

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**INFLUÊNCIA DO USO DE AGREGADOS RECICLADOS NAS  
PROPRIEDADES DOS CONCRETOS**

Priscylla Botelho Athayde

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
Janeiro/2018

**PRISCYLLA BOTELHO ATHAYDE**

**INFLUÊNCIA DO USO DE AGREGADOS RECICLADOS NAS  
PROPRIEDADES DOS CONCRETOS**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização: Produção e Gestão do Ambiente Construído da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2018

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade da vida.

À minha mãe, Liliana, que não está mais conosco, mas que sempre me orienta de onde quer que esteja.

Ao meu pai, Jeronymo e meu irmão Thiago, por sempre apoiarem minhas decisões e conquistas.

Ao Luiz Eduardo, por sempre ser minha companhia.

Ao meu orientador, Doutor Aldo Magalhães pelo incentivo e gentil auxílio.

A todos os meus colegas da Especialização que direta e indiretamente me ajudaram na realização desse trabalho.

A todos os professores da especialização e demais funcionários da UFMG que contribuíram para o meu crescimento profissional e que me auxiliaram de alguma forma no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

As extrações de recursos naturais e o aumento na geração de resíduos pela indústria da construção civil é um problema social e econômico de âmbito mundial. Neste trabalho, buscou-se verificar a viabilidade de uso de resíduos de concreto e de lama residual de concreto usinado para a produção de agregados. Para tal, foi realizado um estudo bibliográfico buscando evidenciar as formas de obtenção e tratamento dos resíduos, seguida da análise das características dos agregados e como elas poderiam influenciar nas propriedades do concreto. A partir dos estudos realizados foi possível identificar como a granulometria, forma, textura, absorção de água e porosidade dos agregados estão correlacionadas e como influenciam na resistência mecânica e na durabilidade dos concretos produzidos. O estudo mostrou potencial de uso para os agregados reciclados de concreto e de lama residual de concreto usinado na substituição de agregados naturais na produção de estruturas de concreto, pavimentação e blocos de concreto.

*Palavra-Chave: agregados reciclados, lama residual de concreto usinado, resíduo de concreto, porosidade, resistência mecânica, durabilidade.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Ciclo de fatores substanciais para o desenvolvimento sustentável da construção civil.....	9
Figura 3.2 - Equipamento de britagem primária e secundária: Triturador de impacto e moinho de martelos .....	13
Figura 3.3 - Resíduo de concreto após a britagem primária.....	14
Figura 3.4 - Lama residual de concreto usinado.....	15
Figura 3.5 - Decantadores para obtenção de agregados reciclados de lama residual de concreto usinado .....	15
Figura 3.6 - Ciclo fechado da água na central de concreto.....	16
Figura 3.7 - Equipamento utilizado para reciclagem de concreto fresco no sistema mecânico de separação .....	17
Figura 3.8 - Condições de umidade dos agregados .....	21
Figura 3.9 - Vida útil total de projeto .....	28
Figura 3.10 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto armado .....	29
Figura 3.11 - Permeabilidade dos agregados.....	31
Figura 3.12 - Mecanismo de migração de íons cloreto.....	34

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Classes de agressividade ao concreto de acordo com o meio ambiente...30
Tabela 4.1 - Peculiaridades dos estudos em concretos com agregados reciclados.....37
Tabela 4.2 - Propriedades dos concretos com agregados reciclados ensaiados .....38
Tabela 4.3 - Características dos agregados reciclados estudados.....39

**LISTA DE UNIDADES**

%	porcentagem
°C	grau Celsius
mm	milímetro
MPa	megapascal

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC	Agregados Reciclados de Concreto
ARLRCU	Agregado Reciclado de Lamas Residuais de Concreto Usinado
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAA	Classes de Agressividade Ambientais
CPs	Corpos de Prova
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
LRCU	Lamas Residuais de Concreto Usinado
NBR	Norma Brasileira
RC	Rejeitos de Concreto
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
pH	Potencial Hidrogeniônico



**LISTA DE SÍMBOLOS**

a/c	relação água/cimento
Ca(OH) <sub>2</sub>	hidróxido de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	carbonato de cálcio
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de Cálcio
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ácido carbônico
HCl	ácido muriático
n°	número
↑	aumento
↓	redução
≈	semelhança

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	iv
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	v
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE UNIDADES</b> .....	vii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	ix
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivo geral.....	3
1.3 Objetivo específico.....	4
1.4 Justificativa.....	4
1.5 Estrutura do trabalho.....	4
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	6
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	8
3.1 Desenvolvimento sustentável e a construção civil.....	8
3.2 Histórico do uso de agregados reciclados.....	10
3.3 Agregados naturais e artificiais.....	10
3.4 Agregados reciclados de concreto.....	12
3.4.1 Resíduo de concreto.....	13
3.4.2 Lamas residuais de concreto usinado.....	14
3.5 Características dos agregados reciclados.....	17
3.5.1 Granulometria, forma e textura.....	17
3.5.2 Massa específica e massa unitária.....	20
3.5.3 Porosidade e absorção de água.....	20
3.6 Influência do uso de agregados reciclados nas propriedades dos concretos.....	24
3.6.1 Propriedades mecânicas.....	24
a) Resistência à compressão.....	24
b) Resistência à tração.....	26
c) Módulo de elasticidade.....	26
3.6.2 Durabilidade.....	28
a) Permeabilidade.....	31

b) Corrosão das armaduras .....	32
c) Carbonatação .....	32
d) Migração de cloretos .....	33
<b>4. ANÁLISE CRÍTICA .....</b>	<b>36</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>43</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Generalidades

O comportamento com o meio ambiente sofreu mudanças significativas visto que muitos fatores influenciaram a conscientização da população mundial a respeito das ininterruptas explorações ao meio ambiente. Alguns desses fatores se resumem ao alto consumo de energia e de recursos naturais não renováveis em acréscimo a geração de resíduos, onde os segmentos da sociedade envolvidos repensam suas estratégias produtivas (LEITE, 2001).

A indústria da construção civil está em constante transformação tecnológica e segue avançando em âmbito mundial, originando problemas referentes à escassez de recursos naturais. Há algumas décadas os insumos empregados na construção civil eram considerados infinitos e seu esgotamento era inconcebível para muitos, não havendo receio diante da exploração desenfreada de recursos naturais e grande geração de entulho. A indústria da construção civil é caracterizada por elevadas quantidades de desperdício de materiais, a falta de arrojo técnico é uma das causas principais, além de que, em muitos países, existe conhecimento reduzido relacionado a técnicas de reaproveitamento apropriadas para resíduos oriundos da construção civil (TROIAN, 2010).

A utilização de agregados reciclados na construção civil apresenta-se como uma alternativa para a redução do consumo de agregados naturais e para a reutilização de resíduos. Segundo Bazuco (1999), os custos de deposição de materiais residuais são elevados e as autoridades são coagidas a buscar locais apropriados para a deposição distantes o suficiente para evitar poluição urbana e obstrução de rios, vales, córregos e mangues. Sem mencionar que há baixa disponibilidade de agregados naturais de boa qualidade em áreas urbanas e distâncias

elevadas entre os depósitos naturais e os locais de construção resultam em custos altos com transporte.

