

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE
AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE USINAS
CONCRETEIRAS NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO**

Iara Lilian Rocha de Abreu

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2016

Iara Lilian Rocha de Abreu

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE
AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE USINAS
CONCRETEIRAS NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais Cimentícios

Área de concentração: Materiais de Construção Civil
Orientador: Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2016

A162c

Abreu, Iara Lilian Rocha de.

Contribuição ao estudo da influência da utilização de agregados miúdos reciclados provenientes de usinas concreteiras na carbonatação do concreto [manuscrito] / Iara Lilian Rocha de Abreu. – 2016. xxi, 94 f., enc.: il.

Orientador: Aldo Giuntini de Magalhães.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 86-94.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Concreto - Teses. 3. Porosimetria - Teses. 4. Carbonatos - Teses. I. Magalhães, Aldo Giuntini. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691(043)

IARA LILIAN ROCHA DE ABREU

**"CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE
AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE USINAS
CONCRETEIRAS NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO"**

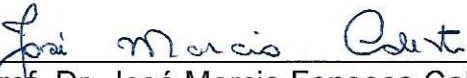
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 07 de julho de 2016


BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães
Orientador - UFMG



Prof. Dr. José Marcio Fonseca Calixto
UFMG



Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
CEFET/MG

Dedico este trabalho primeiramente ao Eterno meu Deus Rei do Universo, ao meu amado e dedicado marido Hezrom, aos meus maravilhosos filhos Iohanan e Hannah, aos meus carinhosos pais Maria e Dilermando, a minha querida irmã Sarah, ao meu sobrinho e quase filho Rodrigo e a todos aqueles que me incentivaram a crescer a cada dia.

“Por tudo isso, seja louvado e enaltecido teu nome, Soberano, por todo sempre.”

AGRADECIMENTOS

“Reconheço com gratidão que tu, Eterno, meu Deus e Deus dos meus antepassados, és fonte de vida, meu amparo e meu protetor, de geração em geração. Agradeço a ti pela minha existência e pelos inúmeros milagres da minha vida diária. Ó bondoso, tua generosidade não se esgota”.
(Sidur judaico)

Minha vida tem sido marcada por muitas realizações, mas cada realização só se tornou possível porque fui abençoada em ter ao meu lado pessoas maravilhosas que construíram esta vitória junto comigo.

Cada pessoa que me acompanhou ao longo da caminhada que me trouxe a este momento, foi colocada por Deus, meu protetor, detentor de todo conhecimento e sabedoria, ao qual devo toda minha gratidão e devoção.

Durante todo este processo pude contar com a generosidade, com o companheirismo, com a lealdade de várias pessoas sendo devedora desta forma de muitos agradecimentos:

Ao meu amado marido, amigo, companheiro e suporte Hezrom, sem o qual eu não teria nem iniciado e nem finalizado este mestrado.

Aos meus lindos, carinhosos e compreensivos filhos, que me dão alegria de viver todos os dias.

À minha dedicada e generosa mãe, com a qual podemos contar sempre e sempre, e a minha querida irmã Sarah que sempre será “meu anjo mais velho”.

Ao Prof. Aldo que se mostrou um professor dedicado e disponível para ensinar, com um conhecimento respeitável, me orientou de forma brilhante na condução deste trabalho.

Ao Prof. Conrado do CEFET-MG, aos técnicos do laboratório Ricardo, da UFMG e Adalberto do CEFET-MG, cujo apoio viabilizou a realização de testes de laboratório, sem os quais este trabalho não seria possível. Ao Prof. José Antônio Belline da Cunha Neto da UFSC pela ajuda na interpretação dos resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Ao Laboratório de Materiais Cimentícios da Escola de Engenharia da UFMG (LabMac) pelo fornecimento da infraestrutura necessária para realização dos ensaios.

Ao colega Evando, que prontamente me ajudou todas as vezes que foi solicitado e também aos colegas Angel e Carla Dabian pela inestimável ajuda prestada.

Aos professores do DEMC que transmitiram durante todo o curso tantos conhecimentos técnicos valorosos, registrando um agradecimento especial ao Prof. Calixto.

Ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro, à BETONMIX pelo apoio técnico, e fornecimento de materiais que viabilizaram esta pesquisa e a Cimento Holcim pelo fornecimento dos relatórios de caracterização do cimento utilizado.

Ao meu pai, ao meu sobrinho Rodrigo, aos amigos e familiares, e a todos àqueles que fazem minha vida mais colorida, o meu MUITO OBRIGADA!

“O que sabemos é uma gota e o que não sabemos é um oceano.”

Isaac Newton

RESUMO

Este estudo tem como objetivo contribuir na investigação da influência da substituição parcial dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados obtidos a partir do processamento de resíduos gerados da lavagem de caminhões betoneira de usinas de concreto, avaliando seu impacto na resistência à compressão, na trabalhabilidade, na porosidade e no avanço da frente de carbonatação do concreto, uma vez que estes fatores interferem diretamente no desempenho estrutural e na durabilidade das estruturas de concreto armado. A carbonatação é um problema que vem se agravando em função do aumento da concentração do dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera dos grandes centros urbanos e a porosidade do concreto influencia na sua capacidade em absorver o CO₂. Como a qualidade do agregado interfere na porosidade do concreto, a investigação da influência do agregado reciclado, torna-se de extrema relevância para viabilizar sua utilização. Utilizou-se nesta pesquisa dois tipos de proporções de misturas para o desenvolvimento, sendo que no primeiro tipo foram feitos corpos de prova com 100% de agregado natural e, no segundo, corpos de prova com 30% de substituição do agregado natural por agregado reciclado miúdo proveniente do processamento dos resíduos gerados da lavagem de caminhões betoneira de uma concreteira situada na região metropolitana de Belo Horizonte. Ambos foram dosados de modo a atender às especificações da ABNT NBR 6118:2014 para concretos estruturais expostos a ambiente com classe de agressividade moderada, cuja classificação ambiental é a urbana, que determina uma relação $a/c \leq 0,60$ e classe de resistência à compressão ≥ 25 MPa. Os corpos de prova foram submetidos ao teste de carbonatação acelerada ficando expostos a condições controladas de umidade, temperatura e concentração de CO₂. Os resultados encontrados sugerem que a substituição parcial dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados nas proporções utilizadas nesse estudo piorou ligeiramente o desempenho do concreto quanto ao avanço da frente de carbonatação. Os testes de resistência à compressão atenderam os requisitos mínimos exigidos pela norma brasileira para a classe de agressividade estudada. O teste de permeabilidade ao oxigênio apresentou para o traço CPAR, aos 77 dias, um valor para o coeficiente de permeabilidade 10,8 % maior que o obtido para o traço CPP. Já o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio sugere que o tamanho dos vazios encontrados no compósito de matriz cimentícia é tão importante quanto o volume total de poros, ao se fazer a análise dos resultados.

Palavras-Chave: concreto, agregado miúdo reciclado, carbonatação, permeabilidade ao oxigênio, porosimetria de mercúrio.

ABSTRACT

This study aims to contribute to the investigation of the influence of the partial replacement of the natural fine aggregates by recycled fine aggregates obtained from the waste generated from the concrete truck mixer truck washing, evaluating its impact on the compressive strength, the workability, in the porosity and in the advance of the carbonation front of the concrete, since these factors directly interfere in the structural performance and the durability of the reinforced concrete structures. Carbonation is a problem that is worsening due to the increase in the concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere of large urban centers and the porosity of the concrete influences its capacity to absorb CO₂. As the quality of the aggregate interferes in the porosity of the concrete, the investigation of the influence of the recycled aggregates becomes of extreme relevance to make feasible its use. In this study, two types of mixtures for development were used: in the first type, samples were made with 100% natural aggregate and, in the second, specimens with 30% natural aggregate replacement per recycled aggregate from the processing of the waste generated from the concrete truck washing of a concrete plant located in the metropolitan area of Belo Horizonte. Both were dosed in order to meet the specifications of ABNT NBR 6118: 2014 for structural specimens exposed to an environment with moderate aggression class, whose environmental classification is urban, which determines a relation to $f_c \leq 0.60$ and class of resistance to compression ratio ≥ 25 MPa. The test specimens were subjected to the accelerated carbonation test and exposed to controlled conditions of humidity, temperature and CO₂ concentration. The results suggest that the partial replacement of the natural fines aggregates by recycled fines aggregates in the proportions used in this study slightly worsened the performance of the concrete in relation to the advance of the carbonation front. The compressive strength test attended the minimum requirements required by the Brazilian standard for the class of aggression studied. The oxygen permeability test presented, for the CPAR mixes, at 77 days, a value for the permeability coefficient 10.8% higher than that obtained for the CPP mixes. However, the mercury intrusion porosimetry test suggests that the void size found in the cementitious matrix composite is as important as the total pore volume when the results are analyzed.

Keywords: concrete, fines recycled aggregates, carbonation, oxygen permeability, mercury porosimetry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Conceituação de vida útil da estrutura	6
Figura 2.2 - Fases que determinam a durabilidade da estrutura	8
Figura 2.3 - Composição usual das frações volumétricas do concreto	9
Figura 2.4 - Características dos agregados versus propriedades do concreto	10
Figura 2.5 - Imagem da eclusa de Berendrech na Bélgica	15
Figura 2.6 - Composição de resíduos provenientes de usinas de reciclagem situadas em Ribeirão Preto, SP	17
Figura 2.7 - Composição de resíduos provenientes de uma usina de inertes situada em Porto Alegre, RS	18
Figura 2.8 - Curva granulométrica de agregado miúdo natural e agregado miúdo reciclado e os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT,2009)	20
Figura 2.9 - Diagrama do aparelho de permeabilidade ao oxigênio	24
Figura 2.10 - Efeito do uso de agregados reciclados na distribuição de poros do concreto	28
Figura 2.11 - Coeficiente de permeabilidade ao oxigênio em concretos produzidos com a incorporação de agregados reciclados	29
Figura 2.12 - Efeito da cura no índice de permeabilidade ao oxigênio	29
Figura 2.13 - Fatores intervenientes na carbonatação do concreto	32
Figura 2.14 - Mecanismos de carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$	33
Figura 2.15 - Gradiente de pH na região da frente de carbonatação	34
Figura 2.16 - Evolução da carbonatação em função da relação água cimento	35
Figura 2.17 - Esquema simplificado da célula de corrosão	35
Figura 2.18 - Relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão para diferentes porcentagens de substituição	39

Figura 2.19 - Relação entre a resistência à compressão e a profundidade de carbonatação em um concreto convencional	39
Figura 2.20 - Relação entre fator água cimento e avanço da frente de carbonatação	40
Figura 2.21 - Avaliação do módulo de elasticidade em concretos com agregados reciclados	43
Figura 2.22 - Resistência à compressão versus relação água cimento aos 28 dias	45
Figura 2.23 - Resistência à compressão versus relação água cimento aos 365 dias	45
Figura 3.1 - Programa experimental	47
Figura 3.2 - Resíduo proveniente da lavagem dos caminhões	54
Figura 3.3 - Baía de resíduos úmidos	54
Figura 3.4 - Baía de resíduos secos	55
Figura 3.5 - Cura dos corpos de prova em câmara úmida	58
Figura 3.6 - Equipamento de vácuo	59
Figura 3.7 - Célula de alumínio do equipamento Controls 58-E0031	60
Figura 3.8 - Pneu de borracha do equipamento Controls 58-E0031	60
Figura 3.9 - Painel do permeâmetro ao oxigênio para concretos	60
Figura 3.10 - Manômetro para conferência de pressão de ar	61
Figura 3.11 - Corte da amostra para o ensaio de porosimetria de mercúrio	62
Figura 3.12 - Porosímetro Quantachrome PoreMaster 60	62
Figura 3.13 - Balança digital utilizada na pesagem do penetrômetro	63
Figura 3.14 - Esquema de corte das amostras para leitura do pH e medição da profundidade de carbonatação	64
Figura 3.15 - Corte dos corpos de prova	64
Figura 3.16 - Condições de exposição das amostras	65
Figura 3.17 - Medição de pH na face interna da amostra serrada	66

Figura 3.18 - Espessuras carbonatadas medidas com paquímetro	66
Figura 3.19 - Espessura carbonatada avaliada por meio de processamento de imagens	67
Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados	70
Figura 4.2 - Caracterização do agregado miúdo reciclado realizada por meio de difratometria de raio X	72
Figura 4.3 - Curva granulométrica do agregado graúdo e os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009)	73
Figura 4.4 - Curvas incrementais de intrusão de mercúrio	77
Figura 4.5 - Evolução da profundidade de carbonatação em função do tempo nos CPPs	79
Figura 4.6 - Evolução da profundidade de carbonatação em função do tempo nos CPARs	80
Figura 4.7 - Avanço da frente de carbonatação nos CPs submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada	81
Quadro 2.1 - Obras de concreto com agregado reciclado na Alemanha	15
Quadro 2.2 - Obras de concreto com agregado reciclado na Holanda	16
Quadro 2.3 - Concentração de CO ₂ conforme o tipo de ambiente	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais estatísticas relacionadas aos agregados graúdos utilizados no Brasil	12
Tabela 2.2 - Balanço do consumo de agregados no setor da construção civil	12
Tabela 2.3 - Consumo de agregados nas regiões brasileiras nos anos 2010 e 2011	13
Tabela 2.4 - Geração dos resíduos e porcentagem de reuso ou reciclagem em países da Europa	16
Tabela 2.5 - Dados comparativos das propriedades de agregados graúdos naturais e reciclados	21
Tabela 2.6 - Classificação da durabilidade do concreto, em função de seu índice de permeabilidade do oxigênio	25
Tabela 2.7 - Porosidade aos 28 dias e coeficiente de permeabilidade ao oxigênio de concretos produzidos com diferentes teores de agregados reciclados	28
Tabela 2.8 - Influência do teor de agregados reciclados na absorção de água e no volume de poros	30
Tabela 2.9 - Profundidade de carbonatação aos 56 dias obtidos nos estudos de Pedro <i>et al.</i>	36
Tabela 2.10 - Profundidade de carbonatação obtidos nos estudos de Levy e Helene	38
Tabela 2.11 - Comparação das propriedades de concretos com diferentes classes de resistência avaliando-se o efeito do uso de agregados reciclados	41
Tabela 2.12 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão	42
Tabela 2.13 - Valores de resistência à tração de concretos aos 7 e 28 dias	44
Tabela 3.1 - Teores normativos dos componentes do cimento Portland CP II-E-32	48
Tabela 3.2 - Propriedades químicas do cimento CP II-E-32 utilizado	48
Tabela 3.3 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II-E-32	49

Tabela 3.4 - Especificações de dosagem dos corpos de prova	57
Tabela 3.5 - Consumo de materiais para produção dos corpos de prova	57
Tabela 4.1 - Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo natural	68
Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo reciclado	69
Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo utilizado	69
Tabela 4.4 - Características físicas dos agregados miúdos naturais e reciclados	70
Tabela 4.5 - Composição mineralógica do agregado miúdo reciclado	72
Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de granulometria do agregado graúdo	73
Tabela 4.7 - Características físicas do agregado graúdo	74
Tabela 4.8 - Resultado do <i>Slump Test</i>	74
Tabela 4.9 - Resultado dos testes de resistência à compressão	75
Tabela 4.10 - Leituras realizadas no ensaio de permeabilidade ao oxigênio do CPP	75
Tabela 4.11 - Leituras realizadas no ensaio de permeabilidade ao oxigênio do CPAR	76
Tabela 4.12 - Resultado do teste do coeficiente de permeabilidade ao oxigênio	76
Tabela 4.13 - Índice de permeabilidade em escala logarítmica	76
Tabela 4.14 - Resultados obtidos para o pH dos concretos	78
Tabela 4.15 - Profundidades de carbonatação obtidas por meio de um paquímetro digital e do software <i>Image J</i>	79
Tabela 4.16 - Constante de difusibilidade dos traços ensaiados	81

LISTA DE UNIDADES

cm	centímetro
cm ²	centímetro quadrado
GPa	gigapascal
g	grama
°	grau
°C	grau Celsius
h	hora
kPa	kilopascal
MPa	megapascal
Mt/ano	megatoneladas por ano
m	metro
m ³	metro cúbico
m ²	metro quadrado
µm	micrômetro
ml	mililitro
mm	milímetro
Psi	<i>pound force per square inch</i>
%	porcentagem
kg/dm ³	quilograma por decímetro cúbico
kg/ m ²	quilograma por metro quadrado
s	segundos
t	Toneladas

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
BRE	Building Reserch Establishment
CEMBUREAU	European Cement Associantion
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difratometria de Raio X
ICDD	International Centre for Diffraction Data
MIP	Mercury Intrusion Porosimetry
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
pH	Potencial Hidrogeniônico

LISTA DE SÍMBOLOS

Ca	Cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
cos	Cosseno
CP II-E-32	Cimento Portland composto com adição de escória - classe 32 MPa
CP	Corpos de prova
CPP	Corpos de prova padrão
CPAP	Corpos de prova com agregado reciclado
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
E _{ci}	Modulo de elasticidade inicial
E _{cs}	Modulo de elasticidade secante
H ₂ O	Água
H ₂ S	Gás sulfídrico
Hg	Mercúrio
m	Massa
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₂	Dióxido de enxofre
V	Volume
α _i	Parâmetro de instabilidade
θ	Teta

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 - Equação de Hagen-Poiseuille	22
Equação 2.2 - Equação de Hagen-Poiseuille para oxigênio à temperatura de 20°	22
Equação 2.3 - Equação de Hagen-Poiseuille simplificada	23
Equação 2.4 - Índice de permeabilidade ao oxigênio	25
Equação 2.5 - Equação de Washburn	26
Equação 3.1 - Massa específica do agregado seco	50
Equação 3.2 - Massa unitária	51
Equação 3.3 - Teor de argila em torrões	51
Equação 3.4 - Materiais pulverulentos	52
Equação 3.5 - Massa específica do agregado graúdo seco	53
Equação 4.1 - Espessura carbonatada obtida a partir da Segunda Lei de Fick	80

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE UNIDADES	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
LISTA DE EQUAÇÕES	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral	2
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Estrutura do trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Características relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto	5
2.2 Agregados	8
2.3 Reservas naturais de agregados	11
2.4 Produtos substitutos dos agregados naturais	14
2.5 Resíduos da construção civil	17
2.6 Agregados reciclados	18
2.7 Porosidade e permeabilidade do concreto	22
2.7.1 Porosidade e permeabilidade em concretos fabricados com agregados Reciclados	27
2.8 Carbonatação	30
2.8.1 Carbonatação em concretos fabricados com agregados reciclados	36
2.9 Concretos para fins estruturais fabricados com agregados reciclados	40
2.9.1 Propriedades mecânicas do concreto fabricado com agregados reciclados	41
a) Módulo de elasticidade	42
b) Resistência à tração	43
c) Resistência característica à compressão	44

3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 Caracterização dos materiais	47
3.1.1 Cimento	48
3.1.2 Agregados	49
3.1.2.1 Agregado miúdo natural	49
a) Ensaio de caracterização granulométrica	50
b) Ensaio de massa específica do agregado seco	50
c) Ensaio de massa unitária	50
d) Ensaio de teor de argila	51
e) Ensaio de materiais pulverulentos	51
f) Ensaio de módulo de finura	52
3.1.2.2 Agregado graúdo natural	52
a) Ensaio de granulometria	52
b) Ensaio de massa específica do agregado graúdo seco	53
c) Ensaio de massa unitária	53
3.1.2.3 Agregado miúdo reciclado de concreto	53
a) Procedimentos para obtenção do agregado miúdo reciclado de concreto	53
b) Ensaio de caracterização do agregado miúdo reciclado	55
c) Difração de Raio X	55
3.1.3 Água	56
3.2 Dosagens do traço do concreto	56
3.3 Teste de consistência do concreto – <i>Slump Test</i>	57
3.4 Moldagem e cura dos corpos de prova	57
3.5 Ensaio de resistência característica à compressão	58
3.6 Ensaio de permeabilidade ao oxigênio	58
3.6.1 Preparação da amostra	58
3.6.2 Equipamento para o ensaio de permeabilidade ao oxigênio	59
3.6.3 Procedimentos do ensaio de permeabilidade ao oxigênio	61
3.7 Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio	61
3.8 Ensaio de carbonatação acelerada	63
3.8.1 Marcação dos corpos de prova	63
3.8.2 Corte dos corpos de prova	64
3.8.3 Limpeza das amostras	65

3.8.4	Câmara de carbonatação	65
3.8.5	Medição de pH	65
3.8.6	Medição da profundidade de carbonatação	66
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
4.1	Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos	68
4.1.1	Caracterização granulométrica	68
4.1.2	Caracterização física	70
4.1.3	Difração de raio X do agregado miúdo reciclado	71
4.2	Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo	72
4.2.1	Caracterização granulométrica	72
4.2.2	Caracterização física	74
4.3	Consistência do concreto – <i>Slump Test</i>	74
4.4	Resistência à compressão	74
4.5	Permeabilidade ao oxigênio	75
4.6	Porosimetria por intrusão de mercúrio	77
4.7	Potencial hidrogeniônico dos concretos	77
4.8	Medição da profundidade de carbonatação	78
5.	CONCLUSÕES	84
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável tem imposto restrições ao uso de matérias-primas não renováveis, fato que tem reflexo direto na construção civil. Esse setor consome globalmente mais insumos que qualquer outra atividade econômica exercida no planeta, atingindo marcas de aproximadamente 3000 Mt/ano, o que representa quase 50 %, em massa, do consumo mundial (TORGAL; JALALI, 2010).

Dentre as matérias-primas utilizados nas construções, os agregados ocupam um lugar de destaque, uma vez que são os insumos minerais mais consumidos no planeta (VALVERDE, 2001). Só no Brasil, segundo a ANEPAC (Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção Civil), a crescente demanda por agregados fez com que sua produção aumentasse de aproximadamente 240 milhões de toneladas em 2000 para cerca de 670 milhões de toneladas em 2014. Dentre os segmentos consumidores de agregados, as concreteiras se destacam, consumindo cerca de 32% da brita e 20 % da areia produzida no país, seguidos das construtoras com consumo de 24 % da brita e 15 % da areia.

Nesse contexto, a utilização dos agregados reciclados para a produção de concretos se apresenta como uma alternativa ambientalmente interessante. Atualmente, vários estudos têm sido realizados com o objetivo de viabilizar esse propósito, visando não somente se atingir a resistência à compressão especificada, mas também buscando garantir a durabilidade do concreto feito com agregados reciclados.

De um modo geral, vários estudos, como o realizado por Thomas *et al.* (2012), indicam que concretos produzidos a partir de agregados reciclados podem ter suas propriedades mecânicas afetadas, assim como o comprometimento de aspectos relacionados a garantia da durabilidade das estruturas. A densidade, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade são

relativamente mais baixos do que o do concreto de referência, sendo que, a permeabilidade, a taxa de carbonatação e o risco de corrosão são maiores. Sabe-se, entretanto, que tais concretos são capazes de atingir a resistência à compressão mínima exigida para fins estruturais estabelecida pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para garantir o bom desempenho das estruturas de concreto durante sua vida útil, o estudo da carbonatação ocupa um papel de fundamental importância. Dessa forma, a avaliação da evolução da profundidade de carbonatação nos concretos feitos com agregados reciclados é necessária para se estabelecer critérios de utilização deste tipo de agregado, sem trazer prejuízo à durabilidade da estrutura.

Levy (2006), a partir de suas pesquisas, entende que qualquer iniciativa que tenha por finalidade a utilização de concretos com agregados reciclados é relevante, não só por contribuir para a preservação do meio ambiente, mas também por constatar que a utilização de tais agregados proporciona ao concreto um desempenho final próximo ao do concreto de referência, com um custo equivalente ou inferior, classificando como irrefutáveis as evidências técnicas que comprovam a qualidade desta opção.

Com a finalidade de contribuir para a avaliação da influência da utilização dos agregados reciclados provenientes dos resíduos gerados da lavagem de caminhões das concreteiras em concretos estruturais, essa pesquisa visa estudar a profundidade de carbonatação do concreto, monitorando o avanço da frente de carbonatação por meio de um equipamento específico para medição do pH em superfícies de compósitos cimentícios, associado à utilização do indicador de fenolftaleína. Para tanto, corpos de prova foram submetidos a um processo de carbonatação em condições controladas e estáveis de umidade relativa, temperatura e concentração de dióxido de carbono, cujos valores aqui definidos tomaram como base outros estudos sobre carbonatação.

1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo contribuir para a avaliação da influência da substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado, gerado a partir da lavagem de caminhões betoneiras, no avanço da frente de carbonatação do concreto.

1.2 Objetivos específicos

Este estudo tem como objetivos específicos:

- a) Descrever o preparo dos agregados reciclados obtidos a partir dos resíduos gerados da lavagem de caminhões betoneiras em uma central de concreto;
- b) Caracterizar os agregados reciclados obtidos a partir dos resíduos gerados da lavagem de caminhões betoneiras;
- c) Avaliar o efeito da substituição parcial do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado na resistência à compressão do concreto;
- d) Avaliar o efeito da substituição parcial do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado no avanço da frente de carbonatação do concreto.
- e) Avaliar o efeito da substituição parcial do agregado miúdo natural pelo agregado reciclado sobre a porosidade e permeabilidade do concreto.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos.

No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica, na qual se procura fornecer uma visão geral dos tópicos de maior relevância deste estudo. Primeiramente, são apresentados os conceitos básicos referentes às características relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto e a influência exercida pelos agregados. Em um segundo momento, são abordadas questões relacionadas à carbonatação do concreto e as consequências da utilização de agregados reciclados nesse fenômeno. São abordados também aspectos relacionados a porosidade e a permeabilidade do concreto.

