliar a durabilidade de um concreto, como indicado na Tabela 1-1, item 1.4.

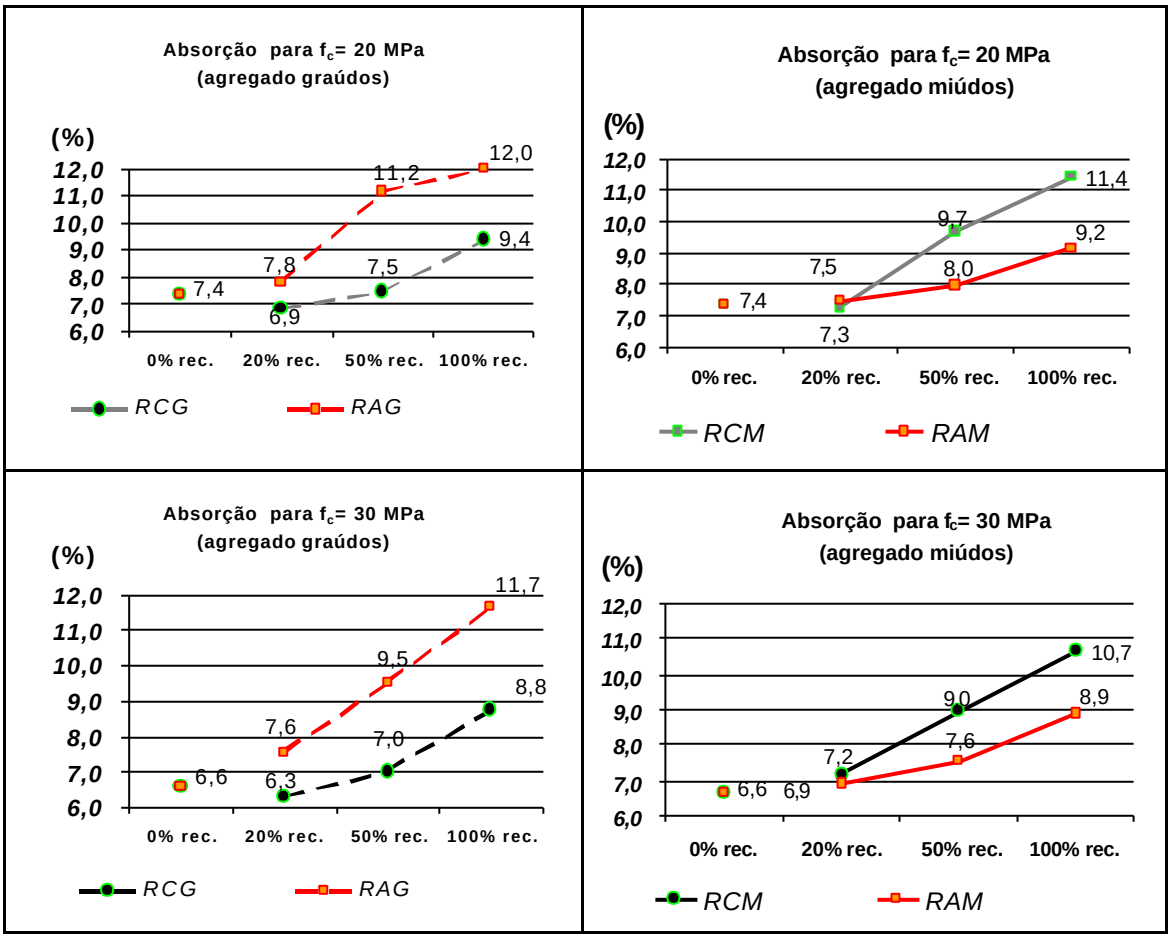
Comparando-se os valores apresentados na referida tabela aos valores obtidos e apresentados a seguir na Figura 4-1, pode se concluir que os concretos produzidos com agregados naturais e reciclados, projetados para resistências de 20, 30 e 40 MPa respectivamente, em termos de durabilidade devem ser considerados como, concretos deficientes a normais, uma vez que os resultados obtidos, variam entre 5,9% e 12%, cabe lembrar que de acordo com HELENE (1993)[40], os concretos para serem considerados duráveis, quando analisados pela critério da resistência à compressão, teriam que ser dosados para resistências superiores a 35 MPa, uma vez que estão sendo analisados os concretos entre 20 e 40 MPa por serem os concretos mais utilizados nas obras nacionais, se torna extremamente delicado pretender que a maioria dos

---

se que este trabalho seria pertinente já que contribui para o desenvolvimento do raciocínio desenvolvido no texto.

concretos nacionais, assim como os concretos estudados no desenvolvimento desta metodologia sejam considerados duráveis de acordo com sua classificação, independentemente da qualidade do agregado utilizado na sua produção.

A seguir apresentam-se os diagramas que mostram as linhas de tendência da absorção de água e do índice de vazios em função do teor de agregado reciclados utilizados na produção de concretos.



[123] No estudo experimental desenvolvido por este pesquisador, a relação a/c não mostrou influência preponderante sobre o tipo de agregado reciclado utilizado no preparo do concreto.

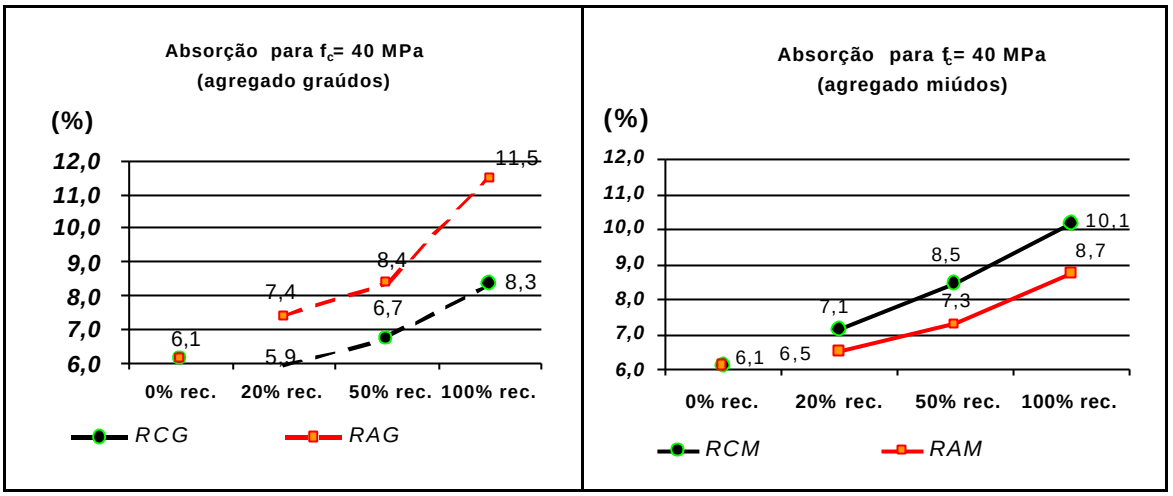
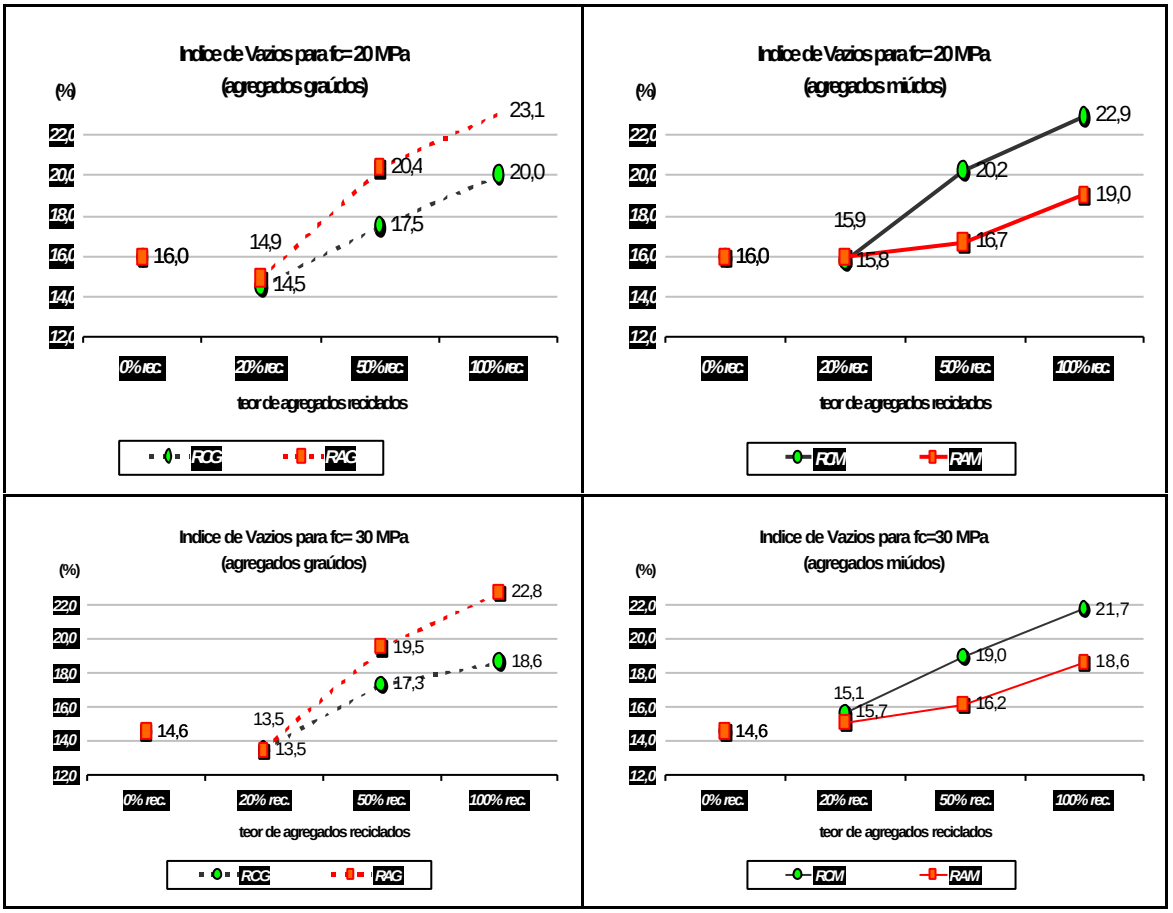


Figura 4-1 Variação da absorção de água por imersão em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30 e 40 MPa.

Analisando-se os diagramas das figuras Figura 4-2 e Figura 4-3 mais os digramas de dosagem da absorção por imersão e índice de vazios, do anexo II, percebe-se que a absorção total variou mais em função do tipo de agregado utilizado do que em função da relação a/c adotada.



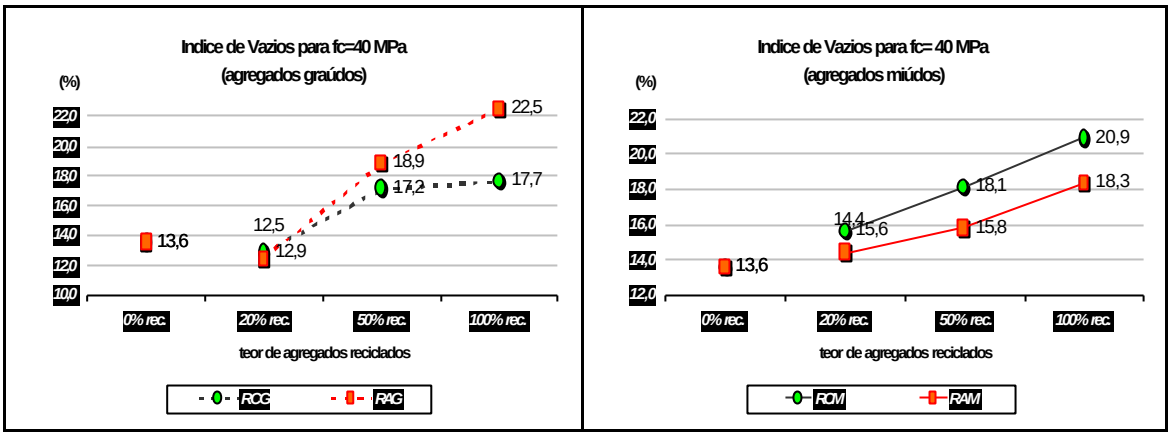


Figura 4-2 Variação do índice de vazios em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30 e 40 MPa.

Analisando-se o comportamento do concreto de referência, quando a resistência deste passa de 20 para 40MPa, a absorção por imersão passa de 7,4 para 6,1 % e o índice de vazios de 16,0 para 13,6%. Todavia, a medida que o agregado natural for substituído por 100% de agregado reciclado, dependendo do agregado escolhido, o valor da absorção pode aumentar em mais de 60 % em relação ao concreto de referência.

A tendência da absorção por imersão e do índices de vazios para concretos de 20 a 40 MPa está representada graficamente nos diagramas das Figura 4-3 e Figura 4-4.

É importante salientar que com a substituição de 50 % do agregado miúdo natural por material reciclado RAM, diferentemente do que se constatou quando foram analisadas outras propriedades, não se observou um ponto de inflexão, mas ao invés disso, foram observados valores crescentes em função de teores crescentes de material reciclado.

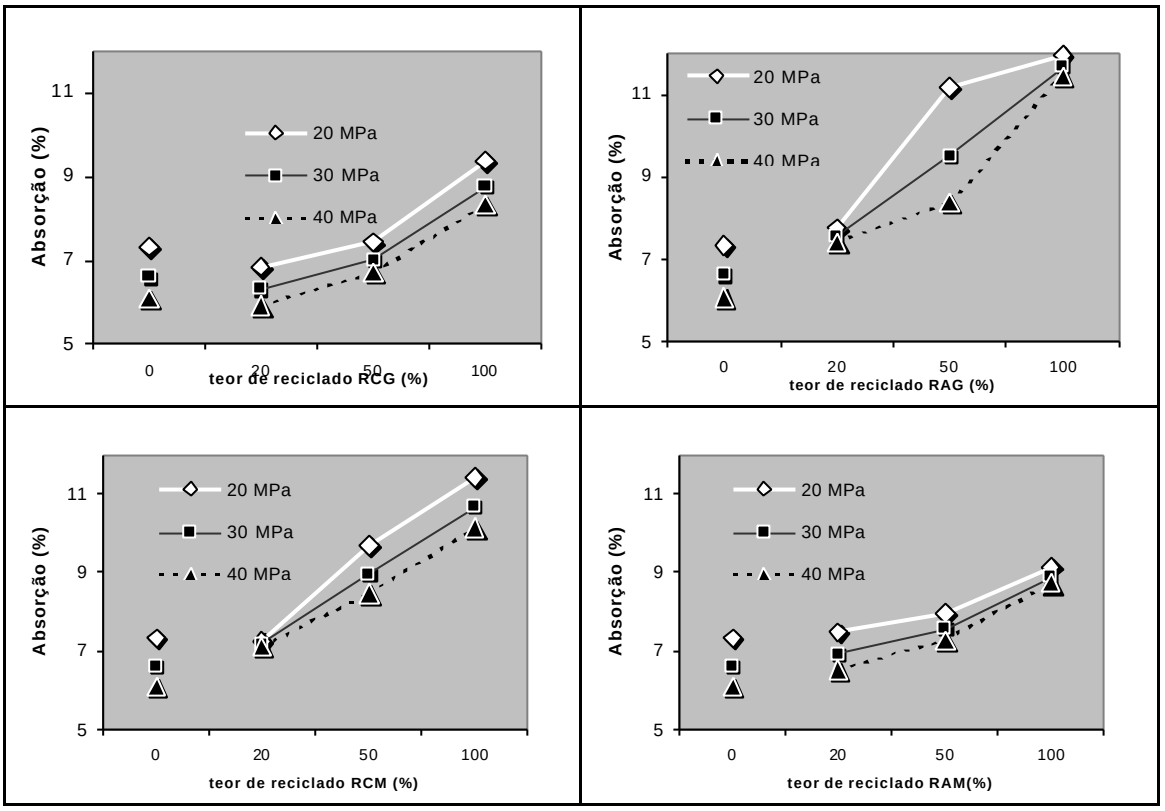


Figura 4-3 Variação da absorção de água em função da classe do concreto e do teor de material reciclado

Uma vez que duas variáveis estão envolvidas, volume de poros e absorção do agregado reciclado, será interessante procurar entender a influência de cada uma delas.

Tudo indica que o aumento da resistência de 20 para 40 MPa, que implica num maior consumo de cimento e maior volume de pasta por m³, desde que mantida a consistência, acaba formando maior número de poros por m³ e estes poros embora em maior número absorvem menos água individualmente e assim o efeito esperado, que seria uma redução sensível da absorção de água em função da melhoria da qualidade da pasta, não pode ser observado.

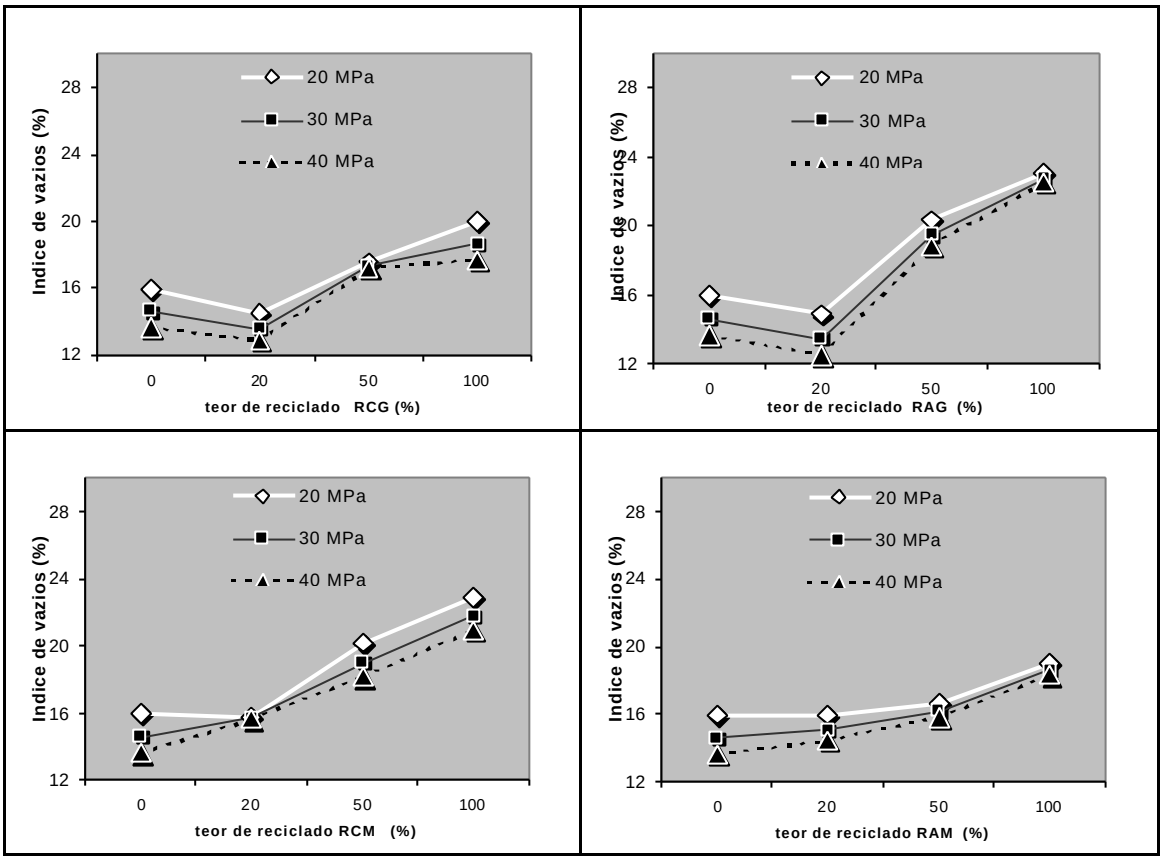


Figura 4-4 Variação do índice de vazios em função da classe do concreto e do teor de material reciclado

Quando os agregados naturais são substituídos por reciclados a água absorvida pela pasta que chegará até os reciclados e é facilmente absorvida por estes, devido sua maior absorção, assim a pasta continua absorvendo mais água.