Apesar de concretos serem fabricados em muitos países tais como África do Sul, Holanda, Reino Unido, Alemanha, França, Rússia, Canadá, Japão, dentre muitos outros (OLORUNSOGO e PADAYACHEE, 2002), a partir de agregados reciclados, nas pesquisas nacionais e internacionais realizadas até o momento não existe unanimidade sobre o desempenho e comportamento de concretos fabricados a partir da utilização de agregados reciclados em substituição de agregados naturais. As razões dos resultados oscilantes são a presença de impurezas, grau de porosidade dos agregados e as diferentes composições que os agregados reciclados podem assumir.

Parâmetros de controle de variabilidade das composições dos resíduos precisam ser desenvolvidos para que os concretos a serem produzidos a partir de agregados reciclados apresentem melhor desempenho e durabilidade (LOVATO, 2007). É necessário classificar minuciosamente os agregados a serem incorporados para prever o comportamento do concreto que será produzido. Após realizar a caracterização, através de ensaios e tratamentos específicos, devem ser observadas as finalidades que melhor se compatibilizem com o desempenho que o concreto poderá atingir.

Para a utilização de agregados reciclados na produção de concretos, os agregados empregados devem apresentar características bem próximas do agregado natural. O resíduo em questão deverá passar por diversos processos de tratamento que apresentam custo elevado, o que justifica a inexistência de aplicabilidade em larga escala da substituição de agregados naturais por agregados reciclados, mesmo que, parcialmente, em concretos. (EGUCHI *et al.*, 2007). Porém, acredita-se que se mais estudos forem realizados sobre o assunto, distintas soluções serão constatadas. Consequentemente poderão ser descobertas variedades de tratamento de resíduo para incorporação como agregado nos concretos com custos reduzidos, viabilizando sua utilização na construção civil.

Para o caso dos concretos estruturais, há um consenso de que muitos problemas em estruturas de concreto armado são consequência de falta de conhecimento dos fatores que afetam a durabilidade do concreto, ou inépcia de aplicação de conhecimento adquirido. A durabilidade elevada do concreto não depende exclusivamente dos constituintes utilizados na mistura, mas

está proporcionalmente relacionada à capacidade do concreto de resistir à penetração de agentes externos, ou seja, sua permeabilidade (OLORUNSOGO e PADAYACHEE, 2002). Ressalta-se a importância dos concretos estruturais apresentarem capacidade de impedir à penetração de agentes agressivos visando reduzir possíveis danos aos constituintes do concreto e às armaduras (ABREU, 2014).

A utilização de agregados reciclados em concretos acarreta em redução das propriedades mecânicas e físicas em relação ao concreto produzido a partir de agregados naturais. Ocasionalmente ocasiona maior permeabilidade, taxas maiores no avanço da frente de carbonatação, migração de cloretos e, conseqüentemente, riscos mais elevados de corrosão (THOMAS *et al.*, 2013). Todavia, de acordo com Abreu *et al.* (2015), estudos confirmam que é possível moldar concretos com finalidade estrutural constituídos de agregado reciclado que atendem à compressão mínima para fins estruturais especificada na NBR 6118 (ABNT, 2014).

A redução da geração de resíduos e do constante consumo de recursos naturais apresenta bastante relevância em termos sociais e econômicos. Uma alternativa eficaz para frear as demandas de recursos naturais e resolver o problema de deposição de resíduos é a reciclagem. Diversos estudos são encontrados na literatura a respeito da substituição de agregados naturais por agregados reciclados, com vistas em utilizá-lo em concretos estruturais.

O concreto estrutural é o tipo de construção que apresenta maiores peculiaridades e deve ser cuidadosamente dosado a fim de garantir resistências exigidas em normas. O problema a ser observado na incorporação de resíduos é se os mesmos apresentam comportamento resistivo aceitável e se apresentam durabilidade adequada para serem aplicados na indústria da construção civil como concreto estrutural. Por conseguinte, essa substituição poderia reduzir as explorações de recursos naturais e reduzir o volume de resíduos encaminhados para aterros.

## **1.2 Objetivo geral**

A presente pesquisa objetiva-se na verificação do estado da arte da influência de diferentes teores de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados originários de concreto residual, analisando a influência das características dos agregados nas propriedades dos concretos reciclados.

### **1.3 Objetivos específicos**

Este estudo tem como objetivos específicos:

- a) Verificar as formas de geração e tratamento dos resíduos de concreto estudados para a utilização como agregados;
- b) analisar a influência da incorporação dos agregados reciclados de concreto na produção de novos concretos a partir do estudo das características dos agregados reciclados em relação às propriedades dos concretos produzidos.

### **1.4 Justificativa**

O presente trabalho se justifica pela disponibilização de referencial teórico para sustentar estudos e trabalhos mais detalhados sobre a utilização dos agregados reciclados, conduzindo ao aprofundamento de conhecimentos das propriedades desses materiais, pois quando adicionados ou substituídos ao concreto, transformam suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Pressupondo que a relação de durabilidade e vida útil desses novos materiais está diretamente relacionada às suas propriedades, uma avaliação mais aprofundada sobre o comportamento do concreto diante de agentes agressivos comuns que induzem e provocam a deterioração do concreto é fundamental.

### **1.5 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em quatro capítulos.

O primeiro capítulo consiste na introdução ao tema do uso de agregados reciclados e os problemas de escassez de recursos naturais assim como a dificuldade mundial em destinar os resíduos originários da construção civil, dentre eles os resíduos de concreto.

O segundo capítulo consiste em uma revisão bibliográfica, visando fornecer uma visão holística dos tópicos de maior relevância deste estudo. Inicialmente, é feita uma contextualização do tema com o desenvolvimento sustentável e a construção civil, seguido de um breve histórico da utilização de agregados reciclados em alguns locais do mundo. Em um

segundo momento, uma apresentação sobre os agregados naturais e artificiais é realizada, ressaltando a importância das características dos agregados nas propriedades assumidas pelo concreto. Dentre os agregados artificiais, destacam-se, neste estudo, os agregados reciclados de concreto, onde a definição, geração e tratamento são evidenciados. Posteriormente, é feita uma conceituação das características dos agregados reciclados relacionando-as às propriedades dos concretos.

O terceiro capítulo corresponde a uma análise crítica sobre as características dos agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos concretos.

O quarto capítulo apresenta a conclusão do estudo.

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



# 2

## METODOLOGIA

Como estratégia metodológica para o presente estudo foi adotada a revisão bibliográfica, a qual permite o acesso às experiências de autores que já pesquisaram sobre o assunto. Para a elaboração deste estudo foi realizada uma revisão de literatura internacional sobre o tema proposto: Influência do uso de agregados reciclados nas propriedades dos concretos, visto que esta revisão possibilita sumarizar as pesquisas já efetuadas e analisar de forma crítica as considerações obtidas por diferentes pesquisadores a partir do tema de interesse. O método de pesquisa utilizado é de caráter exploratório e descritivo.

Para a realização deste estudo foram consultadas normatizações específicas do tema, além da utilização de livros, teses e dissertações como ferramentas de pesquisa e instrumentos de coleta de dados, assim como, artigos presentes nas bases de dados, CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e Scielo (*Scientific Eletronic Library Online*) a partir dos seguintes descritores: *recycled aggregates*, *fresh concrete*, *concrete properties*, *concrete waste*, *durability*.

Após a coleta dos dados, foi feita a leitura de todo o material, com o intuito de estabelecer uma compreensão e ampliar o conhecimento sobre o tema pesquisado, as principais informações foram compiladas para a elaboração do referencial teórico.