No capítulo 3, são descritos os materiais e os métodos utilizados nessa pesquisa. Nele, será apresentado o plano experimental, englobando o número de corpos de prova confeccionados e

a descrição do seu processo de produção, além do método utilizado para a preparação das amostras para cada ensaio executado.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos para cada ensaio realizado e as respectivas análises dos mesmos. Busca-se com os resultados obtidos comparar o desempenho entre os concretos fabricados somente com agregados naturais, e os concretos fabricados com a substituição parcial dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados provenientes da lavagem de caminhões betoneiras. Diferentes teores da substituição foram avaliados.

O capítulo 5 apresenta as conclusões, e no capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas deste estudo.

Ao longo de todo o texto, apesar das recomendações da NBR 14724 (ABNT, 2011), a identificação das figuras será feita da maneira clássica, ou seja, aparecerá em sua parte inferior recebendo uma numeração sequencial associada ao capítulo em que se encontra. Do mesmo modo, somente serão explicitadas as fontes de referências que não forem produzidas pelo autor, especificamente para este trabalho.

2

REVISÃO DA LITERATURA

O concreto é produzido a partir da mistura de agregados graúdos, miúdos, cimento Portland e água, podendo ainda ser incorporados a esta mistura aditivos e adições de vários tipos. Todos estes componentes influenciam suas características, tornando importante se estabelecer uma dosagem que garanta um desempenho adequado para a função que lhe foi atribuída.

Nesta revisão bibliográfica busca-se avaliar os aspectos relacionados à durabilidade das estruturas de concreto armado e, mais especificadamente, analisar a influência do uso de agregados reciclados no concreto, tanto nas suas propriedades mecânicas, quanto no efeito produzido no avanço da frente de carbonatação verificada em sua matriz cimentícia.

2.1 Características relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto

Se for devidamente projetado e produzido para o ambiente em que irá servir, o concreto será um material extremamente durável, mas se sua concepção ou produção for inadequada, este pode deteriorar-se precocemente (TAYLOR, 1990). Para que seja considerada durável, a estrutura de concreto deve desempenhar as funções que lhe foram atribuídas pelo período de vida previsto (TROIAN, 2010).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece que a durabilidade “*consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração de projeto*”. Traz também o conceito de vida útil de projeto como sendo, “*o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor*”.

Segundo Taylor (1990), o conceito de vida de projeto para as estruturas de concreto está relacionado com a deterioração das propriedades esperadas para um nível inaceitável, em uma idade menor do que a prevista.

Segundo Helene (1997), as estruturas de concreto devem ser projetadas, construídas e utilizadas, de modo que, sob condições ambientais previstas, e respeitadas as devidas manutenções preventivas, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço, conforme indicado na Figura 2.1. Seu estudo associa vida útil de projeto ao período de tempo gasto para que se inicie a despassivação das armaduras. Já a vida útil de serviço ou de utilização é caracterizada pelo surgimento de manchas, fissuras e destacamentos na superfície do concreto. O período de tempo relativo à ruptura ou colapso da estrutura, seja este parcial ou total, é chamado de vida útil última ou total. Nesta etapa, há uma redução significativa da seção da armadura acompanhada de uma perda de aderência da mesma. Com relação ao conceito de vida útil residual, tem-se que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, mas neste momento deve-se realizar uma vistoria para diagnosticar o limite das condições de serviço da estrutura. O período de início da vida útil residual poderá ocorrer em qualquer instante do uso da estrutura, sendo este período diagnosticado no momento da vistoria sem, no entanto, permitir que seja conhecida a data especificada do seu início.

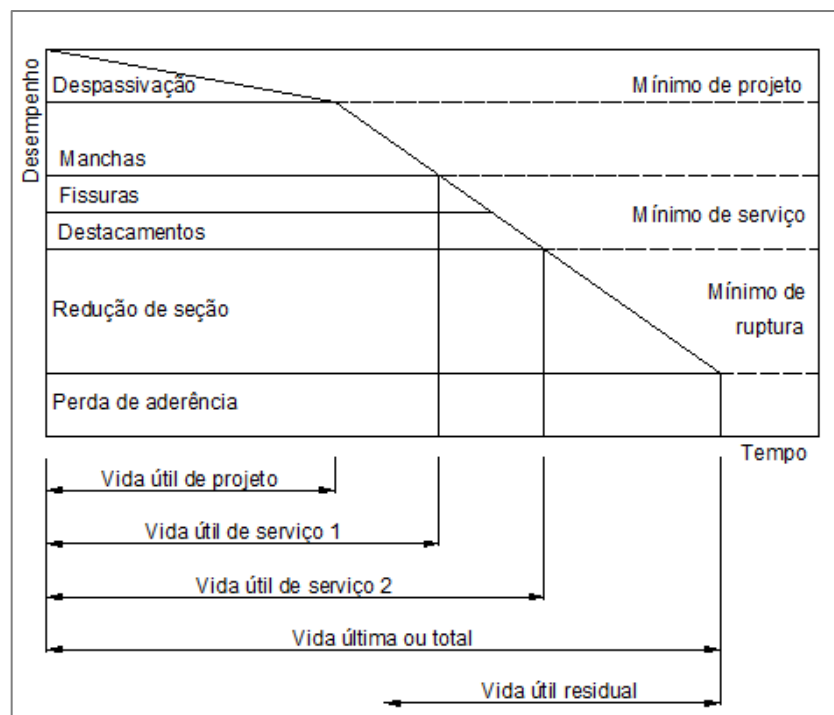


Figura 2.1 - Conceituação de vida útil da estrutura
 Fonte: Adaptado de HELENE, 2004, p.10.

Para Carmona (2005), o estado limite último está relacionado com a segurança estrutural e, quando ultrapassado, supõe um colapso total ou parcial da estrutura. Já o estado limite de serviço está relacionado com os requisitos de funcionalidade, conforto e estética.

Para Taylor (1990), a deterioração da estrutura pode ocorrer por meio de uma variedade de processos físicos ou químicos. Medina *et al.*, (2012) alegam que a performance do concreto durante sua vida útil pode ser mensurada por uma série de indicadores de durabilidade, dentre os quais, a permeabilidade ao oxigênio e ao dióxido de carbono, a difusão de íons de cloreto e a porosidade do concreto.

Kropp e Hilsdorf (1995) afirmam que o início do processo de corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado é, muitas vezes, considerado determinante para o tempo de vida da estrutura. Segundo Carmona (2005), a corrosão só irá ocorrer se existir água suficiente no interior do concreto para atuar como eletrólito capaz de transportar os íons das reações de corrosão, uma diferença de potencial elétrico entre as regiões da armadura e a presença de oxigênio. Mesmo que haja uma despassivação da armadura, se não houverem os elementos necessários, não acontecerá a corrosão. A extensão dos ataques que o concreto poderá sofrer vai ser influenciada por uma série de fatores, dentre os quais, a permeabilidade do concreto, as condições em que ele está exposto e o tipo de cimento utilizado. A qualidade do concreto influencia no grau de qualquer tipo de ataque (HEWLETT, 1988).

Para Gomes (2006), no que tange a durabilidade das armaduras, deve-se ter uma atenção especial quanto ao recobrimento mínimo das armaduras, visando garantir a proteção das estruturas de concreto armado.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define que os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado estão relacionados às ações mecânicas, às movimentações térmicas, aos impactos, à retração, a fluência e a relaxação. Com relação aos mecanismos de deterioração especificamente associados ao concreto, são apresentados a lixiviação, a expansão por sulfato e a reação álcali-agregado. As armaduras são deterioradas pela ação de cloretos e pela carbonatação. Todos estes mecanismos contribuem para a diminuição da durabilidade da estrutura.

Observa-se na Figura 2.2 que a durabilidade de uma estrutura depende de cuidados tomados em todas as etapas envolvidas no processo, desde a fase de projeto, passando pela escolha dos materiais, execução da estrutura e perdurando durante a fase de uso da mesma.

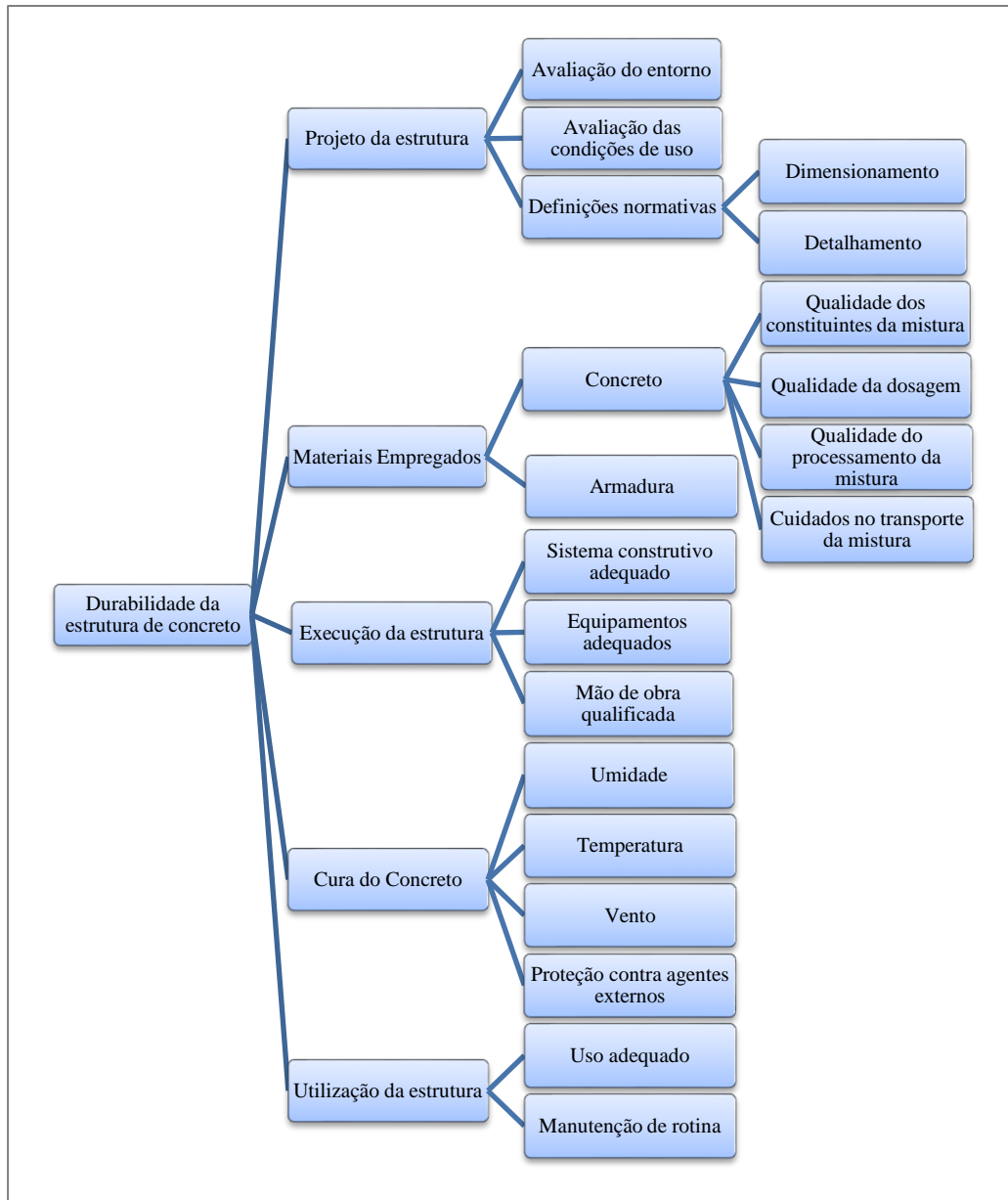


Figura 2.2 - Fases que determinam a durabilidade da estrutura

2.2 Agregados

Os agregados para construção civil são materiais minerais, granulares, inertes, sendo classificados, de acordo com a ABNT, segundo seu modo de obtenção, como naturais ou

artificiais. As mineradoras são capazes de produzir grandes volumes de agregados, estando usualmente localizadas próximas ao local de consumo (LA SENNA; RESENDE, 2009).

Quando utilizados na produção dos concretos, são classificados como agregados miúdos (areia) e agregados graúdos (brita e cascalho). Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009) estes *“devem ser compostos por grãos minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto”*.

Segundo Magalhães (2007), os agregados podem ser classificados de acordo com sua origem mineralógica, dimensões, forma, textura e peso. A classificação mineralógica ajuda no reconhecimento das propriedades do agregado e são definidas de acordo com a rocha de origem, podendo essas rochas serem ígneas, sedimentares ou metamórficas. A análise dos agregados segundo as suas dimensões é definida na NBR 7211 (ABNT, 2009), baseando-se na sua composição granulométrica. É classificado como agregado miúdo, quando seus grãos passam na peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com malha de 75 µm. Os agregados graúdos são aqueles cujos grãos passam na peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira com malha de 4,75 mm. A forma das partículas é medida nos agregados graúdos fornecendo o grau de arredondamento dos seus grãos por meio de seu índice de forma, determinado de acordo com a NBR 7809 (ABNT, 2008). Quanto ao peso os agregados são classificados como sendo leves, normais ou densos conforme sua massa específica aparente.

Segundo Valverde (2001), o concreto é composto por agregados, cimento Portland, água e aditivos químicos, conforme as proporções usuais apresentadas na Figura 2.3.

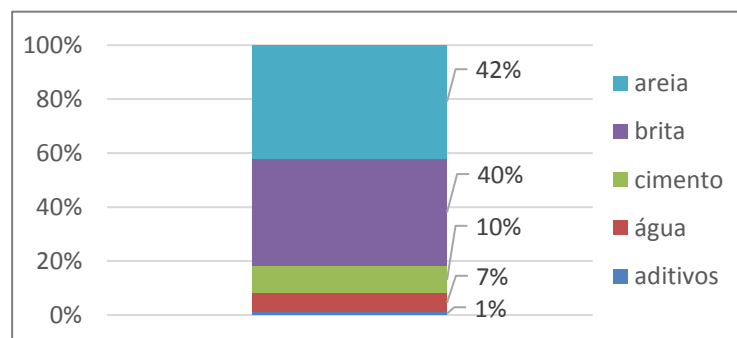


Figura 2.3 - Composição usual das frações volumétricas do concreto

Por representar cerca de $\frac{3}{4}$ do volume do concreto, os agregados têm influência direta na qualidade do mesmo, porém, estes não representam proporcionalmente ao seu volume o custo da composição do concreto.

Segundo Bernardes (2013), estudos sobre a microestrutura dos compósitos cimentícios mostram que os agregados têm um papel muito mais importante em sua constituição do que somente preenchimento. Magalhães (2007) apresenta uma relação entre os agregados e as propriedades do concreto que são influenciadas por eles, conforme apresentado na Figura 2.4.

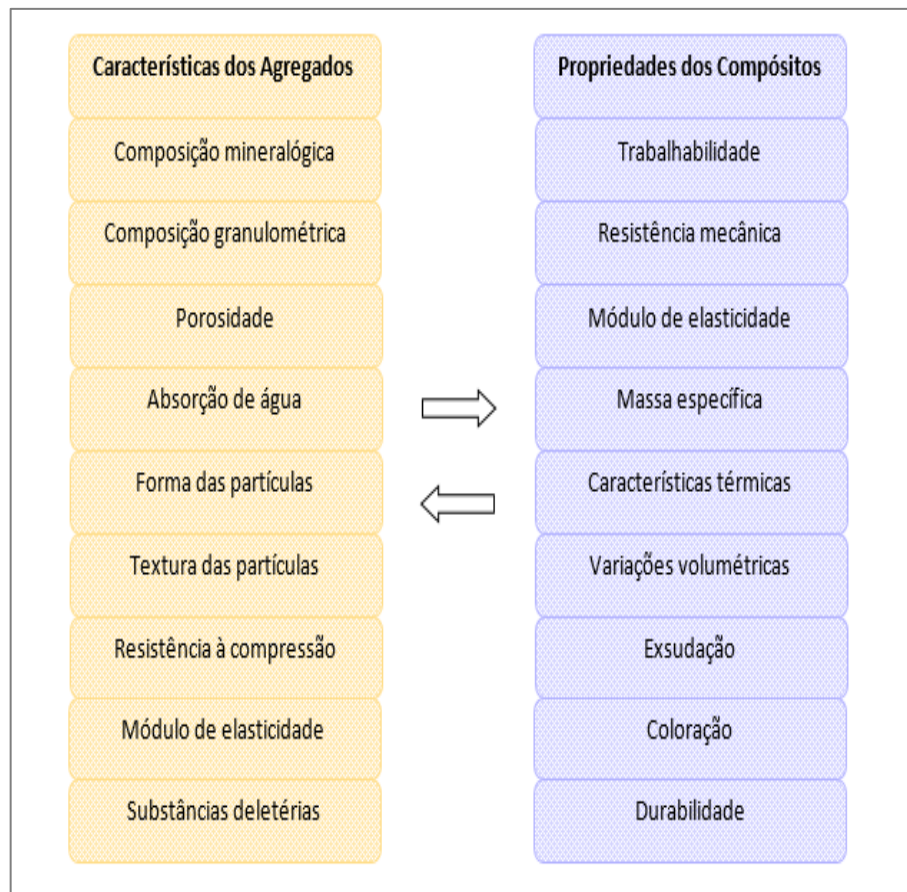


Figura 2.4 - Características dos agregados versus propriedades do concreto
Fonte: MAGALHÃES, 2007, p.13.

Como pode ser visto, os agregados impactam nas propriedades do concreto, influenciando sua resistência, sua durabilidade e seu desempenho estrutural. Valverde (2001) defende que, além de influenciar na resistência mecânica, os agregados influenciam também na retração, na massa unitária, na resistência à derrapagem e no custo final, além de alertar para o fato de que

as especificações inadequadas de agregados podem causar efeitos danosos aos concretos produzidos com cimento Portland em condições severas de temperatura.

2.3 Reservas naturais de agregados

Segundo La Senna e Resende (2009), as areias e rochas utilizadas na construção civil são abundantes na natureza, mas fatores externos à geologia, influenciam na relação entre a quantidade de reservas existentes e as realmente disponíveis para uso. Estes fatores são basicamente a distância entre a jazida e o local do consumo do agregado, e as leis restritivas à mineração. De acordo com o presidente executivo da ANEPAC, Fernando Mendes Valverde (2011), a produção de areia e brita vem atendendo satisfatoriamente à necessidade nacional, mas o declínio da disponibilidade de recursos devido ao inadequado planejamento, problemas ambientais, zoneamentos restritivos e usos competitivos do solo, vem tornando a exploração dos recursos naturais cada vez mais limitadas, ficando as garantias de suprimento futuro indefinidas.

Devido ao baixo valor unitário dos agregados, considera-se que se uma jazida estiver localizada a mais de 100 quilômetros de distância do mercado consumidor, ela se torna inviável economicamente. Como a mineração de agregados gera impactos ambientais, tais como a poluição sonora e do ar, quando as cidades se aproximam dos locais de produção, a população se mobiliza no intuito de afastar a mineração dos seus locais de moradia, levando a criação de leis municipais e de ocupação do solo, com zoneamentos mais restritivos à mineração.

As reservas de areia são formadas a partir de processos intempéricos, podendo ser seguidos ou não de outros processos do ciclo da rocha, como a erosão, o transporte ou a deposição. É um recurso explorado em todos os países, embora nem todos divulguem dados de sua produção. Os EUA por exemplo, produziram em 2013 um montante de 861.000.000 de toneladas de areia, enquanto que o Brasil produziu 377.248.000 t e o Canadá 225.010.000 t. Normalmente é um material que só se torna escasso em locais ou regiões de alta demanda.

A brita é obtida a partir de jazidas de rochas de diversos tipos, como, por exemplo, de rochas granitoides, de rochas basálticas e, têm-se ainda, a brita obtida a partir das rochas calcárias. Geralmente são abundantes mundialmente, com eventual escassez em regiões localizadas.

No Brasil, a areia não apresenta exportação ou importação significativa, entretanto, a brita e o cascalho apresentaram um total de 131.811 t em importação em 2013. Conforme apresentado na Tabela 2.1, foram exportadas também em 2013, um total 38.887 t de brita e cascalho para países como Bolívia, Venezuela, Peru e China (DNPM, 2014).

Tabela 2.1 - Principais estatísticas relacionadas aos agregados graúdos utilizados na construção civil no Brasil

Discriminação	2011 (t)	2012 (t)	2013 (t)
Produção	267.987.000	287.040.000	293.526.805
Importação	142.281	108.177	131.811
Exportação	31.204	21.169	38.887
Consumo	268.098.077	287.127.008	293.619.729

Fonte: DMPM, 2014, p.41.

No período entre 1998 e 2000 constatou-se um crescimento de 4,4% ao ano no consumo de agregados no Brasil. Em 2001, a ANEPAC fez uma projeção de crescimento para 2010, da ordem de 4% a 4,5% ao ano, baseando-se nos fatores de crescimento médio, período histórico, fatores sócio econômicos, financeiros e políticos do país. Tal projeção é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Balanço do consumo de agregados no setor da construção civil

Agregados para a construção civil (t)			
Histórico			
Ano	Areia	Brita	Total
2000	254.989.020	175.854.497	430.843.518
Projeção			
2005	303.006.600	209.466.000	513.192.600
2010	361.778.400	249.501.600	611.280.000

Fonte: Adaptado de VALVERDE, 2001, p. 13.

No Brasil, todas as unidades da federação são produtoras de agregados miúdos havendo uma variação significativa do consumo por região. Já com relação ao agregado graúdo, o estado do Acre é uma exceção em relação a produção de brita e cascalho, sendo o único estado a importar dos estados vizinhos brita para seu consumo (DNPM, 2014).

A ANEPAC, em 2012, apresentou os dados de consumo de agregados no Brasil por região para os anos de 2010 e 2011. O resultado do consumo total de agregados apurado em 2010, apresentado na Tabela 2.3, corresponde a um valor de 631.740.387 t, indicando que a projeção feita em 2002 apresentou boa precisão.

Tabela 2.3 - Consumo de agregados nas regiões brasileiras nos anos 2010 e 2011

Estados	Consumo de Agregados 2010 (t)	Representatividade 2010	Consumo de Agregados 2011 (t)	Representatividade 2011
Norte	43.175.411	7%	45.999.319	7%
Nordeste	128.122.364	20%	135.519.961	20%
Centro Oeste	55.832.105	9%	58.509.721	9%
Sudeste	303.345.237	48%	324.042.493	48%
Sul	101.265.270	16%	109.670.6369	16%
Brasil	631.740.387	100%	673.741.863	100%

Fonte: ANEPAC, 2012, p. 16.

De acordo com o sumário mineral de 2014 do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), o consumo de areia para construção no Brasil entre os anos de 2011 e 2013 passou 346.772.000 t para 377.247.785 t, o que representou um aumento de 8,07% no consumo. Conforme já apresentado na Tabela 2.2, a brita sofreu um aumento de consumo de 268.098.077 t em 2011 para 293.619.729 t em 2013, tendo assim um aumento da ordem de 8,68%. Como não existe importação ou exportação de areia, a produção da mesma coincide com o consumo brasileiro neste período; já a brita e o cascalho possuem um consumo um pouco superior a produção nacional, conforme dados do DNPM de 2014.

2.4 Produtos substitutos de agregados naturais

As fontes de agregados naturais são abundantes no Brasil e, por isto, sua escassez ainda não é uma preocupação. Todos os estados brasileiros são produtores de agregados, porém, algumas cidades como São Paulo, devido a sua alta demanda, já começam a ter necessidade de importar agregados das cidades vizinhas. Diante deste cenário, a busca por agregados que possam servir como substitutos dos agregados naturais começa a ter relevância no país, visto que estes não são recursos renováveis e as jazidas nem sempre estão em áreas ambientalmente licenciadas, tornando-se indisponíveis para extração.

Os agregados artificiais já são recursos amplamente utilizados na construção civil. Dentre os agregados artificiais pode-se citar a argila expandida, que é um material cerâmico produzido a partir da queima da argila natural, a areia produzida a partir da britagem de rochas, a areia marinha, a escória de alto forno e os agregados produzidos a partir de resíduos da construção civil. Estes, por sua vez, apresentam menor custo de produção em função dos menores custos de energia e transporte quando comparados aos agregados naturais, podendo até mesmo serem produzidos no local de produção do resíduo (LA SENNA; RESENDE, 2009).

Como ainda não existem normas reguladoras, Valverde (2001) defende a necessidade de estudos visando o estabelecimento de procedimentos seguros para a aplicação destes produtos.

A Alemanha se destaca por ser pioneira na utilização de resíduos, devido à grande quantidade de material produzido como fruto da segunda guerra mundial. Os entulhos deixados pela destruição das edificações neste período foram utilizados para confecção de blocos para reconstrução das cidades alemãs no pós-guerra e, a partir de 1996, na estrutura de unidades residenciais e comerciais. De acordo com Levy (2001), a partir de 1988, a Comunidade Européia executou um grande número de obras utilizando concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, alvenaria e até da mistura de ambos.

O Quadro 2.1 apresenta algumas obras na Alemanha onde foram utilizados resíduos de construção.

Quadro 2.1 - Obras de concreto com agregado reciclado na Alemanha

Ano	Obra Realizada	Aplicação
1945-2000	Reconstrução das cidades alemãs	Concretos normais, leves e blocos de concreto
1996-1997	Unidades residenciais e comerciais	Toda a estrutura
1999	Concretos, alvenaria de blocos cerâmicos e combinação de ambos	Peças decorativas

Fonte: adaptado de LEVY, 2001, p.7.