Para comprovar esta afirmação seria necessário garantirmos uma pasta de mesma qualidade para todos os concretos, para isso foram adotadas três relações a/c 0,52, 0,68 e 0,85 e a partir delas, calculou-se através do modelo matemático desenvolvido, o volume de pasta, a absorção por imersão e o índice de vazios de cada concreto os resultados encontrados são apresentados na Tabela 4-1.

De acordo com o conhecimento atual a absorção acontece muito mais pela pasta do que pelo agregado, uma vez que os agregados naturais são menos porosos que a pasta de cimento, e que os agregados reciclados.

Analisando-se os valores da primeira coluna da Tabela 4-1, percebe-se que a medida que se reduz o valor de a/c o volume de pasta também reduz, mas então como explicar que a absorção aumenta?

Tabela 4-1 Comparação entre volume de pasta, absorção indicie de vazios em função do agregado utilizado

	volume de pasta l/m³			Absorção (%)			Indice de Vazios (%)		
a/c	0,52	0,68	0,85	0,52	0,68	0,85	0,52	0,68	0,85
REFER.	206,6	199,6	176,1	6,1	6,6	7,2	13,6	14,6	15,6
20-80 RCC	210,1	215,2	209,4	6,0	6,5	7,1	12,9	13,8	14,8
50-50 RCC	218,6	213,8	195,9	6,7	7,1	7,5	17,2	17,4	17,5
100-0 RCC	219,3	211,8	190,6	8,2	8,7	9,2	17,4	18,4	19,5
20-80 RAG	237,7	228,8	206,9	7,4	7,5	7,7	12,6	13,4	14,3
50-50 RAG	259,6	264,0	256,0	8,9	9,9	10,9	19,1	19,7	20,2
100-0 RAG	300,2	303,2	297,8	11,6	11,8	11,9	22,7	22,8	23,0
20-80 RCN	234,3	213,0	180,3	7,1	7,2	7,3	15,6	15,7	15,8
50-50 RCN	231,9	224,6	208,5	8,5	9,0	9,5	18,1	19,0	19,8
100-0 RCN	250,1	248,9	235,3	10,1	10,7	11,3	20,8	21,7	22,7
20-80 RAN	190,4	184,0	162,5	6,6	7,0	7,5	14,5	15,2	15,9
50-50 RAN	231,2	222,0	199,6	7,2	7,5	7,8	15,7	16,1	16,5
100-0 RAN	256,2	255,7	245,1	8,7	8,8	9,0	18,3	18,5	18,7

Tabela 4-2 Comparação entre volume de pasta, absorção indicie de vazios em função do agregado utilizado, valores relativos.

	volume de pasta l/m³			Absorção (%)			Indice de Vazios (%)		
a/c	0,52	0,68	0,85	0,52	0,68	0,85	0,52	0,68	0,85
REFER.	1,00	0,97	0,85	1,00	1,09	1,17	1,00	1,07	1,14
20-80 RCC	1,02	1,04	1,01	0,98	1,06	1,16	0,95	1,02	1,09
50-50 RCC	1,06	1,03	0,95	1,10	1,16	1,22	1,26	1,28	1,29
100-0 RCC	1,06	1,02	0,92	1,35	1,42	1,50	1,28	1,36	1,43
20-80 RAG	1,15	1,11	1,00	1,22	1,24	1,26	0,93	0,99	1,05
50-50 RAG	1,26	1,28	1,24	1,46	1,62	1,79	1,41	1,45	1,49
100-0 RAG	1,45	1,47	1,44	1,91	1,93	1,96	1,67	1,68	1,69
20-80 RCN	1,13	1,03	0,87	1,16	1,18	1,19	1,14	1,15	1,16
50-50 RCN	1,12	1,09	1,01	1,39	1,47	1,55	1,33	1,39	1,46
100-0 RCN	1,21	1,21	1,14	1,65	1,75	1,86	1,53	1,60	1,67
20-80 RAN	0,92	0,89	0,79	1,08	1,15	1,22	1,07	1,12	1,17
50-50 RAN	1,12	1,07	0,97	1,18	1,23	1,28	1,16	1,18	1,21
100-0 RAN	1,24	1,24	1,19	1,42	1,45	1,47	1,34	1,36	1,38

Segundo a literatura vigente, os poros da pasta com a/c 0=52 embora em maior número que os poros da pasta com a/c = 0,85, estão menos interligados entre si, dificultando assim a absorção total de água, por isso mesmo com a

redução do volume de pasta, observa-se um aumento da absorção, bem como do índice de vazios.

Também deve ser observado, analisando-se os dados da Tabela 4-2 o fato de que a redução do volume de pasta não é proporcional a absorção por imersão e ao índice de vazios, pois o que acontece com os agregados RCG, RCM e RAM, para uma variação entre 2 a 20% do volume de pasta a variação da absorção e do índice de vazios apresentam um aumento de até 50% para os agregados reciclados miúdos RAM e RCM, tal fato demonstra que quando se trata de agregados reciclados eles também influem diretamente na absorção e na formação do índice de vazios, ou seja, esta propriedade não depende exclusivamente da pasta de cimento, como acontece no caso dos agregados naturais.

No caso dos agregados RCG mesmo não havendo demanda maior da quantidade de pasta com o teor crescente de agregados reciclados há um aumento da absorção, assim como, do índice de vazios com o acréscimo do teor de reciclados. Fato este que também comprova a influência dos agregados reciclados na absorção e no índice de vazios do concreto.

Na seqüência serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios acelerados de carbonatação.

Agora fica a pergunta: carbonatação, absorção de água, e o índice de vazios estão diretamente inter-relacionadas?

Para responder a esta pergunta é importante analisar a forma pela qual a carbonatação se desenvolverá nos concretos com agregados reciclados, assunto a ser tratado no próximo item.

4.2.5 Carbonatação

Antes de iniciar a análise dos resultados obtidos julgou-se importante rever o conceito de como avança a frente carbonatação. De acordo com LIMA, (1999)[124], o concreto é um material poroso e o CO_2 do ar penetra por estes poros

---

[124] LIMA, L. A. De; Hormigones com escorias de horno elétrico como áridos: propriedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Barcelona, 1999.p. 243. tese (Doutorado) - Escola

até o seu interior, ali se dissolve na presença de água reagindo inicialmente com os hidróxidos de sódio e de potássio, para depois reagir com o hidróxido de cálcio de acordo com as reações apresentadas no item 1.5.1, ou seja, a carbonatação ocorre preponderante por um mecanismo de difusão do CO_2, seguido de uma reação química entre o CO_2 dissolvido em água e os álcalis do cimento. Esse conceito será utilizado no final deste item para análise dos resultados obtidos.

Não é possível realizar a comparação pura e simples de vários resultados produzidos por grande número de pesquisadores nacionais e estrangeiros, sobre o assunto, uma vez que tais resultados foram obtidos em condições experimentais diferentes, todavia, dentre os trabalhos localizados, procurou-se relacionar os de condições equivalentes a este, ou trabalhos com informações relevantes que de alguma forma pudesse agregar valor ao conhecimento técnico atual.

HAMADA (1969)[125] sugere que os ensaios acelerados de carbonatação apresentam uma clara correlação com os resultados obtidos em condições normais de exposição e NISHER (1984)[126]que afirma que o efeito de uma elevada concentração de CO_2 é muito maior em concretos com resistência inferior a 30 MPa.

Mas apesar de citar que existe uma relação entre os ensaios acelerados e os obtidos em condições normais (exposição ao ar na atmosfera do laboratório) apenas um trabalho que descrevesse essa correlação foi localizado, e será citado adiante.

Segundo BARRA (1996)[87], que usou agregados reciclados, obteve profundidades de carbonatação distintas dependendo da ordem de lançamento dos materiais na betoneira e justificou as diferenças encontradas entre profundidades de carbonatação, através da elevada absorção dos agregados

---

Tècnica Superior d' Engiinyers de Camins, Canals i Ports, Universidade Politécnica de Catalunya.

[125] HAMADA, M. Neutralization of concrete and corrosion of reinforcing steel, In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CHEMISTRY OF CEMENT. 5 **Proceedings** 1968 II-3, p.343-382

[126] NISCHER, P; Influence of concrete quality and environment on carbonation. In: RILEM SEMINAR, Hanover **Proceedings** 1984 p.231-238.

reciclados. A explicação para o fato seria que a mistura inicial do agregado graúdo com a água obriga o cimento ao se hidratar a entrar em contato com uma superfície cuja textura superficial é mais porosa, portanto condiciona maior quantidade de grãos de cimento a se manterem aderidos a ela durante o processo de amassamento.

A presença de água nos poros superficiais, assim como a concentração dos grãos de cimento nesta superfície, permite a penetração de mais pasta pelos poros. Conseqüentemente a pasta e o agregado desenvolveram alta aderência na interface.

A concentração de cimento em volta do agregado contribuirá para que a argamassa ao seu redor seja mais rica e, portanto menos porosa, tal fato levará à formação de uma camada de blindagem em volta do agregado, camada esta, que reduz a permeabilidade, dificultando o avanço da frente de carbonatação.

Outro fato salientado por BARRA é que a concentração de cimento em volta do agregado elevaria a reserva alcalina dificultando assim o avanço da frente de carbonatação.

Neste experimento a ordem de lançamento dos materiais para confecção do concreto foi sempre a mesma, agregado graúdo ½ da água agregado miúdo, algomerante e restante da água, as diferenças referentes da avanço da frente de carbonatação devem ser atribuída exclusivamente ao agregado utilizado e assim poderia ser explicado o melhor desempenho dos concretos produzidos com agregados reciclados.

Através da analise dos diagramas de dosagem apresentados nas figuras Figura 4-4 a Figura 4-6, percebe-se que no experimento realizado, chegou-se a uma forte relação linear entre eCO_2 e a /c.

Fato que está de acordo com os resultados encontrados por. ANDRADE (1992)[127] e $_{CO2}$ = 50*a/c -15 e ALMEIDA (1992).[128]... e $_{CO2}$ =.33*a/c - 2,3.

---

[127] ANDRADE, P. M del C. **Manual para diagnóstico de obra deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação CARMONA, A. e HELENE, P. São Paulo PINI 1992.

[128] ALMEIDA, I. R. **Carbonation of high strength concrete with chemical and mineral admixtures**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL CONCRETE, 4., Istanbul, 1992. Proceedings: Supplementary papers. Ottawa, CANMET, ACI 1992. p. 735-48.

Na Tabela 4-1, comparam-se os resultados obtidos por BARRA e este pesquisador, embora as condições do experimento de BARRA foram diferentes, foram comparados os resultados, uma vez que a idade dos ensaios foi a mesma.

Tabela 4-1 Resultados comparativos de ensaios acelerados profundidades de carbonatação em (mm)

Traço		14 dias		28 dias		Ensaio acelerado de carbonatação	
		eCO_2 (mm)		eCO_2 (mm)			
		BARRA	LEVY	BARRA	LEVY	BARRA	LEVY
1:6,5	1:6	9,00	7,2	11,00	7,7	REF	REF
		8,00	5,3	11,00	6,0	Recicl.100%	RCG100%
1:5	1:4,5	4,5	2,7	5,00	3,2	REF	REF
		6,0	3,6	5,5	3,7	Recicl.100%	RCG 100%
1:3,5	1:3	-	2,0	-	2,5	REF.	REF
			1,8		2,0	Recicl.100%	RCG 100%

As diferenças constatadas entre os trabalhos são perfeitamente justificáveis, uma vez que os traços não são exatamente os mesmos o cimento é diferente e a qualidade dos agregados também não foi a mesma.

Num trabalho mais recente, DUNSTER, (2000)[129] demonstra que não é sensível o efeito do acréscimo do teor de CO_2 além de 4% num ensaio acelerado de carbonatação, os concretos ensaiados foram preparados com diferentes adições e submetidos 20º C e UR 65%, é importante lembrar que estas condições são muito similares às adotadas no trabalho experimental realizado nesta tese. Os valores por ele obtidos oscilam entre 6 a 15 mm,ou seja, estão de acordo com os resultados obtidos para os concretos ensaiados.

Na seqüência apresenta-se a interpretação dos resultados obtido na parte experimental da tese. Inicialmente, deve ser observado o fato da profundidade

[129] DUNSTER A.M., **Accelerated carbonation testing of concrete** Information papers of the Building Research Establishment 2000 p. 11

de carbonatação ter apresentado uma relação linear com a relação a/c nos diagramas de dosagem apresentados no anexo II.

Posteriormente, observando-se os gráficos da Figura 4-1 percebe-se que: para os concretos de 20 e 30 MPa a profundidade de carbonatação foi menor do que a obtida no concreto de referência do que a obtida nos concretos com a utilização de agregados reciclados, e quando foi especificado um concreto de 40 MPa a diferença se tornou ainda menor, comprovando o fato de que a medida que se reduz a/c, a qualidade bem como a quantidade dos agregados reciclados passa a exercer uma influência cada vez menos significativa na profundidade de carbonatação, passando a prevalecer a influência exercida pela da qualidade da pasta.

Uma primeira análise dos demais gráficos da figura em questão poderia levar a conclusão errônea de que os agregados graúdos de alvenaria são recomendados para concretos resistentes à carbonatação, todavia não pode ser esquecido o fato de que concretos de 30 MPa, com agregados RAG, exigiram um consumo de cimento superior a 500 kg/m³ e com este consumo qualquer concreto seria resistente à carbonatação.

Utilizando-se agregados miúdos de alvenaria RAM, foi obtido um valor ótimo quando, se substituiu 50% do agregado miúdo natural por reciclado, tal fato é digno de nota, pois para concretos de 30 MPa, comparando-se o consumo e a profundidade de carbonatação do concreto de referência e o do concreto preparado com agregado miúdo RAM 50-50%, percebe-se que um acréscimo de 3,1 % no consumo de cimento conduz a redução de 33% na profundidade de carbonatação.

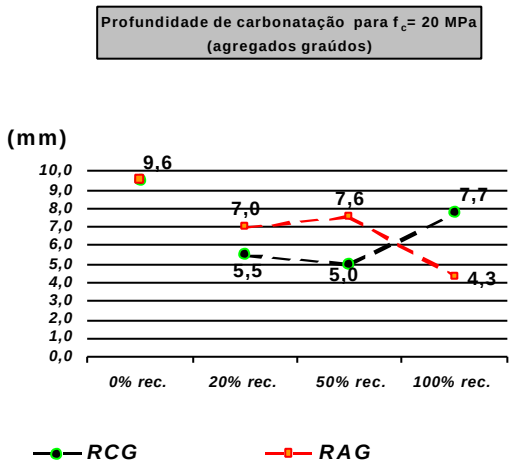
Agora o leitor poderia perguntar: mas se aumentarmos em 2% o consumo de cimento do concreto de referência a profundidade de carbonatação também sofreria redução?

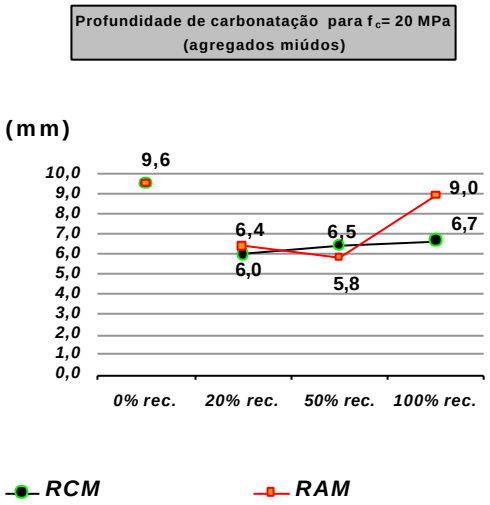
Para redimir esta dúvida calculou-se o que aconteceria aumentando-se 3,1% o consumo de cimento para o concreto de referência e qual seria o consumo necessário do concreto de referência para apresentar uma redução da profundidade de carbonatação de 33%, todos estes cálculos foram desenvolvidos através das equações obtidas pelos diagramas de dosagem, os resultados foram sintetizados na Tabela 4-2.