Para a realização da análise crítica o estudo concentrou-se em toda literatura relacionada ao tema, indexada nos bancos de dados CAPES e Scielo. Foram selecionados 6 artigos, os quais descrevem ensaios relacionados às características e propriedades dos concretos reciclados e as considerações dos respectivos pesquisadores sobre a influência do uso de agregados reciclados nas características e propriedades dos concretos. A seleção foi feita a partir da leitura criteriosa dos artigos encontrados nas bases de dados, sendo que foram seletadas as

literaturas que atendiam aos critérios de inclusão definidos neste estudo. Foram incluídas as publicações que responderam à questão de estudo, publicadas no período de 2009 a 2015, no idioma inglês. A análise crítica das principais considerações dos autores dos artigos selecionados foi exposta de forma qualitativa.

# 3

## REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 Desenvolvimento sustentável e a construção civil

A Revolução Industrial na Europa e nos Estados Unidos teve início a partir dos séculos XVIII e XIX, conseqüentemente, a população das cidades começou a aumentar de forma rápida, recebendo pessoas que abandonavam seus trabalhos em zonas rurais com o intuito de trabalhar em indústrias. Imensas aglomerações humanas foram geradas consumindo quantidades de alimentos, espaço e energia cada vez maiores e demandando saneamento básico, estradas, criação e fornecimento de mercadorias, iluminação, escolas e a construção de habitações. A indústria da construção civil possibilitou que as cidades fossem estruturadas para o recebimento de milhões de pessoas, sendo responsável pelo desenvolvimento econômico de diversos países. No contexto atual, estima-se que a construção civil seja responsável pela geração de investimentos excedentes a 90 bilhões de dólares por ano, criando 62 postos de trabalhos indiretos a cada 100 postos diretos. No Brasil, a construção civil contribui diretamente na redução do déficit de infraestrutura, essencial para o progresso social e econômico dos países em desenvolvimento (PASCHOALIN FILHO *et al.*, 2016).

Em paralelo ao desenvolvimento tecnológico, preocupações com os impactos ambientais tais como o efeito estufa, aumento do consumo de energia, destruição da camada de ozônio, poluição do ar, chuvas ácidas, consumo desmedido de matérias primas não renováveis e a geração desenfreada de resíduos foram originadas (BRASILEIRO, 2013). A China, um país em ascensão, é um grande consumidor de recursos naturais. De acordo com as estatísticas, o país consome cerca de 820 milhões de toneladas de cimento, o que equivale a 55% do consumo mundial, estima-se que aproximadamente 200 milhões de toneladas de resíduos de concreto são geradas (XIAO *et al.*, 2012). A indústria da construção civil tornou-se mundialmente responsável por um alto consumo de recursos naturais e energia, geração de

resíduos e poluição sonora e do ar e contaminação dos solos e cursos d'água (PASCHOALIN FILHO *et al.*, 2016).

De acordo com John (2010), o desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil demanda a otimização das técnicas construtivas, construindo-se mais, utilizando-se da menor quantidade possível de materiais e, quando viável, substituir matérias-primas por resíduos reciclados. É possível concluir que o desenvolvimento sustentável da construção civil ideal fundamenta-se em três fatores substanciais. Onde é possível aliar o desenvolvimento social e econômico às necessidades do meio ambiente.

Neste contexto, Reis (2013) afirma que o uso de agregados reciclados de concreto está inserido nas demandas futuras para que o planeta possa desenvolver-se de forma sustentável, pelo fato de dispensar a extração de recursos naturais como matéria prima para a obtenção de agregados assim como solucionar a problemática da destinação de resíduos, favorecendo o ciclo de fatores substanciais que definem o desenvolvimento sustentável da construção civil (FIGURA 3.1).

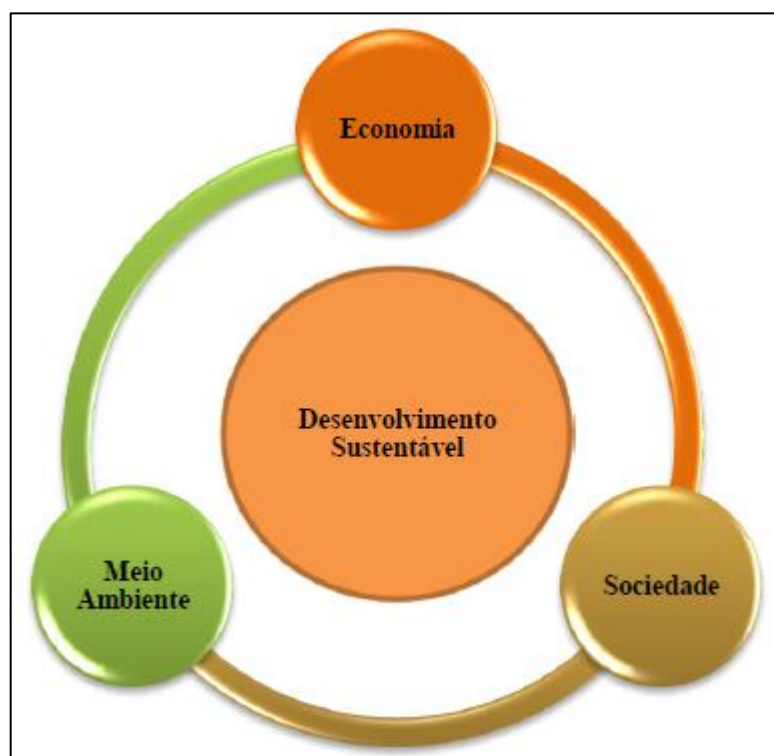


Figura 3.1 - Ciclo de fatores substanciais para o desenvolvimento sustentável da construção civil

Fonte: REIS, 2013, p. 18.

### 3.2 Histórico do uso de agregados reciclados

De acordo com Higa (2010), os primeiros relatos da utilização de resíduos minerais da construção civil na execução de novas obras vieram do Império Romano. O entulho proveniente da destruição das cidades tomadas através de guerras pelo império era utilizado pelos romanos na reconstrução, o entulho era misturado com argila, cinza vulcânica e resíduos cerâmicos, o material resultante dessa mistura é um tipo de concreto, que foi utilizado em construções na época, como o Panteon de Alexandre na cidade de Roma (BRITO FILHO, 1999 *apud* PORTO, 2011).

No ano de 1928 deu-se início às pesquisas que avaliavam o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados oriundos de resíduos de alvenaria e concreto na Europa. Após a 2ª Guerra Mundial, no ano de 1946, na reconstrução das cidades europeias destruídas pela guerra, foi utilizado concreto com agregados reciclados em sua composição. O escombros e o entulho restantes foram britados para a produção de agregados, devido à alta demanda da época. A partir de 1988 diversas obras foram executadas em concretos fabricados a partir de agregados reciclados de concreto (ARC), alvenaria, assim como a mistura de ambos em diversos países europeus, tais como Holanda, Inglaterra, Bélgica, Alemanha, Finlândia e Noruega (WEDLER e HUMMEL, 1946 *apud* LEVY, 2001). Em um contexto atual, a meta estabelecida pela *European Directive 2008/98/CE* é que até o ano de 2020 70% de todos os resíduos de construção civil sejam reciclados (Pedro *et al.*, 2014).

### 3.3 Agregados naturais e artificiais

Carvalho (2012, p.110) define os agregados como, “*material granuloso e inerte, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia*”. Assim como a NBR 7211 (ABNT, 2009, p.3) ressalta a definição de agregado miúdo “*agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm*” e para agregado graúdo “*agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira de malha de 4,75 mm*”.