Na Bélgica, para ampliação do porto de Antuérpia, situado junto a eclusa de Berendrech, considerada a maior eclusa do mundo, foram utilizados 80.000 m³ de agregados reciclados provenientes da demolição das paredes da antiga eclusa, com um lançamento de 650.000 m³ de concreto. Este empreendimento, apresentado na Figura 2.5, mostrou ser viável a produção de concretos com resistência a compressão de 35 MPa aos 28 dias, utilizando tal tipo de agregado.



Figura 2.5 - Imagem da eclusa de Berendrech na Bélgica

Fonte: Site <http://www.flows.be/nl/shipping/proef-met-centrale-sluismelding-haven-antwerpen-maandag-van-start>, 2015.

Na obra do edifício do *Building Reserch Establishment* (BRE), sede de pesquisas sobre edifícios sustentáveis no Reino Unido, foram utilizados 1500 m³ de concretos produzidos com

agregados reciclados. Utilizou-se neste projeto, concretos da classe C25 nas fundações e C35 para lajes e pilares. Ainda na Inglaterra, o piso do laboratório de Cardinton, também pertencente ao BRE, foi executado utilizando-se 500 m³ de concreto produzido com agregados reciclados que continham 50% de resíduos de alvenaria, apresentando uma resistência à compressão, aos 91 dias, de 60 MPa, similar à de um piso construído exclusivamente com agregados naturais (LEVY, 2001).

Conforme apresentado por Pedrozo (2008), os países Europeus, por conhecerem o grande potencial destes materiais, tem incentivado a reciclagem de resíduos da construção. Na Holanda, devido à falta de recursos naturais no país, cerca de 80% de seus resíduos de construção são reaproveitados (TROIAN, 2010). No Quadro 2.2 são apresentadas obras na Holanda onde foram utilizados agregados reciclados.

Quadro 2.2 - Obras de concreto com agregado reciclado na Holanda

Ano	Obra Realizada	Aplicação
1988	Viaduto na rodovia RW-32	Muretas Laterais
1988	Eclusa na hidrovía de Haandrick	Laje Submersa
1989	Interligação entre a barragem e a Eclusa	Laje Submersa
1990	2º viaduto na rodovia RW-32	Todos os componentes da estrutura
1997-1998	Empreendimento residencial de médio padrão	Painéis pré-moldados de concreto

Fonte: Adaptado de LEVY, 2001, p. 4.

A Tabela 2.4, mostra a quantidade de resíduos gerados e o percentual reciclado, conforme dados fornecidos pela *European Comission* (EC).

Tabela 2.4 - Geração dos resíduos e porcentagem de reuso ou reciclagem em países da Europa

País	Geração de resíduo (em 1000 t)	% de reuso ou reciclagem	% incinerado ou enterrado
Alemanha	59	17	83
Reino Unido	30	45	55
Holanda	11	90	10
Bélgica	7	87	13

Fonte: Adaptado de EC, 2000, *apud* PEDROZO, 2008, p.10

2.5 Resíduos da construção civil

Segundo Levy (2006), as pesquisas relacionadas aos resíduos da construção tiveram início em 1928, com o objetivo de avaliar o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados oriundos de alvenaria e concretos britados. Sua aplicação, entretanto, ocorreu de forma significativa somente após o fim da Segunda Guerra mundial, na reconstrução das cidades europeias.

Os resíduos de construção e demolição são resíduos extremamente heterogêneos, variando, inclusive, de região para região, o que dificulta sua caracterização e a elaboração de critérios normativos. Zordam (1997) caracterizou e quantificou os resíduos provenientes de uma usina de reciclagem em Ribeirão Preto, São Paulo. Após analisar as amostras obtidas em quatro coletas, ele chegou a uma proporção média de cada tipo de material presente nos resíduos, e verificou que a composição da amostra possuía predominância de argamassa, correspondendo a 37,4% de sua composição, tendo ainda 21,1% de concreto, 20,8% de materiais cerâmicos (cerâmicas vermelhas), além de materiais de outra natureza, conforme apresentado na Figura 2.6.

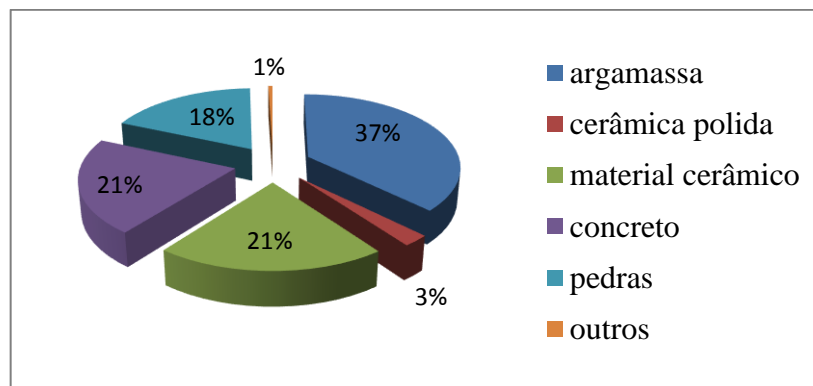


Figura 2.6 - Composição de resíduos provenientes de usinas de reciclagem situada em Ribeirão Preto, SP

Fonte: ZORDAM, 1997, p.89.

Em estudo semelhante, Leite (2011) caracterizou os resíduos de uma usina de inertes de um aterro em Porto Alegre, chegando a seguinte composição: 29,84% de rochas naturais, 28,26% de argamassa, 26,33% de material cerâmico e 15,18% de concreto, conforme apresentado na Figura 2.7.

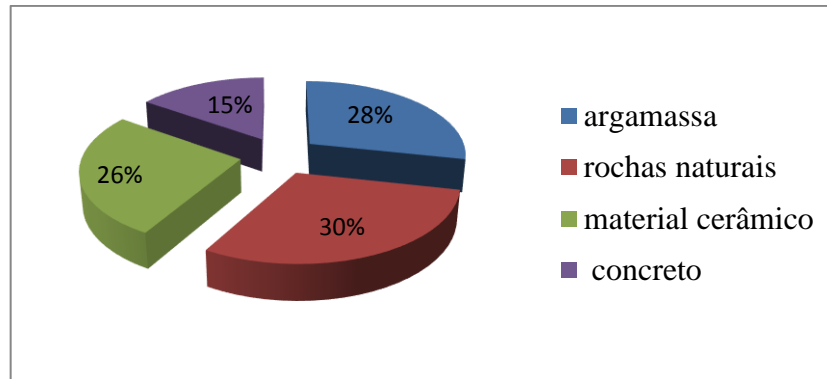


Figura 2.7 - Composição de resíduos provenientes de uma usina de inertes situada em Porto Alegre, RS
 Fonte: LEITE, 2011, p. 127.

Analisando os dados obtidos pelas amostras de Zordam (1997) e Leite (2011), confirma-se não somente a grande heterogeneidade dos resíduos, mas também as diferenças das proporções e seus materiais constituintes. Esta heterogeneidade faz com que os agregados reciclados apresentem grande variação em suas propriedades dependendo da composição do resíduo processado, e do teor de impurezas (PEDROZO, 2008).

Segundo Sim e Park (2011), apesar desta grande variedade na composição dos resíduos provenientes da construção e demolição, a utilização destes é crucial para a conservação dos recursos naturais destinados a fabricação dos materiais de construção. Para Estanqueiro (2012), a indústria da construção é uma das principais responsáveis pelo desenvolvimento econômico e social de todos os países, no entanto, provoca grandes problemas ambientais por consumir grandes quantidades de recursos naturais, gerando, conseqüentemente, grandes volumes de resíduos.

2.6 Agregados reciclados

A incorporação de agregados reciclados provenientes de concretos descartados tem sido amplamente defendida por pesquisadores que vem estudado a influência de sua utilização na dosagem de novos traços. Deve-se observar que ainda não existe uma padronização dos ensaios no que se refere ao tipo de agregado utilizado, sendo, desta forma, pesquisados resíduos provenientes de demolição, resíduos de alvenaria, resíduos de concreto, resíduos de peças cerâmicas, dentre outros. Também não há uma padronização em porcentagens de substituição do agregado reciclado pelo agregado natural. Apesar da vasta variedade de

estudos envolvendo os agregados reciclados, de um modo geral, os pesquisadores defendem a utilização deste material inclusive em concretos com finalidade estrutural, visto que vários estudos indicam ser viável seu uso para tal fim. A maioria das conclusões têm extensivamente mostrado que algumas propriedades do concreto reciclado podem ser geralmente inferiores aos do concreto normal, mas ainda são suficientes para aplicações práticas na engenharia civil (XIAO *et al.*, 2005).

Agregados reciclados são definidos como materiais granulares provenientes de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresentam características técnicas para aplicação em obras de edificação e infraestrutura, conforme NBR 15116 (ABNT, 2004). Essa norma classifica os resíduos provenientes da construção e demolição como resíduos classe A, classe B, classe C ou classe D, de acordo com sua procedência, e ainda estabelece os requisitos para o emprego dos agregados reciclados de resíduos sólidos, os quais devem ser destinados somente às obras de pavimentação viária (camadas de reforço de subleito, sub base e base de pavimentação) e em preparo de concreto sem função estrutural. A NBR 15116 (ABNT, 2004) é a única norma brasileira que trata dos agregados reciclados, não existindo até o momento uma norma que estabeleça critérios para utilização desses agregados em concretos para fins estruturais.

Conforme já visto, os agregados reciclados podem ser provenientes de resíduos de alvenaria, concretos e argamassas, podendo ser utilizados na fabricação de concretos, substituindo parcialmente os agregados naturais. Estes agregados, da mesma forma que os naturais, devem ser avaliados antes de sua utilização em termos de composição granulométrica, massa específica, absorção e umidade superficial, forma da partícula e textura superficial. A NBR 15116 (ABNT, 2004), estabelece que a composição granulométrica do agregado reciclado a ser utilizado deve estar de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) e que, nos casos em que a composição granulométrica não atender tal norma, esta pode ser corrigida pela adição de agregados convencionais.

Rodrigues (2011) caracterizou a granulometria dos agregados miúdos reciclados segundo as recomendações NBR 7211 (ABNT, 2009) e comprovou que estes se encontravam dentro dos limites estabelecidos pela norma, conforme visto na Figura 2.8.

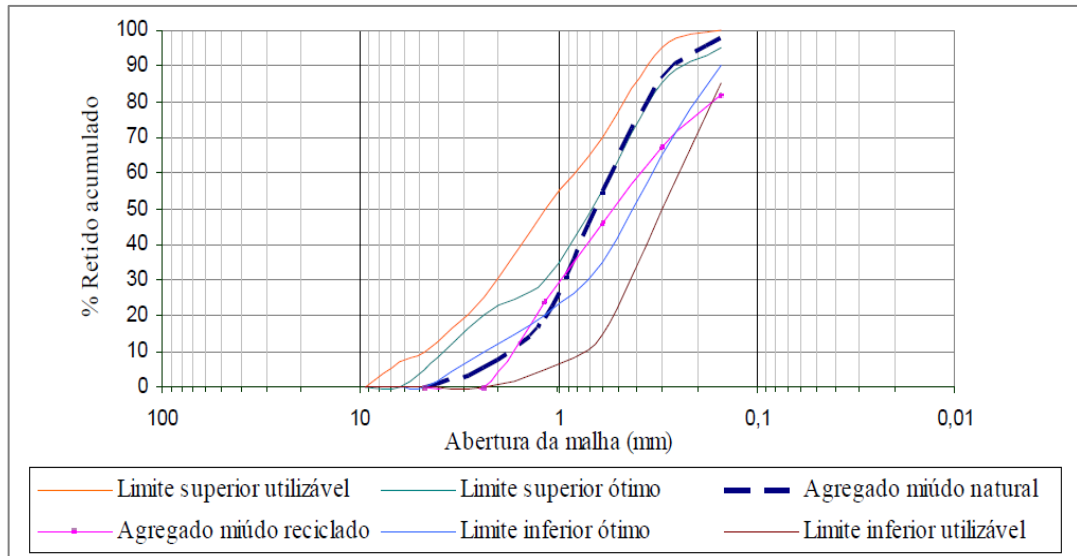


Figura 2.8 - Curva granulométrica de agregado miúdo natural e agregado miúdo reciclado e os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009)

Fonte: RODRIGUES, 2011, p.80.

Segundo Troian (2010), os agregados reciclados de resíduos da construção são normalmente heterogêneos, podendo assim, gerar grandes dispersões nos resultados de resistência mecânica dos concretos feitos a partir destes, o que pode inviabilizar sua utilização em concretos estruturais. Já para Levy e Helene (2004) esforços para utilização destes concretos devem ser realizados por contribuir para o meio ambiente, uma vez que, em algumas circunstâncias, tais concretos são capazes de alcançar o mesmo desempenho final dos concretos feitos somente com agregados naturais, porém com custos menores.

Troian (2010) ainda afirma que os agregados reciclados, tanto miúdos quanto graúdos, tendem a uma composição granulométrica um pouco mais grossa, resultando em um módulo de finura um pouco maior que a dos agregados naturais. Leite (2011) constatou que as curvas granulométricas do agregado reciclado miúdo e graúdo, apresentam uma granulometria contínua, evidenciando um bom arranjo entre partículas.

Realizando ensaios de caracterização em agregados graúdos reciclados de resíduos de concreto, após triturados em um britador de mandíbulas e peneirados, Buttler e Machado (2004) apresentam em seu estudo, uma comparação entre diversas propriedades dos agregados graúdos naturais e dos agregados graúdos reciclados, vista na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Dados comparativos das propriedades de agregados graúdos naturais e reciclados

Propriedades	Resultado		Norma
	Agregado Graúdo Natural	Agregado graúdo reciclado de concreto britado com idade de um dia	
Dimensão máxima característica	19 mm	19 mm	NBR NM 248
Módulo de finura	6,74	6,45	NBR NM 248
Massa unitária no estado solto	1,505 kg/dm ³	1,287 kg/dm ³	NBR NM 45
Abrasão Los Angeles	20,52 %	41,68 %	NBR NM 51
Massa específica na condição seca	2,816 kg/dm ³	2,455 kg/dm ³	NBR NM 53
Índice de vazios	5,52 %	13,46 %	NBR NM 53
Absorção de água em 24 horas (%)	1,96 %	5,48 %	NBR NM 53

Fonte: adaptado de BUTTLER e MACHADO, 2004, p.8.

Com relação à massa unitária dos agregados reciclados, Lovato *et al.* (2011) constataram que esta possui um valor inferior à dos agregados naturais usuais, e que isso se deve, provavelmente, à sua forma e granulometria.

Nos ensaios realizados por Rodrigues (2011), observou-se um módulo de finura do agregado miúdo reciclado aproximadamente 10% inferior ao obtido para o agregado natural. Tal variação acarreta um aumento de sua superfície específica, produzindo um acréscimo tanto no consumo de água quanto no consumo de aglomerantes utilizados na mistura do concreto.

Thomas *et al.* (2012) obtiveram do ensaio de amostras de agregados reciclados uma taxa de absorção de água em torno de 8% aos 28 dias e entre 7 % e 8% após 365 dias. A NBR 15116 (ABNT, 2004) estabelece que o agregado miúdo de resíduo de concreto a ser utilizado em concreto sem finalidade estrutural, deve ter taxa de absorção de água inferior ou igual a 12%, e o agregado graúdo de resíduo de concreto dever ter taxa de absorção de água inferior ou igual a 7%.

Devido à falta de padronização dos métodos de ensaio utilizados para se caracterizar agregados reciclados, a comparação entre os resultados obtidos por vários pesquisadores, torna-se complexa.

2.7 Porosidade e permeabilidade do concreto

Segundo Kearsley e Wainwright (2001), muitos autores têm investigado a relação entre a porosidade e a permeabilidade dos concretos. A permeabilidade do concreto dá uma indicação da facilidade com que os líquidos, gases e vapores podem se mover em seu interior e é um bom indicador de sua qualidade. Uma alta porosidade é usualmente associada a uma alta permeabilidade, mas, se os poros forem descontínuos, a permeabilidade do concreto será baixa. Em seus estudos, Martin *et al.* (2014) analisam o impacto da distribuição de poros na permeabilidade geral da amostra, mostrando que o conceito de tamanho de poros e conectividade são importantes para a permeabilidade.

Kollek (1989) iniciou seus estudos sobre a permeabilidade em concretos motivado por uma percepção crescente em sua época, a qual supunha que a resistência a compressão não era o único parâmetro para indicar a qualidade do material. Como a estrutura dos poros do concreto já era reconhecida como um dos aspectos de durabilidade, partiu para a realização de testes de permeabilidade. De acordo com Kollek (1989), em uma estrutura de concreto armado, deve-se analisar com especial atenção a região superficial que protege a armadura da corrosão e que está sujeita à penetração do oxigênio, do dióxido de carbono e da água. Realizando ensaios de permeabilidade ao oxigênio pelo método CEMBUREAU (*European Cement Association*), representado de forma esquemática na Figura 2.9, e utilizando a relação de Hagen-Poiseuille para o fluxo laminar de um fluido compressível por meio de um corpo poroso com pequenos capilares em condições de estado estacionário, ele calculou a permeabilidade ao oxigênio por meio da Equação 2.1.

$$K = \frac{2 \cdot Q \cdot P_0 \cdot L \cdot \eta}{A \cdot (P^2 - P_a^2)} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde:

K = Coeficiente de permeabilidade ao gás (m^2)

Q = Fluxo de gás (m^3/s)

P_0 = Pressão na qual o fluxo de gás é determinado; assumida neste ensaio como sendo igual a pressão atmosférica P_a (N/m^2)

P = Pressão absoluta de entrada do gás (N/m^2)

P_a = Pressão de saída; assumida neste teste igual a pressão atmosférica (N/m^2)

η = Viscosidade dinâmica do fluido à temperatura de realização do ensaio ($N.s/m^2$)

A = Área da amostra (m^2)

L = Altura da amostra (m)

Para o oxigênio à temperatura de 20 °C, a viscosidade dinâmica (η) pode ser considerada igual a $2,02 \times 10^{-5}$ ($N.s/m^2$).

Desse modo:

$$K = \frac{4,04 \times 10^{-5} \cdot Q \cdot P_a \cdot L}{A \cdot (P^2 - P_a^2)} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Quando o corpo de prova, preparado para este ensaio, possuir 150 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, a Equação 2.2 pode ser escrita de modo simplificado como apresentado na Equação 2.3.

$$K_{Oxigênio} = \frac{1,14 \times 10^{-4} \cdot Q \cdot P_a}{(P^2 - P_a^2)} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Para Villani *et al.* (2014), a medição da capacidade de transporte de fluidos através do concreto é útil por fornecer uma indicação do potencial de durabilidade do mesmo e pode ser utilizada na previsão de sua vida de serviço. Os ensaios de permeabilidade a gás e difusão, são atraentes devido a facilidade do teste, à sua natureza não destrutiva e seu potencial em se correlacionar com a carbonatação das estruturas de concreto armado. De acordo com Salvoldi *et al.* (2015), a carbonatação é um processo de difusão que acontece em uma matriz

permeável, e mesmo sendo o processo de difusão e de permeabilidade dois processos de transporte diferentes, com diferentes mecanismos de condução, por ocorrerem no mesmo sistema de poros, os dois podem ser relacionados.

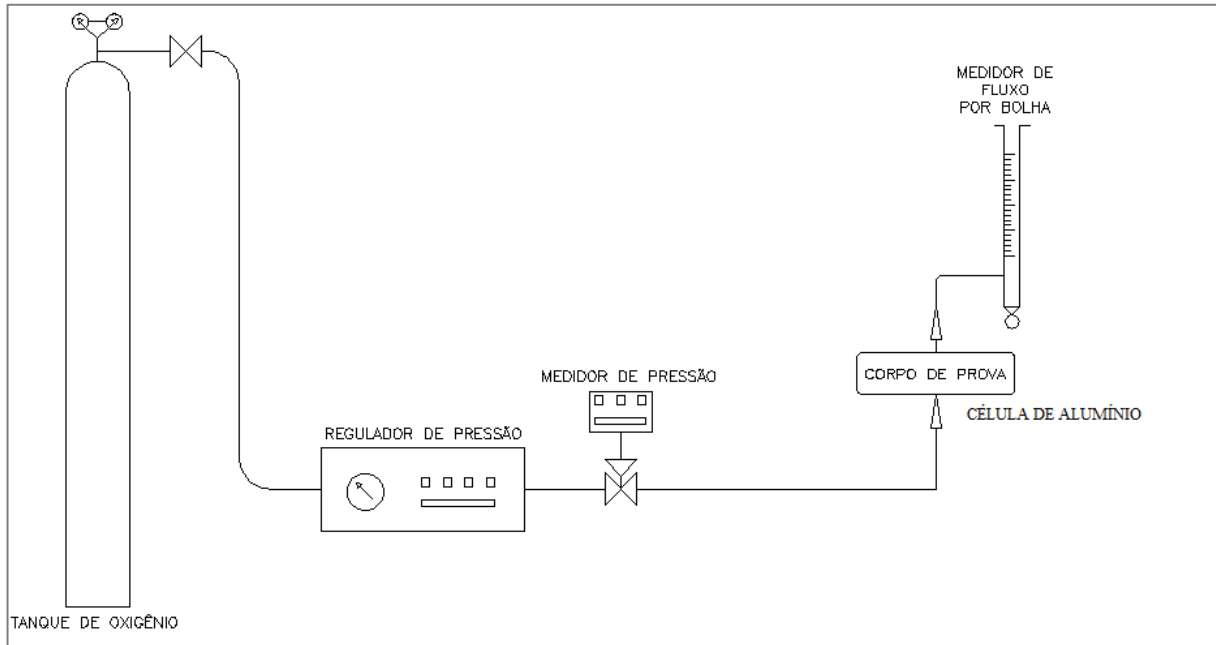


Figura 2.9 - Diagrama do aparelho de permeabilidade ao oxigênio
 Fonte: Adaptado de KOLLEK, 1989, p. 227.

Segundo Ahmad e Agad (2013), a permeabilidade é frequentemente utilizada como uma propriedade chave do material para avaliar sua durabilidade. De acordo com Figueredo e Meira (2013), a permeabilidade depende das características dos poros do material, tendo a porosidade, uma relação direta com a velocidade de transporte dos agentes agressivos para o interior do concreto. A porosidade está diretamente relacionada com o tempo de cura, conforme visto no trabalho de Chopra *et al.* (2015), que afirmam que a porosidade diminui com o aumento do tempo de cura em função do aumento da hidratação, que proporciona um aumento de formação de gel C-S-H, deixando a estrutura mais densa e diminuindo assim sua porosidade.

A permeabilidade ao oxigênio pode ser utilizada para avaliar a deterioração do concreto, sendo um dos índices usados para determinar sua durabilidade (ALEXANDER *et al.*, 1999). A permeação descreve o processo de movimento dos fluidos por meio da estrutura dos poros sob uma pressão externa aplicada. Conseqüentemente, a permeabilidade é uma medida de capacidade do concreto transferir fluidos por permeação, sejam estes fluidos gases ou

líquidos. Para estes autores, o coeficiente de permeabilidade é um número exponencial demasiadamente complexo, podendo ser simplificado pelo índice de permeabilidade. O índice de permeabilidade ao oxigênio, calculado pela Equação 2.4, é definido como o logaritmo negativo do coeficiente de permeabilidade. Tal coeficiente pode ser utilizado para classificar a durabilidade do concreto, conforme escala proposta na Tabela 2.6.

$$OPI = -\log_{10}K \quad \text{Eq. 2.4}$$

Onde:

OPI = índice de permeabilidade ao oxigênio

K = coeficiente de permeabilidade ao oxigênio (m^2)

Tabela 2.6 - Classificação da durabilidade do concreto, em função de seu índice de permeabilidade ao oxigênio

Classe de durabilidade	Índice de permeabilidade ao oxigênio (escala logarítmica)
Excelente	> 10
Boa	9,5 - 10
Pobre	9,0 - 9,5
Muito pobre	< 9,0

Fonte: ALEXANDER *et al.*, 1999, p. 25.

Outro ensaio comumente utilizado para se avaliar a porosidade aberta de um compósito de matriz cimentícia é a porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP). De acordo com Ma (2014), o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio tem sido amplamente utilizado para investigar a estrutura dos poros de materiais a base de cimento há muitos anos. Os resultados do MIP são influenciados por fatores como ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro, a tensão superficial do mercúrio, o método de secagem da amostra e a preparação da amostra, sendo necessário, portanto, fixar estes fatores e garantir que as medições de MIP sejam realizadas em amostras sob as mesmas condições para fins de comparação de estruturas de poros.

De acordo com Zeng *et al.* (2012), o princípio deste ensaio reside no fato de que o volume de intrusão de mercúrio depende da pressão externa aplicada para superar a tensão superficial do mercúrio para que este penetre nos poros do material. Assim, o processo de intrusão de mercúrio pode ser quantificado pelo volume de intrusão de mercúrio versus o aumento da pressão. Deste modo, se a geometria dos poros é idealizada como cilíndrica, o tamanho do diâmetro dos poros pode ser relacionado com a pressão aplicada por meio da Equação 2.5, chamada de equação de Washburn.

$$P = \frac{-4\gamma\cos\theta}{d} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Onde:

P = Pressão de Intrusão (N/m²)

γ = tensão superficial do mercúrio (N/m)

$\cos\theta$ = ângulo de contato

d = diâmetro capilar (m)

O mercúrio possui uma tensão superficial, medida a 20 °C, ao ar a uma pressão atmosférica de 1 atm, igual a 0,484 N/m.

De acordo com Abell *et al.* (1999), a porosimetria por intrusão de mercúrio é baseada na premissa de que um líquido com ângulo de contato maior que 90° somente será introduzido nos poros de um material se uma pressão for aplicada. Desta forma, utiliza-se o mercúrio, uma vez que este possui ângulo de contato de aproximadamente 140°. A porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica indireta, amplamente utilizada para caracterizar a distribuição do tamanho dos poros em materiais a base de cimento. Apesar de ser uma técnica simples e rápida, apresenta certas limitações quando aplicada em materiais com poros de geometria irregular. Para materiais a base de cimento o tamanho e a distribuição dos poros é útil para comparar sistemas semelhantes e para obtenção de medidas de percolação.