- C_{onsumo} = - (ln (m) –2,473)/ 0,0026066
- m = 8.19459 * a/c + -0.0343392
- a/c = (eCO_2+ 4.60395)/15,4891

Tabela 4-2 Incremento do consumo de cimento, para redução da profundidade de carbonatação

Profundidade de carbonatação prevista eCO_2 (mm)	Agregados utilizados no concreto	Consumo de cimento /m³	Redução da profundidade de carbonatação	Acréscimo no consumo de cimento	Categoria do concreto MPa
6,0	REFE.	291	-	-	30,00
5,7	REFE.	300	4%	3,10%	30,84
4,0	RAM 50-50%	300	33%	3,10%	30,00
4,0	REFE.	370	33%	27,15%	37,60





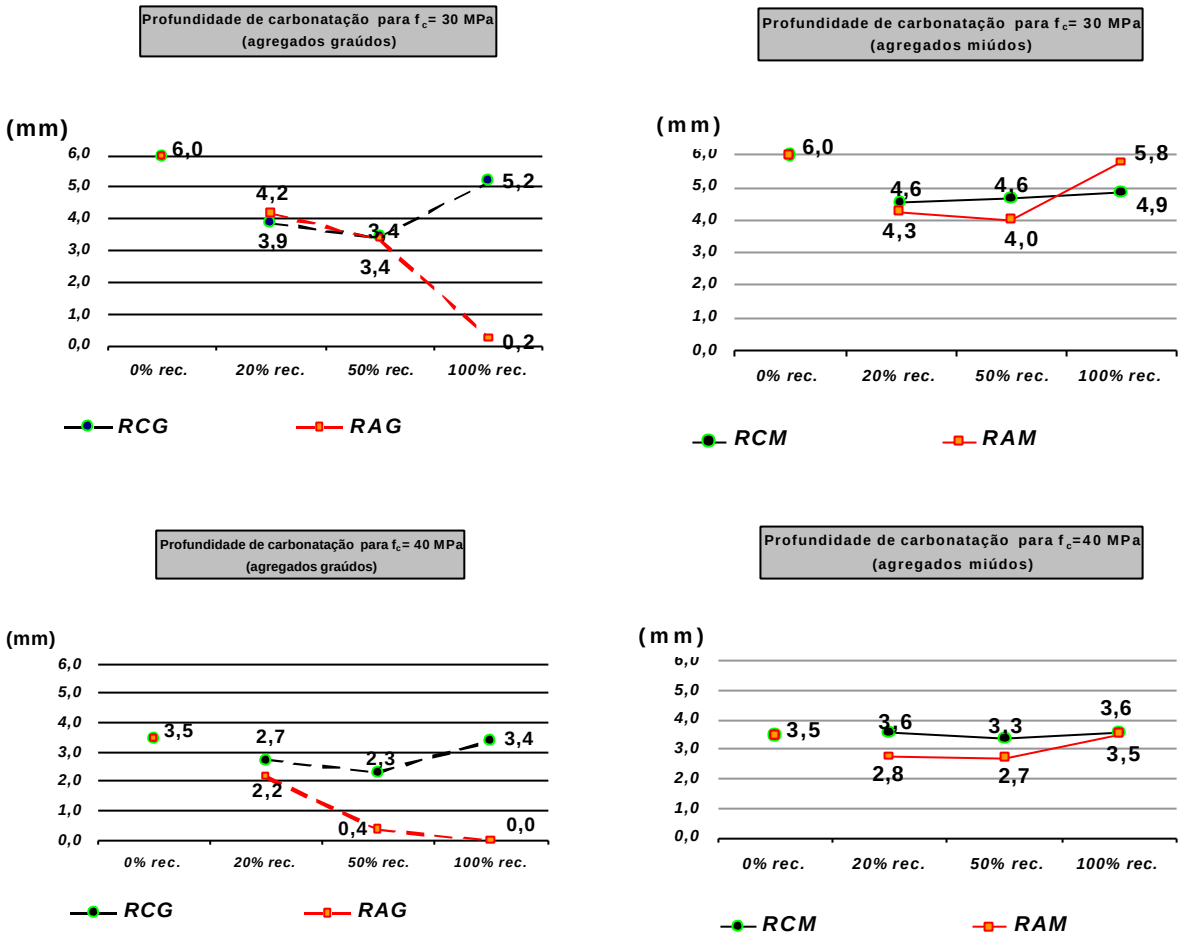


Figura 4-1 Variação da profundidade de carbonatação em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30,40 MPa

Para complementar este item, apresenta-se os gráficos que representam a profundidade de carbonatação em função do teor de reciclados utilizados para os concretos de 20 a 40 MPa

Como foi dito anteriormente os concretos de 40 MPa são os que apresentar menor influência exercida pelo teor crescente de agregados reciclados. Os concretos produzidos com agregados reciclados RAM e RCG apresentam comportamento similar entre si, assim como os concretos produzidos com agregados reciclados.

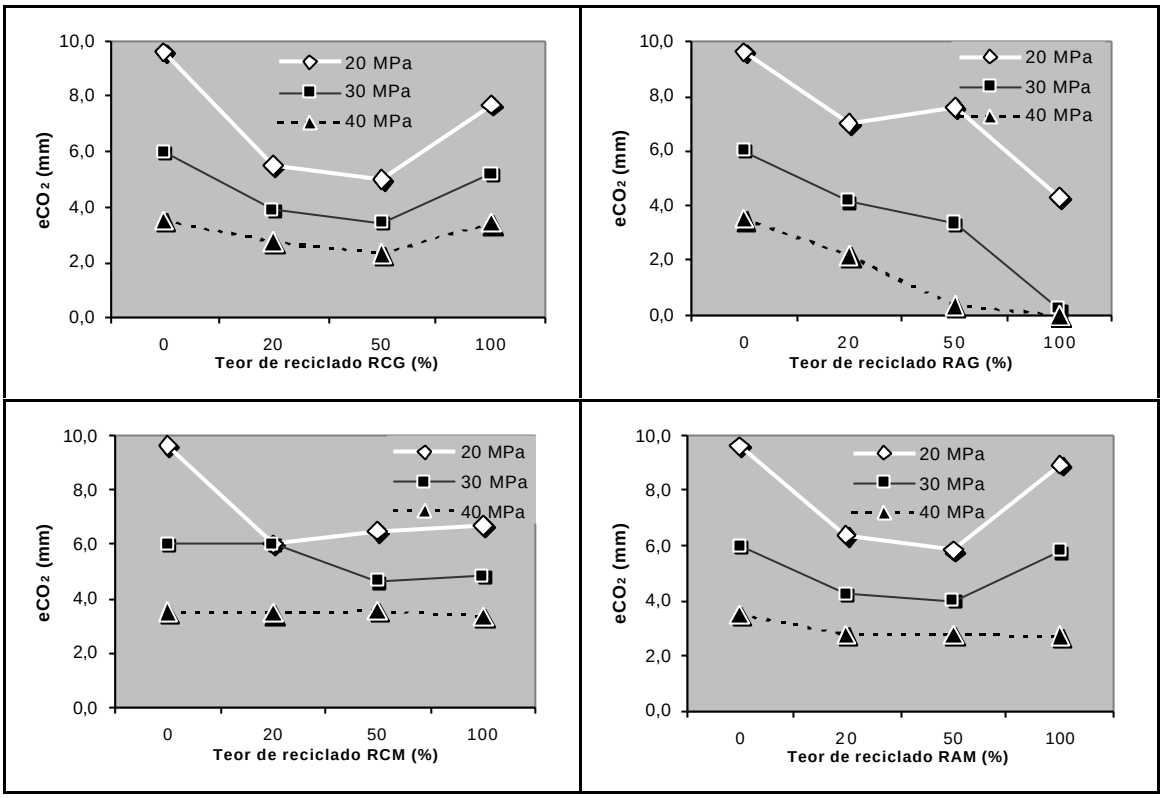


Figura 4-2 Variação da profundidade de carbonatação em função da classe do concreto e do teor de material reciclado

Finalizando-se pode se dizer que desta forma será fácil, em função do agregado escolhido ou da resistência especificada para o concreto, prever a espessura de carbonatação para as condições da câmara onde foi desenvolvido o ensaio.

Porém a grande dificuldade será relacionar a profundidade de carbonatação obtida nas condições da câmara com a profundidade de carbonatação a serem obtidas no meio ambiente em que possa vir a ser inserida a estrutura.

Agora cabe a pergunta: como pode o consumo e a carbonatação passarem por um mínimo, enquanto que a absorção e o índice de vazios são crescentes com o aumento do teor de agregados reciclados RAM?

Através do conhecimento atual seria de se esperar que todas as três propriedades apresentassem a mesma tendência, ou seja, que concretos de maior absorção e maior índice de vazios apresentassem maior profundidade de carbonatação, uma vez que absorção e o índice de vazio (porosidade total)

sempre foram sinônimos de durabilidade. No entanto esse fato não é confirmado pelo modelo matemático adotado, o que significa que os produtos químicos formados nas reações de carbonatação atuam de alguma forma como agentes retardadores da frente de carbonatação independentemente do grau de empacotamento obtido com o tipo de agregado utilizado.

Mediante os resultados obtidos e devido a importância da carbonatação na durabilidade de uma estrutura, será necessário rever a importância atribuída ao fato de que a absorção e a porosidade total são pontos fundamentais para durabilidade de um concreto, pois, o aumento do teor de reciclados pode conduzir simultaneamente ao aumento da absorção de água e redução da frete de carbonatação como exemplificado no gráfico da Figura 4-3 e dependendo do meio ambiente no qual estiver inserida a estrutura, a carbonatação poderá ser mais importante na redução da vida útil.

Para exemplificar o assunto, foram escolhidos os concretos preparados com agregado RAG 50-50%, pois são os que melhor ilustram o comportamento aparentemente contraditório observado.

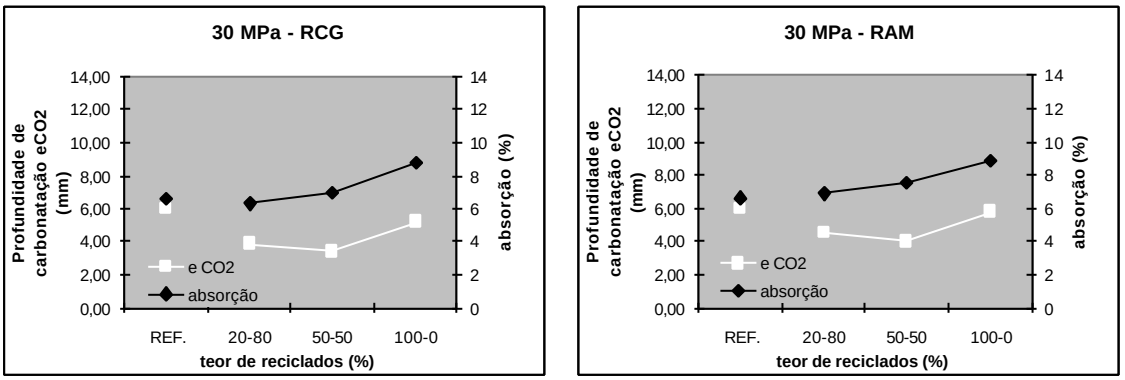


Figura 4-3 Inter-relação entre profundidade de carbonatação e absorção total par os concretos de 30 MPa com agregados RCG 50%-50%e RAM 50%-50%

Na seqüência será tratado o aspecto da velocidade de propagação da frente de carbonatação, ou seja, o coeficiente de difusão do CO_2 no interior da massa de concreto.

4.2.6 Difusão do CO_2 no interior do concreto.

Antes de iniciar a análise dos resultados do coeficiente de difusão, julgou-se importante rever o conceito atual (dezembro 2001) de como o CO_2 se difunde através da massa de concreto. Na Figura 4-1 apresenta-se uma ilustração de como esse fenômeno ocorre, ou seja, através de seus poros capilares de maior diâmetro não preenchidos com água, enquanto que os poros capilares de menor diâmetro preenchidos com água funcionam como uma barreira ao avanço da frete de carbonatação. Uma vez que a difusão na fase líquida e na fase gasosa difere de um fator de 10^4[130] tornará a velocidade de carbonatação altamente influenciada pelo teor de umidade do concreto, que por sua vez dependerá do teor de umidade relativa do ar do ambiente em que esteja inserida a estrutura.

Figura 4-1 Representação esquemática do percurso de difusão do CO_2 no concreto. Canais de transporte do CO_2 são representados como os poros capilares de maior diâmetro, os poros capilares de menor diâmetro preenchidos com água, são indicados como os retardadores do processo de carbonatação (TUUTTI, K; -1982)[130]

Qual seria o tipo de correlação entre k_{CO2} e a/c?

Uma vez que a profundidade de carbonatação (e) apresentou uma correlação linear com a/c, matematicamente é fácil de demonstrar que k_{CO2} também teria que apresentar uma correlação linear com a/c, uma vez que:

$$e = k_{CO2} \sqrt{t}$$

$$e = m \bullet a/c + n$$

$$k_{CO2} = (m \bullet a/c + n) / \sqrt{t}$$

---

[130] TUUTTI, K.; **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and concrete Research Institute. 1982 p 30

onde: m e n são constantes

Portanto para um determinado instante t, a equação de k_{CO2} em função de a/c será a equação de uma reta.

Determinou-se o coeficiente de difusão pela declividade da reta que melhor se adequou aos três pontos: origem (0:0) e valores da profundidade de carbonatação encontrados aos 14 e 28 dias.

Assim foram obtidos os valores pontuais que representam o coeficiente de difusão para cada um dos concretos ensaiados, com esses valores foram construídos os diagramas de dosagem apresentados no Anexo II, e a partir daí adotou-se o mesmo procedimento aplicado às outras propriedades, ou seja, foram construídos os diagramas das linhas de tendência que permitiram observar o comportamento da propriedade em função do teor de agregado reciclado.

Analisando-se os dados da linha de tendência apresentados nos gráfico da Figura 4-2, outra vez se confirma o fato de que a influência exercida pela relação a/c é preponderante sobre o a influência exercida pelo teor de agregados utilizados.

É fácil perceber que ao se passar de um concreto de 20 MPa para um de 40 MPa, independentemente do concreto utilizado, o coeficiente K_{CO2} tem um acréscimo de mais de 60% enquanto que se for substituído o agregado natural por reciclado de qualquer tipo até a proporção de 100% a variação máxima constatada do coeficiente K_{CO2}, estará em torno de 36% no caso dos concretos de menor resistência (20 MPa), todavia no caso dos concretos de maior resistência (40 MPa) e exeqüíveis[131], essa diferença não ultrapassará a casa dos 14%

---

[131] Entenda-se por concretos exeqüíveis os concretos que não apresentaram consumo superior a 600 kg de cimento por m³. Não deve ser esquecido o fato de que para produção de concreto com 40 MPa com agregado RAG 100% o modelo aplicado apresenta uma expectativa de consumo superior a 850 kg de cimento por m³, esse concreto foi considerado inexeqüível, todavia ainda de acordo como o resultados esperados através da aplicação do modelo matemático o concreto em questão apresentaria um coeficiente k_{CO2} próximo de zero. Deve se ter em mente que a reserva alcalina neste caso seria mais elevada do que nos outros concretos, tal fato reforça a idéia que os produtos da reação dos álcalis com o CO_2 forma produtos que obstruem os poros e assim dificultam a difusão do CO_2 .

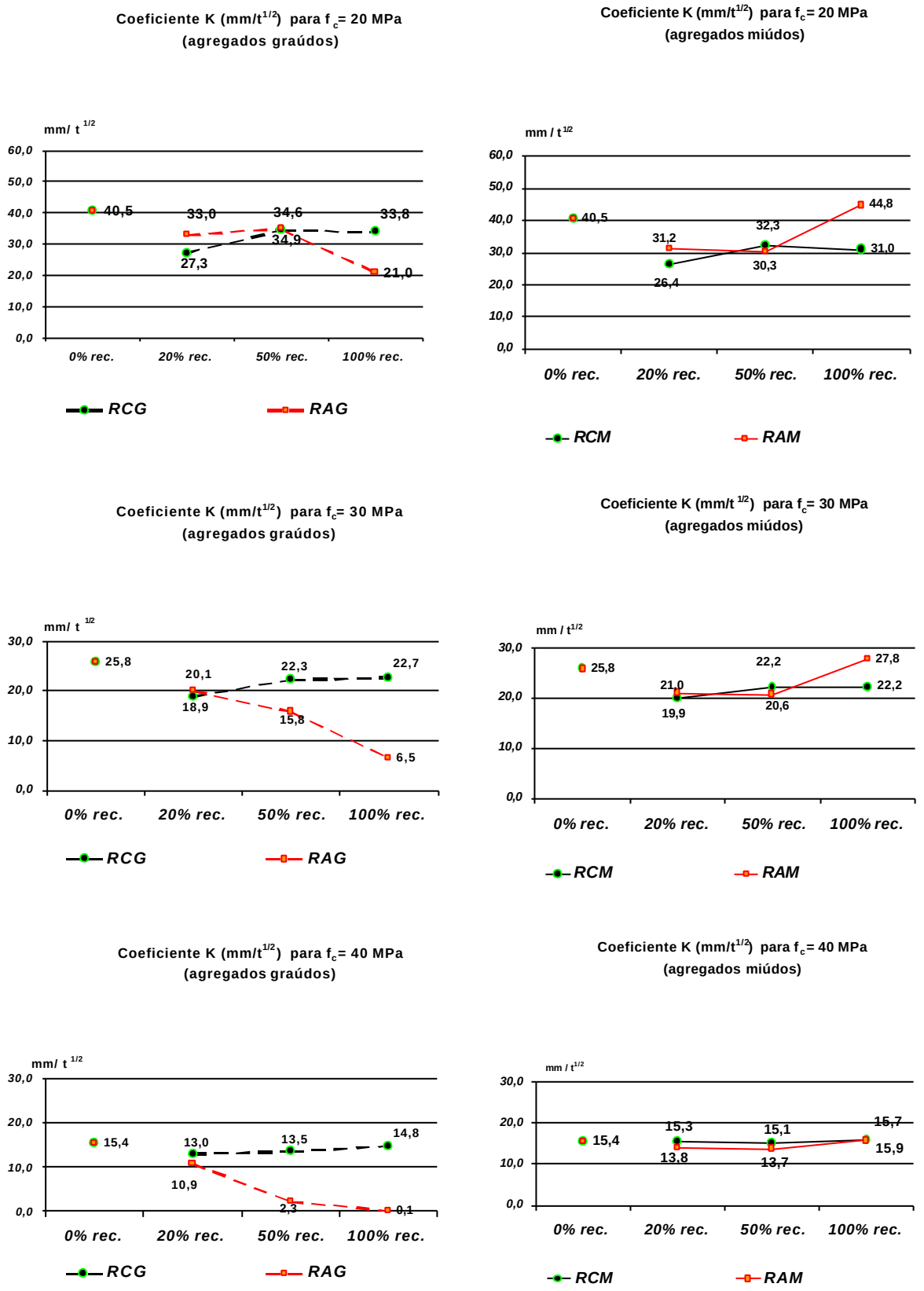


Figura 4-2 Variação do coeficiente de difusão da carbonatação em função do teor de agregados reciclados para concretos de 20,30,40 MPa

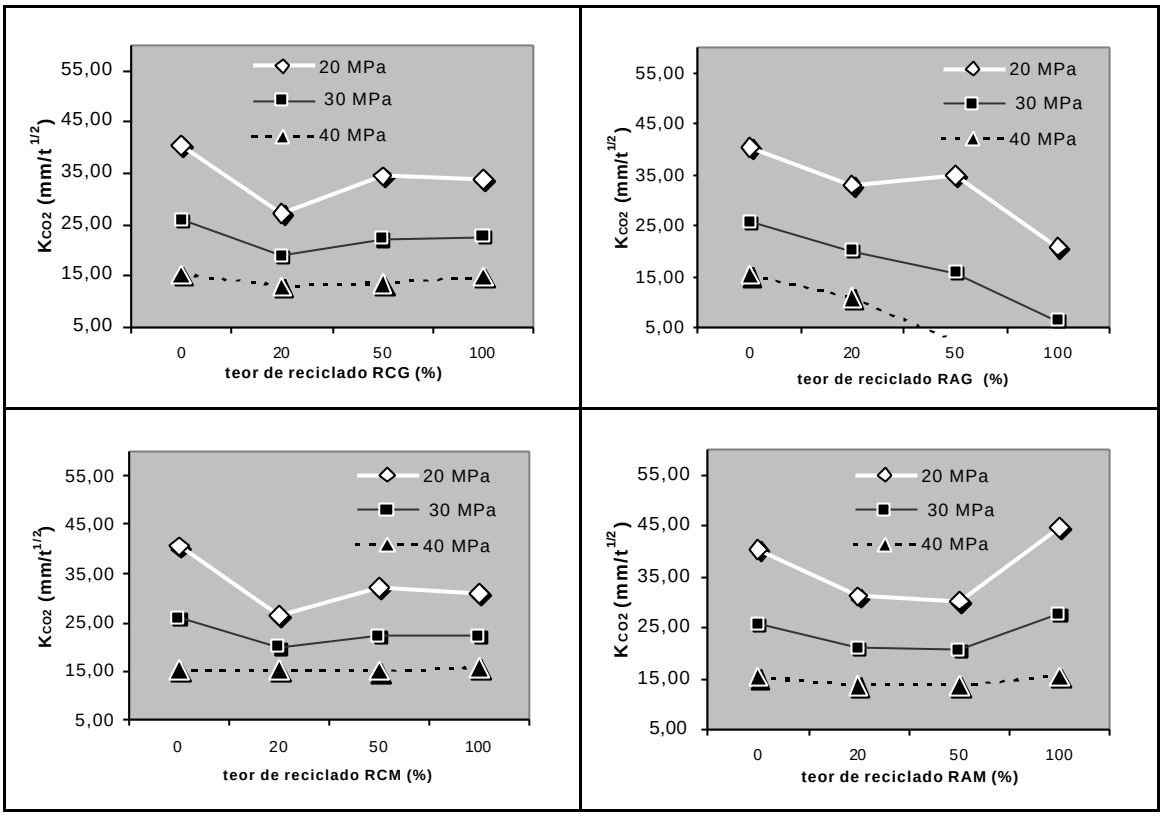


Figura 4-3 Variação do coeficiente de difusão do CO_2 para as classes de concreto e em função do teor de material reciclado

Ao analisar os resultados obtidos para o coeficiente de difusão do CO_2, constatou-se a repetição da tendência observada no item anterior 4.2.5 quando se pesquisou a frente de carbonatação, ou seja, a influência do agregado reciclado é muito menor do que a da qualidade da pasta, do mesmo modo, a difusão do CO_2, também foi menos suscetível ao tipo de agregado utilizado do que à relação água/cimento, isso comprova a teoria de que a reserva alcalina tem uma forte influência na velocidade da frente de carbonatação, ou seja, no coeficiente k_{CO2}.