De acordo com La Serna e Rezende (2013), os agregados são oriundos de rochas sedimentares, tais como os arenitos e os siltitos, de rochas metamórficas, à exemplo os

quartzitos, calcários e gnaisses, ou provenientes de rochas ígneas como o granito, sienitos, basaltos e diabásios. As rochas compostas de arenito, granito, diorito, gabro, basalto e as rochas carbonáceas originam os agregados graúdos, ao passo que, a areia de sílica é usada com frequência como agregado miúdo (MEHTA, 1994).

Os agregados são compostos por grãos minerais duros, estáveis, limpos, duráveis e compactos e devem estar livres de substâncias que interfiram no endurecimento e hidratação do cimento, na durabilidade e no aspecto visual do concreto. As principais razões para sua utilização são a influência técnica benéfica sobre retração e resistência à tração, assim como sua adição no concreto resultar em economia (CARVALHO, 2012).

A resistência, durabilidade e desempenho estrutural do concreto são limitados pelos agregados, suas propriedades físicas, térmicas e algumas vezes químicas influenciam melhorando a estabilidade dimensional e durabilidade do concreto. Os agregados naturais são originados em processos de intemperismo e abrasão ou por britagem de grandes blocos da rocha matriz. As propriedades dos agregados oriundos desses processos, tais como composição química e mineral, classificação petrográfica, massa específica, dureza, resistência, estabilidade física e química, estrutura de poros e cores, dependem da composição da rocha originária. A forma, dimensão das partículas, textura superficial e absorção dos agregados são propriedades que exercem influência na qualidade do concreto fresco e endurecido e não estão relacionadas à rocha matriz (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Na NBR 7809 (ABNT, 2008) é estabelecido o método que determina o índice de forma de agregados graúdos, fornecendo o grau de arredondamento dos seus grãos. Em relação ao peso, os agregados são classificados como leves, normais e pesados, dependendo da sua massa específica aparente (ABREU, 2015). A forma e a textura superficial das partículas são características relevantes no desempenho dos agregados, o arredondamento depende da resistência à abrasão da rocha matriz e das ações de desgaste a que a partícula foi submetida (NEVILLE, 1997).

As areias artificiais são agregados oriundos da moagem ou classificação de fragmentos rochosos, sendo que as que apresentam melhor desempenho são as de granito e pedras com predominância de sílica. Já as areias artificiais originárias de basalto possuem grãos em forma de placas e agulhas, característica a qual reduz significativamente a trabalhabilidade do

concreto. As principais vantagens do uso das areias artificiais são a possibilidade de ajustes granulométricos, teor de finos na dosagem dos concretos e por apresentarem ligação epitáxica com o cimento (CARVALHO, 2012).

Segundo Mehta (1994), os agregados artificiais são materiais processados termicamente, como por exemplo, a argila ou folhelho expandidos, a escória de alto-forno assim como a cinza volante são agregados feitos de rejeitos industriais, assim como os resíduos selecionados de rejeitos urbanos, Resíduo de Construção e Demolição (RCD) ressaltando os resíduos de concreto nos estados endurecido e fresco.

### **3.4 Agregados reciclados de concreto**

A resolução de nº 307 (CONAMA, 2002, p.2) estabelece que agregado reciclado *“é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia”*.

Segundo Buttler (2003), o conceito de resíduo de concreto se divide em dois tipos, os rejeitos de concreto no estado fresco, que inclui as lamas residuais de concreto usinado (LRCU), e os rejeitos de concreto (RC) no estado endurecido. Nogueira (2015, p.27), define que *“o concreto é um material que possui duas condições distintas: estado fresco e estado endurecido. O primeiro obedece a um período de tempo de 1 a 5 horas, em geral, no qual o material é misturado, transportando, lançado e adensado. A segunda etapa relaciona-se ao início da hidratação, seguindo por toda a vida da estrutura do concreto”*.

Dentre os tipos de resíduos de construção civil, destaca-se o RC, pois quando devidamente separado, é bastante homogêneo e conseqüentemente, suas propriedades propiciam seu emprego em concretos estruturais e em elementos pré-moldados (BUTTLER, 2003). Assim como o LRCU, que apresenta a vantagem de ser um tipo de resíduo que contém quantidade limitada de impurezas em relação a outros resíduos a serem aplicados como agregados (SÉRIFOU *et al.*, 2013). Em consequência de uma melhor qualidade algumas normas e especificações são menos restritivas para o emprego de agregados reciclados de tais materiais. O uso de RC e de LRCU requer cautela, sobretudo quando elevado percentual de substituição de agregados naturais por agregados reciclados compõe a mistura do concreto. Esse fato pode

acarretar em aumento significativo da absorção de água, redução da coesão e aumento da retração por secagem do concreto (BUTTLER *et al.*, 2007).

### 3.4.1 Resíduo de concreto

De acordo com Pedro *et al.* (2014), o RC é basicamente composto de argamassa e agregados naturais. Devido à argamassa aderida em agregados originais, as propriedades mecânicas e físicas dos agregados reciclados são inferiores as dos agregados naturais (DJERBI TEGGUER, 2012).

O resíduo de concreto pode ser obtido através da separação de RCD selecionando-se a fração concreto (BUTTLER *et al.*, 2007), por meio de peças residuais de pavimentos antigos, resíduos de estruturas de concreto demolidas, material residual de indústrias de pré-moldados, dentre outros.

De acordo com Ulsen *et al.* (2013), o processo para reciclagem do resíduo de concreto para a produção de agregados reciclados envolvem britagem, (mandíbulas ou impacto), esmagamento, peneiramento a seco e meios de remoção de materiais contaminantes (FIGURAS 3.2 e 3.3).



Figura 3.2 - Equipamento de britagem primária e secundária: Triturador de impacto e moinho de martelos  
Fonte: PEDRO *et al.*, 2014, p.144.





Figura 3.3 - Resíduo de concreto após a britagem primária  
Fonte: BAZUCO, 1999, p.44.

### 3.4.2 Lamas residuais de concreto usinado

O LRCU, evidenciado na Figura 3.4, é constituído de sobras de concreto nos caminhões betoneiras e bombas de concreto, os quais se originam pela incerteza na quantidade necessária de concreto suficiente para projetos de construções (SÉRIFOU *et al.*, 2013), ou pela lavagem desses elementos com posterior disposição em decantadores (POLESELLO *et al.*, 2010).

De acordo com Buttler (2003), o sistema de tratamento por decantação característico da Figura 3.5, é o mais utilizado no Brasil devido ao baixo custo, consiste no lançamento do concreto residual e dos resíduos da lavagem de caminhões e bombas em um sistema de caixas de decantação, para posterior retirada dos resíduos por terceiros ou da própria central dosadora para reciclagem e produção dos agregados reciclados de lama residual de concreto usinado (ARLRCU).

Polesello *et al.* (2010) destacam a reutilização do resíduo na produção de blocos maciços de concreto, e ressaltou que através do processo de sucessivos níveis de decantação a água utilizada na lavagem dos caminhões e bombas de concreto é reutilizada em um ciclo fechado, evitando a disposição dessa água no meio ambiente (FIGURA 3.6). Buttler (2003) ressalta que a água de lavagem poderá ser reutilizada desde que o cimento presente no resíduo não

seja considerado como aglomerante, mas simplesmente como um material fino e inerte. Além de que, para o reaproveitamento da água no sistema de decantação é necessária à disposição de 2 a 4 caixas em série, para a possível decantação do cimento e partículas finas em suspensão na água.