2.7.1 Porosidade e permeabilidade em concretos fabricados com agregados reciclados

O concreto é um material repleto de vazios e, tanto sua resistência, quanto sua permeabilidade estão associadas à sua porosidade. Há um consenso entre os pesquisadores de que a incorporação do agregado reciclado ao concreto, em substituição ao agregado natural, aumenta a porosidade do mesmo, e que, o aumento da proporção de substituição, aumenta a profundidade de carbonatação. Segundo Taylor (1990), a qualidade do concreto é afetada pelo tipo de cimento, pela relação água/cimento, pela classificação do agregado, pelo grau de compactação e pelo processo de cura.

Levy e Helene (2004) analisaram o comportamento do concreto quando dosado com a incorporação de agregados graúdos e miúdos reciclados, provenientes de resíduos de concreto, e sua influência sobre o volume dos poros. Os resultados indicam que a utilização de agregados miúdos reciclados produz um volume de poros superior ao gerado quando se faz a substituição dos agregados graúdos naturais pelos reciclados, aumentando também os valores de absorção de água. O aumento das proporções de substituições também aumenta o volume de poros, tanto quando são substituídos agregados miúdos, quanto graúdos.

Medina *et al.* (2012) avaliaram a variação do diâmetro dos poros em três traços de concreto, sendo adotado um concreto de referência (RC), fabricado apenas com agregados naturais, um concreto com substituição parcial do agregado graúdo por 20% de agregado reciclado proveniente de cerâmicas de vasos sanitários (CC-20) e, por fim, um concreto com 25% de substituição deste mesmo agregado (CC-25). Os resultados obtidos por meio do ensaio de picnometria por intrusão de mercúrio, apresentados na Figura 2.10, indicaram que o diâmetro dos poros do concreto de referência foi maior do que o encontrado nos concretos onde realizou-se a substituição parcial do agregado graúdo por agregados reciclados. Por outro lado, houve um refinamento do sistema de poros com o aumento do percentual de substituição adotado.

Os resultados também mostraram que a substituição de 25% do agregado natural por agregados reciclados produziu um aumento de 4,12% em sua porosidade, quando comparado ao concreto de referência (TABELA 2.7). Os autores concluíram que o aumento da porosidade observada nos concretos em função do aumento do percentual de substituição se

deu em função da maior porosidade dos agregados reciclados, apesar dos valores encontrados terem permanecido dentro do intervalo normal de porosidade esperado (entre 10% e 20%). O estudo de Medina *et al.* (2012) mostrou ainda que o coeficiente de permeabilidade ao oxigênio sofreu pequenos aumentos em função de tais substituições.

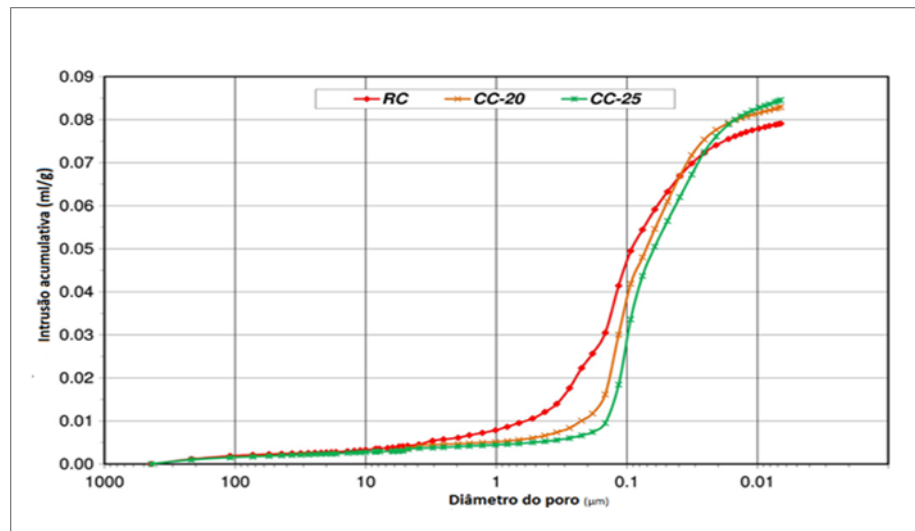


Figura 2.10 - Efeito do uso de agregados reciclados na distribuição de poros do concreto
Fonte: MEDINA *et al.*, 2012, p. 600.

Tabela 2.7 - Porosidade aos 28 dias e coeficiente de permeabilidade ao oxigênio de concretos produzidos com diferentes teores de agregados reciclados

Concreto	Porosidade total (% de volume)	Coefficiente de Permeabilidade ao oxigênio K (10^{-17} m^2)
Concreto de referência	$15,72 \pm 0,32$	$6,40 \pm 0,58$
Concreto com 20% de substituição	$16,21 \pm 0,48$	$6,49 \pm 0,50$
Concreto com 25% de substituição	$16,38 \pm 0,59$	$6,57 \pm 0,65$

Fonte: MEDINA *et al.*, 2012, p. 600.

Zong *et al.* (2014) também realizaram testes de permeabilidade ao oxigênio em concretos produzidos com a incorporação de agregados reciclados em proporções de substituição de 0%, 30%, 40% e 50%, encontrando valores de permeabilidade ao oxigênio maiores à medida que se aumenta a proporção de substituição, conforme mostrado na Figura 2.11.

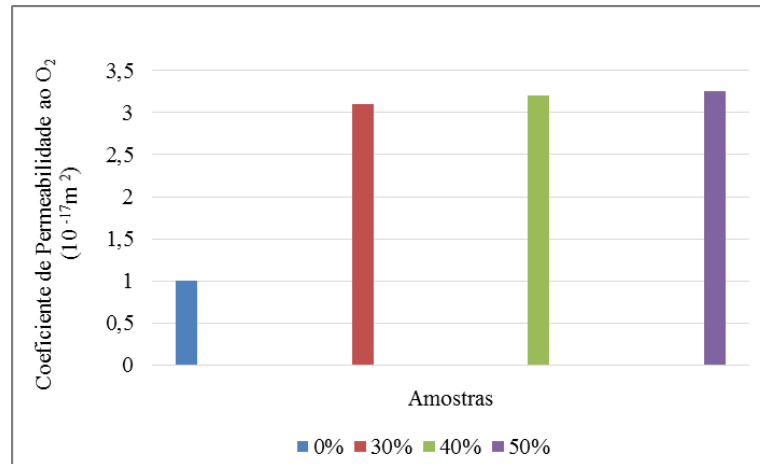


Figura 2.11 - Coeficiente de permeabilidade ao oxigênio em concretos produzidos com a incorporação de agregados reciclados
 Fonte: Adaptado de ZONG *et al.*,2014, p. 180.

Olorunsogo e Padayachee (2001) estudaram o efeito do tempo de cura e do uso de agregados graúdos reciclados, obtidos a partir de resíduos de concretos e tijolos, no índice de permeabilidade ao oxigênio. Os traços estudados foram produzidos com teores de substituição de 0%, 50% e 100% do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado. Os resultados encontrados mostram que o índice de permeabilidade ao oxigênio aumenta em função do aumento do tempo de cura (FIGURA 2.12), indicando que um concreto com 50% de substituição, tendo alcançado um índice de permeabilidade de 9,69 aos 56 dias de cura, atingiu uma classificação “boa” segundo a classificação proposta por Alexander *et al.* (1999) na Tabela 2.6. Já o concreto com substituição de 100% de agregado natural pelo reciclado, alcançou um índice de 9,22 aos 56 dias, sendo classificado, como um concreto “pobre”.

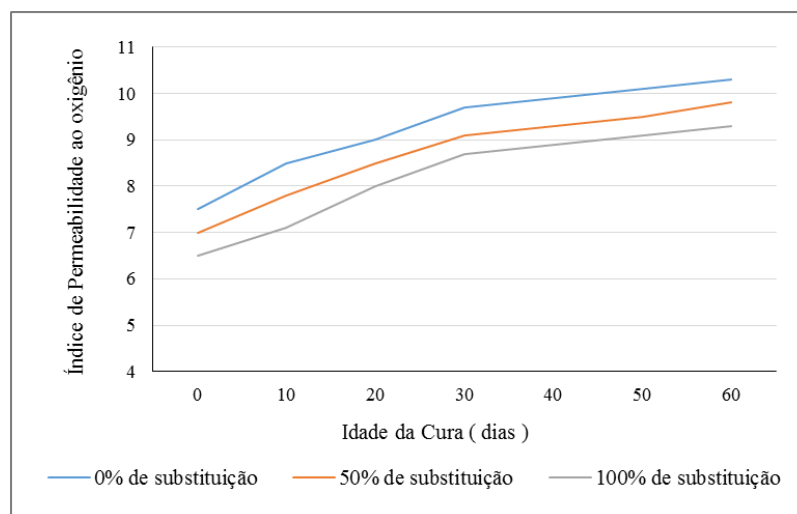


Figura 2.12 - Efeito da cura no índice de permeabilidade ao oxigênio
 Fonte: OLORUNSOGO e PADAYACHEE, 2001, p. 183.

Em outro estudo realizado por Olorunsogo e Padayachee (2002), observou-se grande presença de fendas e fissuras no agregado reciclado, que os deixam mais suscetível à permeabilidade, difusão e absorção de fluidos, prejudicando a durabilidade do concreto.

Ensaio realizados por Pedro *et al.* (2014), em corpos de prova fabricados com 100% de substituição do agregado natural por um agregado graúdo proveniente da reciclagem de concreto, mostram um aumento entre 3,9% e 7,6% na absorção de água em relação ao concreto de referência. Levy (2006) também encontrou acréscimo nos valores de absorção de água e volume de poros com o aumento do teor de substituição (TABELA 2.8).

Tabela 2.8 - Influência do teor de agregados reciclados na absorção de água e no volume de poros

Concreto	Absorção de água (%)			Volume de Poros (%)		
	20 MPa	30 MPa	40 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa
Reciclado de concreto com 20% de substituição	6,9	6,3	5,9	14,5	13,5	12,9
Reciclado de concreto com 50% de substituição	7,5	7,0	6,7	17,5	17,3	17,2

Fonte: LEVY, 2006, p. 380.

Segundo Butler e West (2011), essa maior porosidade do concreto com agregados reciclados é o que faz com que este apresente maior capacidade de absorção de água e menores densidades em relação aos concretos convencionais.

2.8 Carbonatação

A carbonatação é um processo físico-químico de neutralização da fase líquida intersticial do concreto, transformando íons alcalinos, como os cátions de sódio, potássio e, sobretudo, de cálcio, em sais de carbonatos desses elementos, pela ação ácida provocada predominantemente pelo dióxido de carbono (CO₂), mas também de outros gases, como o dióxido de enxofre (SO₂) e o gás sulfídrico (H₂S), os quais atuam nas superfícies expostas das estruturas de concreto (FIGUEREDO, 2005; CASCUDO; CARASEK, 2011).

O concreto que envolve o aço proporciona a este uma proteção física, constituída pela espessura da camada de cobrimento, e uma proteção química, constituída pela película passivadora que se forma em sua superfície, em decorrência da elevada alcalinidade do meio. Uma das formas de se romper essa película passivadora se dá por meio da diminuição da alcalinidade do concreto por reações físico-químicas provenientes da carbonatação do material (PAULETTI, 2004).

O fenômeno da carbonatação depende da concentração de CO₂ no ambiente, do percentual de umidade do ar, da temperatura a que a estrutura está submetida, do tipo de cimento, das adições, dos agregados e da cura (WERLE *et al.*, 2011). De acordo com Taylor (1990) a resistência à penetração depende da permeabilidade do concreto, que é afetada pela relação água/cimento e pela granulometria do agregado.

O processamento da carbonatação ocorre por meio de mecanismos de difusão, e a profundidade e a velocidade da carbonatação dependem de fatores como o pH e o sistema de poros do concreto, e das condições adequadas para difusão do CO₂, ligadas neste caso ao ambiente do qual o concreto está inserido (SARTORI, 2013). A concentração de gás carbônico varia em função do ambiente que a estrutura está inserida, conforme apresentado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Concentração de CO₂ conforme o tipo de ambiente

Concentração de CO ₂ no ar (em volume)	Tipo de Ambiente
0,03%	Ambiente rural
0,1%	Ambiente de laboratório (não ventilado)
0,3%	Ambiente urbano
1,0%	Ambiente urbano-industrial

Fonte: SARTORI, 2013, p.31.

A carbonatação do concreto é um processo muito lento por ser predominantemente governada pela difusão de CO₂ somente sendo alcançada em sua totalidade a longo prazo (THIERY *et al.*, 2013). A carbonatação começa nas superfícies expostas dos compósitos cimentícios, e avança para seu interior a uma velocidade proporcional à raiz quadrada do tempo.

Para que ocorra o processo de carbonatação é necessária uma combinação de fatores os quais interferem diretamente no processo, como condições de exposição e as características do concreto. Na Figura 2.13 vê-se um esquema representativo dos fatores que interferem na carbonatação.

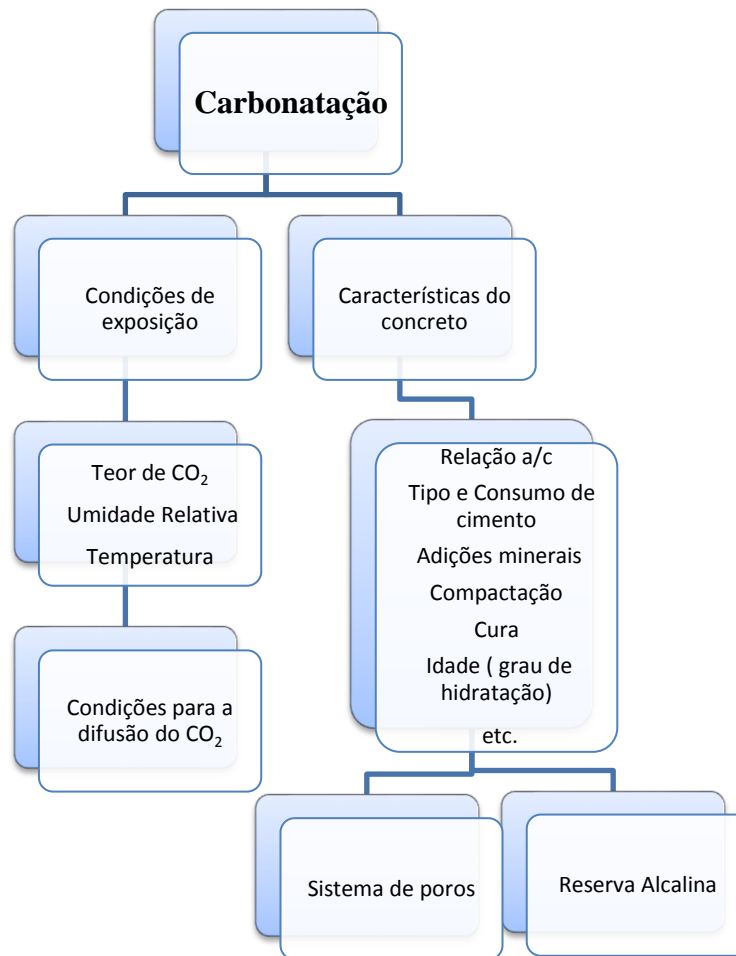


Figura 2.13 - Fatores intervenientes na carbonatação do concreto
Fonte: Adaptado de CASCUDO e CARASEK, 2011, p.856.

Os hidróxidos alcalinos produzem um valor de pH elevado nos poros, o que ajuda a proteger contra a corrosão do aço (HEWLETT, 1988). O pH do concreto provém da fase líquida constituinte dos poros e geralmente varia de 12,5 a 13,5. As reações ocasionadas pela carbonatação ao longo do avanço de sua “frente” faz com que seu pH seja reduzido para valores inferiores a 9, fazendo com que a proteção contra a corrosão por passivação num ambiente alcalino seja perdida (KROOP; HILSFORF, 1995).

Um pH alto estabiliza a película do óxido depositado sobre o aço protegendo-o, mas esta película fica instável quando submetida a valores baixos de pH, normalmente resultantes da carbonatação, lixiviação ou na presença de cloretos (TAYLOR, 1990). A corrosão das armaduras ocorre somente se a película passivadora for destruída.

O concreto armado tem potencial para ser muito resistente e capaz de suportar condições ambientais adversas, mas falhas na estrutura podem ter como resultado a corrosão prematura das armaduras. A corrosão das armaduras causadas por ataque de cloretos, ataques ácidos e pela carbonatação, somente ocorrerá se existirem quantidade de oxigênio e umidade suficientes para que tal fenômeno se instale (HUSSAIN; ISHIDA, 2010).

Segundo Taylor (1990), a corrosão é provavelmente a causa mais comum de deterioração das estruturas de concreto armado. A corrosão representa um ataque destrutivo de um metal por reações eletroquímicas que conduzem a um transporte de íons e de elétrons na interface metal-solução (BOUNY *et al.*, 2014). A expansão produzida pela ferrugem faz com que o concreto ao redor fissure, podendo provocar o desprendimento de suas partes.

Um esquema das reações químicas que ocorrem durante a carbonatação é apresentado na Figura 2.14.

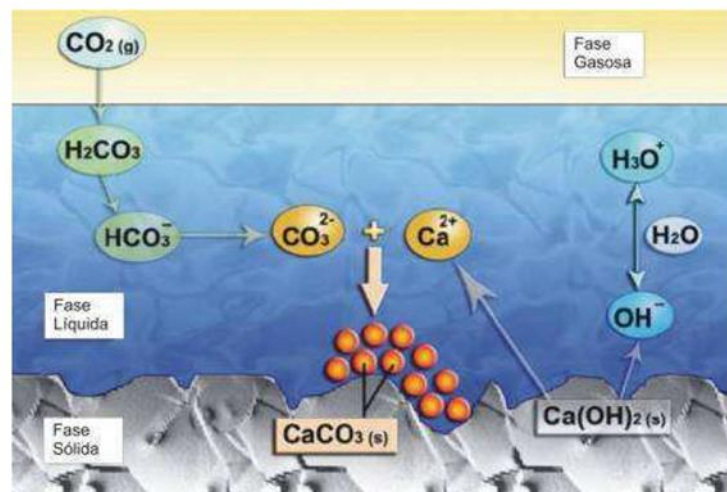


Figura 2.14 - Mecanismo de carbonatação do Ca(OH)_2
 Fonte: THIERY, 2006, p.6272, *apud* BOUNY, *et al.* 2014 p.272.

A reação da carbonatação envolve reações gasosas, líquidas e sólidas, entre o dióxido de carbono (CO_2) dissolvido e os íons de hidróxido (OH^-) (SARTORI, 2013).

A espessura da camada afetada pode ser determinada de forma aproximada pelo teste com fenolftaleína (TAYLOR,1990), sendo este capaz de identificar até onde houve a diminuição do pH causado pelo fenômeno da carbonatação. A amostra apresenta coloração róseo-avermelhada para valores de pH iguais ou superiores a 9,5 e incolor abaixo desse valor. Geralmente aplica-se sobre a amostra uma solução de 1 grama de fenolftaleína dissolvida em 50 gramas de álcool e 50 gramas de água (RIBEIRO, 2014).

Segundo Bouny *et al.* (2014) a carbonatação do concreto está associada à diminuição progressiva do pH como mostra a Figura 2.15. Quando o pH do concreto se encontra próximo a 9,5 o efeito da carbonatação já é identificado por meio da aplicação da solução de fenolftaleína (ponto de viragem). Quando o pH do concreto se encontra próximo a 8 considera-se que esteja totalmente carbonatado.

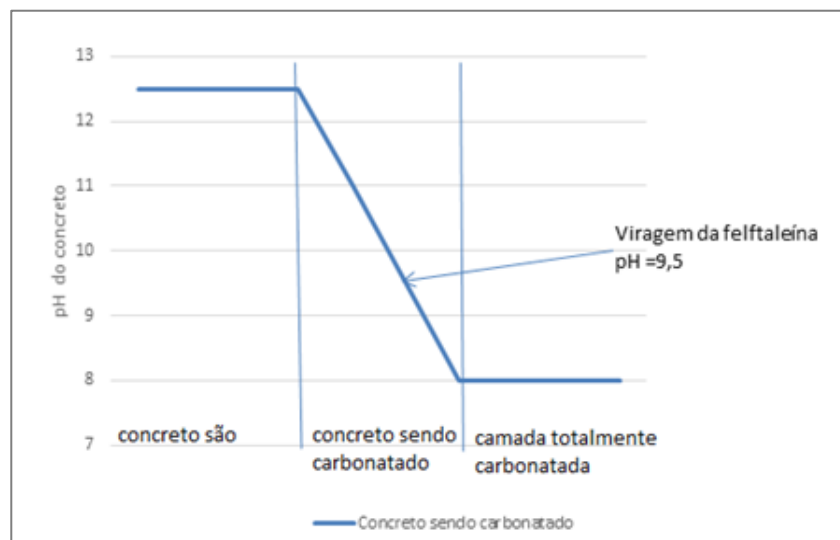


Figura 2.15 – Gradiente de pH na região da frente de carbonatação
Fonte: Adaptado de BOUNY *et al.*, 2014, p.274

A composição do concreto e as condições de execução têm influência sobre o processo de carbonatação. Segundo Bouny *et al.* (2014) a profundidade carbonatada é tão baixa quanto maior o consumo de cimento, fato este decorrente da diminuição da porosidade do concreto. A cura inadequada por sua vez, aumenta a porosidade, e conseqüentemente, a sensibilidade dessa camada à carbonatação. A relação água/cimento também tem influência sobre a profundidade de carbonatação, conforme apresentado na Figura 2.16, onde dois corpos de prova com diferentes condições de cura e relações água/cimento, apresentaram diferentes espessuras de carbonatação, para um mesmo tempo de exposição.

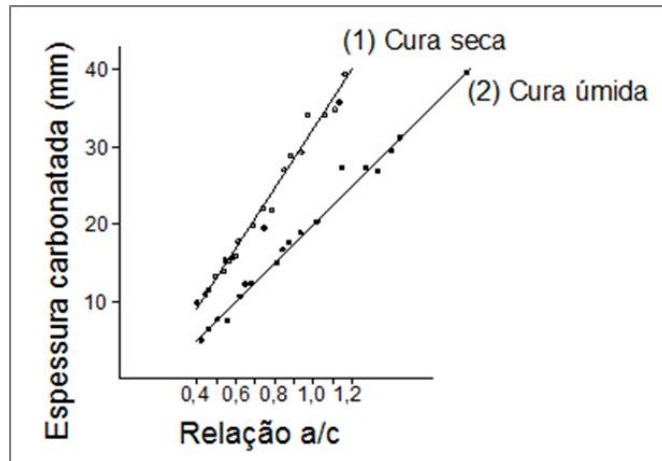


Figura 2.16 - Evolução da carbonatação em função da relação água cimento

Fonte: Adaptado de BARON,1987 *apud* BOUNY *et al.*, 2014, p. 277.

Segundo Troian (2010), não acontece corrosão em concretos secos, devido ausência de eletrólito, e nem em concretos saturados, por não haver acesso suficiente de oxigênio. Como a armadura funciona como um eletrodo misto, onde ocorrem reações anódicas e catódicas, qualquer diferença de potencial gerada entre estas duas zonas, ocasiona o surgimento de correntes elétricas, as quais, quando em presença de oxigênio ocasionam a corrosão da armadura, conforme mostrado na Figura 2.17.

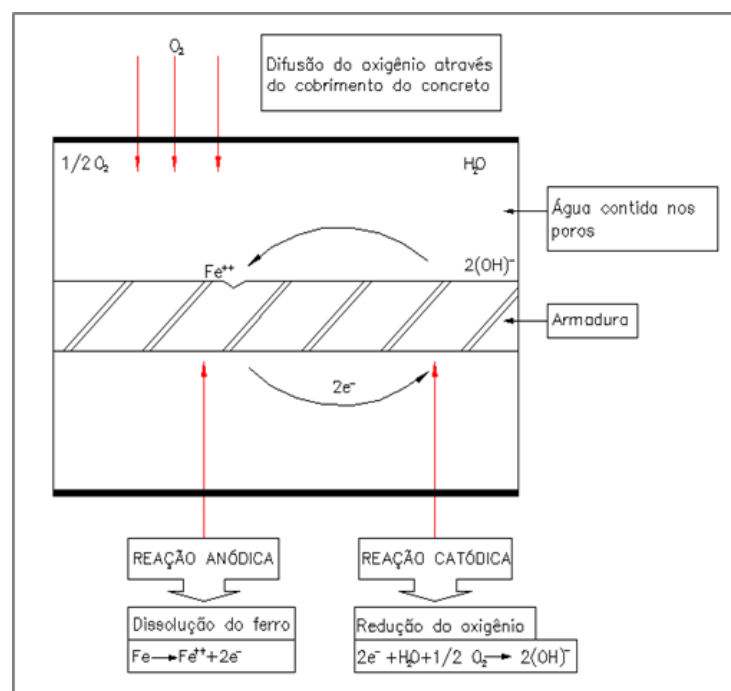


Figura 2.17 - Esquema simplificado da célula de corrosão

Fonte: Adaptado de CEB n. 152, 1984 *apud* TROIAN, 2010, p.31.