Quando foram utilizados os agregados graúdos reciclados ocorreram alterações dos valores do coeficiente K_{CO2} em função do tipo de agregado, sim, mas as que ocorreram em função da categoria do concreto utilizado foram mais significativas, como pode ser observado através dos respectivos diagramas da linha de tendência.

É importante observar, que como no caso da carbonatação, à medida que se trabalha com uma relação a/c mais elevada o tipo de agregado utilizado apresentará influência mais acentuada sobre o coeficiente de difusão do CO_2.

Conhecer ou poder prever a velocidade com que a frente de carbonatação avançará no interior de um concreto contribuirá para solução da determinação da espessura de cobrimento, evidentemente que realizar ensaios em condições de exposição natural demandaria um período de tempo extremamente longo, fato que não condiz com a realidade de um obra que na maioria das vezes, necessita ser executada rapidamente, mas porque não realizar ensaios em câmara de carbonatação e extrapolar esses resultados para as condições ambientais na qual o concreto estiver inserido?

Claro que seria a solução, mas como relacionar o tempo de exposição na câmara com o tempo de exposição na atmosfera?

Utilizando-se o modelo tradicionalmente adotado para estudo da difusão do CO_2, "$\mathbf{e = k_{CO2} \cdot \sqrt{t}}$" determina-se qual a relação entre os tempos necessários para que profundidade de carbonatação obtida na câmara e na atmosfera sejam iguais, sendo necessário para isso estimar o valor de k_{CO2} quando o concreto estiver inserido na atmosfera. Procedimento adotado utilizando-se os valores apresentados por HELENE (1993)[40] indicados na Tabela 4-1.

Já na Tabela 4-14 são apresentadas as relações entre tempos de permanecia na câmara e tempo de exposição à atmosfera, obtidas através do procedimento descrito, para os concretos de referência entre 30 a 40 MPa, a relação foi: 4 semanas de permanência na câmara eqüivalem de 2,5 a 3,5 anos na atmosfera com UR 60-80% e temperatura 25 $\pm$ 5 °C, dependendo do valor de K_{CO2} adotado.

Para elaboração da Tabela 4-14 admitiu-se uma variação de K_{CO2} entre 2,0 a 2,9 para os concretos duráveis, de 3,19 a 5,99 para os concretos normais e de 6,1 a 10,0 para os concretos deficientes.

Para concretos com resistência de 20 MPa constatou-se uma redução no valor desta relação ou seja, as 4 semanas na câmara passam a corresponder a cerca de 2 anos na atmosfera. Este fato significa que a velocidade de difusão do

CO_2 em concretos de menor resistência não tem um incremento tão elevado na câmara quanto na natureza.

Tabela 4-1 Classificação dos concretos com base no coeficiente de carbonatação[132].

Classificação do concreto	K_{CO2}	$f_{ck\ 28}$	Profundidade carbonatada provável eCO_2		
	Exposição ao meio ambiente	Faixas de referência	4 anos	9 anos	16 anos
	mm • ano$^{-½}$	MPa	mm	mm	mm
Durável	≤ 3	35	≤ 6	≤ 9	≤12
Normal	3 a 6	20 a 35	6 a 12	9 a18	12 a 24
Deficiente	≥ 6	< 20	≥ 12	≥ 18	≥ 24

Tabela 4-2 Tempo de equivalência entre câmara e atmosfera para concretos de cimento Portland.

concreto	fck MPa	$K_{CO2câmara}$ mm*ano -1/2	$k_{CO2atmosfera}$ $k_{CO2reduzido}$ mm*ano$^{-1/2}$	$k_{CO2atmosfera}$ $k_{CO2elevado}$ mm*ano$^{-1/2}$	Equivalência do tempo de exposição: 4 semanas na camâra em anos de exposição na atmosfera. (anos)
REFE	40	15,4	2,40	2,90	3,2 → 2,2
RCG50-50	40	13,5	2,10	2,54	3,2 → 2,2
RAM50-50	40	13,2	2,06	2,49	3,2 → 2,2
REFE	30	25,8	4,00	5,99	3,2 → 1,4
RCG50-50	30	22,3	3,46	5,18	3,2 → 1,4
RAM50-50	30	20,6	3,19	4,78	3,2 → 1,4
REFE	20	40,5	8,15	10,00	1,9 → 1,3
RCG50-50	20	34,6	6,96	8,54	1,9 → 1,3
RAM50-50	20	30,3	6,10	7,48	1,9 → 1,3

Para finalizar este item, apresenta-se os resultados de um trabalho experimental no qual foram moldadas diversos concretos e monitoradas as

[132] Estes coeficientes aplicam-se a concretos de cimento Portland comum, submetidos a cura adequada, por mais de cinco dias, para então serem expostos às condições de ambiente com UR de 60 a 80% e temperatura de 20 a 30 ºC.

profundidades de carbonatação de 2 até 4 anos em condições de exposição ao ar, as quais posteriormente foram comparadas à profundidades de carbonatação observadas em ensaios acelerados com 4 semanas de duração, os resultados são apresentados no gráfico da Figura 4-4 .

No trabalho em questão, foram ensaiadas 12 misturas diferentes com relações a/c de 0,55 e 0,70, as adições e as misturas utilizadas no ensaio são apresentadas na Tabela 4-3. Deve ser lembrado como citado no item 4.2.5 que as condições adotadas para realização do ensaio acelerado foram temperatura 20 °C UR = 65 % e concentração de CO_2 de 4% uma vez que DUNSTER observou que a partir desta concentração de CO_a, o efeito sobre o avanço da frete de carbonatação não tem influência significativa.

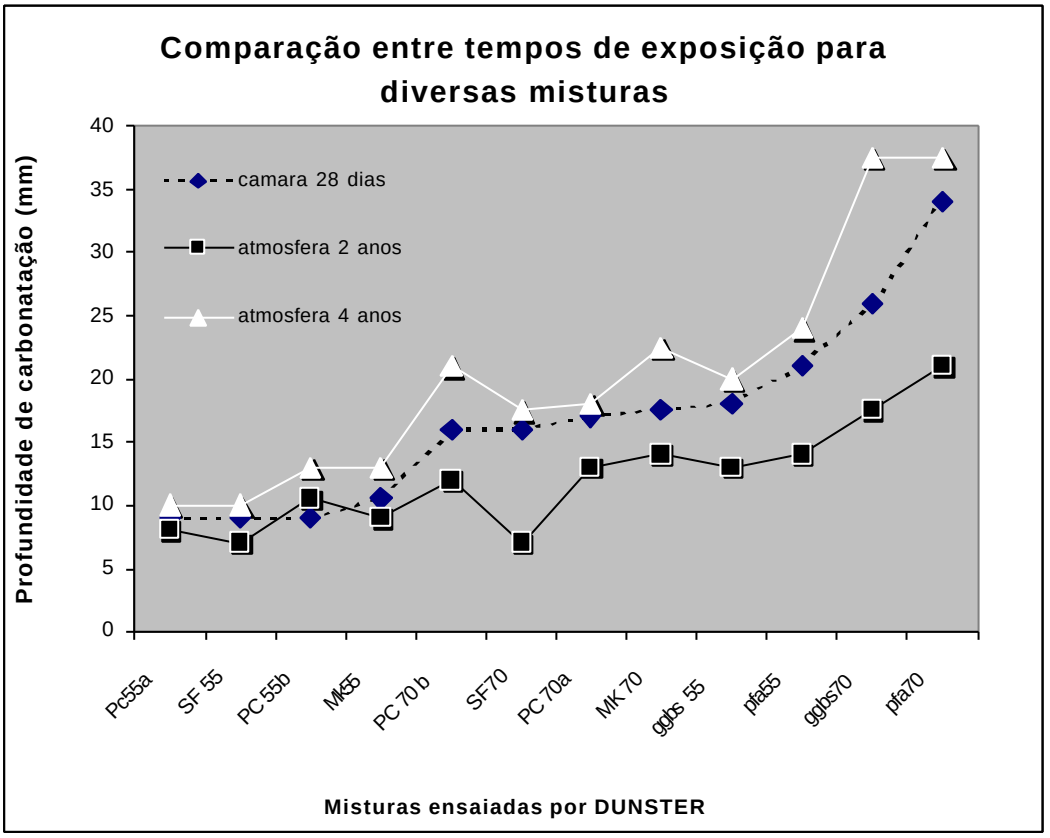


Figura 4-4 Ranking das dos concretos monitorados que apresentaram profundidades crescentes de carbonatação, observações experimentais elaboradas por realizado por DUNSTER – (2000)[129]

Os resultados apresentados na Figura 4-4 estão de acordo com os resultados esperados pelo modelo matemático, utilizado para análise dos resultados experimentais, ou seja, indicam uma equivalência da espessura carbonatada para 4 semanas de ensaio acelerado com 3 a 4 anos de exposição ao ar independente da mistura utilizada.

Está claro que o assunto não se esgota aqui e esta e uma das pesquisas que deve ser aprofundada, uma vez que contribuirá com o desenvolvimento de um tema extremamente necessário ao estudo da durabilidade de concretos, que é a relação entre os resultados obtidos nos ensaios acelerados e as expectativas quanto aos resultados no campo no longo prazo.

Tabela 4-3 Misturas utilizadas no ensaio para comparação de resultados em condições de exposição acelerada e em condições de exposição natural (DUNSTER - 2000)[129]

Tipo de cimento	a/c efetiva	Adição % em massa Cimento + adição	Resistência à compressão MPa	Abreviatura das misturas
Cimento Portland	0,55	0	40	PC 55 a*
	0,55	0	42	PC 55 b*
	0,55	0	39	
Cimento Portland	0,70	0	28	PC70 a
	0,70	0	28,5	PC 70 b
	0,70	0	25,5	
Silica Fume	0,55	10	47,5	SF 55
Metakaolim	0,55	10	47,5	MK55
Ground Granulated blast furnace slag	0,55	50	38,0	ggbs 55
Pulverized fuel ash	0,55	30	28,5	pfa 55
Silica Fume	0,70	10	36,5	SF 70
Metakaolim	0,70	10	33,5	MK 70
Ground Granulated blast furnace slag	0,70	50	28,5	ggbs 70
Pulverized fuel ash	0,70	30	18,5	pfa 70

*a e b são as mesmas misturas preparadas em ocasiões diferentes

Na seqüência, será analisada outra das propriedades consideradas importantes na fundamentação de um estudo sobre durabilidade de concretos, a penetração de cloretos em concretos.

4.2.7 Penetração de íons Cl-

Como explicado inicialmente no item do item 1.7 do CAPÍTULO 1. a penetração de cloretos pode ocorrer de diversas formas, como o objetivo desta tese não foi tentar estabelecer qual o mecanismo da penetração de cloretos, e sim, contribuir com o avanço do conhecimento sobre a durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, procurou-se apenas desenvolver um modelo que pudesse estabelecer qual a facilidade apresentada por diferentes famílias de concreto, 20 a 40 MPa à penetração destes íons.

Diferentemente da absorção, da carbonatação e da difusão do CO_2, a penetração de íons Cl^- é igualmente influenciada pela relação a/c e pelo teor de agregado reciclado, pois quando se passa de um concreto de 20 MPa para um de 40 MPa a concentração de íons Cl^- passa de 0,50% para 0,35%, ou seja, uma redução de 30%, constatada para o concreto de referência.

Quando se aumentou o teor de reciclados de 0 para 100%, a concentração de íons Cl^- passou de 0,38 para 0,60, ou seja uma redução de 36% na situação mais desfavorável constatada, ocorrida para concretos de 40 MPa preparados com agregados RCM.

Os resultados obtidos na camada superficial de 0-1 cm estão indicados nos gráficos da Figura 4-1, e possibilitaram a constatação de que, para teores de até 20% de material reciclado, a granulometria do agregado, assim como sua qualidade levaram a um aumento da concentração de íons Cl^- inferior a 20% em relação ao concreto de referência. Todavia, quando a substituição dos agregados naturais ocorreu em valores superiores a 20%, ocorreu uma tendência crescente da concentração dos íons Cl^-, tendo sido detectado um pico da ordem de 70 a 80%, em relação à concentração do valor encontrado parra o concreto de referência, quando foram utilizados agregados RGG.

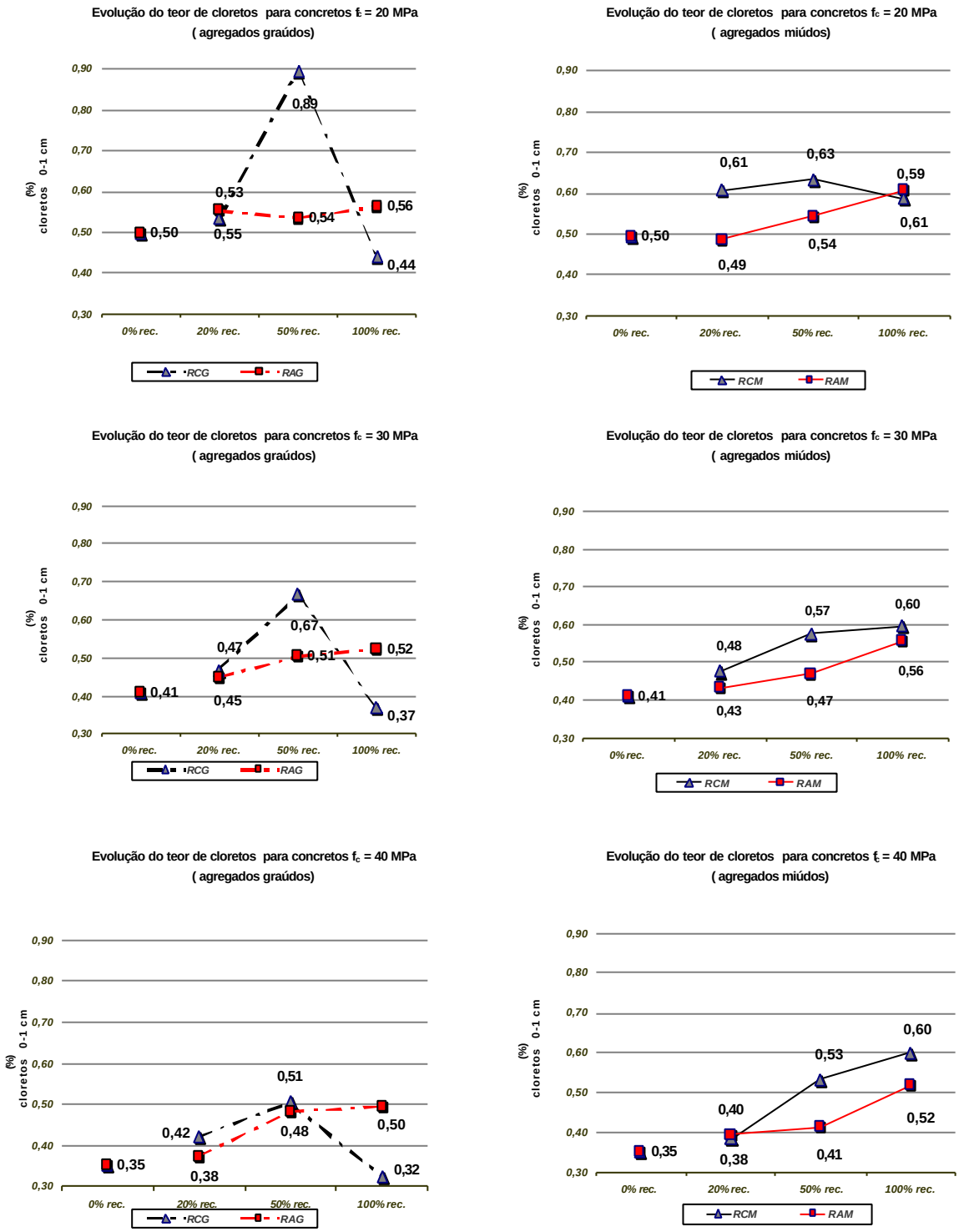


Figura 4-1 Variação do teor de cloretos encontrados na camada com espessura de 0- 1 cm para concretos de 20, 30 e 40 MPa.

Já nas camadas mais profundas, 1-2 e 2-3 cm a concentração de íons Cl^- variará como indicado a seguir:

- *Variação de íons Cl^- constatada nos concretos com agregados reciclados RCG e RAG*

- o teor de íons Cl^- apresenta teor crescente com o incremento do teor de agregado reciclado RCG e uma tendência indefinida com o acréscimo de agregado RAG.

- *Variação de íons Cl^- constatada nos concretos com agregados reciclados RCM e RAM*

-Os concretos produzidos com agregados miúdos de alvenaria reciclada (RAM), mantêm a característica detectada para outras propriedades, ou seja, passam por um ponto ótimo (máximo ou mínimo) quando se substitui 50 % do agregado natural por reciclado.

A esta altura o leitor poderia perguntar:

Por quê nas camadas mais próximas à superfície a concentração de cloretos apresentou tendência diferente da concentração detectada nas camadas mais profundas?

A resposta está no fato de que na camada superficial, houve a penetração de íons Cl^- por mecanismos distintos da difusão e tal fato contribui para o acréscimo do teor de cloreto de forma diferente da difusão, e como foi visto no item 4.2.4, quando foi explicada a absorção está, também apresentou tendência crescente com o teor de reciclados utilizados na preparação do concreto.

Isso significa que em profundidades superiores a 1 cm este mecanismo não conseguiu mais atuar, dando lugar apenas à penetração de cloretos apenas por difusão.