Figura 3.4 - Lama residual de concreto usinado



Figura 3.5 - Decantadores para obtenção de agregados reciclados de lama residual de concreto usinado

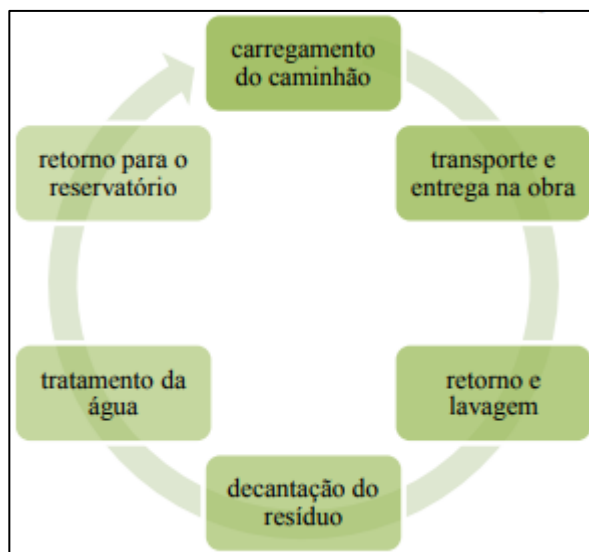


Figura 3.6 - Ciclo fechado da água na central de concreto  
 Fonte: POLESELLO *et al.*, 2010, p.5.

Além do sistema por decantação, há também o sistema mecânico de separação, o qual Buttler (2003) justifica o uso devido as suas vantagens econômicas e técnicas para o reaproveitamento dos agregados no processo de lavagem, e a extinção dos custos com deposição de resíduos sólidos além de ressaltar e valorizar os benefícios ambientais da reciclagem.

O sistema mecânico de separação consiste em um funil alimentador, o qual os resíduos de concreto fresco são depositados e as sobras são conduzidas para uma primeira sessão do equipamento, (FIGURA 3.7), onde se inclui água para auxílio na decantação dos agregados, de modo que o aglomerante existente, ou seja, o cimento permaneça suspenso.

Essa sessão do equipamento consiste em um tambor com espirais que giram no sentido contrário ao fluxo de água. A água é recolhida ao verter pelo ponto onde são introduzidos os resíduos de concreto.

Os finos em suspensão são expelidos juntamente com a água, e são direcionados para um tanque que possui agitadores evitando a decantação, após esse processo, pode-se propiciar o bombeamento desses materiais para o sistema de dosagem de novos concretos. No outro extremo do equipamento os agregados são recolhidos na calha de descarga, se encontrando, finalmente, preparados para a sua aplicação na fabricação de concreto (REZENDE, 1996 apud BUTTLER, 2003).

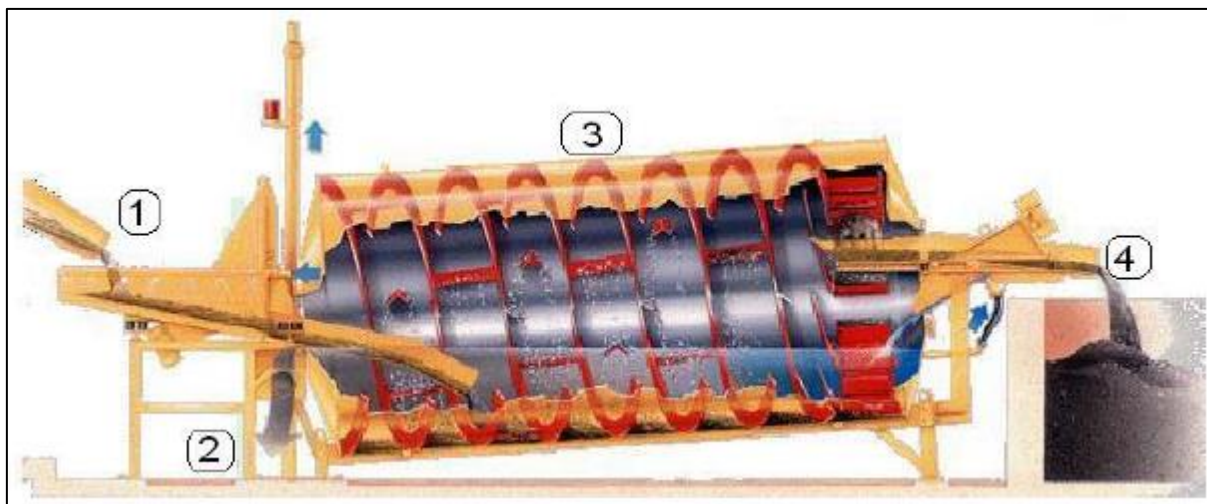


Figura 3.7 - Equipamento utilizado para reciclagem de concreto fresco no sistema mecânico de separação

- 1) Resíduos de concreto fresco sendo depositados no funil alimentador
- 2) Saída da água de lavagem com os finos em suspensão
- 3) Processo de lavagem sendo executado no tambor
- 4) Saída dos agregados na calha de descarga

Fonte: SCHWING STETTER. Disponível em <[www.schwingstetter.com.br](http://www.schwingstetter.com.br)>. Acesso em: 4 dez. 2017.

### 3.5 Características dos agregados reciclados

Kebaili *et al.* (2015) afirmam que o agregados reciclados diferem dos agregados naturais essencialmente pela sua menor densidade, maior capacidade de absorção de água e angularidade sistemática.

Algumas impurezas podem ser encontradas nos agregados reciclados comprometendo o desempenho, prejudicando a durabilidade e as propriedades mecânicas dos novos materiais (LEITE, 2001). As impurezas devem ser identificadas, quantificadas e, quando possível, eliminadas. O gesso é um componente que eventualmente está presente, sendo agudamente deletério, sua presença não deve ser desprezada (BAZUCO, 1999). De acordo com Leite (2001), o gesso é bastante conhecido pela formação de etringita secundária, altamente expansiva, provoca grandes tensões internas que podem fissurar o concreto.

#### 3.5.1 Granulometria, Forma e textura

Bazuco (1999) define que os agregados reciclados grãos e miúdos apresentam um módulo de finura ligeiramente maior, característica resultante de uma granulometria um pouco mais grossa em relação ao agregado natural. Esta particularidade pode estar relacionada às

características do concreto de origem dos agregados reciclados e também do sistema de britagem ou esmagamento utilizado.

A normalização que regulamenta os ensaios de caracterização da composição granulométrica dos agregados são as ASTM C117 (2017), ASTM C136 (2014) e a norma brasileira NBR NM 248 (ABNT, 2003). A forma e a textura superficial das partículas são normalizadas pelas ASTM C295 (2012), a ASTM D3398 (2014) e, no Brasil, a NBR 7809 (ABNT 2006).

Com a intenção de desenvolver concretos auto-adensáveis com custo reduzido Kebaïli *et al.* (2015) realizaram testes substituindo parcialmente os agregados naturais por ARC em percentuais pré definidos de 40%, 60% e 100% na produção dos corpos de prova (CPs). O ARC foi acrescentado à mistura sem saturação prévia, e água suplementar foi adicionada durante o processo para compensar a alta capacidade de absorção de água, peculiaridade dos agregados reciclados. Os concretos reciclados resultantes dos ensaios realizados pelos autores não apresentaram desempenho satisfatório, os resultados dos ensaios realizados mostraram que a densidade de empacotamento das partículas granulares diminuía à medida que o percentual de ARC aumentava na mistura. A angularidade e textura áspera das partículas do ARC ensaiado influenciaram na redução da densidade de empacotamento. A distância relativa reduzida entre os grãos e elevado contato superficial entre as partículas conduziu a tensões superficiais identificadas nos espécimes produzidos com ARC, sendo mais evidente nos espécimes com substituições de 60% e 100%. Os autores concluíram que o estado seco do ARC aliado à forma e textura assumida pelos grãos, influenciaram no aumento das tensões superficiais, e concluíram, que, mesmo que a água adicionada tenha satisfeito a capacidade de absorção do ARC, ela gerou tensões nos capilares da pasta intersticial.