A taxa de corrosão é muito lenta quando o concreto está totalmente imerso em água. Do mesmo modo, a taxa de corrosão sob condição de alta umidade (90 a 95 %) também é baixa, uma vez que tais teores são suficientes para bloquear a passagem do oxigênio gasoso. Essa alta umidade bloqueia os poros do concreto, reduzindo a conectividade necessária para transferência do oxigênio do meio ambiente para a superfície da barra de aço (HUSSAIN *et al.*, 2010). Segundo Papadakis *et al.* (1992) as maiores profundidades de carbonatação ocorrem para umidades do ambiente entre 50% e 65%.

2.8.1 Carbonatação em concretos fabricados com agregados reciclados

Diversos estudos têm mostrado que, dentre outras consequências, a incorporação de quantidades crescentes de agregado reciclado leva a maiores profundidades de carbonatação, uma vez que ela está relacionada com a porosidade do material. Segundo Silva *et al.* (2015 a), para se produzir um concreto fabricado com a incorporação de agregados reciclados que apresente um avanço da frente de carbonatação equivalente ao concreto convencional, deve-se usar uma maior quantidade de cimento.

Testes realizados por Pedro *et al.* (2014), mostram um aumento na profundidade de carbonatação, quando feita substituição de 100% do agregado natural pelo agregado graúdo reciclado, conforme apresentado na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Profundidade de carbonatação aos 56 dias obtidos nos estudos de Pedro *et al.*

Mistura do concreto	Idade (dias)	Profundidade de Carbonatação e_{co2} (mm)		
		$f_{c28} = 20$ MPa	$f_{c28} = 45$ MPa	$f_{c28} = 65$ MPa
Concreto de Referência	56	37	11	1,3
Concreto com 100% de agregado reciclado	56	46,9	16	2,5

Fonte: Adaptado de PEDRO *et al.*, 2014, p 148.

Os resultados encontrados por Pedro *et al.* (2014), sugerem que, da mesma forma que o concreto convencional, o concreto com agregado reciclado apresenta um comportamento de diminuição da profundidade de carbonatação com o aumento da resistência à compressão.

Geng e Sun (2013), pesquisaram a utilização de agregado miúdo reciclado e concluíram que a profundidade de carbonatação aumenta com a diminuição do tamanho da partícula do agregado. Para Silva *et al.* (2015 a) o tamanho do agregado reciclado tem influência clara no comportamento da carbonatação do concreto, onde as misturas feitas com agregado miúdo reciclado apresentam profundidades de carbonatação maiores do que as misturas feitas com agregado graúdo reciclado.

Entretanto, outros estudos encontraram resultados divergentes, indicando que outros fatores, como, por exemplo, o teor e a natureza química do cimento e das adições utilizadas, podem ter uma maior influência no processo de carbonatação do que a natureza dos agregados.

Werle *et al.* (2011), analisaram o efeito da substituição parcial do agregado graúdo natural, por agregados graúdos reciclados de concreto em relação a velocidade de carbonatação, não tendo observado grandes variações para uma mesma classe de resistência à compressão.

Sartori (2013) estudou o comportamento de um concreto produzido com agregados graúdos reciclados provenientes de concreto, associada a incorporações de cinza de casca de arroz na mistura, e observou que a substituição de 10% a 20 % de cimento pela cinza de casca de arroz diminuiu os macroporos do concreto, o que acarretou um decréscimo na profundidade de carbonatação, além de aumentar a resistência à compressão, diminuir a porosidade e a taxa de absorção.

Abbas *et al.* (2008) estudaram concretos com substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos provenientes de resíduos de demolição, e concluíram que a profundidade de carbonatação em concreto fabricado com agregado reciclado, se situa em uma faixa similar à encontrada em concretos estruturais convencionais. Eles também observaram que as amostras com alto teor de cimento tiveram maior resistência a carbonatação.

Nos testes feitos por Levy e Helene (2004), onde foram utilizados agregados graúdos e miúdos reciclados provenientes de resíduos de concreto, a profundidade de carbonatação obtida foi inferior à do concreto feito com agregado natural, independente da porcentagem de substituição utilizada, conforme visto no Tabela 2.10. Tais resultados levam a crer que esse comportamento se deve ao fato de que a profundidade de carbonatação depende fortemente da composição química do concreto e não apenas dos aspectos físicos. Observa-se também uma

diferença de comportamento do concreto quando ao tipo de agregado substituído, onde a substituição do agregado miúdo provocou profundidades de carbonatação superiores às do agregado graúdo.

Tabela 2.10 - Profundidade de carbonatação obtidos nos estudos de Levy e Helene

Agregado	% de substituição	Profundidade de Carbonatação e_{CO_2} (mm)		
		$f_{c28} = 20$ MPa	$f_{c28} = 30$ MPa	$f_{c28} = 40$ MPa
Graúdo e miúdo natural	0	9.6	6.0	3.5
Reciclado graúdo de concreto	20	5.5	3.9	2.7
Reciclado graúdo de concreto	50	5.0	3.4	2.3
Reciclado graúdo de concreto	100	7.0	5.2	3.4
Reciclado miúdo de concreto	20	6.0	4.6	3.6
Reciclado miúdo de concreto	50	6.5	4.6	3.3
Reciclado miúdo de concreto	100	6.7	4.9	3.6

Fonte: LEVY E HELENE, 2004, p.1979.

Segundo Geng e Sun (2013) a penetração de cloretos e a carbonatação são os dois maiores problemas de durabilidade de concretos produzidos com agregados miúdos reciclados. A durabilidade de concretos com resíduos da construção pode ser comprometida em função do aumento de sua porosidade e absorção d'água, embora estudos apontem que concretos feitos com até 50% de substituição de agregado natural por agregado reciclado podem apresentar comportamento semelhante ao concreto de referência (WERLE *et al.*, 2011).

Na Figura 2.18 vê-se a relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão em concretos estudados por Thomas *et al.* (2012), onde verifica-se uma ligeira redução da profundidade de carbonatação com o aumento de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado. Observa-se também que, para um mesmo teor de

substituição, a profundidade de carbonatação diminuiu com o aumento da resistência à compressão.

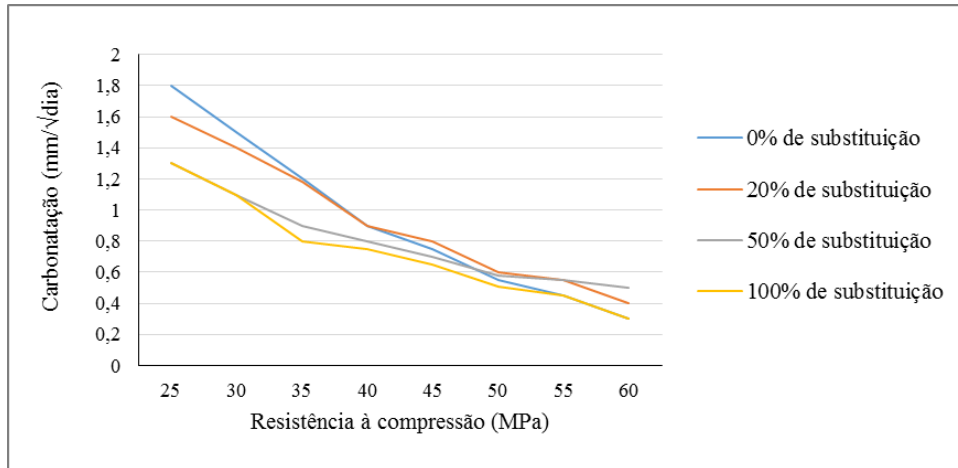


Figura 2.18 - Relação entre profundidade de carbonatação e resistência à compressão para diferentes percentagens de substituição
Fonte: Adaptado de THOMAS *et al.* 2012, p. 1060.

Bouny *et al.* (2014), estudando concretos convencionais, verificaram uma queda na profundidade de carbonatação com o aumento da resistência a compressão, conforme pode ser verificado na Figura 2.19. Com base nos resultados obtidos, concluiu que acima de 50 MPa, a carbonatação é praticamente desprezível devido ao fato de se ter, nesses casos, reduzidos índices de vazios.

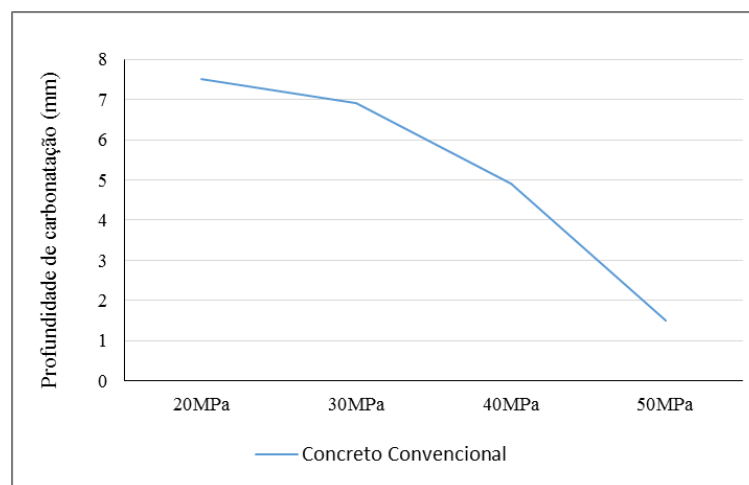


Figura 2.19 - Relação entre a resistência à compressão e a profundidade de carbonatação em um concreto convencional
Fonte: Adaptado de BOUNY *et al.*, 2014, p. 279.

Fazendo-se um paralelo entre os resultados encontrados por Thomas *et al.* (2012) e Bouny *et*

al. (2014), embora os dois tenham estudado concretos diferentes, observou-se a mesma tendência de comportamento para qualquer porcentagem de substituição.

A Figura 2.20 mostra o efeito da relação água/cimento utilizada nos traços e a espessura carbonatada aos 28 dias, em concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de concretos, dosados com diferentes proporções de substituição. Observa-se um aumento da taxa de carbonatação, com o aumento da relação água/cimento e com o aumento da proporção de substituição (THOMAS *et al.*, 2012).

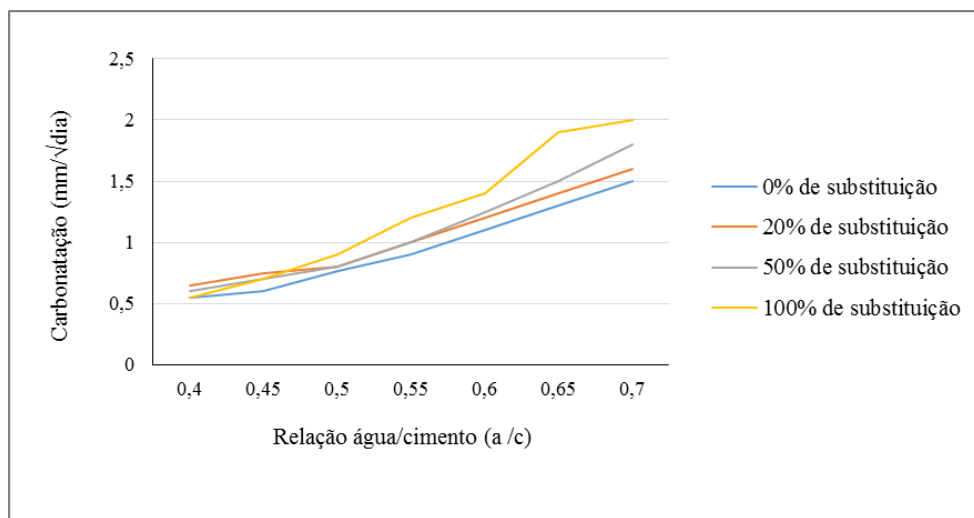


Figura 2.20 - Relação entre o fator água cimento e o avanço da frente carbonatação
Fonte: Adaptado de THOMAS *et al.* 2012, p. 1060.

2.9 Concretos para fins estruturais fabricados com agregados reciclados

Embora os agregados reciclados sejam amplamente utilizados em concretos sem finalidade estrutural e em pavimentos, conforme previsto na NBR 15116 (ABNT, 2004), nenhuma norma brasileira prevê a utilização de agregados reciclados para fins estruturais. Vários estudos, porém, têm sido realizados no intuito de viabilizar seu uso para tais fins.

Pereira *et al.* (2012) analisaram algumas propriedades de concretos de diferentes classes de resistência, utilizando um concreto de referência, produzido sem agregados reciclados e um concreto com substituição de 20% do agregado natural por um agregado graúdo reciclado, proveniente de resíduos de concretos, obtendo os dados apresentados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Comparação das propriedades de concretos com diferentes classes de resistência avaliando-se o efeito do uso de agregados reciclados

Desempenho	Concreto de referência			Concreto com agregados reciclados		
	20 MPa	30 MPa	40 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa
Relação água/cimento	0,91	0,68	0,52	0,79	0,63	0,51
Consumo de cimento por m ³	179	291	397	269	341	407
Profundidade de Carbonatação (mm)	9,6	6,0	3,5	5,5	3,9	2,7
Absorção de água (%)	7,3	6,6	6,1	6,9	6,3	5,9
Índices de vazios (%)	16,0	14,6	13,6	14,5	13,5	12,9
Resistividade (kΩ.com)	13,3	17,0	20,4	16,3	17,9	19,3
Concentração de cloretos (%)	0,50	0,41	0,35	0,53	0,47	0,42
Módulo de elasticidade (GPa)	24,2	27,0	29,1	23,5	26,6	29,1

Fonte: PEREIRA *et al.*, 2012, p. 133.

Observa-se em algumas das propriedades analisadas que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram desempenho superior aos concretos com agregados naturais. O desempenho dos concretos quanto à durabilidade melhorou com o aumento da resistência mecânica, devido à diminuição da relação a/c e, conseqüentemente, dos vazios.

2.9.1 Propriedades mecânicas do concreto fabricado com agregados reciclados

O módulo de elasticidade, a resistência à tração e a resistência à compressão são as propriedades usualmente avaliadas quando se deseja aferir o desempenho mecânico do concreto. Para se garantir a qualidade e a durabilidade das estruturas, deve-se estudar os efeitos da incorporação de agregados reciclados nestes parâmetros. Embora ocorra uma diferença de comportamento quando se incorporam agregados reciclados miúdos ou graúdos, o desempenho geral do concreto se mostra similar, apresentando sempre valores mais baixos de módulo de elasticidade e resistência à compressão a medida que os valores de substituição

de agregados naturais por artificiais aumenta, independentemente da faixa granulométrica utilizada.

a) Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade relaciona a tensão aplicada com a deformação instantânea obtida que, por sua vez, depende da composição do traço do concreto e, em especial, da natureza dos agregados. O módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) e o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) são obtidos segundo o método de ensaio estabelecido na NBR 8522 (ABNT, 2008), podendo ser estimado em função da resistência à compressão do concreto conforme apresentado na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão

Classe de Resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci} (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014, p. 25.

Buttler e Machado (2004), estudando concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes da britagem de resíduo de concreto, encontraram uma redução média de 16% no módulo de elasticidade do concreto reciclado em relação ao concreto natural, atribuindo a essa característica a uma menor capacidade de restringir deformações da matriz devido ao aumento de porosidade.

Em sua tese de doutorado, Levy (2001) encontrou, para concretos de 20 MPa, valores de módulo de elasticidade de 24,2 GPa para o concreto de referência, 23,5 GPa para o concreto com 20% de substituição de agregado graúdo e 21,9 GPa para o concreto com 20% de substituição de agregado miúdo.

Pedro *et al.* (2014) em testes realizados com uma porcentagem de substituição de 100% do agregado natural pelo agregado reciclado, encontraram módulos de elasticidade relativamente mais baixos que os dos concretos de referência, com um decréscimo da ordem de 22% para concreto com resistência à compressão de 20 MPa, um decréscimo de 18% para 45 MPa e de 15% para 65 MPa, conforme pode ser visto na Figura 2.21.

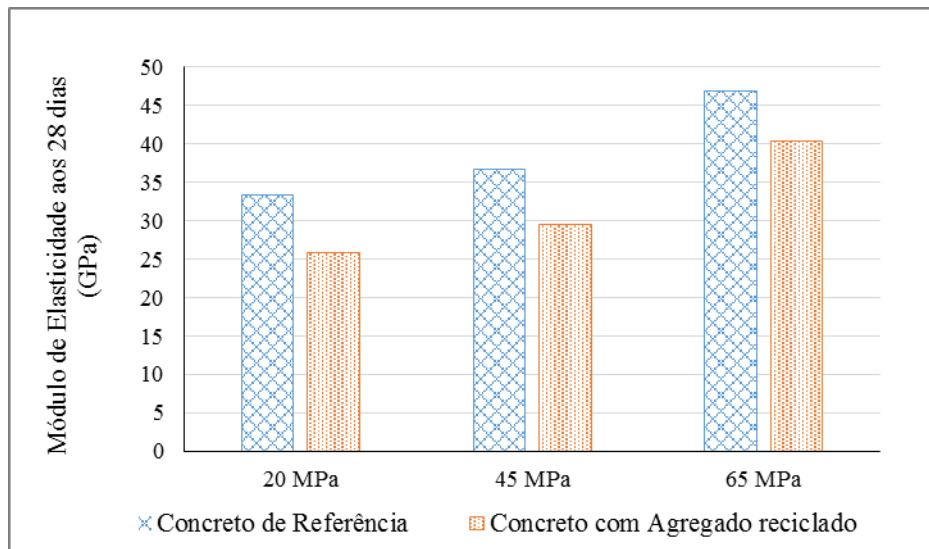


Figura 2.21 - Avaliação do módulo de elasticidade em concretos com agregados reciclados
Fonte: PEDRO *et al.*, 2014, p. 146.

Ao se comparar os valores encontrados por Pedro *et al.* com os valores estabelecidos na NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme apresentado na Tabela 2.12, observa-se que dentre os concretos produzidos com agregados reciclados, apenas o concreto da classe C45 ficou abaixo dos limites estabelecidos.

Maslesev *et al.* (2010) também encontraram uma diminuição no módulo de elasticidade com o aumento do teor de substituição do agregado e recomendam que este tipo de concreto não seja utilizado em elementos estruturais que exigem maiores deformações.

b) Resistência à tração

A resistência à tração do concreto é influenciada basicamente pelas características da matriz e da zona de transição (BUTTLER; MACHADO, 2004). Para Silva *et al.* (2015 b), de um modo geral, a resistência à tração deverá diminuir com o aumento da quantidade de incorporação de

agregados reciclados, mas, dependendo da quantidade, do tamanho, do tipo e da qualidade do agregado, haverá uma maior ou menor redução desta.

Segundo Buttler e Machado (2004), embora algumas pesquisas mostrem que não há uma diferença significativa entre a resistência à tração para concretos produzidos com agregados reciclados e concretos produzidos com agregados naturais, observa-se uma redução média quando se incorpora agregados graúdos reciclados ao traço, conforme apresentado na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 - Valores de resistência à tração de concretos aos 7 e 28 dias

Concreto	Idade (dias)	Resistência à tração (MPa)
Concreto de referência	7	2,68
Concreto com agregado reciclado	7	1,97
Concreto de referência	28	3,33
Concreto com agregado reciclado	28	3,24

Fonte: BUTTLER e MACHADO, 2004, p. 12.

c) Resistência característica à compressão

A resistência característica à compressão do concreto é definida em função da classe de agressividade a que este será submetido. Ao se projetar estruturas com vistas à durabilidade deve-se levar em consideração os critérios de projeto estabelecidos para cada uma das classes de agressividade previstas na NBR 6118 (ABNT, 2014). A resistência característica à compressão mínima especificada para concretos estruturais, definida para classe de agressividade I é de 20 MPa.

Levy e Helene (2004), produziram concretos utilizando agregados reciclados miúdos provenientes de resíduos de alvenaria, agregados miúdos de concreto, agregados graúdos de alvenaria e agregados graúdo de concreto em proporções de substituição de 0%, 20%, 50% e 100% de agregado natural por agregado reciclado e chegaram a resistências média à compressão de 20 MPa, 30MPa e 40 MPa aos 28 dias em todos os tipos de substituições realizadas. Pedro *et al.* (2014), com substituição de 100% do agregado graúdo natural pelo

reciclado, chegaram a resistências à compressão de 20 MPa, 45 MPa e 65 MPa. Malesev *et al.* (2010) afirmam que a resistência à compressão do concreto depende da qualidade dos agregados reciclados, podendo-se atingir a resistência à compressão desejada independente da porcentagem de substituição.

Thomas *et al.* (2012) verificaram que a resistência à compressão em concretos produzidos com agregados graúdos obtidos a partir de resíduos de concreto, com uma porcentagem de substituição de até 50% do agregado natural pelo agregado reciclado, pode ser superior a 30MPa, conforme apresentado na Figura 2.22. Aos 365 dias eles chegaram a uma resistência à compressão superior a 40 MPa para a mesma mistura, conforme apresentado no Figura 2.23.

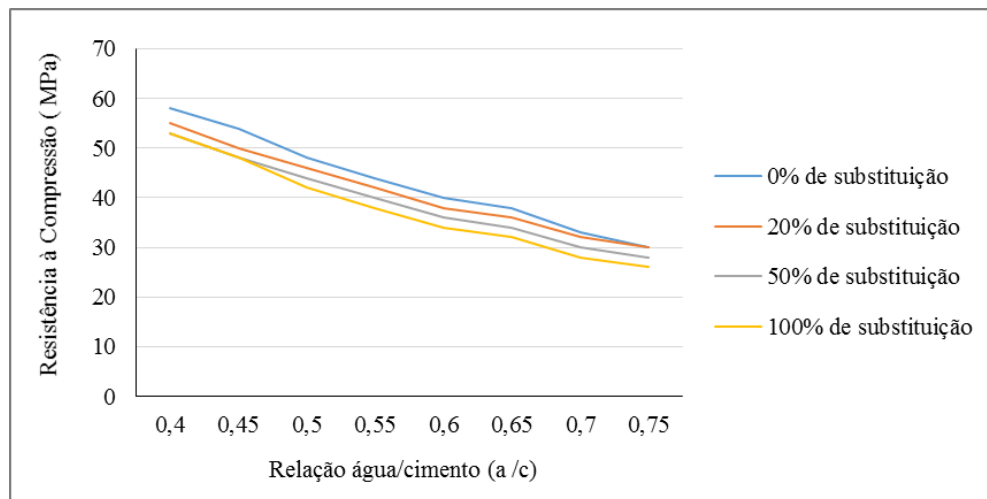


Figura 2.22 - Resistência à compressão versus relação água cimento aos 28 dias
Fonte: Adaptado de THOMAS *et al.*, 2012, p. 1058.

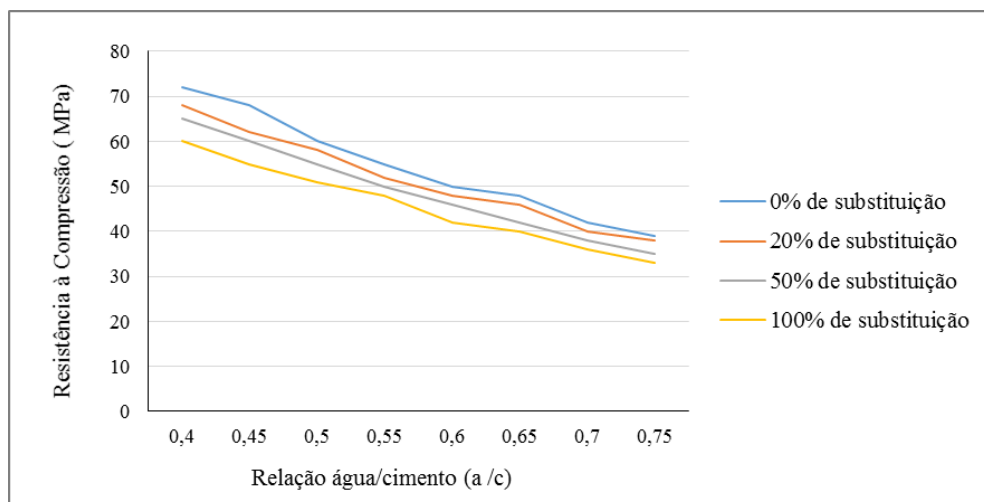


Figura 2.23 - Resistência à compressão versus relação água cimento aos 365 dias
Fonte: Adaptado de THOMAS *et al.*, 2012, p. 1058.

Os trabalhos apresentados indicam que a resistência à compressão prescrita para um concreto estrutural pode ser atingida com a utilização de agregados reciclados. Observa-se, entretanto, uma redução da resistência constatada para uma mesma relação água/cimento, quando se compara com um traço de referência sem substituições.

Segundo Butler *et al.* (2011) a redução da resistência se dá em função dos planos de falhas que ocorrem ao redor do agregado e indicam que a zona interfacial de transição do agregado com argamassa é um dos responsáveis pela queda da resistência. Para eles, outra possibilidade para esta redução está associada a alta absorção da água, capaz de alterar a relação água/cimento da mistura. Já Buttler e Machado (2004) acreditam que o alto índice de vazios aumenta a porosidade na zona de transição, diminuindo a resistência à compressão.

3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. O programa experimental foi elaborado conforme esquema mostrado na Figura 3.1.