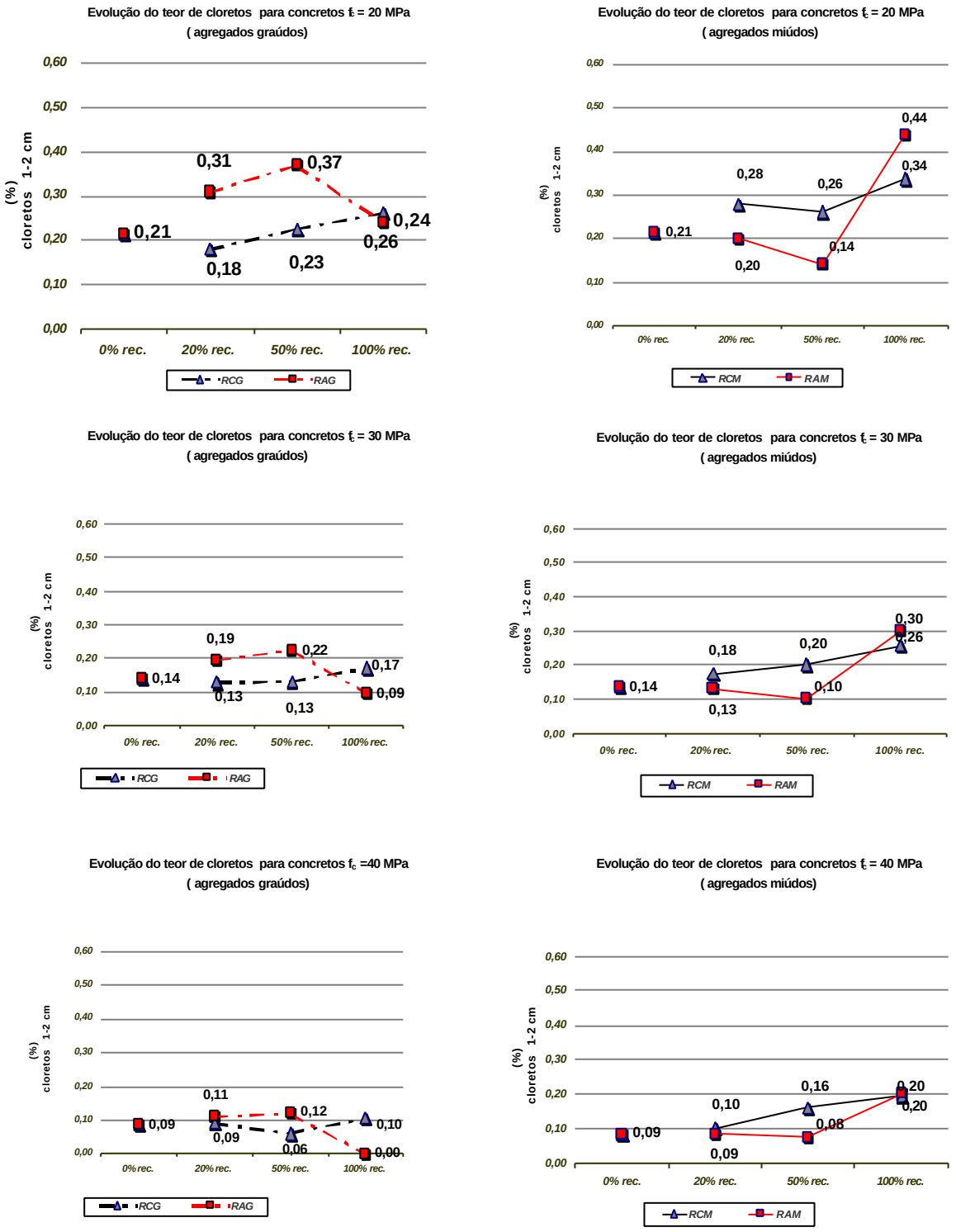


Figura 4-1 Variação do teor de cloretos encontrados na camada com espessura de 1- 2 cm para concretos de 20, 30 e 40 MPa.

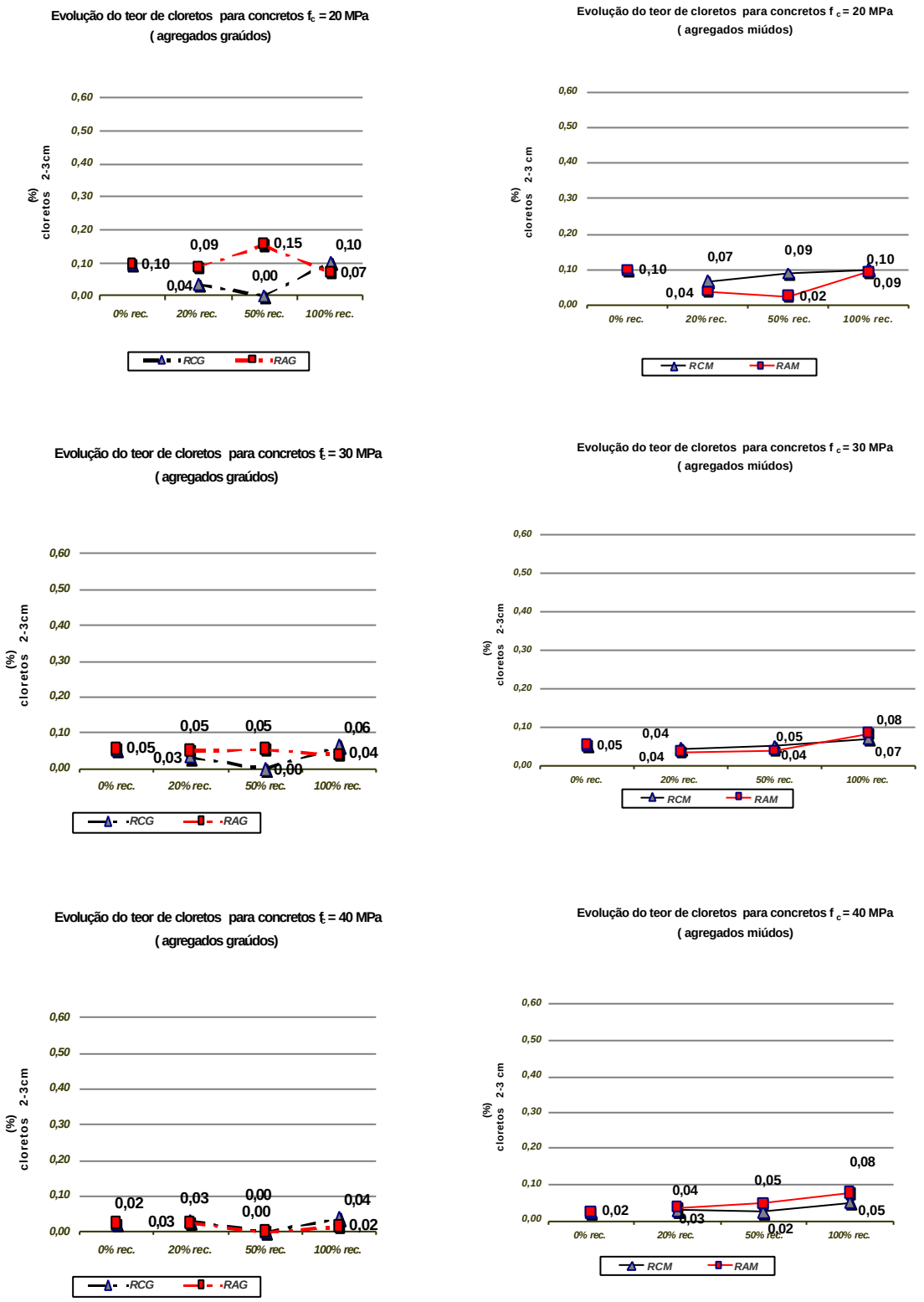


Figura 4-2 Variação do teor de cloretos encontrados na camada com espessura de 2- 3 cm para concretos de 20, 30 e 40 MPa.

A partir dos dados obtidos nos gráficos das figuras anteriores, para concretos de 30 MPa, foram levantados os perfis de concentração dos cloretos. Esses gráficos mostram que independentemente do agregado reciclado escolhido, a curva de distribuição é similar, sendo que os agregados miúdos RAM foram aqueles que apresentaram o desempenho mais próximo ao concreto de referência.

Os valores apresentados nos gráficos anteriores referem–se ao concreto, se fossem expressos em relação ao cimento, serão cerca de 10 x maiores.

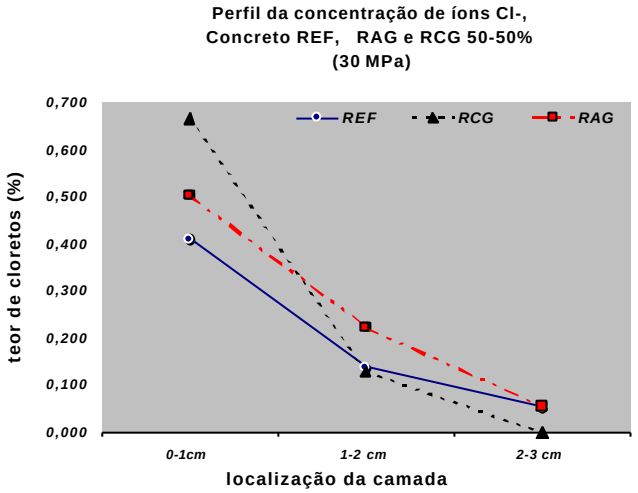


Figura 4-3 Perfil de cloretos para concretos de 30 MPa, concretos REFE. x RCG e RAG.

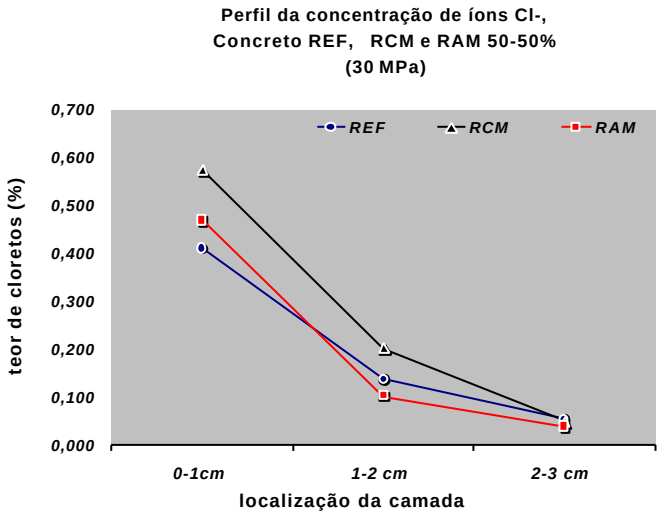


Figura 4-4 Perfil de cloretos para concretos de 30 MPa, concretos REFE. x RCM e RAM.

Com o intuito de comparar os valores obtidos aos valores preconizados por normas atualmente em vigor, é apresentada a Tabela 4-1, na qual são apresentados os valores tolerados em relação ao teor de cloretos, pelas diversas normas nacionais e internacionais

Comparando-se os limites apresentados com os valores calculados nos diagramas, percebe-se que, nenhum dos concretos ensaiados atenderia às condições preconizadas por estas normas. Evidentemente tal fato não significa que os concretos ensaiados devam merecer algum tipo de restrição quanto a sua durabilidade, mas que as condições do ensaio acelerado foram extremamente severas em relação às existentes na natureza.

Tabela 4-1. Limite de normas para teor total de cloretos (HELENE-1993) [23]

País	Norma	Limite máximo de Cl^- para		Limite referente
		Concreto armado	Concreto protendido	
Brasil	NBR 6118	0,05%	-	Água de amassamento
	NBR 7197	-	0,05%	
	NBR 9062	-	0,05%	
Espanha	EH-88	0,40%	-	Cimento
	EP-80	-	0,10%	
EUA	ACI 222	≤ 0,20%	≤ 0,08%	Cimento
	ACI201	≤ 0,20%	≤ 0,08%	
	ACI 318	≤ 0,30% amb. Normal ≤ 0,16 amb. Cl^- ≤ 1,00% amb. Seco	≤ 0,06%	
Inglaterra	CP-110	≤ 0,35% 95%UR ≤ 0,50% 100% UR	≤ 0,06% 100%UR	Cimento
Japão	JSCE SP-2	≤ 0,60 kg/m^3	≤ 0,30 kg/m^3	Concreto

ONYEJEKWE O. O. & REDDY N. (2000); [133] realizaram um trabalho com a finalidade de estabelecer um modelo matemático para estudar a difusão de

[133] ONYEJEKWE O. O.; & REDDY N. A numerical approach to the study of Chloride ion penetration into concrete, **Magazine of Concrete Research** 52 n. 4 Aug. 2000, p.243-250.

cloretos no concreto. Os resultados obtidos através da aplicação do modelo e aqueles obtidos pela 2ª Leis de Fick; praticamente coincidem.

Estes pesquisadores, também compararam os valores estimados pelo modelo por eles proposto aos resultados obtidos por LUPING (1996)[134], através de um trabalho experimental resultante da exposição de corpos de prova prismáticos[135], expostos às condições cíclicas da maré na praia de Aberdeen, por um período de 5 anos. Os resultados são apresentados, na Tabela 4-2.

Na Tabela 4-3 são apresentados os resultados encontrados no desenvolvimento desta tese, após exposição por um período de 75 dias nas condições da câmara salina.

Tabela 4-2 Teor de cloretos, resultados do modelo proposto e obtidos experimentalmente em corpos de prova expostos até 5 anos. (ONYEJEKWE O. O. & REDDY N. - 2000)

Tempo de exposição	Localização da camada	0-1 cm (%)	1-2 cm (%)	2-3 cm (%)
28 (dias)	valores do modelo matemático	1,0-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1
	valores obtidos experimentalmente	0,6	0,3	0,15
90 (dias)	valores do modelo matemático	1,3 - 0,8	0,8 - 0,4	0,4 - 0,2
	valores obtidos experimentalmente	0,90	0,60	0,40
270 (dias)	valores do modelo matemático	1,5-0,9	0,9-0,5	0,5-0,3
	valores obtidos experimentalmente	1,25	0,60	0,40
Após 5 anos de exposição às condições cíclicas da maré na praia de Aberdeen	valores do modelo matemático	1,5-1,0	1,0-0,6	0,6-,3
	valores obtidos experimentalmente	1,4	1,0	0,55

[134] LUPING, T. **Chloride transport in concrete-measurement and prediction.** Chalmers University of technology, Department of Building Technology, Göteborg, Sweden, 1996. Publication p 96:6.

[135] O concreto utilizado no trabalho mencionado tinha traço 1:2.85:4.27 e a/c = 0,70

Tabela 4-3 Teor de Cloreto nas camadas de 0-1, 1-2, 2-3 cm. Valores calculados pela metodologia adotada no desenvolvimento desta tese para concretos de 30 MPa

Localização da camada	0-1 cm (%)	1-2 cm (%)	2-3 cm (%)
REFE.	0,411	0,139	0,054
RAM 20-80%	0,433	0,133	0,036
RAM 50-50%	0,468	0,103	0,038
RAM 100-0%	0,556	0,301	0,083
RCG 20-80%	0,468	0,128	0,033
RCG 50-50%	0,666	0,130	0,000
RCG 100-0%	0,371	0,170	0,064

Embora as condições de exposição cíclicas da maré, na praia de Aberdeen e da câmara salina utilizadas, não sejam as mesmas e o concreto utilizado nos dois trabalhos tenha características diferentes, a comparação tornou-se irresistível, mas as diferenças constatadas foram grandes e à luz do conhecimento atual, não se encontrou justificativa para explicar o fato constatado.

Finalmente se está diante de uma dificuldade comum no meio técnico, como utilizar os resultados obtidos experimentalmente obtidos através de um ensaio acelerado e utilizá-los para previsão do desenvolvimento de manifestações patológicas resultantes da penetração de agentes agressivos.

No caso da difusão do CO_2 conseguiu-se estabelecer um paralelo, entre o tempo de permanência na câmara de carbonatação e o tempo necessário de exposição ao meio ambiente para obtenção de resultados equivalentes, mas para o caso de penetração de íons Cl^- o estabelecimento de um paralelo entre estes tempos, não pôde ser estabelecido, devendo este assunto gerar o desenvolvimento de uma linha de pesquisa inédita.

Na seqüência será analisada mais uma das propriedades selecionadas para estudar a durabilidade de concretos, produzidos com materiais reciclados, a resistividade.

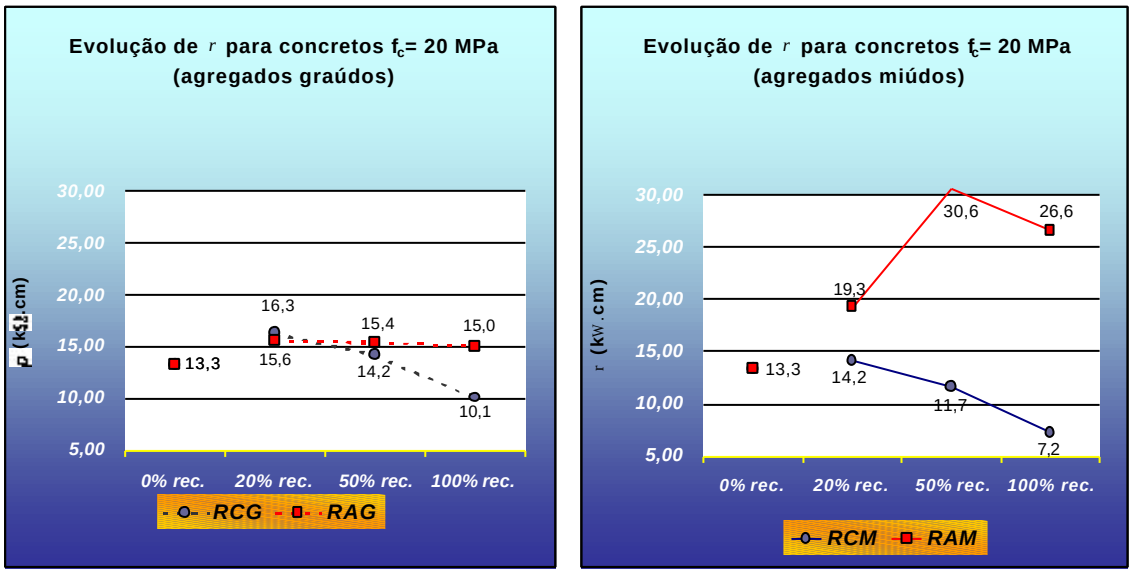
4.2.8 Resistividade

Segundo HUNKELER, (1996)[42] o teor de umidade no concreto pode diminuir sua resistividade aumentando sua taxa de corrosão mais do que o teor de cloretos existente na massa de concreto.

Sem dúvida trata-se de uma opinião no mínimo polêmica, pois a prática tem mostrado que estruturas a beira mar tem maiores problemas de corrosão do que estruturas construídas em locais úmidos.

Para avaliar a resistividade, do concreto produzido com agregados reciclados, procedeu-se de forma análoga à adotada para avaliação das demais propriedades selecionadas no desenvolvimento do estudo sobre durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, ou seja foi construído o diagrama de dosagem da propriedade a ser estudada e foram determinados os valores de a/c que levaram a concretos de 20 30 e 40 MPa respectivamente, estes valores foram utilizados para determinar qual o valor da propriedade analisada, que se obteria, se fossem moldados os concretos em questão.