De acordo com Neville e Brooks (2013), a classificação da textura dos agregados é fundamentada na intensidade de polimento da superfície das partículas, sendo elas, polidas ou opacas, lisas ou ásperas. A textura superficial depende das dimensões dos grãos, da dureza e de características de porosidade do resíduo empregado como agregado ou, no caso de agregados naturais, da rocha matriz, e, assim como nas pesquisas de Kebaïli *et al.* (2015), pode influenciar na densidade do agregado e na resistência do concreto.

Sérifou *et al.* (2013) testaram diversas propriedades de concretos fabricados com ARLRCU. Para a obtenção dos agregados reciclados a serem utilizados optou-se pelo tritramento do

concreto residual após um mês de cura. O resíduo foi dividido em dois grupos, destinados à substituição parcial de agregados graúdos, medindo de 5-10 mm, e miúdos, medindo de 0-5 mm. Os percentuais de substituição definidos foram de 0%, 50% e 100%, e, para a realização dos testes, os ARLRCU foram acrescentados à mistura, sem saturação prévia, e a proporção de água foi ajustada para atingir a capacidade de trabalho desejada. Os autores afirmam que a granulometria dos agregados influencia diretamente na redução da resistência à compressão dos concretos produzidos com base em ARLRCU, contudo, para seus ensaios não houve influência direta.

A utilização de ARC e ARLRCU na fabricação de agregados reciclados miúdos e graúdos fornece ao concreto a ser produzido, reduzida trabalhabilidade, característica oriunda do fato de que os agregados reciclados são mais grosseiros do que os agregados naturais, mesmo em dimensões menores (MEHTA, 1994; SÉRIFOU *et al.*, 2013).

Nas pesquisas realizadas por Corinaldesi (2010), foram desenvolvidos testes com o objetivo de avaliar propriedades relacionadas a concretos produzidos a partir de ARC graúdos. Foram desenvolvidos quinze traços distintos, divididos em três grupos, o primeiro grupo apresentava traços com 30% de substituição de agregado natural de calcário por ARC graúdo, com granulometria de 11 a 22 mm. O segundo grupo era composto por espécimes que apresentavam substituição parcial de agregado natural de cascalho fino por ARC graúdos menores, com granulometria entre 6 a 12 mm. E o terceiro grupo era composto por espécimes de concreto convencional, com 100% de agregados naturais. Os ARC foram saturados previamente a sua incorporação nas misturas. Todos os grupos foram produzidos com as relações água/cimento ( $a/c$ ) de 0,40, 0,45, 0,50, 0,55 e 0,60. O autor utilizou cimento caracterizado por alta resistência inicial, além de aditivo superplastificante. Como agregado miúdo natural foi utilizado areia de quartzo com granulometria de 0 a 5 mm.

Contraditoriamente aos conceitos defendidos por Mehta (1994) e Sérifou *et al.* (2013) de que os agregados reciclados apresentam reduzida trabalhabilidade, foi possível constatar por Corinaldesi (2010) que os espécimes de concreto de referência apresentavam mesmo grau de homogeneidade nas misturas em relação aos espécimes de concreto reciclado, apresentando trabalhabilidade semelhante.

Evangelista e Brito (2009), desenvolveram uma pesquisa para a verificação da influência da

utilização de ARC miúdo em substituição de 30% e 100% aos agregados naturais. Os agregados graúdos utilizados foram originários de rocha calcária, um superplastificante foi adicionado às misturas. Os testes foram realizados sem a saturação prévia dos ARC e a a/c foi corrigida com a introdução de água, garantindo trabalhabilidade da mistura, visto que, segundo Evangelista e Brito (2009), a forma mais angular das partículas de ARC miúdos produziu maior fricção interna.

### **3.5.2 Massa específica e massa unitária**

Neville e Brooks (2013) definem que a relação entre a massa de agregado seco e seu volume excluindo os capilares é a determinação da massa específica do agregado, a massa unitária é determinada como a massa real suficiente para o preenchimento de um recipiente de volume unitário, considerando este valor para a realização das conversões entre massa e volume. A massa unitária está relacionada diretamente a granulometria e forma das partículas do agregado, e as normas regulamentadoras responsáveis por caracterizar através de ensaios a massa unitária dos agregados são a ASTM C29 (2017), assim como a norma brasileira NBR NM 45 (ABNT, 2006). De acordo com Mehta (1994, p. 257), *“a massa específica é definida como a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas”*, a massa unitária foi esclarecida como *“a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume. O fenômeno da massa unitária surge, porque não é possível empacotar as partículas dos agregados juntas, de tal forma que não haja espaços vazios.”* Mehta (1994) ainda afirma que o termo massa unitária apresenta relação direta com o volume preenchido por agregados e espaços vazios.

A massa específica dos agregados graúdos é determinada pela ASTM C127 (2015), onde o método da balança hidrostática é prescrito. Usualmente a massa específica para agregados miúdos, é determinada com o método normatizado pela ASTM C128 (2015), conhecido como método do picnômetro. No Brasil a normatização que regulamenta os ensaios de massa específica de agregados miúdos e graúdos é a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

### **3.5.3 Porosidade e absorção de água**

As normalizações que regulamentam os ensaios de caracterização de absorção e umidade superficial dos agregados são as ASTM C70 (2013), ASTM C127 (2015), ASTM C128

(2015) e a ASTM C566 (2013) e as brasileiras são, NBR 9775 (ABNT, 2011), NBR NM 30 (ABNT, 2001), NBR NM 53 (ABNT, 2009).

De acordo com Djerbi Tegguer (2012), a quantidade de água absorvida está diretamente relacionada à abundância e continuidade dos poros nas partículas dos agregados reciclados. A taxa de absorção depende do tamanho, assim como da continuidade dos poros, o tamanho das partículas também pode influenciar na taxa de absorção. Em acréscimo, Djerbi Tegguer (2012) define que a capacidade de absorção é a quantidade máxima de água que os agregados podem absorver nas correntes circunstâncias. Em uma mistura de concreto, quando os agregados não estão totalmente saturados, parte da água da mistura é absorvida, no entanto, a umidade livre nas superfícies das partículas dos agregados se tornará parte da água da mistura, aumentando sua quantidade. De acordo com alguns autores (MEHTA, 1994; NEVILLE e BROOKS, 2013) uma partícula de agregado pode apresentar diferentes estados de umidade (FIGURA 3.8).