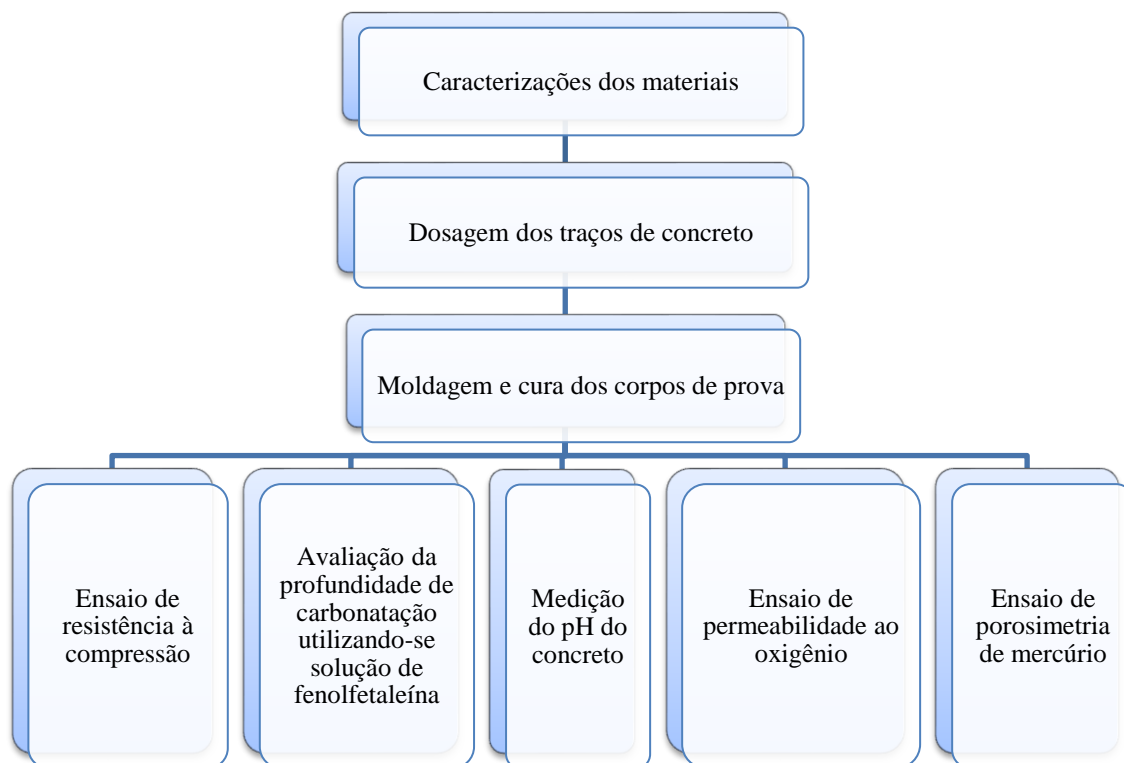


Figura 3.1 - Programa experimental

3.1 Caracterizações dos materiais

Para a produção dos corpos de prova de concreto foram utilizados cimento Portland, agregado miúdo natural, agregado graúdo natural, agregado miúdo reciclado proveniente de resíduos de

concreto obtidos da lavagem de caminhões betoneira e água, conforme as especificações apresentadas a seguir.

3.1.1 Cimento

Utilizou-se o cimento Portland composto com escória de alto forno, CP II-E-32, produzido dentro dos percentuais estabelecidos pela NBR 11578 (ABNT, 1991) e apresentados na Tabela 3.1. A caracterização química do cimento utilizado é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Teores normativos dos componentes do cimento Portland CP II- E-32

Cimento	Componentes (% em massa)		
	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material carbonático
CP II-E-32	56 - 94	6 - 34	0 - 10

Fonte: ABNT NBR 11578, 1991, p. 2.

Tabela 3.2 - Caracterização química do cimento CP II- E-32 utilizado

Determinações Químicas	Cimento Utilizado	Limites (NBR 11578)	Determinações Químicas	Cimento Utilizado	Limites (NBR 11578)
CaO	56,01	-	K ₂ O	0,65	-
SiO ₂	23,60	-	CO ₂	4,99	≤ 5,0
Al ₂ O ₃	6,95	-	C ₃ A (Teórico)	4,94	-
Fe ₂ O ₃	2,43	-	PF 500°C	0,55	-
MgO	2,16	≤ 6,5	PF 1000°C	5,86	≤ 6,5
SO ₃	1,5	≤ 4,0	RI	2,10	≤ 2,5

Fonte: Relatório de assessoria técnica, Holcim.

As propriedades físicas e mecânicas do cimento estabelecidas pela NBR 11578 (ABNT, 1991) são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II-E-32

Características e Propriedades	Unidade	Cimento Utilizado	Limites (NBR 11579)
Resíduo na peneira # 200 (75 µm)	%	0	≤ 12
Resíduo na peneira # 325 (44 µm)	%	7,2	-
Blaine	cm ² /g	3700	≥ 2600
Tempo de início de pega	min	203	≥ 60
Tempo de fim de pega	min	263	≤ 600
Expansibilidade a quente	mm	-	≤ 5
Expansibilidade a frio	mm	-	≤ 5
Resistência à compressão	1 dia de idade	MPa	6,5
	3 dias de idade	MPa	19,7
	7 dias de idade	MPa	27,7
	28 dias de idade	MPa	38,5

Fonte: Relatório de assessoria técnica, Holcim.

3.1.2 Agregados

3.1.2.1 Agregado miúdo natural

Utilizou-se como agregado miúdo para fabricação dos corpos de prova uma areia natural quartzosa, comercializada no município de Belo Horizonte, com faixa granulométrica média grossa, segundo a classificação da NBR 7211 (ABNT, 2009). Tal areia foi utilizada tanto nos corpos de prova do concreto de referência (100% de areia natural) quanto no preparo dos corpos de prova com substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado proveniente do resíduo de concreto, obtidos da lavagem de caminhões betoneira. A caracterização dos agregados miúdos foi executada por meio de ensaios de granulometria, massa específica, massa unitária, teor de argila, materiais pulverulentos, e módulo de finura.

Antes da realização dos ensaios de caracterização do agregado miúdo natural, este foi seco em estufa na temperatura de 105°, quarteado e fracionado.

a) Ensaio de caracterização granulométrica

A caracterização granulométrica foi feita conforme recomendações da NBR 7214 (ABNT, 2012), na qual 1000 g de areia foram peneiradas mecanicamente por 2 minutos entre as peneiras 4,8 mm e 0,15 mm. Os ensaios foram realizados em duas amostras e o resultado apresentado equivale a média aritmética dos dois ensaios.

b) Ensaio de massa específica do agregado seco

O ensaio de massa específica foi feito conforme recomendação NBR NM 52 (ABNT, 2009). Para tal, utilizou-se 500 g de agregado. Após seguidos todos os procedimentos indicados em norma, a massa específica do agregado seco foi determinada a partir da Equação 3.1.

$$d = \frac{m_s}{V - V_a} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde:

d = massa específica aparente do agregado seco (g/cm³)

m_s = massa da amostra seca em estufa (g)

V = volume do frasco (cm³)

V_a = volume de água adicionado ao frasco (cm³)

c) Ensaio de massa unitária

O ensaio de massa unitária foi realizado seguindo os procedimentos estabelecidos na NBR NM 45 (ABNT, 2006). A massa unitária foi então calculada, a partir da Equação 3.2.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar}-m_r}{V} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (kg/m³)

m_{ar} = massa do recipiente mais agregado (kg)

m_r = massa do recipiente vazio (kg)

V = volume do recipiente (m³)

d) Ensaio de teor de argila

O procedimento para o ensaio de teor de argila foi feito conforme NBR 7218 (ABNT, 2009). Após se pesar 200 g do material retido na peneira 1,2 mm, a areia foi lavada e passada na peneira 0,6 mm. O material passante nesta peneira foi pesado e o resultado do teor de argila calculado utilizando-se a Equação 3.3.

$$M_T = \frac{M_i - M_F}{M_i} \times 100 \quad \text{Eq. 3.3}$$

Onde:

M_T = teor de argila (%)

M_i = massa inicial da fração (g)

M_F = massa após peneiramento (g)

e) Ensaio de materiais pulverulentos

No ensaio de materiais pulverulentos, obteve-se o material fino passante na peneira 75µm, pesando-se 500 g deste material para a realização do teste conforme procedimento estabelecido na NBR NM 46 (ABNT, 2003). O material foi colocado em uma bandeja e coberto por água. O material presente na peneira 75 µm foi lavado até a obtenção de uma

água clara. Após 24 h na estufa a uma temperatura de 105°, o material foi novamente pesado, sendo então, determinada a porcentagem do material fino a partir da Equação 3.4.

$$m = \frac{m_i - m_F}{m_i} \times 100 \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde:

m = porcentagem de material mais fino que a peneira 75 μ m (%)

m_i = massa original da amostra seca (g)

m_F = massa da amostra seca após lavagem (g)

O resultado apresentado será obtido por meio da média aritmética de dois resultados, conforme recomendado pela norma.

f) Ensaio de módulo de finura

Para obtenção do módulo de finura foram realizados os procedimentos indicados na NBR 7211 (ABNT, 2009), onde realizou-se a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado nas peneiras de série normal, sendo o resultado dividido por 100.

3.1.2.2 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo utilizado foi obtido por meio da britagem de rochas calcárias. Foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária.

a) Ensaio de granulometria

O ensaio de granulometria da brita foi realizado conforme os procedimentos indicados na NBR 7211 (ABNT, 2009). Uma vez quarteado o material, uma amostra de 5000 g foi peneirada mecanicamente, sendo pesada a fração retida em cada peneira.

b) Ensaio de massa específica do agregado graúdo seco

O ensaio de massa específica do agregado graúdo seco foi feito conforme a recomendação prevista na NBR NM 53 (ABNT, 2009), que determina que para uma dimensão característica máxima de 25 mm, o ensaio a ser realizado deve ser feito com uma amostra de 4,0 kg. Após seguidos todos os procedimentos especificados em norma, a massa específica do agregado seco foi calculada a partir da Equação 3.5.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Onde:

d = massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3)

m = massa ao ar da amostra seca (g)

m_a = massa em água da amostra (g)

c) Ensaio de massa unitária

Para o cálculo da massa unitária foram seguidos os procedimentos estabelecidos na NBR NM 45 (ABNT, 2006) onde foi feita a pesagem do material em um recipiente com volume de 10 dm^3 . A massa obtida na pesagem foi dividida pelo volume do recipiente conforme indicado na Equação 3.2.

3.1.2.3 Agregado miúdo reciclado de concreto

a) Procedimentos para obtenção do agregado miúdo reciclado de concreto

O agregado miúdo reciclado utilizado nesta pesquisa é proveniente da lavagem dos caminhões betoneira de concreteira localizada na cidade de Santa Luzia (região metropolitana de Belo Horizonte).

Durante a lavagem dos caminhões, são gerados resíduos de concreto conforme apresentado na Figura 3.2, os quais são conduzidos para uma baia de resíduos úmidos, passando por um processo de decantação, conforme mostrado na Figura 3.3.



Figura 3.2 - Resíduo proveniente da lavagem dos caminhões



Figura 3.3 - Baia de resíduos úmidos

Posteriormente são retirados por um trator pá carregadeira e colocados em uma baia de resíduos secos, mostrada na Figura 3.4, onde ficam armazenados até serem transportados para um bota fora credenciado para disposição final.

Foram retirados aproximadamente 120 kg de material de quatro pontos diferentes da baia de resíduos secos, os quais foram distribuídos em quatro sacos de linhagem para serem transportados para o laboratório. Os mesmos foram misturados, quarteados e peneirados até se obter a quantidade de material passante na peneira 4.8 mm, suficiente para a realização dos ensaios de caracterização e confecção dos corpos de prova.



Figura 3.4 - Baía de resíduos secos

Não foi feita uma estimativa da quantidade de volume de resíduo gerado na concreteira, visto que a mesma varia muito em função da quantidade de concreto produzido, o que demandaria um acompanhamento a longo prazo da operação da central de concreto, não sendo este, objeto desta pesquisa.

b) Ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado

Após o quarteamento do material foram realizados os mesmos procedimentos utilizados para caracterização do agregado miúdo natural.

Dentre os ensaios realizados na areia reciclada, encontram-se o de granulometria, o de massa específica, o de massa unitária, o de teor de argila, o de materiais pulverulentos e o de módulo de finura.

b) Difração de raio X

Com a finalidade de obter uma classificação qualitativa das fases mineralógicas presentes no agregado miúdo reciclado foi realizado o ensaio de difração de raio X pelo método do pó passante na peneira #200 (abertura 75 μm). As amostras foram submetidas a análises por Difractometria de Raios X (DRX), realizadas em um Difrátômetro da PANalytical Empyream, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita. O método de análise baseia-se na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos

difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD – International Center for Diffraction Data.

3.1.3 Água

Utilizou-se nesta pesquisa água potável, conforme especifica a NBR 7215 (ABNT, 1996), proveniente da rede de abastecimento local.

3.2 Dosagem dos traços de concreto

Como estratégia de dosagem buscou-se um traço de referência da classe C25, produzido apenas com o agregado miúdo natural. A partir desse traço foi feita uma nova formulação em que 30% do agregado miúdo natural foi substituído pelo agregado miúdo reciclado, mantendo-se todos os demais parâmetros de dosagem.

A dosagem dos componentes do concreto foi definida de forma a atender as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos estruturais de classe de agressividade II (ambiente urbano). Essa norma especifica que para essa classe de agressividade, a relação água/cimento deve ser igual ou inferior a 0,6 e a resistência característica à compressão deve atingir no mínimo 25 MPa.

Definiu-se que seria utilizado para fins de comparação o mesmo traço, tanto para o concreto de referência (sem agregado reciclado) quanto para o concreto onde foi feita 30% de substituição do agregado miúdo por agregado miúdo reciclado. A Tabela 3.4 apresenta as características básicas dos traços de concreto fabricados e analisados, aqui chamados de concreto padrão (CPP) e concreto com agregados reciclados (CPAR).

As especificações de dosagem e o consumo dos materiais empregados são apresentados na Tabelas 3.5. A proporção dos materiais apresentada permitiu a moldagem de 11 corpos de prova cilíndricos (100 x 200) mm e 2 corpos de prova cilíndricos (150 x 300) mm para o traço de CPP, e as mesmas quantidades e dimensões para o traço de CPAR.

Tabela 3.4 - Especificações de dosagem dos corpos de prova

Parâmetros	CPP	CPAR
Resistência característica à compressão	25 MPa	25 MPa
Relação água/cimento	0,55	0,55
Areia natural	100 %	70 %
Areia reciclada	0 %	30 %
Brita 1 calcária	100 %	100 %
Slump	120 ± 20 mm	120 ± 20 mm

Tabela 3.5 - Consumo de materiais para produção dos corpos de prova

Traço: 1: 1,66: 1,84		
Materiais	CPP	CPAR
Cimento CP II-E-32	13,60 kg	13,60 kg
Areia natural	22,60 kg	15,80 kg
Areia reciclada	0	6,80 kg
Brita 1 calcária	25,0 kg	25,0 kg
Água	7,5 kg	7,5 kg

3.3 Teste de consistência do concreto - *Slump Test*

Realizou-se o *Slump Test*, para determinar a consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone, conforme recomendações da NBR NM 67 (ABNT, 1998). O ensaio foi realizado tanto no concreto padrão, quanto no concreto com agregado reciclado, para verificação da trabalhabilidade das misturas no estado fresco.

3.4 Moldagem e Cura dos Corpos de prova

Os corpos de prova foram feitos segundo os procedimentos descritos na NBR 12821 (ABNT, 2009) que estabelece os critérios de preparação de concreto em laboratório. Os materiais

foram misturados na betoneira por 5 minutos, desformados 24 h após a moldagem e mantidos por 28 dias em câmara úmida para cura, conforme mostrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Cura dos corpos de prova em câmara úmida

3.5 Ensaio de resistência característica à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2007) aos 7 dias, 14 e aos 28 dias em corpos de prova cilíndricos com dimensões de (100 x 200) mm, sendo rompidos 3 corpos de prova de cada traço para cada idade.

3.6 Ensaio de permeabilidade ao oxigênio

3.6.1 Preparação da amostra

Para realização do teste de permeabilidade ao oxigênio foram confeccionados dois corpos de prova de (150 x 300) mm para cada um dos traços. Os CPs foram serrados ao meio e, de cada uma das metades obtidas, extraiu-se um disco de 50 mm de espessura por meio de um novo corte. Obteve-se deste modo 4 discos de 150 mm de diâmetro e 50 mm de espessura para cada um dos traços. Após o corte, as amostras foram secas em estufa por 24 h a uma temperatura de 40°C. Retiradas da estufa após as 24 h as amostras foram colocadas no vácuo por 48 h, conforme mostrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Equipamento de vácuo

3.6.2 Equipamento para o ensaio de permeabilidade ao oxigênio

Para este ensaio, utilizou-se um permeâmetro ao oxigênio para concretos, Modelo 58-E0031, da empresa Controls.

O aparelho em questão, é constituído por:

- Uma célula de permeabilidade, produzida em alumínio, utilizada para colocação da amostra (FIGURA 3.7);
- Um pneu de borracha utilizado para prevenir a passagem de oxigênio ao longo da face lateral da amostra (FIGURA 3.8);
- Um painel, conforme apresentado na Figura 3.9, contendo:
 - Três medidores de vazão, tipo bolha, usados para medir o fluxo ao oxigênio;
 - Um medidor de pressão digital com transdutor de pressão;
 - Uma válvula de controle de fluxo de alta precisão, para controlar a entrada de pressão;
 - Um painel de distribuição com válvulas para ativar os medidores de fluxo.



Figura 3.7 - Célula de alumínio do Equipamento Controls 58-E0031



Figura 3.8 - Pneu de borracha do Equipamento Controls 58-E0031

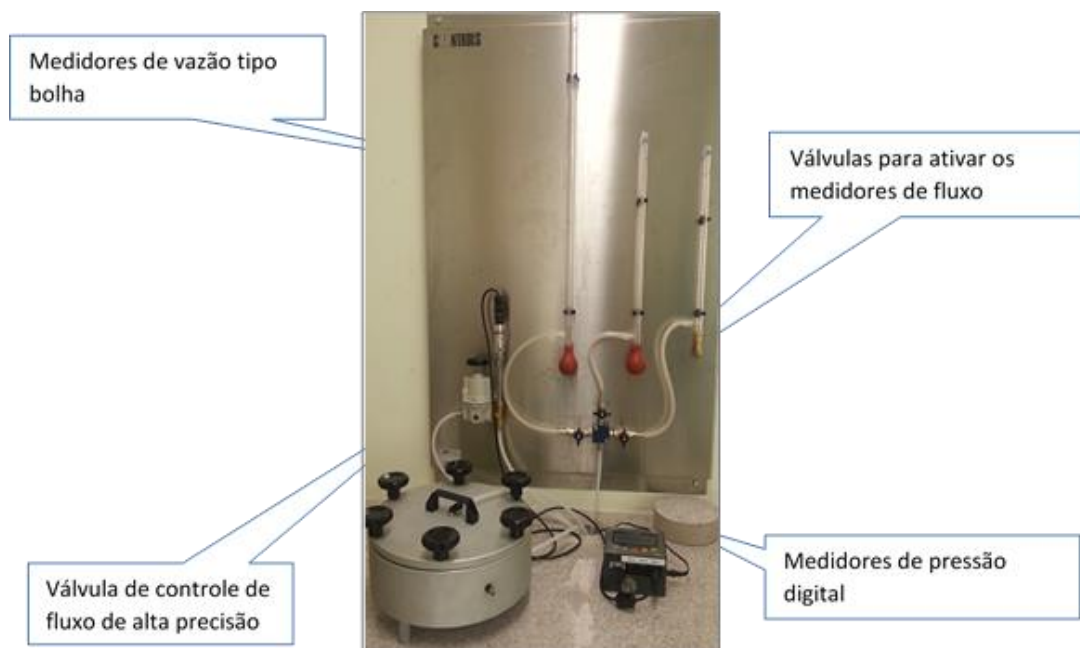


Figura 3.9 - Painel do permeâmetro ao oxigênio para concretos

3.6.3 Procedimentos do ensaio de permeabilidade ao oxigênio

Para realização deste ensaio, o pneu de borracha, situado no entorno da amostra (150 x 50) mm, foi cheio até se obter uma pressão de no mínimo 90 Psi ($6,2 \times 10^{-4}$ GPa). Antes de se fechar a célula de pressão, fez-se uma conferência da pressão do pneu com um manômetro, conforme mostrado na Figura 3.10, garantiu-se, deste modo, iguais condições em todos os ensaios, de modo a se evitar distorções nos resultados.



Figura 3.10 - Manômetro para conferência da pressão de ar

Colocou-se uma solução de água com sabão dentro do medidor de vazão tipo bolha, para então serem realizadas as leituras de volume e tempo, com intervalo mínimo de 20 s, para as pressões de 150, 200, 250, 300 e 350 kPa.

Calculou-se o coeficiente de permeabilidade ao oxigênio, para cada uma das pressões solicitadas pelo método CEMBUREAU, a partir da Equação 2.1 apresentada no capítulo anterior. O valor final dos coeficientes de permeabilidade foi obtido a partir da média dos resultados encontrados.

3.7 Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Para realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, uma fatia foi extraída da borda do corpo de prova, utilizando-se para tal, uma serra de mesa, conforme mostrado na

Figura 3.11. Em seguida, esta fatia foi fragmentada até se obter amostras com um tamanho inferior a 10 mm, que é a dimensão necessária para que as mesmas pudessem ser inseridas no penetrômetro utilizado.



Figura 3.11 - Corte da amostra para o ensaio de porosimetria de mercúrio

Após atingido o tamanho ideal, as amostras foram colocadas na estufa, por um período de 24h, a uma temperatura de 40°C

Utilizou-se para a realização do ensaio o equipamento Quantachrome PoreMaster 60, mostrado na Figura 3.12, configurado para atingir pressões de 0,34 MPa na baixa pressão e 400 MPa na alta pressão. Trabalhou-se com um ângulo de contato do mercúrio de 140° e uma tensão superficial de 480 erg/cm², de modo a se analisar, desta forma, intervalos de poros de 0,004 a 300 µm.



Figura 3.12 - Porosímetro Quantachrome PoreMaster 60

Utilizou-se a balança analítica mostrada na Figura 3.13 para as pesagens que se fizeram necessárias.

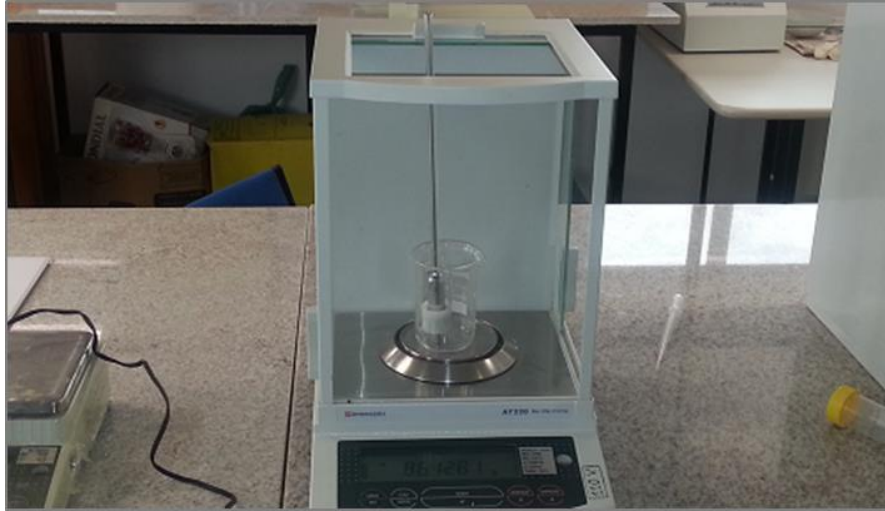


Figura 3.13 - Balança digital utilizada na pesagem do penetrômetro

3.8 Ensaio de carbonatação acelerada

Após 28 dias de cura, os corpos de prova (10 x 20) cm foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada. Foram ensaiados 2 corpos de prova de cada um dos traços analisados.

3.8.1 Marcação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram serrados ao longo dos 70 dias de ensaio, de modo a se obter 5 fatias de 4 cm, conforme mostrado na Figura 3.14. As leituras foram realizadas, em idades distintas, nas 4 fatias superiores, tendo sido descartada a fatia proveniente da base do CP (últimos 4cm).

Foram utilizados 2 corpos de prova (10 x 20) cm de cada traço, de modo a se viabilizar leituras nas idades de 0, 3, 7, 21, 28, 42, 63 e 70 dias, tanto no traço de referência, quanto no traço com substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado proveniente da lavagem dos caminhões betoneira. As medições foram realizadas sempre nas superfícies da seção de corte.

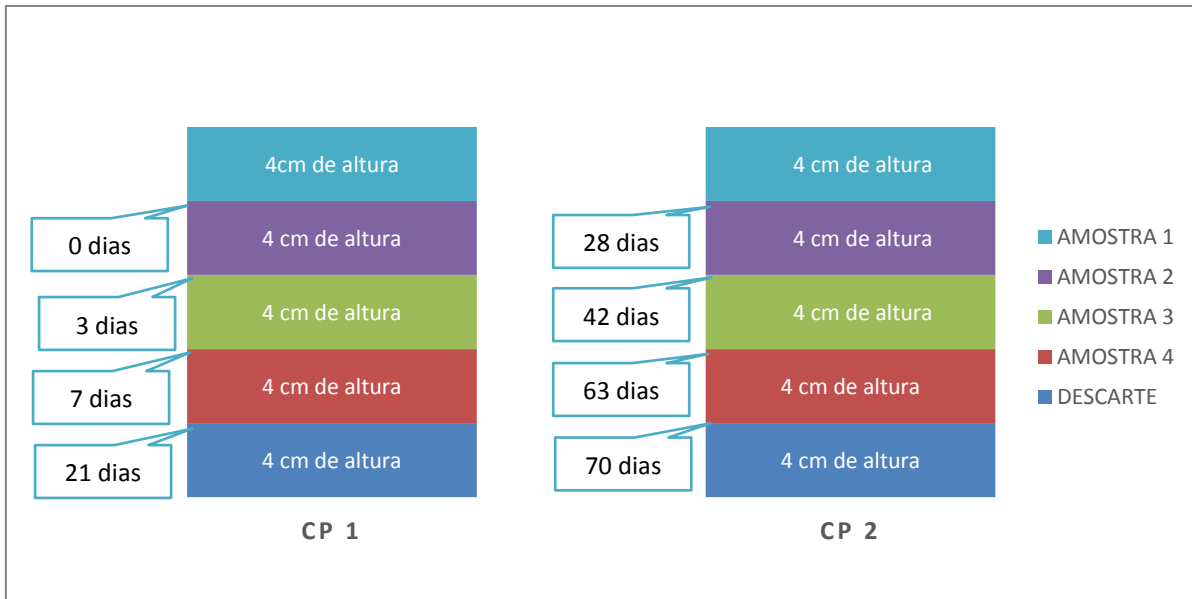


Figura 3.14 - Esquema de corte das amostras para leitura do pH e medição da profundidade de carbonatação

3.8.2 Corte dos corpos de prova

Nas datas especificadas para os ensaios, os corpos de prova foram serrados transversalmente conforme apresentado na Figura 3.15, utilizando uma serra de diamante arrefecida a água, de modo a permitir a extração de uma fatia de espessura igual a (40 ± 2) mm de seu topo.