Determinados estes valores, construíram-se os diagramas de tendência apresentado na Figura 4-1, estes diagramas apresentam a mesma tendência apresentada pelos diagramas de outras propriedades. Em síntese, pode-se dizer que a resistividade como as demais propriedades apresentam uma tendência de redução em função do incremento dos agregados reciclados, porém apresentam um valor ótimo (máximo no caso) com a substituição de 50% do agregado miúdo natural por reciclado RAM.



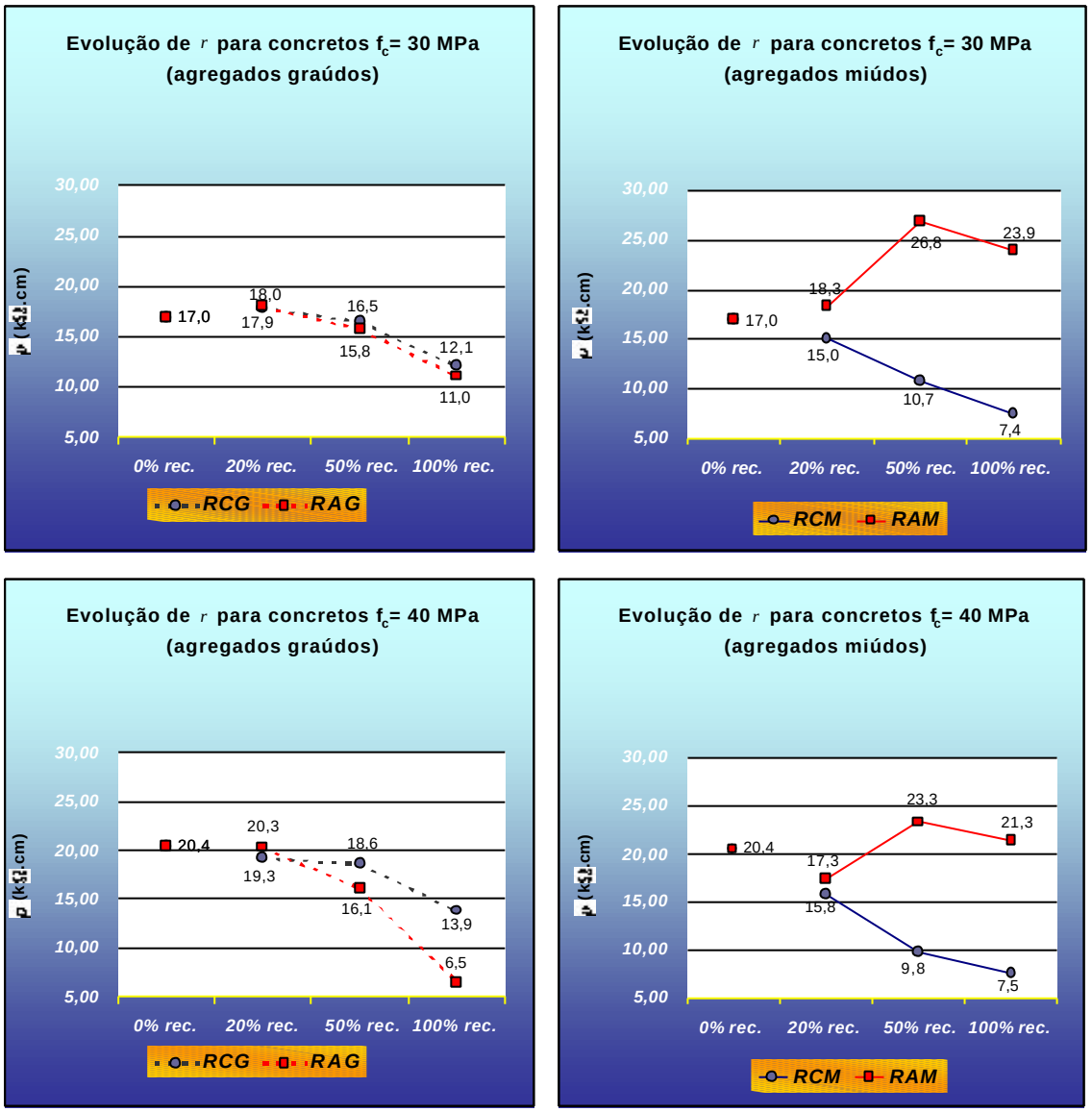


Figura 4-1 Variação da resistividade em função do teor de agregados reciclados e de sua granulometria, para concretos de 20 30 e 40 MPa respectivamente.

Da análise das dos gráficos da Figura 4-1, percebe-se a resistividade apresentou tendência bem definida de redução com o incremento do teor de reciclados para os agregados reciclados RCG, RAG e RCM, para o agregado reciclado RAM, como já foi dito, ocorreu um pico quando este foi utilizado em substituição a 50% do agregado miúdo natural, tal fato confirma que desta forma se obtém uma melhor distribuição granulométrica com a substituição de 50 % do agregado miúdo natural por agregado RAM 50-50%, obtendo-se um grau de empacotamento que levou a um máximo de resistividade.

Essa tendência se torna perfeitamente visível nos gráficos da Figura 4-2, neste caso como não se trata de um ensaio acelerado os resultados encontrados são diretos e podem ser utilizados para produção do concreto desejado em termos de resistividade.

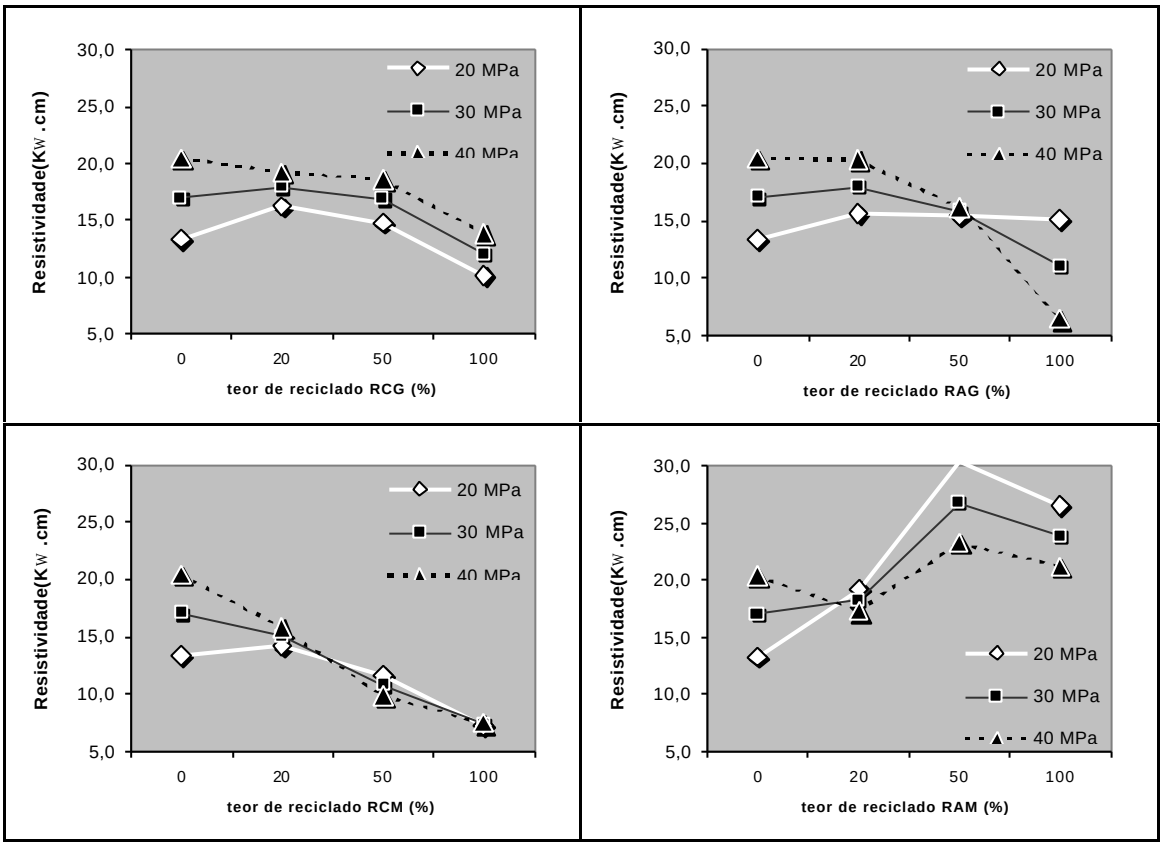


Figura 4-2 Variação da resistividade para as classes de concreto em função do teor de material reciclado

Embora todas as medidas de resistividade foram elaboradas nas mesmas condições, após os corpos de prova terem sido imersos por 72 horas, aqueles que mostraram maior absorção de água e maior porosidade total também mostraram menor resistividade ou seja os resultados obtidos estão de acordo com o esperado.

Esses resultados se comparados à classificação apresentada adotada pelo CEB, leva a conclusão que os concretos das classes de 20 a 40 MPa produzidos com agregados reciclados RAM, na proporção de 50-50% teriam

uma probabilidade desprezível de desenvolver a corrosão da armadura, uma vez que apresentaram a resistividade do concreto sempre acima de 20 kΩ.cm.

Tabela 4-1. Critérios de avaliação da resistividade (CEB Bulletin nº192).

RESISTIVIDADE DO CONCRETO	PROBABILIDADE DE CORROSÃO
< 5 kΩ.cm	Muito alta
5 a 10 kΩ.cm	Alta
10 a 20kΩ.cm	Baixa
> 20 kΩ.cm	Desprezível

No próximo item que trata da inter-relação entre as propriedades pesquisadas, serão abordados alguns aspectos entre absorção e resistividade.

4.2.9 Inter-relação entre as propriedades pesquisadas.

Sendo irrefutável o fato que o acréscimo do teor de material reciclado, qualquer que seja sua granulometria, ou sua origem, elevou a absorção, assim como o índice de vazios (porosidade total), deveria se esperar que o material reciclado devido a sua maior absorção, produziria concretos mais porosos com teores crescentes de reciclados.

Conseqüentemente, também seria de esperar, que todas as demais propriedades tivessem um comportamento crescente ou decrescente com o acréscimo do teor de reciclados, todo via isso não ocorreu com a utilização do agregado RAM, as razões para este comportamento já foram explicadas na discussão dos resultados, cabendo agora mostrar a inter-relação destas propriedades ente si.

Com a finalidade de tornar o trabalho mais didático possível, julgou-se importante também exemplificar o desenvolvimento de uma propriedade em relação à outra. Para isso foram elaborados os gráficos apresentados nas figuras Figura 4-1 a Figura 4-8.

Devido às inúmeras combinações possíveis entre as propriedades selecionadas para o estudo de durabilidade em pauta, optou-se por analisar apenas para os concretos de 30 MPa produzidos com agregados RCG e RAM a

absorção x consumo, absorção x difusão do CO_2, absorção x teor de cloretos na camada de 0-1 cm, e absorção x resistividade que são apresentadas a seguir:

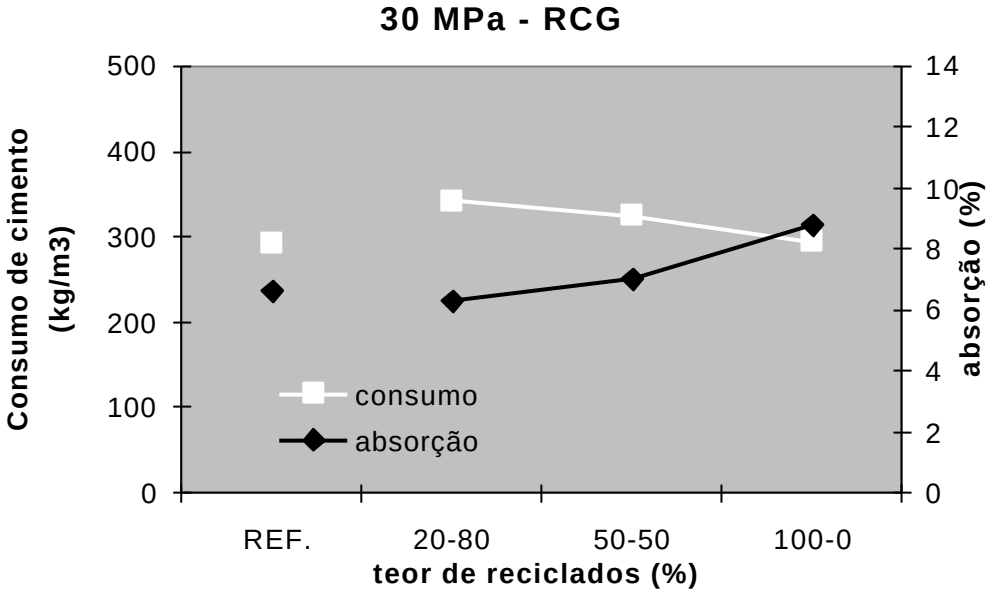


Figura 4-1 Consumo em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RCG

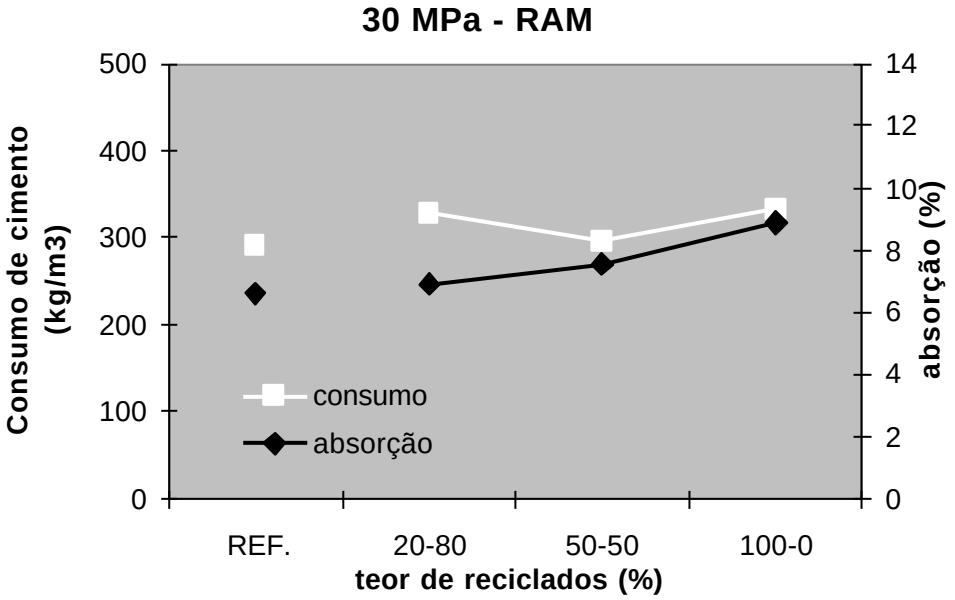


Figura 4-2 Consum

o em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RAM

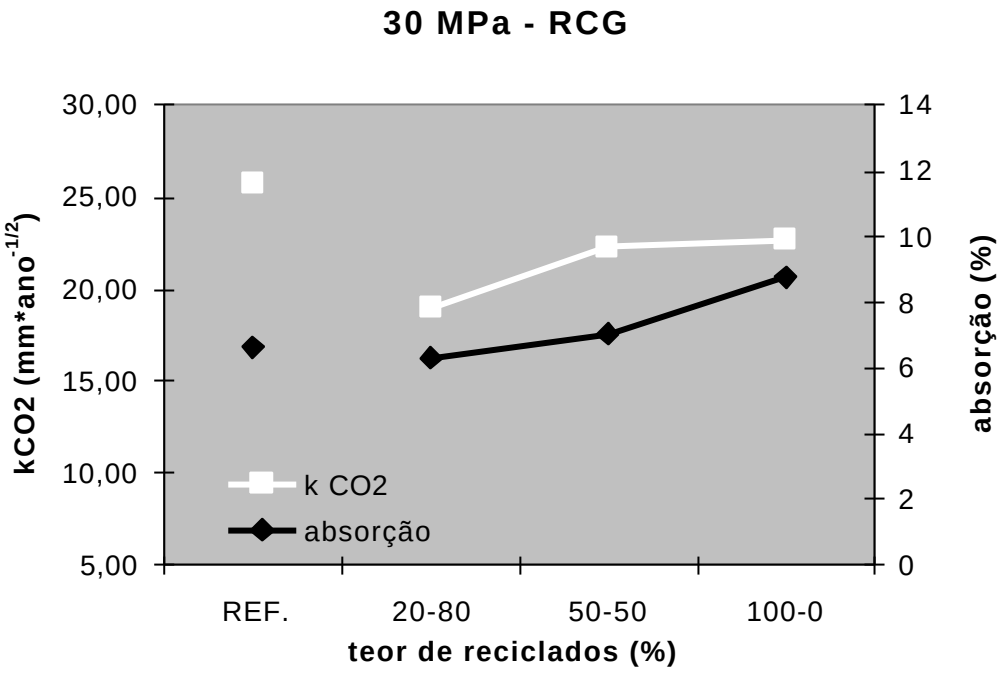


Figura 4-3 Difusão do CO_2 em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RCG

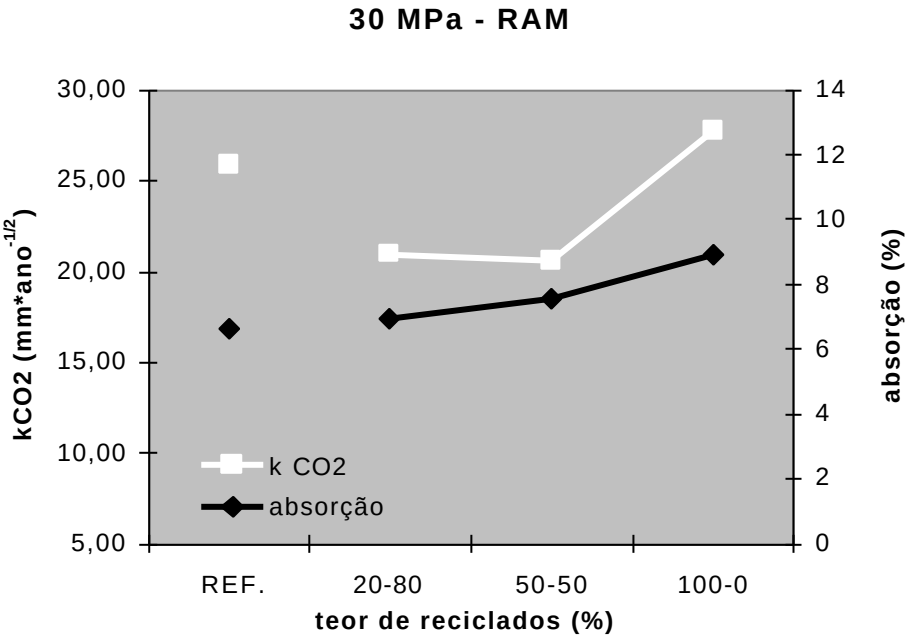


Figura 4-4 Difusão do CO_2 em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RAM