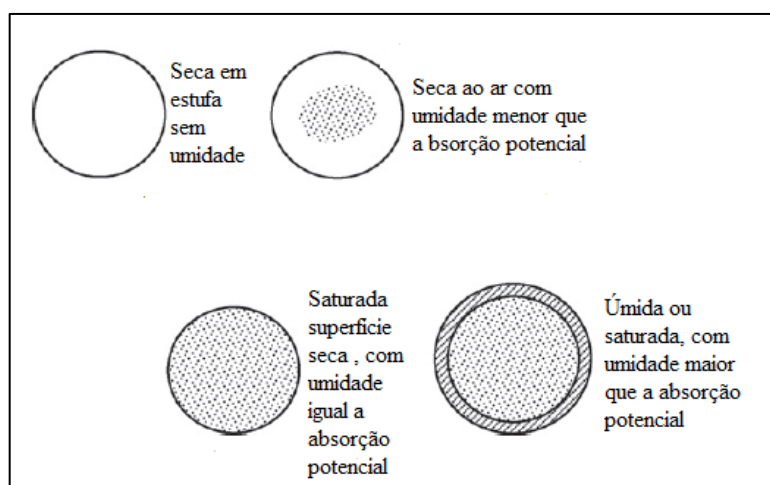


Figura 3.8 - Condições de umidade dos agregados  
Fonte: adaptado de DJERBI TEGGUER, 2012, p. 113.

Quando a água evaporável do agregado foi removida completamente pelo aquecimento em estufa na temperatura de 100 °C a condição do agregado é definida como seco em estufa, o agregado também pode ser seco ao ar, apresentando umidade menor do que a máxima absorção. A condição saturada superfície seca é definida quando todos os poros permeáveis estão ocupados e não há água solta na superfície, já a condição úmida ou saturada é



determinada quando o agregado está saturado e também há umidade desprendida na superfície (MEHTA, 1994).

Corinaldesi (2010), ao realizar a caracterização dos espécimes constatou que os ARC destinados à produção apresentavam percentuais de porosidade superiores aos valores percentuais dos agregados naturais. Com a avaliação da estrutura dos poros determinou-se que os ARC apresentam dimensão média dos poros superior aos dos agregados naturais, fatores que contribuíram para percentuais de absorção de água mais elevados nos concretos de ARC do que nos concretos de agregados naturais.

González-Fonteboa *et al.* (2011) realizaram testes com o intuito de avaliar as propriedades de concretos de alto desempenho fabricados com ARC graúdo com argamassa aderida. Foram desenvolvidos seis traços distintos, apresentando a/c de 0,65 e 0,50, ambos com substituições parciais de 20%, 50% e 100%. Posteriormente dois traços de concretos convencionais com a/c de 0,65 e 0,50, assim como os traços de concreto reciclado, foram obtidos para a análise. Os autores utilizaram aditivo superplastificante na mistura e o ARC graúdo utilizado estava sob condições saturadas. O ARC foi obtido a partir de resíduos estruturais com granulometria de 4 a 16 mm. Foram utilizadas duas granulometrias distintas de agregados naturais grosseiros de calcário triturado nos traços, uma com tamanhos nominais de 4 a 12 mm, e outra com tamanhos nominais de 8 a 20 mm. O agregado miúdo natural apresentou granulometria entre 0 e 4 mm.

Os resultados encontrados apontaram que o ARC, devido à argamassa aderida, resulta em concretos reciclados menos densos e com maior absorção de água em relação aos convencionais. Essa capacidade de absorção de água dos ARC influencia diretamente nas propriedades do concreto fresco, em particular a sua consistência. González-Fonteboa *et al.* (2011) observaram que, quanto maiores eram os percentuais de substituição, maiores eram os valores de absorção de água.

Na caracterização dos agregados reciclados e dos agregados naturais nos ensaios de Sérifou *et al.* (2013), foi averiguado que os agregados reciclados apresentavam uma densidade relativamente menor, principalmente os agregados miúdos reciclados, e maior absorção de água em relação aos agregados naturais. Em todas as misturas testadas foi identificado diminuição de força, característica proveniente da água adicionada para a correção da

habilidade de trabalho. A redução de resistência mecânica explicitada pelos espécimes fabricados com ARLRCU avaliados por Sérifou *et al.* (2013) foi relacionada à altos percentuais de porosidade apresentados pelos agregados reciclados utilizados nos ensaios. Essa característica resultou em um concreto produzido com aumentada porosidade na zona de transição entre os agregados reciclados e a nova mistura, contribuindo para a redução da resistência mecânica.

O nível de porosidade do concreto influencia diretamente a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a resistência à abrasão, sendo que a densidade e a resistência dos agregados contribuem para formar um concreto com porosidade ideal (MEHTA, 1994).

Pedro *et al.* (2014) desenvolveram pesquisas com a intenção de averiguar as propriedades de concretos estruturais produzidos com 100% de agregados reciclados graúdos de ARC, oriundos de rejeições pré-moldadas, e LRCU curado, de diferentes classes de resistência, os quais foram submetidos a processos de esmagamento. Ambos os tipos de agregados reciclados foram acrescentados à mistura sem prévia saturação e a *a/c* foi ajustada durante o processo. Ao analisar os resultados encontrados nos ensaios os autores concluíram que a incorporação de ARC foi responsável por um desempenho pior em relação aos concretos com a inclusão de ARLRCU, com aumento da absorção de água em até 50%, considerando que os ARC e ARLRCU que apresentavam classe de resistência mais elevada produziram concretos que apresentavam menores taxas de absorção de água. Os concretos com taxas mais elevadas foram os menos rígidos.

Ao realizar a caracterização dos agregados reciclados a serem utilizados nos ensaios os autores perceberam que os mesmos absorviam água até 7 vezes mais em relação aos agregados naturais ensaiados, fato determinante para um aumento da absorção de água pelos concretos produzidos a partir dos mesmos. Os autores concluíram que a argamassa antiga aderida ao ARC foi responsável por elevar as taxas de porosidade nos espécimes ensaiados em taxas muito mais elevadas que os espécimes ensaiados com ARLRCU. Os autores correlacionaram à resistência mecânica, a absorção de água e a porosidade dos agregados definindo que os concretos produzidos a partir de ARC e a partir de ARLRCU que apresentavam maior resistência mecânica, possuíam menores taxas de absorção de água e conseqüentemente menor porosidade quando relacionados aos concretos produzidos com agregados menos resistentes. Os autores afirmam que os CPs produzidos com a incorporação

de ARLRCU apresentaram um desempenho melhor em relação aos espécimes produzidos com a inclusão de ARC, apresentando uma estrutura de poros menos conectada e com dimensões reduzidas.

Durante a caracterização dos agregados reciclados miúdos ensaiados por Evangelista e Brito (2009), foi constatada maior porosidade, densidades mais baixas e alta absorção de água quando relacionados aos agregados naturais.

A aderência entre os agregados e a pasta de cimento, a resistência à abrasão, a massa específica e a estabilidade química da mistura, são propriedades influenciadas pela porosidade e a absorção de água dos agregados. Estes apresentam poros de variadas dimensões e que podem apresentar aberturas nas partes superficiais das partículas, favorecendo a penetração de água e de outras substâncias (NEVILLE e BROOKS, 2013).

### **3.6 Influencia do uso de agregados reciclados nas propriedades dos concretos**

#### **3.6.1 Propriedades mecânicas**

##### **a) Resistência à compressão**

Em diversos casos práticos, características como a durabilidade e a permeabilidade dos concretos são consideradas as características mais importantes quando se deseja prever a vida útil de uma estrutura a ser introduzida em um determinado ambiente. Entretanto, Neville (1997) afirma que a resistência à compressão é considerada a propriedade mais importante a ser considerada em qualquer situação. A resistência à compressão pode ser utilizada indiretamente como parâmetro de avaliação da durabilidade, sendo conhecida, pelo meio técnico e universalmente aceita, como parâmetro de qualidade. A resistência à compressão possui ensaios de verificação simples, executáveis por qualquer laboratório devidamente equipado para tal finalidade (LEVY, 2001). Os ensaios de resistência à compressão que caracterizam os agregados reciclados e naturais são normalizados pela ASTM C39 (2017), a ASTM C78 (2016) e pela norma brasileira NBR 7221 (ABNT, 2012).