Figura 3.15 - Corte dos corpos de prova

3.8.3 Limpeza das amostras

A limpeza das amostras foi feita com pincel, para retirada do pó proveniente do processo de corte, tendo sido, posteriormente, lavadas com água.

3.8.4 Câmara de carbonatação

Após 28 dias de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e colocados saturados na câmara de carbonatação. O modelo de câmara utilizado foi a Thermo Scientific Steri-Cult® CO2, ficando expostos a condições estáveis de umidade relativa a $(65 \pm 1) \%$, temperatura a $(28,0 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$ e concentração de dióxido de carbono (CO_2) a $(5,0 \pm 0,1) \%$, conforme mostrado na Figura 3.16, até o dia previsto para a realização dos ensaios.



Figura 3.16 - Condições de exposição das amostras

3.8.5 Medição do pH

Após submetidos à câmara de carbonatação, o pH foi medido na superfície da face interna da fatia serrada, utilizando-se para tal, o equipamento ExStik® PH150-C específico para medição quantitativa do pH em superfícies de materiais cimentícios. As medidas foram realizadas após se aspergir água deionizada na região de contato da sonda com a superfície serrada do corpo de prova (FIGURA 3.17).



Figura 3.17 - Medição do pH na face interna da amostra serrada

O equipamento, antes de cada leitura, foi calibrado em soluções de pH, utilizando-se primeiramente uma solução de pH igual a 7 e, posteriormente, soluções de pH igual a 4 e 10, respeitando-se esta sequência.

3.8.6 Medição da profundidade de carbonatação

Utilizou-se uma solução de fenolftaleína a 1%, para se avaliar o avanço da frente de carbonatação, sendo aspergida na superfície da amostra logo após a medição de seu pH. A profundidade da frente de carbonatação foi calculada por meio da média de oito medidas, realizadas com o auxílio de um paquímetro, a partir da face externa da seção até o limite da borda da região de coloração vermelho-púrpura, conforme indicado na Figura 3.18.

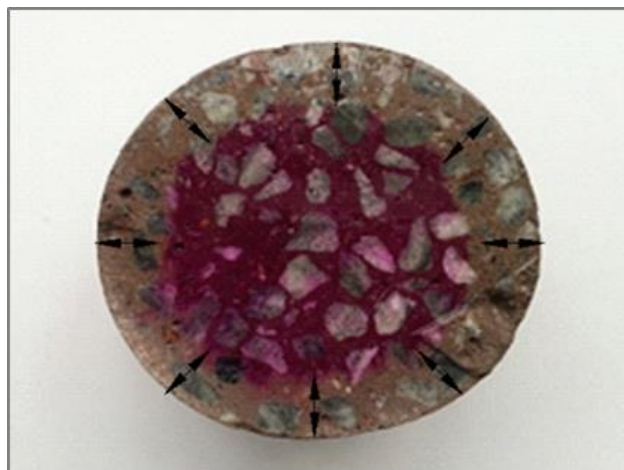


Figura 3.18 - Espessuras carbonatadas medidas com paquímetro

A espessura carbonatada também foi obtido por meio de processamento de imagem, utilizando-se o *software* Image J, conforme mostrado na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Espessura carbonatada avaliada por meio de processamento de imagens

4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos

4.1.1 Caracterização granulométrica

Os resultados obtidos a partir do ensaio de granulometria do agregado miúdo natural são apresentados na Tabela 4.1 e do agregado miúdo reciclado na Tabela 4.2. O concreto foi fabricado com uma percentagem de 30% de agregado miúdo reciclado e 70% de agregado miúdo natural. A Tabela 4.3 apresenta a granulometria do agregado miúdo após realização da mistura dos dois materiais nas proporções utilizadas.

Tabela 4.1 - Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo natural

Peneira (mm)	Material retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida (%)	Acumulada (%)
4,8	9,3	0,9	0,9
2,4	29,2	2,9	3,80
1,2	69,2	6,9	10,70
0,6	285,9	28,6	39,30
0,3	336,9	33,7	73,00
0,15	201,9	20,2	93,20
Fundo	67,6	6,8	100
Total	1000	100	

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo reciclado

Peneira (mm)	Material Retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida (%)	Acumulada (%)
9,5	17	1,7	1,7
6,3	28,9	2,89	4,59
4,8	3,6	0,36	4,95
2,4	42,5	4,25	9,20
1,2	155,2	15,52	24,72
0,6	236,0	23,6	48,32
0,3	224,0	22,4	70,72
0,15	132,8	13,28	84,0
Fundo	160,0	16,0	100
Total	1000	100	

Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo utilizado

Peneira (mm)	Material Retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida (%)	Acumulada (%)
9,5	5,10	0,51	0,51
6,3	8,67	0,867	1,377
4,8	7,59	0,759	2,136
2,4	33,19	3,319	5,455
1,2	95,00	9,50	14,955
0,6	270,93	27,093	42,048
0,3	303,03	30,303	72,351
0,15	181,17	18,117	90,468
Fundo	95,32	9,532	100
Total	1000	100	

A Figura 4.1 mostra as curvas granulométricas obtidas nos ensaios, e os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Observa-se que tanto as curvas granulométricas obtidas para o agregado miúdo natural e para o reciclado, quanto a curva granulométrica obtida da composição dos agregados, ficaram dentro dos limites inferior e superior estabelecidos por esta norma.

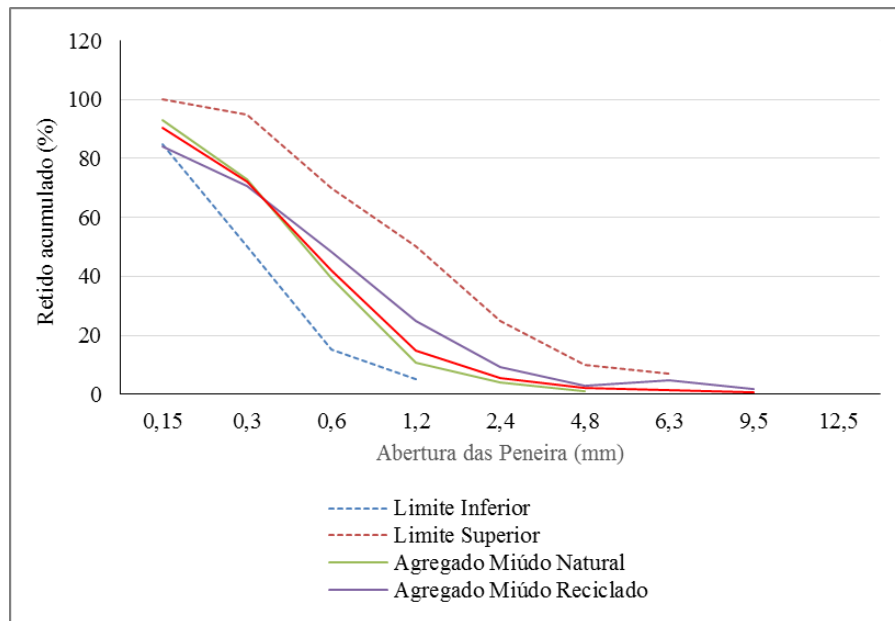


Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados

4.1.2 Caracterização física

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados miúdos natural e reciclado podem ser verificados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características físicas dos agregados miúdos naturais e reciclados

Descrição do Ensaio	Norma	Resultados	
		Agregado natural	Agregado reciclado
Massa unitária	NBR NM 45	1,364 kg/dm ³	1,610 kg/ dm ³
Massa específica	NBR NM 52	2,564 g/ml	2,660 g/ml
Teor de argila	NBR 7218	0,95 %	0,15 %
Materiais pulverulentos	NBR NM 46	2,8 %	8,54 %
Módulo de finura	NBR 7211	2,21	2,48

A partir dos resultados destes ensaios, pôde-se verificar que a massa unitária do agregado reciclado é superior à do agregado natural.

A massa específica do agregado reciclado utilizado é ligeiramente superior à do agregado natural, indicando que para obtenção de um mesmo volume, deve ser realizada uma compensação de massa entre os dois materiais conforme observado por Vieira *et al.* (2004). Este resultado diverge do resultado encontrado por Rodrigues e Fucale (2014), provavelmente em função da diferença da origem do agregado reciclado.

O teor de argila do agregado reciclado é inferior ao do agregado natural em função de ser um resíduo proveniente de materiais cimentícios. A NBR 7211 (ABNT, 2009) estabelece um limite máximo aceitável de teor de argila igual a 3%, indicando que, tanto o agregado natural, quanto o reciclado, atendem este quesito da norma.

Com relação aos materiais pulverulentos, a NBR 7211 (ABNT, 2009) indica que o teor máximo de material fino que passa por meio da peneira 75 μm por lavagem não deve ser superior a 3% em concreto submetido a desgaste superficial, e não deve ser superior a 5% em concretos protegidos do desgaste superficial. Porém, se este material for proveniente de britagem de rocha, estes limites são alterados de 3% para 10% para concretos submetidos a desgaste superficial e de 5% para 12% para concretos protegidos de desgaste superficial. Tais recomendações indicam que a origem do material pulverulento interfere nos limites estabelecidos. Embora o agregado miúdo reciclado não seja um material gerado durante a britagem de rocha conforme indicado em norma, por ser um material de base cimentícia, deve ser considerada a possibilidade de avaliá-lo dentro dos limites de 10% a 12% de permissão de pulverulentos, o que faria que o material estudado atendesse este critério de norma.

Com relação ao módulo de finura, a NBR 7211 (ABNT, 2009) indica que os valores podem variar de 1,55 a 3,50. Observa-se que os materiais estudados atendem os limites estabelecidos por norma.

4.1.3 Difração de raio X do agregado miúdo reciclado

O resultado da análise da amostra por Difractometria de raios X é apresentado na Tabela 4.5 e o difratograma obtido pode ser visto na Figura 4.2.

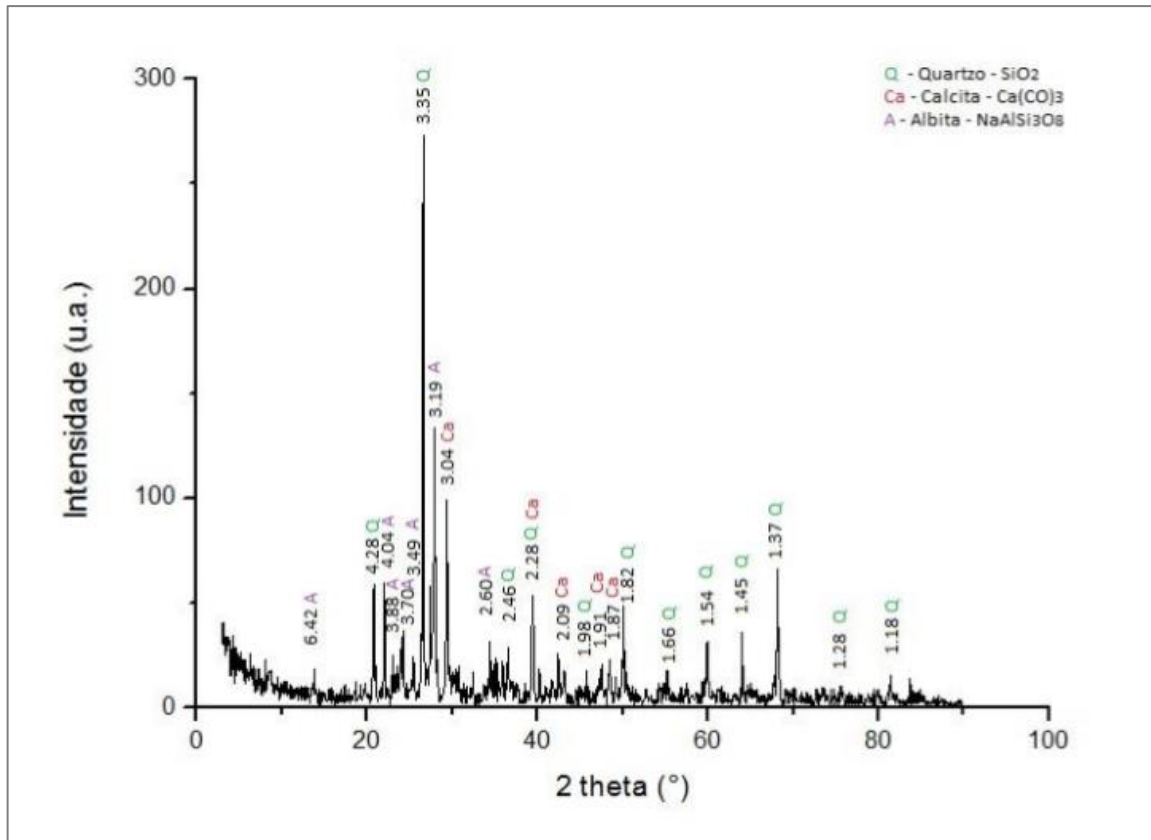


Figura 4.2 - Caracterização do agregado miúdo reciclado realizada por meio de difratometria de raio X

Tabela 4.5 - Composição mineralógica do agregado miúdo reciclado

Amostra	Mineral identificado		
Resíduo de concreto	Quartzo	Calcita	Albita

4.2 Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo

4.2.1 Caracterização granulométrica

O resultado obtido a partir do ensaio de granulometria do agregado graúdo natural é apresentado na Tabela 4.6, a partir do qual obteve-se a curva granulométrica apresentada na Figura 4.3, indicando que o material utilizado se encontra dentro das exigências normativas estabelecidas na NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 4.6 - Resultados obtidos no ensaio de granulometria do agregado graúdo

Peneira (mm)	Material retido (g)	Porcentagem (%)	
		Retida	Acumulada
25	0	0	0
19	460	9,2	9,2
12,5	3022	60,5	69,7
9,5	1276	25,5	95,2
6,3	182,4	3,6	98,8
4,8	11,0	0,2	99
Fundo	48,6	1,0	100%
Total	5000	100	

Verifica-se que o agregado graúdo utilizado pertence a zona granulométrica 9,5/25 estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009), possuindo dimensão máxima característica igual a 25 mm, sendo denominado comercialmente como brita 1.

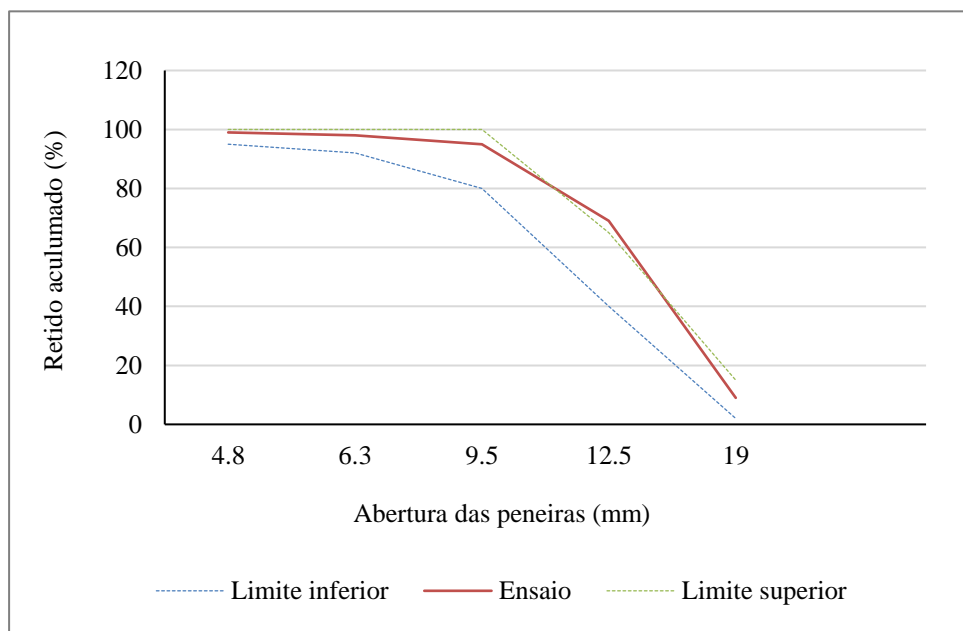


Figura 4.3 - Curva granulométrica do agregado graúdo e limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009)

4.2.2 Caracterização física

Para caracterização física do agregado graúdo foram realizados os ensaios de massa unitária e massa específica, cujos resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Características físicas do agregado graúdo

Descrição do Ensaio	Norma	Resultados
Massa unitária	NBR NM 45	1,38 kg/dm ³
Massa específica	NBR NM 52	3,56 g/cm ³

4.3 Consistência do concreto - *Slump Test*

Os resultados do *Slump Test* apresentados na Tabela 4.8, ficaram dentro do intervalo proposto de (10 ± 2) cm e foram iguais para os dois corpos de prova, o que indica que a adição do agregado reciclado na proporção estabelecida não interferiu na trabalhabilidade do material.

Tabela 4.8 - Resultado do *Slump Test*

Resultado do <i>Slump Test</i>	
Concreto Padrão	10 cm
Concreto com Agregado Reciclado	10 cm

4.4 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados na Tabela 4.9. Realizados o cálculo da média das resistências obtidas nos ensaios e considerando uma redução de 1,65 de desvio padrão, têm-se um resultado de resistência à compressão aos 28 dias igual a 30 MPa para o CPP e 27 MPa para o CPAR, o que indica que o concreto produzido com

substituição parcial de 30% do agregado natural pelo reciclado atendeu o critério proposto de obtenção de uma resistência característica de 25 MPa.

Tabela 4.9 - Resultado dos testes de resistência à compressão

Corpo de Prova	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias
	CPP	20,0 ± 0,8	20 ± 2
CPAR	20 ± 1	24 ± 2	29,0 ± 0,8

4.5 Permeabilidade ao oxigênio

A Tabela 4.10 apresenta os resultados dos ensaios realizados nas amostras obtidas a partir dos corpos de prova produzidos com o concreto padrão (CPP), nas idades de 56 e 77 dias. Já a Tabela 4.11 apresenta as leituras das amostras extraídas dos corpos de prova produzidos com o concreto com agregado reciclado (CPAR), realizados nas mesmas idades.

Tabela 4.10 - Leituras realizadas no ensaio de permeabilidade ao oxigênio no CPP

Pressão (kPa)	56 dias		77 dias	
	Volume (ml)	Tempo (s)	Volume (ml)	Tempo (s)
150	34	20,49	22	20,68
200	44	20,43	30	20,60
250	56	20,35	46	20,45
300	72	20,36	56	20,69
350	86	20,12	72	20,59

Tabela 4.11 - Leituras realizadas no ensaio de permeabilidade ao oxigênio no CPAR

Pressão (kPa)	56 dias		77 dias	
	Volume (ml)	Tempo (s)	Volume (ml)	Tempo (s)
150	30	20,43	24	20,93
200	40	20,23	36	20,87
250	52	20,45	50	20,98
300	64	20,41	68	20,55
350	78	20,60	72	20,36

Com as leituras de volume e tempo obtidas durante o ensaio, foi possível calcular os coeficientes de permeabilidade ao oxigênio para os corpos de prova produzidos com o concreto padrão (CPP) e para os corpos de prova produzidos com agregado reciclado (CPAR) a partir da fórmula de Hagen-Poiseuille (EQUAÇÃO 2.1). Os resultados são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Resultado do teste do coeficiente de permeabilidade ao oxigênio

Idade	CPP (m ²)	CPAR (m ²)
56 dias	8,09 x 10 ⁻¹⁶	7,27 x 10 ⁻¹⁶
77 dias	5,75 x 10 ⁻¹⁶	6,37 x 10 ⁻¹⁶

Quando transformados, utilizando-se a Equação 2.4, nos índices de permeabilidade propostos por Alexander *et al.* (1999), verifica-se que não houve aumento significativo na permeabilidade em decorrência da incorporação do agregado reciclado (TABELA 4.13). Observando-se que, em todas as idades e traços analisados, o concreto permaneceu dentro da classe de durabilidade estabelecida com excelente, conforme apresentado na Tabela 2.6.

Tabela 4.13 - Índice de permeabilidade em escala logarítmica

Idade	CPP	CPAR
56 dias	15,09	15,13
77 dias	15,24	15,19

4.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Os volumes de intrusão de mercúrio relacionados com diâmetro dos poros da amostra são apresentados no gráfico da Figura 4.4. Utilizou-se para elaboração do gráfico uma escala logarítmica no eixo das abscissas e uma escala linear no eixo das ordenadas. O eixo x é apresentado de forma invertida, ou seja, começa com os maiores diâmetros que vão diminuindo à medida que o volume acumulado aumenta. Tal escolha procura retratar a sistemática do ensaio, uma vez que os diâmetros diminuem à medida que se aumenta a pressão.

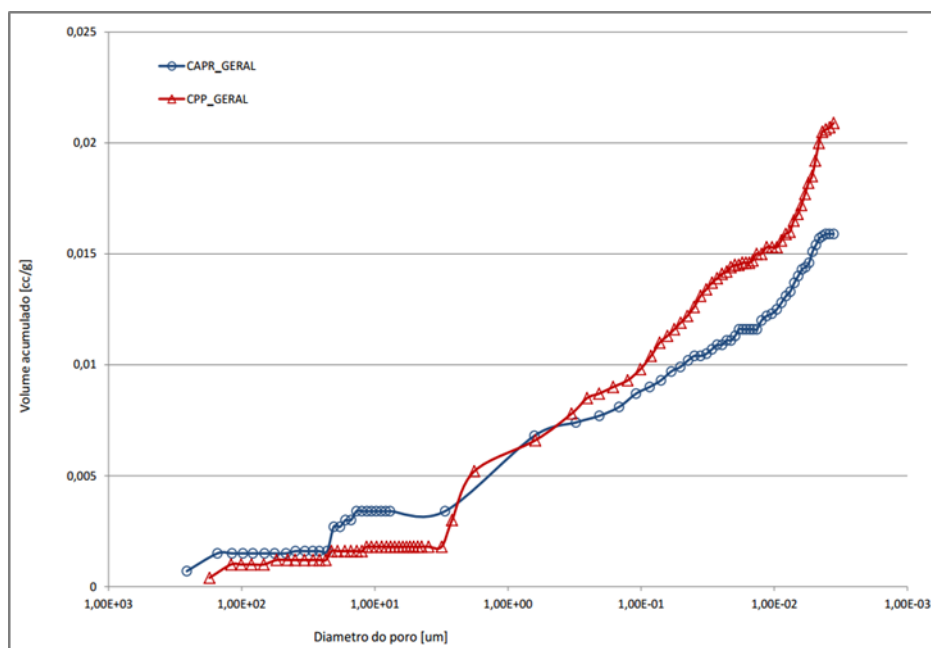


Figura 4.4 - Curvas incrementais de intrusão de mercúrio

A análise dos resultados nos permite concluir com alguma segurança que o concreto produzido com a incorporação do agregado reciclado apresenta um diâmetro de percolação ($\sim 21 \mu\text{m}$) maior do que o da amostra obtida a partir do concreto padrão ($\sim 3,15 \mu\text{m}$). Verifica-se também que o volume total de poros abertos da amostra CPP é maior que o da amostra CPAR.

4.7 Potencial hidrogeniônico dos concretos

Os corpos de prova, após permanecerem 3, 7, 14, 21, 28, 42, 63 e 70 dias na câmara de carbonatação, foram avaliados quanto ao seu pH. Foram realizadas leituras em todas as idades, no centro e na borda carbonatada dos corpos de prova.

Pode-se observar na Tabela 4.14 que os valores de pH obtidos nos concretos produzidos com a incorporação do agregado miúdo reciclado (CPAR), são muito próximos aos valores encontrados no concreto de referência (CPP), considerando-se as mesmas idades de leitura, o que indica que a perda de alcalinidade nos dois traços ocorreu de forma similar.

Tabela 4.14 - Resultados obtidos para o pH dos concretos

CPP			CPAR		
Tempo de Carbonatação	pH Centro	pH Borda	Tempo de Carbonatação	pH Centro	pH Borda
0 dias	12,60	12,51	0 dias	12,81	12,72
3 dias	12,88	12,83	3 dias	12,94	12,93
7 dias	12,90	12,21	7 dias	12,80	12,72
21 dias	12,76	9,98	21 dias	12,58	9,92
28 dias	13,28	8,69	28 dias	13,18	8,63
42 dias	13,37	8,52	42 dias	13,46	8,45
63 dias	13,50	7,51	63 dias	12,90	8,52
70 dias	13,50	7,30	70 dias	13,50	7,13

Embora tenha ocorrido carbonatação na borda dos corpos de prova nas idades de 3 e 7 dias, a leitura de pH não apresenta valores compatíveis com os de regiões carbonatadas, provavelmente em função da ponta da sonda apresentar diâmetro superior a espessura carbonatada, interferindo desta forma na leitura dos valores de borda nestas idades. Na idade de 0 dias, os corpos de prova não foram submetidos à câmara de carbonatação, não apresentando, portanto, diferença entre valores de pH de centro e borda.