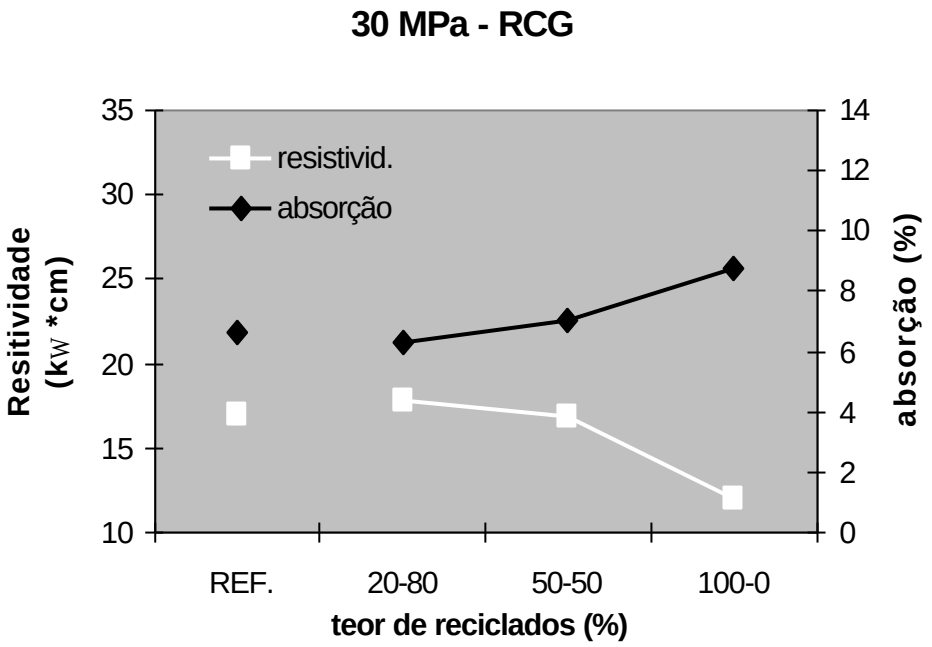


Figura 4-5 Resistividade em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RAM

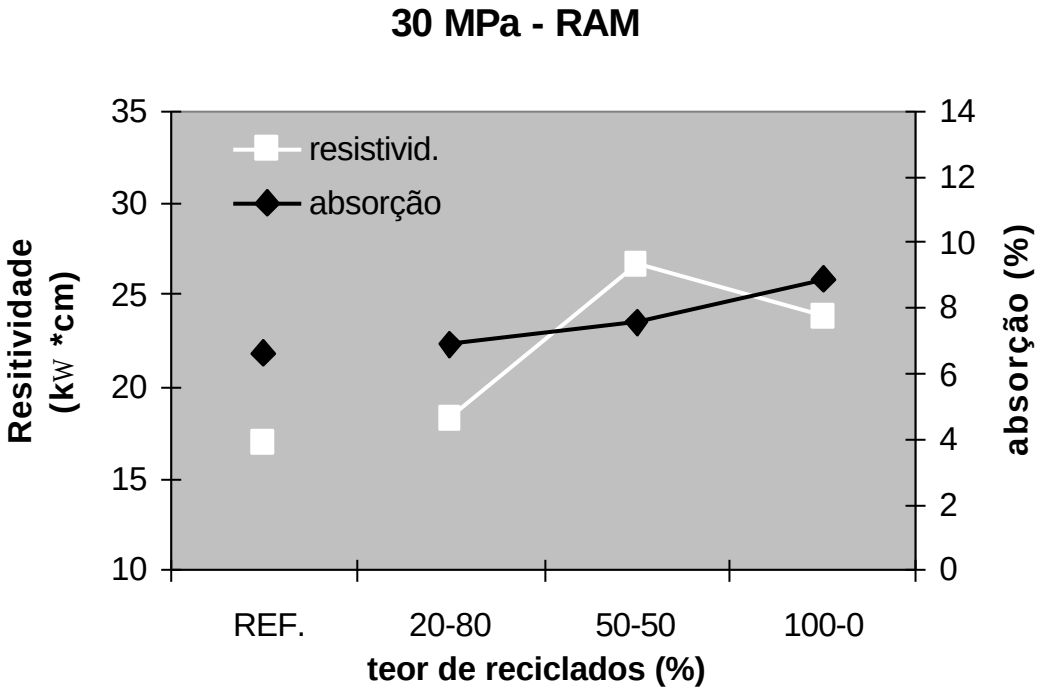


Figura 4-6 Resistividade em função da absorção, concreto 30 MPa agregado RAM

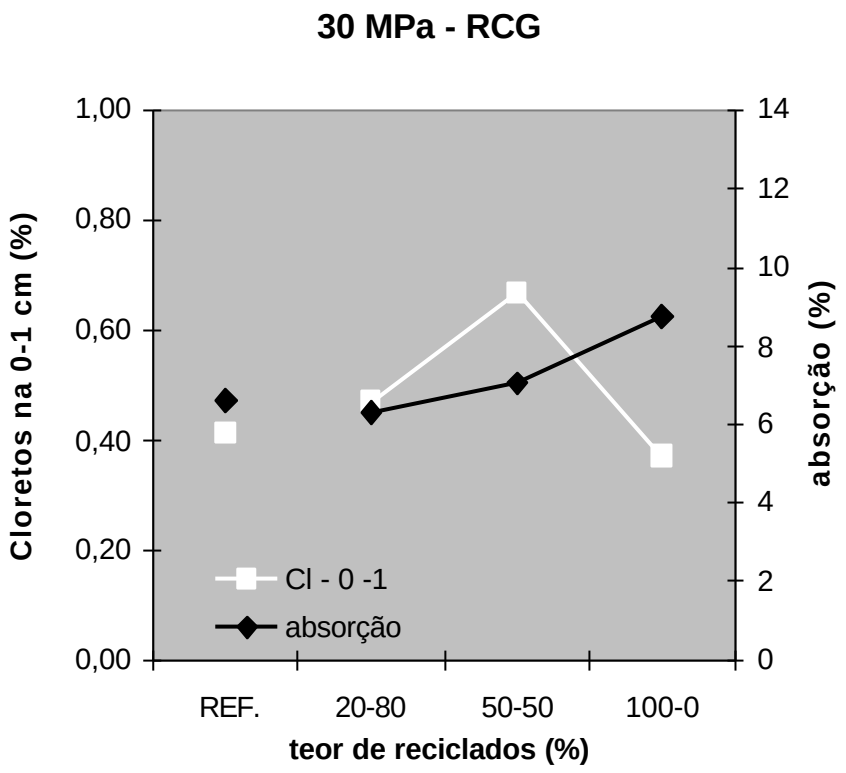


Figura 4-7 Cloretos na camada 0-1cm, concreto 30 MPa agregado RCG

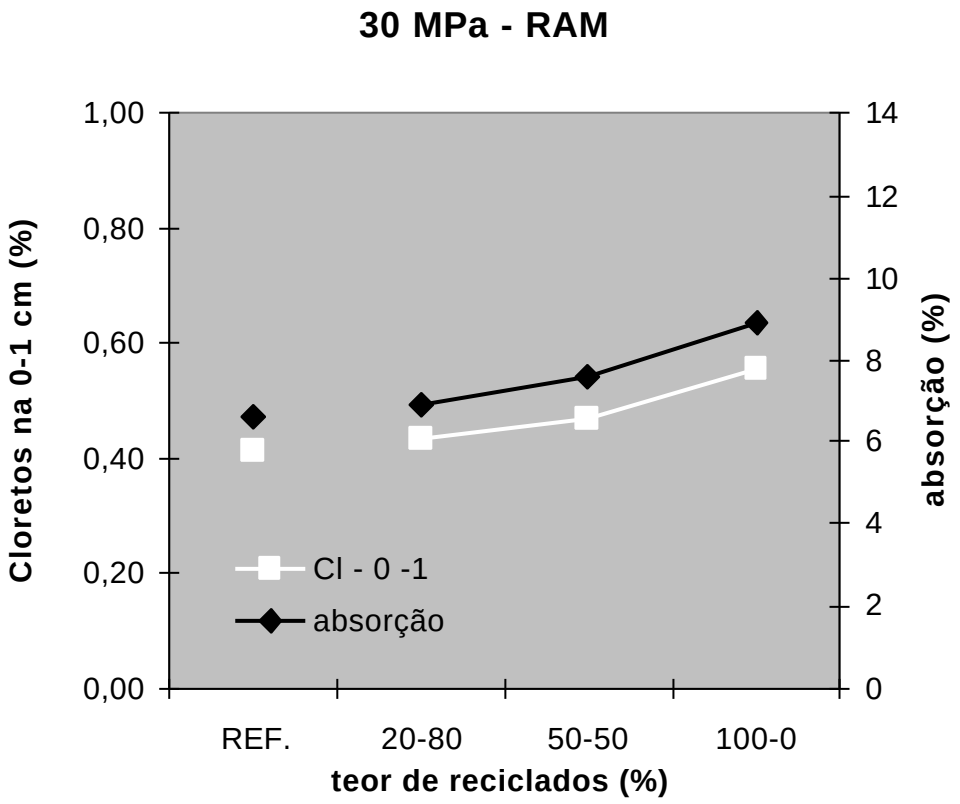


Figura 4-8 Cloretos na camada 0-1cm, 30 MPa agregado RAM

Estes gráficos foram selecionados uma vez que deixam claro que nem sempre a absorção de água apresenta a mesma tendência que propriedades diretamente relacionadas com a durabilidade, como a difusão do CO_2, pois quando se prepara concretos com agregados reciclados, estes têm papel fundamental na absorção.

4.3 Conclusões

Antes de apresentar as conclusões propriamente ditas devem ser observados alguns aspectos:

o primeiro deles, é o fato de terem sido utilizados agregados produzidos em laboratório foi proposital, mesmo que isso não reflita qualquer situação real, tal procedimento foi necessário pois de outra forma, as variáveis envolvidas seriam tantas que inviabilizaria qualquer conclusão,

o segundo deles, é o fato de que a utilização de materiais novos para preparação dos agregados reciclados foi intencional, uma vez que no município de São Paulo 60% do entulho, oficialmente coletado, ainda provém de obras novas[136] [137] diferentemente do que acontece nas cidades européias onde grande parte do entulho é proveniente de demolições.

Na seqüência apresentam-se as principais conclusões sobre a influência do teor de agregados reciclados de concreto e alvenaria nas propriedades selecionadas para estudo da durabilidade de concretos.

4.3.1 Propriedades de um concreto X teor de agregados reciclados.

Os resultados analisados confirmaram que o incremento de resíduos de concreto e alvenaria até o teor de 20%, não afeta o comportamento do concreto em relação ao de referência, demonstrando que poderão ser utilizados sem qualquer restrição quanto à resistência e à durabilidade.

---

[136] ver tabela 10, coleta oficial no município de São Paulo 2050 t/dia.

[137] 1342 t/dia quantidade gerada só por obras novas, licenciadas no município de São Paulo, admitindo-se a taxa de 0,10m³/m² e os dados publicados pela SEHAB na Revista “A Construção em São Paulo” n. 2653 PINI dezembro 1998.”

Para dar prosseguimento a este estudo caso se queira conhecer a influência de materiais reciclados mais antigos, a realização de ensaios de lixiviação será necessária.

Para os concretos produzidos com reciclados de alvenaria graúdos RAG, mesmo que os resultados indiquem uma redução das propriedades mecânicas com o incremento dos resíduos reciclados, sempre haverá a possibilidade de se produzir concretos para os quais as exigências de desempenho e durabilidade e qualidade não sejam rígidas como para o caso de concreto estrutural.

No estado fresco para manter a consistência de 70 ± 10 mm a demanda de água não é sensivelmente afetada quando se substitui agregado natural por agregados reciclados de concreto RCG. Todavia quando a troca de agregados naturais se dá por agregados reciclados de alvenaria RAG é visível a necessidade maior de água para se manter a consistência, fato que pode ser atribuído a maior absorção de água do agregado de alvenaria e sua maior lamelaridade.

Essa lamelaridade provém do fato da alvenaria possuir uma resistência inferior a do concreto e sua passagem pelo britador de mandíbulas produz uma quantidade muito maior de material lamelar.

A absorção de água e índice de vazios, nos concretos com agregados reciclados de alvenaria apresentaram uma tendência crescente com o acréscimo do teor de reciclados graúdos. Este comportamento era esperado, uma vez que na caracterização individual os agregados RAG apresentaram elevada absorção da ordem de 12 a 13 %, enquanto que os agregados naturais ficaram na faixa de 0,8 a 1,0%.

Nos concretos produzidos com agregados reciclados, independentemente de sua granulometria, e de sua origem (alvenaria ou concreto), a carbonatação e a difusão do CO_2 está relacionada muito mais à relação a/c e ao consumo de cimento do que com ao tipo de agregado reciclado.

Quanto aos resíduos miúdos de alvenaria recomendados apenas pela Norma Holandesa para utilização em concreto, estes demonstram excelente desempenho como redutores da carbonatação, uma vez que, com a substituição de 50 % de areia natural por areia de alvenaria, houve uma redução na profundidade de carbonatação em torno de 33%, assim abre-se uma

possibilidade para aplicação em larga escala deste material na produção de concreto como aditivo anti-carbonatação.

Quanto aos agregados reciclados de concreto graúdos, demostraram também excelente desempenho em relação ao concreto de referência, todavia com um consumo de cimento mais elevado no caso de concretos de 30 MPa, ao invés de 300 kg/ m³ para agregados RAM houve necessidade de 329 kg/m³, ou seja 10 % mais.

Quanto ao módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci},), analisando-se as curvas e as equações dos modelos experimentais obtidos, para todos os concretos ensaiados, confirmou-se que o aumento do teor de agregados reciclados contribui para redução de E_{ci}, como encontrado em diversos trabalhos consultados.

Considerando-se que a durabilidade de uma estrutura é preponderantemente determinada pela sua capacidade de dificultar a penetração do CO_2, assim como, a de outros agentes agressivos através da absorção de água de intempéries, pode-se afirmar que concretos produzidos com agregados reciclados de alvenaria miúdo (RAM) ou reciclados de concreto graúdos, na proporção de 50%-50% em massa, seriam mais duráveis que o concreto de referência, pelos resultados superiores apresentados.

É importante ressaltar o fato de que a absorção de água assim como o índice de vazios apresentaram uma tendência crescente com o incremento do teor de material reciclado, todavia o mesmo comportamento não foi observado pela carbonatação e pelo consumo, quando os concretos estudados foram produzidos com agregados RAM.

Tal fato comprova que não se deve entender que a durabilidade de um concreto possa ser atrelada exclusivamente à sua porosidade, pois propriedades importantes como a carbonatação são fenômenos físico químicos que por vezes ocorrem de forma inversa a absorção, ou seja enquanto a absorção aumenta ela reduz.

4.3.2 Desempenho dos concretos com agregados reciclados

Na Tabela 4-20 apresentam-se os resultados de desempenho relativo para os concretos de 30 MPa, produzidos com as quatro categorias de agregado reciclado, os valores obtidos para o concreto de referência foram apresentados todos com valor unitário, desta forma, os valores encontrados na tabela são proporcionais à unidade, assim é possível visualizar o comportamento relativo do concreto desejado para a categoria de 30 MPa.

Evidentemente, que com os dados disponíveis será possível elaborar a mesma tabela, qualquer que seja a resistência especificada e, assim, prever a influência que determinado teor de reciclado terá sobre o concreto, sem a necessidade de ir ao laboratório moldá-lo e ensaiá-lo.

Para dar prosseguimento a este estudo, o trabalho poderá ter continuidade com ensaios de lixiviação e teor de sulfatos adotando-se esta mesma metodologia.

Tabela 4-1 Propriedades relativas para concretos de 30 MPa

	a/c para	Consumo (Kg/m³)	eCO_2 (mm)	$KeCO_2$ ($mm/t^{1/2}$)	Abs. (%)	Vazios (%)	Resit. (KW. cm)	Cl^- (%) 0-1cm	Eci (GPa)
família	**30 MPa**	**30 MPa**	**30 MPa**	**30 MPa**	**30 MPa**	**30 MPa**	**30 MPa**	**30 MPa**	**30 MPa**
REFER.	**0,68**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**
20-80 RCG	**0,63**	**1,17**	**0,65**	**0,73**	**0,95**	**0,93**	**1,05**	**1,14**	**0,99**
50-50 RCG	**0,65**	**1,13**	**0,57**	**0,86**	**1,06**	**1,19**	**0,99**	**1,62**	**0,95**
100-0 RCG	**0,71**	**1,01**	**0,87**	**0,88**	**1,32**	**1,28**	**0,71**	**0,90**	**0,93**
20-80 RAG	**0,69**	**1,14**	**0,70**	**0,78**	**1,14**	**0,92**	**1,06**	**1,09**	**0,87**
50-50 RAG	**0,63**	**1,43**	**0,56**	**0,61**	**1,44**	**1,34**	**0,93**	**1,23**	**0,81**
100-0 RAG	**0,58**	**1,79**	**0,04**	**0,25**	**1,76**	**1,56**	**0,65**	**1,28**	**0,73**
20-80 RCM	**0,66**	**1,12**	**0,76**	**0,77**	**1,08**	**1,07**	**0,88**	**1,16**	**0,94**
50-50 RCM	**0,69**	**1,13**	**0,77**	**0,86**	**1,35**	**1,30**	**0,63**	**1,40**	**0,78**
100-0 RCM	**0,68**	**1,26**	**0,81**	**0,86**	**1,61**	**1,49**	**0,43**	**1,45**	**0,64**
20-80 RAM	**0,65**	**1,13**	**0,71**	**0,81**	**1,04**	**1,03**	**1,08**	**1,05**	**0,93**
50-50 RAM	**0,73**	**1,03**	**0,67**	**0,80**	**1,14**	**1,11**	**1,57**	**1,14**	**0,83**
100-0 RAM	**0,76**	**1,14**	**0,96**	**1,08**	**1,34**	**1,28**	**1,40**	**1,35**	**0,88**

CAPÍTULO 5.
CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Transferência do conhecimento ao meio técnico.

Através do apoio e financiamento da FAPESP o projeto Durabilidade de Concretos Produzidos com Resíduos Minerais da Construção Civil" possibilitou a elaboração de um trabalho através do qual se pôde levar ao meio técnico o conhecimento da influência exercida na durabilidade dos concretos produzidos com de teores crescentes de agregados reciclados, todo este conhecimento foi repassado por meio da elaboração de diversos artigos apresentados em congressos internacionais, e através da realização de quatro Seminários sobre o tema Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, seminários que contaram com apoio de instituições com ABCP, IPT, EPUSP, IBRACON além de Universidades Públicas e Privadas como a UNESP / UNITAU, Escola de Engenharia Mauá, e do Centro Universitário Nove de Julho.

Diversos dos artigos escritos ao longo do desenvolvimento deste projeto de pesquisa também foram disponibilizados na página do Departamento de Construção Civil da EPUSP www.reciclagem.pcc.usp.br de forma que todo meio técnico passou a ter acesso ao conhecimento técnico advindo desta tese .

Com o apoio e envolvimento direto do Prof. e orientador Paulo Helene foi possível a divulgação deste conhecimento em seminários Internacionais realizados na Paraíba “Sustainable construction into the next millenium-Environment friendly and innovative cement based materials”, em São Paulo CIB Symposium on Construction & Environment, theory into practice e em Foz do Iguaçu 43º Congresso Brasileiro do Concreto.

Também será apresentado em Lisboa Portugal no Congresso Internacional: Construção 2001 mais um dos artigos advindos do desenvolvimento da parte experimental desta tese, que versa sobre a penetração de íons Cl^- em concretos com agregados reciclados e concretos com agregados convencionais.

Desta forma acredita-se que o conhecimento ao meio técnico fruto desta pesquisa foi e vem sendo amplamente divulgado junto ao meio técnico com auxilio e apoio das entidades citadas.

5.2 Prosseguimento dos Estudos

Considerando a importância e a atualidade dos estudos sobre reciclagem de resíduos de construção no tocante ao uso pela própria indústria da construção civil, a produção de concreto com agregados reciclados juntamente com o gerenciamento de resíduos da construção civil despontam como algumas das atividades que mais vêm sendo pesquisados no País e no Exterior, fatos que podem ser comprovados pelos inúmeros eventos realizados no último biênio, (2000 /2001).

Como passo seguinte para prosseguimento dos estudos, no âmbito internacional está sendo contatado o prof. Enric Vázquez da Universidade da Catalunya para com sua experiência no tema auxiliar um laboratório para realização de ensaios de lixiviação para dar continuidade às pesquisas sobre durabilidade com materiais mais antigos, pois tais materiais poderiam conter sais os quais seriam transportados para superfície do concreto através de chuvas ácidas, comuns em metrópoles do porte de São Paulo, tema que pela sua extensão não poderia ter sido abordado neste trabalho, além disso, está sendo idealizado com a colaboração dos Profs. Paulo Helene e Enric Vázquez a formação de uma rede IBERO AMERICANA nos moldes da rede EUROPÉIA ETNRecyle.net para desenvolver os estudos e as possibilidades de aplicações dos os resíduos sólidos de construção civil.

Em parceria com o Prof. Vanderley John será possível interagir os frutos desta pesquisa com os trabalhos que atualmente estão sendo desenvolvidos por seus orientados no PCC.

No âmbito Nacional com apoio do IBRACON através de seu comitê CT206 do SINDUSCON e do PCC/USP já foram formados dois grupos de trabalho para preparar textos básicos visando a elaboração de práticas recomendadas para utilização de agregados reciclados, um deste grupos se dedicará a aplicação de agregados reciclados em pavimentos e outro a aplicação de agregados reciclados para produção de concretos, é importante

frizar que futuramente estas práticas recomendadas após seu uso e consolidação poderão ser encaminhadas ao CB18 como texto básico para Normalização dos agregados reciclados em nosso País.

Considera-se que seja necessário o prosseguimento dos estudos em tres temas:

relacionar os resultados de ensaios acelerados de carbonatação com a previsão de comportamento de estruturas inseridas em determinados ambientes, ou seja, encontrar uma forma de conhecido o resultado obtido através de um ensaio acelerado na câmara de carbonatação poder utilizá-lo para previsão de vida útil de estruturas que terão de ser inseridas em determinados ambientes,

relacionar os resultados de ensaios acelerados da câmara salina com ensaios de longo prazo em atmosferas agressivas,

realização de ensaios de lixiviação com os agregados reciclados com mínimo de 20 anos, uma vez que será parte de um processo natural o aumento do entulho proveniente de demolição e para consolidar o conhecimento técnico sobre a durabilidade de concreto será necessário a realização de trabalhos nesta linha.

CAPÍTULO 6.

BIBLIOGRAFIA

AJDUKIEWICZ,B.A.; KLISZCZEWICZ, T.A. Properties of structural concrete with rubble aggregate from demolition of RC/ PC structures. In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND - INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION, Dundee- Escócia junho 1996. **Proceedings** Ravindra & Thomas Grã Bretanha -1996 p. 115 a 120.

AKHTARUZZAMAN, A. A.; HASNAT, A.; Properties of concrete using crushed brick as aggregate. **Concrete International.** Feb. - 1983 p 58-63.

ALMEIDA, I. R. **Carbonation of high strength concrete with chemical and mineral admixtures**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL CONCRETE, 4., Istanbul, 1992. Proceedings: Supplementary papers. Ottawa, CANMET, ACI 1992. p. 735-48.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS- ASTM 1152 Standard test method for acid chloride in mortar concrete 1990

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS- ASTM G57 Standard Method for Field Measurement. Using the Werner Four -Electrode Method.

ANDRADE, P. M del C. **Manual para diagnóstico de obra deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação CARMONA, A. e HELENE, P. São Paulo PINI 1992.

Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. **AREIA & BRITA** n. 9 Jan/Fev/Mar 2000 p 9

Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil **AREIA & BRITA** n. 5 Jan/Fev/Mar 1999 p 8-10.

ASTM C 1260/94 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates

ASTM C1260/94 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates

BARRA, M. **Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Armado**. Barcelona 1996. p. 223 tese (Doutorado) - Escola Tècnica Superior d' Enginyers de Camins, Canals i Ports, Universidade Politècnica de Catalunya.

BASHEER P.A.M; CHIDIAC S.E.; LONG A. E. Predictive models for deterioration of concrete structures. **Constructions and Buildings Materials** v. 10 n.1 p. 27-37, 1996

Brasil. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO CESP- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO LABORATÓRIO CESP DE ENGENHARIA CIVIL, ILHA SOLTEIRA SÃO PAULO. **A Reatividade Potencial de Agregados para Concreto**, (em CD ROOM) 2000.

BUCK, Original não localizado apud HANSEN T. C. RILEM Report 6 **Recycling of Demolished Concrete and Masonry,** London, E&FN SPON an imprint of Chapman & Hall, 1992. 316p.

Building Contractors Society of Japan B.C.S.J. Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete, Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste summary in **Concrete Journal**, Japan, 16, n. 7, p.18-31, 1978.

Bulletin d`Information, Paris n. 192

CASTRO, P.; SANJUÁN, M.A.; GENESCÁ J. Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. **Building and Environment** n.35, p.145-149, 2000.

CHENA, S. I.M. O Manejo e a reciclagem de entulhos em Belo Horizonte. In: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. São Paulo 2001 **ANAIS.** CT 206 IBRACON p. 3-10. 2001

COLENBRANDER, W Rijkswaterstaat Demonstration Projects The Netherlands 1988-1992, **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

COLLINS, R BRE 1995-1996 **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

Commissie voor Uitvoering van Research CUR **Betonpuingranulaaten Metselwerkpuins Granulaat alls Toeslagsmaterial van Beton**. Commissie voor Uitvoering van Research ingesteld door de Betonvereniging, Rapport 125, 1986

De PAUW, C.; DESMYTER, J.; DESSEL J. Van Reuse of construction and demolition waste as aggregates in concrete, technical and environmental aspects. In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND-INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION, Dundee - Escócia junho 1996. **Proceedings**. Ravindra & Thomas Grã Bretanha -1996 p. 131- 140.

De PAUW, C.; DESMYTER, J.; DESSEL J. Van Reuse of construction and demolition waste as aggregates in concrete, technical and environmental aspects. In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND. -INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION, Dundee - Escócia junho 1996 **Proceedings**. Ravindra & Thomas Grã Bretanha p. 131- 140, 1996.

Di NIRO, G.; DOLARA E. ; CAIRNS R. Properties of hardened RAC for structural purposes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION: USE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE. **Proceedings** Ravindra K. Dhir, Neil a Henderson and Mukesh C. Limbachiya. London THOMAS TELFORD 1998. p. 176 –187.

DIF Proposed amendment to the Danish concrete code: use of recycled demolition rubble - 1989 **Dansk Beton**, 6, n°4.

DILLMANN, R. Concrete with recycled concrete aggregate In INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION: Use of recycled concrete aggregate **Proceedings** Ravindra K. Dhir, Neil a Henderson and Mukesh C. Limbachiya. London THOMAS TELFORD 1998. p. 239-254.

DUNSTER A.M., **Accelerated carbonation testing of concrete** Information papers of the Building Research Establishment 2000. p. 11

FERRAZ, G.R.; MASSUDA, O.; ASSIS, C. S.; OLIVEIRA, M. J. E.; ZAMATARO, R.S.; PIRES, M. A. F.; OLIVEIRA, M. C. B.; AMORIM, A. S. Estações de classificação e de transbordo na cidade de São Paulo. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. 4. São Paulo 2001. **ANAIS** CT 206 IBRACON p.75-86. 2001.

FRONDISTON-YANNAS, S.; Waste concrete as aggregate for new concrete **ACI Journal** pp 373-376.

GARBOCZI, E.J. Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review. **Cement Concrete Research**. p.591-601, 1990.

HAMADA, M. Neutralization of concrete and corrosion of reinforcing steel, In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CHEMISTRY OF CEMENT. 5 **Proceedings** 1968 II-3, p.343-382

HANSEN T. C. RILEM Report 6 **Recycling of Demolished Concrete and Masonry,** London, E&FN SPON an imprint of Chapman & Hall, 1992. 305p.

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate **Concrete International- Design and Construction**, 5 n.1 p. 79-83,1983.

HELENE Paulo R. L. **Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto Armado** São Paulo tese (Livre Docência) Escola Politécnica. 1993 241p

HELENE, P. R L. Projeto do texto proposto para revisão da NBR 6118/78

HELENE, P. R.L. **La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón**. Hormigón, AATH, n. 10 p. 25-35, ago. 1983.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo. PINI; Brasília, DF : SENAI, 1992.

HUISMAN, C.L.; BRISTON, R.A. Recycled Portland cement concrete specifications and control. In Federal Highway Administration (FHWA) in: National Seminar on PCC Pavement recycling and rehabilitation, St Louis, Missouri USA 1981. Federal Highway Administration .**Proceedings.** Report FHWA- TS -82-208 -1981. p. 140-143.

HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. **Constructions and Building Materials.** v. 10 n. 5, p.381-389,1996.

JAPAN BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN B.C.S.J. **Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete.** Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste 1977.

JAPAN. BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN BSJ. Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Disposal and reuse of construction waste summary **Concrete Journal**, 16 n. 7 p.18-31 Japan,1978.

KARISSON, F. B. **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

KASHINO, N.; TAKAHASHI,Y. Experimental studies on placement of recycled aggregate concrete. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2º Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988. **Proceedings**. Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. p. 557-564.

KASHINO, N.; TAKAHASHI,Y. Strength and elastic modulus of recycled aggregate. in: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2° Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988 **Proceedings**. Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. P. 557- 564.

KIKUCHI, M.; MUKAI, T.; KOZUMI, H. Properties of products containing recycled aggregate. In INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2º Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988. **Proceedings.** Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. p 595-604.

KIVEKÃS, L. **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

KROPP, J. **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

KUPERMAN,S.C.;SBRIGHI NETO, C. Reação álcalis-agregado:visão atual e a situação brasileira. In SIMPÓSIO SOBRE DURABILIDADE DO CONCRETO. **ANAIS.** p.100-124, 1998.

KYHARA, Y. The Influence of carbonation of the alkali-aggregate reaction mechanism. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT 10 **PROCEEDINGS. v.4** p.331-334, 1997.

LAGUETTE, M. J. Reciclaje: la clave para la conservación de recursos. **CONSTRUCTION PAN-AMERICANA**, julho 1995.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo 1997. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PCC/USP.

LEVY, S. M.; HELENE P. R. Restauração e recuperação de estruturas de concreto armado de escolas estaduais no Estado de São Paulo. **Téchene**. n. 47 p. 53-58 julho/agosto. PINI. São Paulo. 2000.

LEVY, S.M.; HELENE P. R. L**. Reciclagem do Entulho de Construção Civil, para Utilização como Agregado de Argamassas e Concretos**. São Paulo 1997. P. 148 Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Departamento de Engenharia de Construção Civil PCC/USP.

LIMA, J.A. Ribeiro**; Proposição de Diretrizes para Produção e Normalização de Resíduo de Construção Reciclado e suas Aplicações em Argamassas e Concretos.** São Paulo, 1999 240p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo.

LIMA, L. A. De; Hormigones com escorias de horno elétrico como áridos: propriedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Barcelona, 1999.p. 243. tese (Doutorado) - Escola Tècnica Superior d' Engiinyers de Camins, Canals i Ports, Universidade Politécnica de Catalunya.

LIMBACHIYA M.C.; LEELAWAT, T. D. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures,** novembro-2000.

LUPING, T. **Chloride transport in concrete-measurement and prediction.** Chalmers University of technology, Department of Building Technology, Göteborg, Sweden, 1996. Publication p 96:6.

MEHTA K. P.; MONTEIRO Paulo J. M. **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo. PINI, 1994. 574 p.

METHA, P. K. ; SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. Performance and durability of concrete systems. In: INTERNACIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 9. New Delhi, Nov.1992 **Procedings**.

MIJINSBERGEN, J.; The Delftse Zoom Housing Project **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

MONFORE, G.E. **The electrical resistivity of concrete**. Skokie, Portland Cement Association, May 1968. (Bulletin, 224).

NBR 05738 Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos 1994 *Procedimentos*

NBR 09204 Concreto endurecido - determinação da Resistividade Elétrica Volumétrica *Método de Ensaio* 1985

NBR 11686 Concreto fresco - Determinação do teor de ar aprisionado pelo método pressométrico *Método de ensaio* 1990.

NBR 5739 Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto *Método de ensaio* 1994.

NBR 7217 Agregado-Determinação da composição granulométrica *Método de Ensaio* 1987

NBR 7225/93 Materiais de pedra e agregados naturais -Terminologia

NBR 8522 Determinação do módulo de deformação estática e diagrama - Tensão deformação *Método de ensaio* 1984.

NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa especifica 1987

NBR 9833 Concreto fresco - determinação da massa específica e do teor de ar aprisionado pelo método gravimétrico * Método de ensaio* 1987.

NETO, H. Lopes Encarregado da Central de Triagem e Reciclagem do Município de Vinhedo. Comunicação pessoal via telefônica Outubro 2001.

NEVILLE A.M. **Propriedades do Concreto**, São Paulo, PINI. 1997. 828 p.

NISCHER, P. Influence of concrete quality and environment on carbonation. In: RILEM SEMINAR, Hanover **Proceedings** 1984 p.231-238.

ONYEJEKWE O. O.; & REDDY N. A numerical approach to the study of Chloride ion penetration into concrete, **Magazine of Concrete Research** 52 n. 4 Aug. 2000, p.243-250.

PAULON, V. A; **Reações álcali-agregado em concreto**. São Paulo 1981. p.114 dissertação (mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PETROCOKINO, M.D Les Divers Aspects de la Corrosión des Armatures dans les Ouvrages en Béton Armé e Précontraint**. Annales de L' Institute Technique du Bâtiment et des Travois Publics** v. 13 n. 153, p. 915 –36, 1960.

PINTO, T.P. Bacias de Captação de Resíduos Sólidos –Instrumento Para Uma Gestão Sustentável Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana, In: III SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL junho 2000, São Paulo SP **ANAIS**, São Paulo, junho 2000 PCC/USP, IBRACON. p 25-34.

PINTO, T.P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo 1999. 189 p. tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil.

QUADROS, C.E.B.; OLIVEIRA A.M. V. Reciclagem de Entulho para Produção de Materiais de Construção. **Projeto Entulho Bom**. Salvador Bahia. EUFBA 2001, p. 116-141.

RASHEEDUZZAFAR & KHAN A.; Recycled concrete - a source for new aggregate. **Cement Concrete, and Aggregates**- (ASTM), v. 6, n.1, 1984 p. 17-27

RAVINDRADRJAH, R.S.; LOO,Y.H.; TAM, C.T. Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in-situ tests **Materials and Structures** v.21 p. 289-295

RAVINDRARAJAH, R.S.; LOO, Y. H.; TAM, T.C. Recycled aggregate as fine and coarse aggregates in concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 39 n.141 December 1987 p. 214-220.

RAVINDRARAJAH, R.S.; TAM, T.C. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. **Magazine of Concrete Research**. v. 37 n. 130 march 1985 p.29-38.

RILEM TC 121-DRG RILEM RECOMMENDATION Specifications for concrete with recycled aggregates **Materials and Structures.** 27, p. 557 – 559. 1994.

ROUSSEAU, E. **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

SCHIESSL Apud CAMPBELL-ALLEN, D., RPER, H. **Concrete structures: materials, maintenance and reaper**. New York, John Wiley, 1991 p.108.

STATON apud MEHTA K. P & MONTEIRO Paulo J. M. ; **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo PINI 1994. 574 p.

TAKIZAKI M et al.; Strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY 2. v2 **PROCEEDINGS.** Reuse of Demolition Waste ed. Y.Kasai Nihon Daigaku Kailan, Tokyo, Japan, Chapman & Hall, London. 1988. p.557- 564.

TERRA, L.. E. Finos de pedreira para confecção de concreto estrutural – práticas recomendadas. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2. São Paulo 1999. **ANAIS.** IBRACON CT- 206 p.65-71,1999.

TUUTTI, K.; **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and concrete Research Institute. 1982 p 30

Use of Recycled Materials as Aggregates in the Construction Industry v1 Bruxelas ETN Recycling in construction March/September 1999.

VALVERDE, F.M. Mineração de areia e brita e a preservação ambiental. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA

CONSTRUÇÃO CIVIL 2, São Paulo SP 1999. **ANAIS** CT 206 IBRACON, São Paulo, 1996 p. 87-101.

VAZQUEZ, Enric Utilización de residuos en la C.E.E. aspectos políticos y ambientales. In: RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONOMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL (SEMINÁRIO), São Paulo 1997. **ANAIS** São Paulo CT 206 IBRACON p 64 –66.

WEDLER,B.; HUMMEL A. **Trümmerverwertung und ausbau von brandruinen**. Wilhelm Ernest & Sohn, Berlin, 1946.

WIRQUIN, E. ; HAHDJEVA-ZAHAARIEVA, R.; BUYLE-BODIN F. Utilisation de l'absortion d´eau des bétons comme critères de leur durabilité- Aplication aux bétons de granulats recyclés**. Materials and Strucutres/ materiaux et Constructions.** v.33, p. 403-408, julho de 2000.

YAMAMOTO, T.; EMOTO Y. SOEDA, M.; SAKAMOTO, Y.; Some properties of recycled aggregate concrete. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2º Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988. **Proceedings**. Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. p 643-651.

YANAGI, K.; HISAKA, M.; KASAI, Y Effect of impurities in recycled coarse aggregate up on a few properties of the concrete produced with it. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY. 2° Reuse of demolition waste v 2-Nihon Daigaku Kaikan Tokyo Japan 1988. **Proceedings.** Y. Kassai - London, Chapman & Hall Nov.-1988. pp 613- 620

ZAGURSKIJ, V. A.; ZHADANOVSKIJ, B. V. Breaking reinforced concrete and recycled crushed materials. **Research Institute for Concrete (GISSTROY)** Moscow- 1985. Special Technical Report.

ANEXO I RESULTADOS OBTIDOS NO LABORATÓRIO

ANEXO II DIAGRAMAS DE DOSAGEM PARA AS PROPRIEDADES PESQUISADAS