Observa-se que durante todo o período dos ensaios, a alcalinidade no interior dos corpos de prova não foi afetada pela carbonatação do material.

4.8 Medição de profundidade de carbonatação

Após a exposição à câmara de carbonatação acelerada, foram realizadas 8 leituras nos corpos de prova em idades específicas. A Tabela 4.15 apresenta os resultados das profundidades de

carbonatação obtidas com auxílio de paquímetro e com o auxílio do programa de tratamento de imagens *ImageJ*, por meio do qual obteve-se, de modo alternativo, o raio da região não carbonatada.

Tabela 4.15 - Profundidades de carbonatação obtidas por meio de um paquímetro digital e do software *ImageJ*

CPP			CPAR		
Tempo de Carbonatação	Paquímetro	<i>ImageJ</i>	Tempo de Carbonatação	Paquímetro	<i>ImageJ</i>
0 dias	0	0	0 dias	0	0
3 dias	2,1 ± 0,6	2,0	3 dias	2,6 ± 0,4	3,0
7 dias	5,2 ± 0,7	5,9	7 dias	3,2 ± 0,7	3,8
21 dias	6,7 ± 0,6	6,8	21 dias	7,4 ± 0,3	7,4
28 dias	8,5 ± 0,3	7,6	28 dias	11,6 ± 0,9	11,9
42 dias	13 ± 2	11,5	42 dias	12,9 ± 0,8	11,6
63 dias	13,0 ± 0,8	13,4	63 dias	13 ± 2	13,9
70 dias	13,9 ± 0,4	12,5	70 dias	11,7 ± 0,5	11,7

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam respectivamente as imagens da evolução da profundidade de carbonatação em relação ao tempo para o traço CPP e para o traço CPAR.



Figura 4.5 - Evolução da profundidade de carbonatação em função do tempo nos CPPs



Figura 4.6 - Evolução da profundidade de carbonatação em função do tempo nos CPARs

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.15, e tomando-se como base a Equação 4.1, obtida a partir da segunda Lei de Fick, foi possível determinar o valor da constante de difusibilidade k , para cada um dos traços e métodos analisados. A leitura realizada aos 70 dias para o traço CPAR não foi utilizada na regressão não linear que originou o ajuste da curva, uma vez que este resultado fugiu consideravelmente do padrão até então observado, o que prejudicaria a qualidade do ajuste, refletido em seu coeficiente de correlação (r^2). Os valores obtidos são mostrados na Tabela 4.16.

$$e_c = k\sqrt{t}$$

Eq. 4.1

onde:

e_c = espessura carbonatada (mm);

t = tempo (dias);

k = constante de difusividade efetiva do CO_2 através do concreto.

Tabela 4.16 - Constante de difusibilidade dos traços ensaiados

Traço	k	Varição %	Modelo Matemático	r ²
CPP - Paquímetro	1,69575	-	$e_c = 1,69575 \times \sqrt{t}$	0,96418
CPP - ImageJ	1,60650	< 5,3 %	$e_c = 1,60650 \times \sqrt{t}$	0,95796
CPAR - Paquímetro	1,79907	-	$e_c = 1,79907 \times \sqrt{t}$	0,93745
CPAR - ImageJ	1,81484	> 0,9 %	$e_c = 1,81484 \times \sqrt{t}$	0,95563

A Figura 4.7 apresenta os gráficos das funções ajustadas, bem como os valores médios obtidos pela medição do avanço da frente de carbonatação para os traços analisados, ao longo do ensaio de carbonatação acelerada.

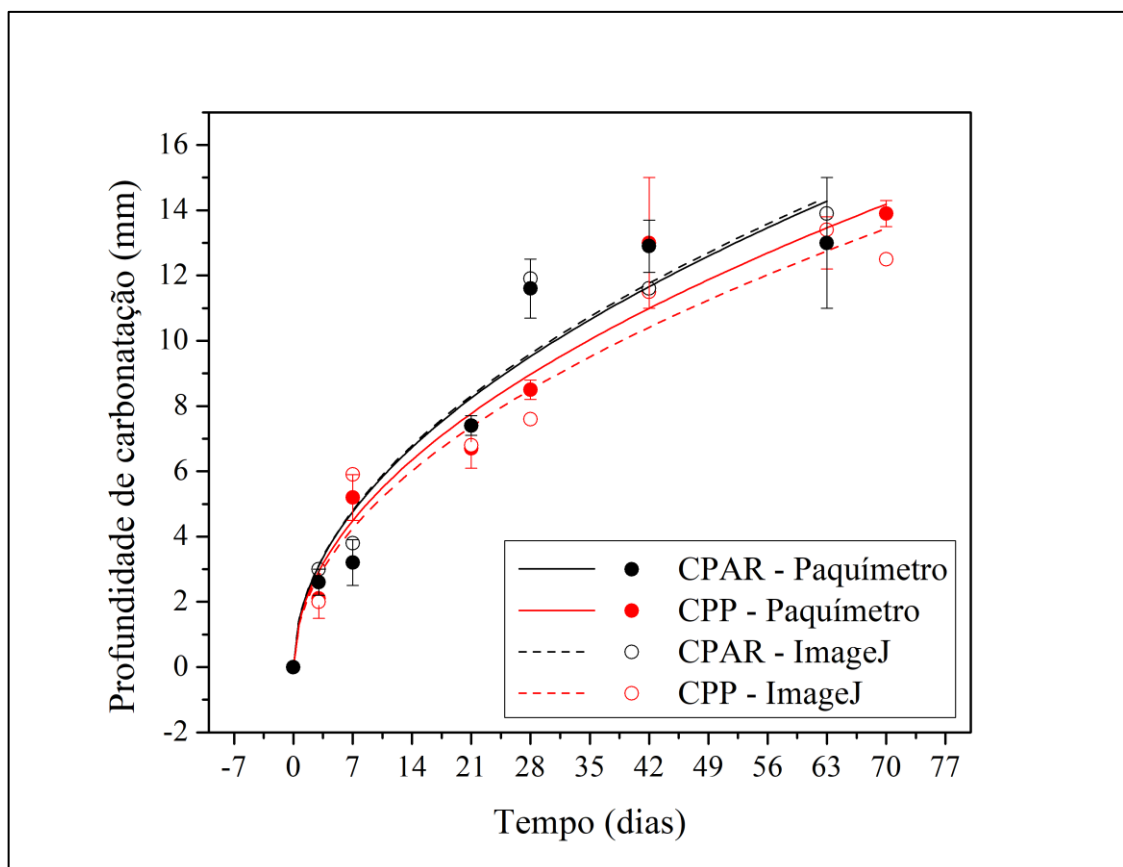


Figura 4.7 - Avanço da frente de carbonatação nos CPs submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada

Verifica-se que o modelo utilizado para descrever o avanço da frente de carbonatação, fornecido pela Equação 4.1, obteve praticamente todos os valores para os coeficientes de correlação (r²) acima de 0,95, garantindo, deste modo, um bom ajuste das curvas. Para o traço produzido com

a incorporação do agregado reciclado (CPAR), houve uma maior dispersão dos valores das leituras do avanço da frente de carbonatação realizadas com o paquímetro, fazendo com que o ajuste piorasse, fornecendo o menor dos coeficientes de correlação ($r^2 = 0,93745$).

É possível que a introdução do agregado miúdo reciclado, material mais heterogêneo que a areia natural utilizada, tenha produzido maiores variações, ao longo da seção transversal dos corpos de prova, no avanço da frente de carbonatação, aumentando a dispersão dos dados e, conseqüentemente, prejudicando as condições para o ajuste da curva gerada por meio de um conjunto de medidas discretas realizadas com o paquímetro. Ao se estimar, entretanto, as profundidades de carbonatação, para o traço CPAR, fornecidas por meio do tratamento de imagens utilizando-se o software *ImageJ*, obteve-se uma melhora no ajuste da curva, de modo que o coeficiente de correlação obtido se aproximou dos encontrados para o traço de referência.

No caso do traço CPP, apesar dos coeficientes de correlação obtidos por meio das duas técnicas propostas terem se mantidos próximos, o coeficiente de difusibilidade (k), obtido por meio dos ajustes feitos utilizando-se o software *ImageJ*, ficou 5,3% abaixo do obtido com as curvas geradas a partir das leituras realizadas com o paquímetro. Tais variações, entretanto, encontram-se dentro de faixas aceitáveis, tendo-se em vista o elevado número de variáveis que influenciam o processo.

Tomando-se como referência as curvas obtidas, pode-se concluir que a substituição parcial de 30% do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado, proveniente de resíduos da lavagem de caminhões betoneira, piorou ligeiramente o desempenho do concreto quanto ao avanço da frente de carbonatação. O coeficiente de difusibilidade (k) do traço CPAR, quando comparado com o do traço CPP, foi 6,1 % superior para os ajustes realizados com os dados obtidos com o uso do paquímetro e de 13,0 % superior com os dados obtidos por meio do software *ImageJ*.

Estes resultados se mostram coerentes com os do ensaio de permeabilidade ao oxigênio, que também apresentou para o traço CPAR, aos 77 dias, um valor para o coeficiente de permeabilidade 10,8 % maior do que o obtido para o traço CPP. Já o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio indicou que apesar do corpo de prova extraído do concreto do traço CPP ter apresentado um volume total de poros abertos superior ao do traço CPAR, este possuía um diâmetro médio de poros ($\sim 21 \mu\text{m}$) maior do que o da amostra obtida a partir do concreto de

referência ($\sim 3,15 \mu\text{m}$). Tais constatações sugerem que o tamanho dos vazios encontrados no compósito de matriz cimentícia é tão importante quanto o volume total de poros, ao se fazer a análise dos resultados.

5

CONCLUSÕES

Os ensaios indicaram que o agregado miúdo produzido a partir do processamento de resíduos gerados da lavagem de caminhões betoneira de usinas de concreto, atendem aos requisitos normativos nos aspectos relacionados ao teor de argila, granulometria, módulo de finura e materiais pulverulentos, considerando-se os limites sugeridos para este último, os mesmos estabelecidos para os agregados miúdos provenientes da britagem de rocha. Constatou-se também, tomando-se como base o resultado do ensaio de difração de raios X realizado no resíduo, a ausência de minerais potencialmente reativos que pudessem impedir seu uso como agregado para produção de compósitos cimentícios.

A incorporação de 30% do agregado reciclado não interferiu na trabalhabilidade do concreto, visto que o *Slump Test* indicou o mesmo valor para os dois traços em análise. Do mesmo modo, a resistência característica à compressão do traço produzido com o agregado miúdo reciclado, ainda que inferior à do concreto produzido somente com o agregado miúdo natural, atendeu as exigências da NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos da classe de agressividade II, que exige uma resistência característica à compressão mínima de 25 MPa e uma relação água/cimento menor que 0,6. O concreto analisado foi produzido com uma relação água/cimento de 0,55, tendo alcançado uma resistência característica à compressão igual a 27 MPa.

Verificou-se que o modelo utilizado para se fazer o ajuste das curvas de avanço da frente de carbonatação, baseado na segunda lei de Fick, se mostrou adequado. O software de tratamento de imagens utilizado para se avaliar a espessura carbonatada nos corpos de prova também produziu resultados satisfatórios.

As constantes de difusibilidade, obtidas por meio do ajuste das curvas geradas a partir dos resultados do ensaio de carbonatação acelerada, apresentaram valores mais elevados para os traços produzidos com a incorporação do agregado miúdo reciclado. Deste modo, pode-se

concluir que a substituição parcial de 30% do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado, proveniente de resíduos da lavagem de caminhões betoneira, piorou ligeiramente o desempenho do concreto quanto ao avanço da frente de carbonatação. Tal constatação mostra-se coerente com os resultados do ensaio de permeabilidade ao oxigênio, que também apresentou para o traço CPAR, aos 77 dias, um valor para o coeficiente de permeabilidade 10,8 % maior que o obtido para o traço CPP. Já o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio sugere que o tamanho dos vazios encontrados no compósito de matriz cimentícia é tão importante quanto o volume total de poros, ao se fazer a análise dos resultados.

Com base nos resultados apresentados, verificou-se que, apesar de se constatar uma ligeira redução na resistência à compressão e uma perda de desempenho na capacidade de resistir ao avanço da frente de carbonatação do concreto produzido com o agregado miúdo nas condições aqui defidas, não deve ser descartada a possibilidade de sua utilização para fins estruturais, levando-se em conta os ganhos ambientais decorrentes de tal decisão.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, A. ; FATHIFAZL G. ; ISGOR O. B. ; RAZAQPUR A. G.; FORNIER B.; FOO S.. *Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method*. Cement and Concrete Composites, Canadá 2008.

ABELL, A. B.; WILLIS, K. L; LANGE, D. A. *Mercury intrusion porosimetry and image analysis of cement-based material*. Journal of Colloid and Interface Science, v.211, n. 1, p. 39-44 Illinois 1999.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 14724: *Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2011. 11p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5738: *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2015. 9p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5739: *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2007. 9p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6118: *Projeto de estrutura de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2014. 238p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6120: *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 1980. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7211: *Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2009. 11p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7214: *Areia normal para ensaio de cimento — Especificação*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2012. 4p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7215: *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 1996. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7218: *Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2010. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7809: *Agregado Graúdo: Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro- Ensaio*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2008. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 8522: *Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2008. 16p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 11578: *Cimento Portland composto - Especificação*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 1991. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12821: *Preparação de concreto em laboratório - Procedimento*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2009. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 15116: *Agregados reciclados de resíduos da construção civil- Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2004. 12p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 45: *Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2006. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 46: *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2003. 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 51: *Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2001. 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 52: *Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2009. 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 53: *Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2009. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 67: *Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 1998. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 248: *Agregados- Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas, 2003. 6p.

AHMAD, S.; AZAD, A. K. *An exploratory study on correlating the permeability of concrete with its porosity and tortuosity*. *Advances in cement Research*, v.25, n. 5, p. 288-294 Saudi Arabia 2013.

ALEXANDER, M. G.; MACKECHNIE, J.R.; BALLIM, Y. *Guide to use of durability indexes for achieving durability in concrete structures, 33 fl.* Research Monograph n°2, Collaborative research by Universities of Cape Town and Wintwatersrand, South African, 1999.

ANEPAC - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL: *Revista Areia e Brita edição 57*. São Paulo, 2012.

BARON, J. Formation de la microstructure. Hydratation, prise, durcissement. In: *Le Béton et L'eau, Séminaire Saint-Rémy-lès-Chevreuse, 1985, Conseil international de la langue française Ed., 1987, p. 26-45 apud BOUNY, V. B.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento*. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Tradução Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. 1ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2014. 606 p.

BERNARDES, E. E. *Estudo da estrutura de poros de um compósito de matriz cimentícia por meio da microtomografia de raio X*. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

BOUNY, V. B.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Tradução Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. 1ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2014. 606 p.

BUTLER, L.; WEST, J. S. *The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement*. *Cement and Concrete Research*, Canadá. v. 41, p 1037-1049, June. 2011.

BUTTLER, A. M.; MACHADO, E. F.; TIGUE, S.L. *Concreto com agregado graúdo de concreto – Caracterização das propriedades mecânicas*. I conferência Latino Americana de Construção Sustentável. X Encontro Nacional do Ambiente Construído. São Paulo, Jul 2004.

CARMONA, T. G. *Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas a carbonatação*. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, 2005.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto - In: ISAÍÁ, G.C- *Concreto, ciência e tecnologia*. seção V, cap. 24 , Porto Alegre: IBRACON, 2011.

COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON. CEB – Working guide for durable concrete structures – protection of reinforcement: report of CEB - RILEM internacional Workshop. *Bulletin D'Information n. 152*. Paris. 1984.

CHOPRA, D.; SIDDIQUE, R; KUNAL. *Strength, permeability and microstructure of self compacting concrete containing rice husk ash*. Science Direct, India. v. 30, p 72-80, January. 2015.

DNPM. – *Departamento Nacional de Produção Mineral Anuário Mineral Brasileiro*. 2001. v. 30, Brasília, 2001.

DNPM. – *Departamento Nacional de Produção Mineral Sumário Mineral*. 2014. v. 34, Brasília, 2014.

ESTANQUEIRO, B. A. M. *Análise de ciclo de vida da utilização de agregados reciclado no fabrico de betão*. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) - Instituto Superior Técnico Lisboa, Lisboa, 2012.

FIGUEIREDO, E. P.; Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no concreto. In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 2, cap. 27, p. 828- 855.

FIGUEREDO, E. P; MEIRA. G. R. *Corrosión de armadura de estructuras de hormigón*. Asociación Latinoamericana de control de calidad, patologia y recuperación de la construcción, Mexico, December. 2013.

GENG J.; SUN J. *Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete*. Construction and Building Materials, Ningbo, v. 49, p 814-820, 2013.

GONZÁLES, C. A. G.; HIDALGO, A.; FRAILE, J.; PERIAGO, L.; ANDRADE, C.; DOMINGO, C. *Porosity and water permeability study supercritically carbonated cement pastes involving mineral additions*. Industrial and Engineering Chemistry Research, Spain, v. 46, p 2488-2496, April 2007.

GOMES, N. A. *Estruturas de concreto armado interrompidas em ambiente urbano: avaliação da carbonatação à luz das recomendações da NBR 6118:2003*. 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

HELENE, P. R. L. *A nova ABNT NBR 6118 e a vida útil das estruturas de concreto*. Congresso Ibero Americano de Patologia da Construção, 4, Porto Alegre, v.1, p. 1-30, 1997.

HELENE, P. R. L. *A nova NBI/2003 e a vida útil das estruturas de concreto*. II Seminário de Patologia de Edificações do Leme/ UFRGS, v.1, p. 1-30, 2004.

HEWLETT P.C. *Lea's Chemistry of cement and Concrete*. 4o ed. Burlington: Editora Elsevier, 1988.

HUSSAIM, R. R.; ISHIDA, T.; *Influence of connectivity of concrete pores and associated diffusion of oxygen on corrosion of steel under high humidity*. Construction and Building Materials, Saudi Arabia, v. 24 (2010), p 1014-1019, December. 2009.

ICDD. – *International Centre for Dffaction Data*. PDF-2. USA, 2015.

ISAIA, G. C. *Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, volume 1 e 2, 2005.

ISAÍÁ, G. C- *Concreto, ciência e tecnologia*. Porto Alegre: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 1º edição, volume 1 e 2, 2011.

KEARSLEY, E. P.; WAINWRIGHT, P. J.; *Porosity and permeability of foamed concrete*. Cement an Concrete Research, South Africa, v. 31, p 805-812, February. 2001.

KOLLEK, J. J. *The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method – a recommendation*. Materials and Structures, Belgium, v. 22, n. 3 p 225-230, 1989.

KROPP, J.; HILSDORF, H.K. *Performance criteria for concrete durability*. 1o edição. New York: RILEM REPORT 12, 1995.

KULAKOWSKI,M.P. *Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa*.2002.199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LA SENNA H. A.; RESENDE M. M. *Agregados para Construção Civil*. Departamento Nacional de Produção Mineral, São Paulo, 2009.

LEITE, M. B. *Avaliação de Propriedades mecânicas de concretos produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 2011. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LEVY, S. M.; HELENE, P. *Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development*. Cemente and Concrete Research, São Paulo, v. 34, p. 1975-1980, Fev. 2004.

LEVY, S.M. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. 2001. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LEVY, S.M. *Produzindo concretos ecológica e politicamente corretos*. Exacta, São Paulo, v. 4, n 2, p. 375-384, Dez. 2006.

LOVATO, P.; POSSAN, E.; MOLIN, D. C. C. D.; MASUERO, A. B.; *Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes*. Construction and Building Materials, Paraná, v. 26, p 437-447, Jul. 2011.

MA, H. *Mercury intrusion porosimetry in concrete technology: tips in measurement, pore structure parameter acquisition and application*. Journal of Porous Materials, New York, v. 21, n. 2, p. 207-215, 2014.

MAGALHÃES, A. G. *Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto forno*. 2007 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MALESEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIC, S. *Recycled concrete as aggregate for structural concrete production*. Sustainability, Serbia, v. 2, p. 1204-1225, April. 2010.

MARTIN III, W. D; KAYE, N. B; PUTMAN, B. J. *Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete*. Construction and Building Materials, Clmsn, USA, v. 59, p. 78-84, 2014.

MEDINA, C.; FRIAS, M.; ROJAS, M. I. S.; THOMAS, C.; *Gas permeability in concrete containing recycled ceramic sanitary ware aggregate*. Construction and Building Materials, Spain, v. 37, p. 597-605, Sept. 2012.

NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. 5th edition. Pearson Education Limited, Harlow, England, 2012. 872 p.

OLIVEIRA, M.J.E *Agregado reciclado empregado na produção de concreto modificado com aditivo*. Exacta, São Paulo, v. 4, n. especial, p. 15-24, nov. 2006.

OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Tradução Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. 1o Edição. São Paulo: IBRACON, 2014. 606 p.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. *Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes*. Cement and Concrete Research, Johannesburg, v. 32, p. 179-185, Sep. 2001.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M.N.; VAYENAS, C.V. *Hydratation and carbonation of pozzolanic cements*. ACI Material Journal. Grécia, 1992, v. 89, p. 119-130.

PAULETTI, C. *Análise comparativa de procedimento para ensaios acelerados de carbonatação*. 2004. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C.; DAL MOLIN, D.C.C.; POSSAN, E. *Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

PAULETTI, C.; DAL MOLIN, D.C.C.; KASMIERCZAK, C.S.; BREZEZINSKI, D. *Profundidade de carbonatação em ensaios acelerados com diferentes percentuais de CO₂*. In: 47ª Congresso Brasileiro do Concreto. Anais em CD. Pernambuco, 2005.

PEDRO, D.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; *Influence of the of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete*. Construction and Building Materials, Lisboa, v. 71, p 141-151, September. 2014.

PEDROZO, R. F. E. *Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos*. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M.H.F.; LEVY, S.M.; *Durability of recycled aggregate concrete: an analytical hierarchy process application*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, p. 125-134, September. 2012.

RECENA, F.A.P. *Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland*. 3. edição. Porto Alegre. Editora PUCRS 2011.

RIBEIRO, D.V. *Corrosão de estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise*. 1. edição. Rio de Janeiro. Editora Elsevier 2014.

RODRIGUES, C. R. DE S. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil*. 2011. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade De Pernambuco, Escola Politécnica De Pernambuco, Recife, 2011.

RODRIGUES, C. R. DE S; FUCALE, S. *Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.14, n.1, p. 99-111, Janeiro. 2014.

SALVOLDI, B. G; BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. G. *Oxygen permeability of concrete and its relation to carbonation*. Construction and Building Materials, South Africa, v. 85, p. 30-37, 2015.

SARTORI, B. R. C. *Estudo da carbonatação em concreto com agregado graúdo reciclado de concreto e cinza de casca de arroz*. 2013.120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. 2013.

SILVA, R.V.; NEVES, R.; BRITO, J.; DHIR, R. K. *Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Composites, Lisboa, v.62, p. 22-32, June. 2015 a.

SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. *Tensile Strength behaviour of recycled aggregate concrete*. . Construction and Building Materials, Lisboa, v.83, p. 108-118, Mach. 2015 b.

SIM, J.; PARK, C.; *Compressive Strength and resistance to choride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate*. Waste Management, Republic of Korea, v.31, p. 2352-2360, July. 2011.

TAYLOR, H. F. W. *Cement*. 1th edition. Academic Press, London, England, 1990.

THIERY, M. *Modélisation de la Carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires*, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'École des Ponts et Chaussées, Paris, 2006. *apud* BOUNY, V. B.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Tradução Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. 1º Edição. São Paulo: IBRACON, 2014. 606 p.

THIERY, M.; DANGLA, P.; BELIN, P.; HABERT, G; ROUSSEL, N. *Carbonation Kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials*. *Cement and Concrete Research*, France, v. 46, p. 50-65, 2013.

THOMAS, C.; SETIÉN J.; POLANCO J.A; ALAEJOS P.; JUAN M. S. *Durability of recycled aggregate concrete*. *Construction and Building Materials*, Madrid, v.40, p. 1054-1065, May. 2012.

TORGAL, F, P.; JALALI S. *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. Minho: Tecminho, 2010.

TROIAN A. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado frente a penetração de íons de cloreto*. 2010. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo 2010.

VALVERDE, F. M. *Balanço Mineral Brasileiro. Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados Para Construção Civil ANEPAC*, São Paulo, 2001.

VIEIRA G.L.; MOLIN, D.C.C.D; LIMA, F.B.; *Resistência e durabilidade de concretos reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição*. *Reserch Gate*, Rio Grande do Sul, Brasil, v. 19, 2014.

VILLANI, C.; LOSER, R.; WEST, M. J; BELLA, C. D.; LURA, P. *An inter lab comparison of gas transport testing procedures: Oxygen permeability and oxygen diffusivity*. *Cement and Concrete Composites*, West Lafayette, USA, v. 53, p. 357-366, 2014.

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

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C.S.; KULAKOWSKI, M.P. *Carbonatação em concretos com agregado reciclado de concreto*. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.11, p. 213-228, Junho. 2011.

ZENG, Q.; KEFEI, L.; CHONG, T. F; DANGLA, P. *Analysis of pore structure, contact angle and pore entrapment of blend cement pastes from mercury porosimetry data*. *Cement and Concrete Composites*, China, v. 34, p. 1053-1060, 2012.

ZORDAM, S. E. *A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto*. 1997.159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

ZONG, L.; FEI, Z; ZHANG, S. *Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste*. Journal of Cleaner Production, China. v. 70, p. 175-182, February, 2014.