González-Fonteboa *et al.* (2011) realizaram o teste de resistência a compressão na idade de 28 dias, considerando que os ARC por ele utilizados eram de boa qualidade, a resistência à compressão sofreu uma pequena redução nos traços com ARC, principalmente nos traços com

a/c de 0,50, apresentando uma redução de até 16,4 % de resistência à compressão em relação ao concreto convencional.

O teste de resistência à compressão, na idade de 28 dias, realizado por Corinaldesi (2010) apontou que a utilização de ARC graúdo menor, com granulometria entre 6 a 12 mm, resultou em resistência inferior em 8% em relação aos concretos com ARC graúdos de granulometria entre 11 e 22 mm. O autor conclui que, apesar de as duas frações serem produzidas simultaneamente a partir do mesmo RC, as propriedades físicas das duas frações são distintas. As partículas de RC provenientes de maiores classes de resistência apresentam distribuição diferente, sendo menos friáveis e, conseqüentemente, mais grosseiras no final do processo de esmagamento, estando presentes em percentuais mais elevados nos ARC graúdo com tamanhos maiores do que no ARC graúdo menor. Apesar de as misturas recicladas apresentarem menores valores de resistência à compressão que as misturas de referência, foram apresentados valores de resistência aceitáveis para todos os traços de concretos reciclados com a/c de 0,40 e 0,50 testados. O autor conclui ainda que, podem ser fabricados concretos estruturais com resistência de até 42 MPa com a substituição de 30% dos agregados naturais por agregados graúdos reciclados a partir do RC utilizado.

Sérifou *et al.* (2013) realizaram testes de resistência à compressão nas idades de 1, 14 e 28 dias, e, para todas as idades, foi constatado que quanto maior a substituição por ARLRCU, menor a resistência à compressão. Os autores ressaltam que a resistência à compressão está correlacionada ao percentual total de agregados miúdos e graúdos reciclados de LRCU utilizados na mistura. A resistência à compressão do concreto após 1 dia de cura, é mais influenciada pela incorporação de agregados reciclados do que nos testados após 14 e 28 dias, concluindo que a diferença de resistência à compressão do concreto com ARLRCU e do concreto com agregados naturais diminui com o passar do tempo. Os autores concluíram que os concretos produzidos com 100% de ARLRCU em sua mistura podem ser aplicados em pavimentos e blocos de concreto.

Como resultado do teste de resistência a compressão, nas idades de 7, 28 e 56 dias, Pedro *et al.* (2014) apuraram que a substituição do agregado natural por ARC e ARLRCU apresentaram resistência à compressão inferiores ao concreto de referência. Os concretos fabricados com a utilização de ARC apresentaram resultados de resistência à compressão melhores que os concretos fabricados com a utilização de ARLRCU. Os autores concluíram

que a argamassa aderida à superfície do agregado natural original dentro do ARC, foi responsável por aumentar a absorção de água dos agregados e diminuir a densidade de partículas quando relacionado ao concreto de referência.

A resistência à compressão dos espécimes testados por Evangelista e Brito (2009) apresentaram resultados satisfatórios para os concretos com agregados naturais substituídos por ARC em 30% e 100%, assim como no concreto de referência, com variações na resistência à compressão mínimas.

### **b) Resistência à tração**

Os resultados dos testes de resistência a tração realizados por González-Fonteboa *et al.* (2011), na idade de 28 dias, apontaram que não há influência significativa na substituição parcial de agregados naturais por ARC originários de rejeitos estruturais sobre essa propriedade, de modo que a relação de resistência à tração do concreto reciclado seja similar a do concreto convencional.

Todavia, nos testes de resistência à tração realizado por Sérifou *et al.* (2013), em concretos fabricados a partir de agregados reciclados de LRCU, foi averiguado que para a substituição de 100% de agregados naturais por agregados reciclados houve 18% de redução na resistência à tração, em relação aos concretos produzidos com agregados naturais. Assim como, para Evangelista e Brito (2009) que ao realizarem o teste de resistência à tração dos espécimes de concreto desenvolvidos por ele com substituição de agregados miúdos por ARC em 30% e 100%, os resultados mostraram redução de 30% da resistência à tração nos concretos fabricados com ARC quando relacionados ao concreto de referência.

### **c) Módulo de elasticidade**

O conceito de limite de elasticidade é derivado da representação da deformação máxima permitida antes do concreto adquirir deformação permanente (MEHTA, 1994). O módulo de elasticidade é uma importante propriedade da qual o engenheiro deve conhecer tendo em vista a sua importância no cálculo estrutural, sendo que ao identificar-se o módulo de elasticidade é possível calcular as flechas máximas admissíveis do concreto estrutural em questão. (LEVY, 2001).

Com a determinação do módulo de elasticidade nos testes realizados por González-Fontebó *et al.* (2011), na idade de 28 dias, foi constatado que os concretos com ARC apresentam diminuição do módulo de elasticidade considerável a medida que o percentual de substituição aumenta. Propriedade influenciada pelo módulo de elasticidade inferior dos ARC oriundos de rejeitos estruturais em relação aos agregados naturais. A a/c também influenciou esse resultado, sendo que os espécimes moldados com relação de 0,50 apresentaram maiores reduções no módulo de elasticidade. Frequentemente, os concretos fabricados a partir de ARC e de outros materiais, apresentam argamassa aderida, fator determinante que atua reduzindo o módulo de elasticidade.

Os ensaios de módulo de elasticidade desenvolvidos por Evangelista e Brito (2009) apontaram redução máxima de 18,5% em concretos fabricados com ARC em relação ao concreto de referência.

Corinaldesi (2010) realizou testes na idade de 28 dias, com o intuito de determinar o módulo de elasticidade em concretos com ARC, concluindo que o módulo de elasticidade está intimamente relacionado à resistência a compressão dos espécimes, e que para valores iguais de resistência a compressão, o módulo de elasticidade dos espécimes de concretos fabricados com substituição parcial de agregados naturais por ARC graúdo menores apresentou módulo de elasticidade inferior a 15% dos espécimes de concreto fabricado a partir de ARC graúdos.

No ensaio de módulo de elasticidade realizado por Pedro *et al.* (2014), os espécimes de concretos com ARC e ARLRCU com menores classes de resistência apresentaram menor módulo de elasticidade em relação aos espécimes produzidos com ARC e ARLRCU com classes de resistência mais elevadas. A maior deformabilidade do ARC e do ARLRCU em relação ao agregado natural é causada por seu menor módulo de elasticidade e pela forte dependência do módulo de elasticidade do concreto no módulo de elasticidade dos agregados.

Pedro *et al.* (2014) concluíram que os concretos produzidos com ARC apresentaram maior módulo de elasticidade em relação aos espécimes produzidos a partir de ARLRCU, para a classe de resistência baixa e média, e para as classes de desempenho mais elevadas os dois tipos de concretos apresentaram desempenho semelhante. Além disso, foi concluído pelos autores que, o concreto de referência, apesar de ter apresentado módulo de elasticidade ligeiramente superior aos concretos com agregados reciclados, apresenta rigidez semelhante.

### 3.6.2 Durabilidade

Neville (1997, p. 481) considera essencial que as estruturas de concreto duráveis “desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto ou, pelo menos, razoável. Portanto o concreto deve poder suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido”. Para condições de exposição diversas das estruturas de concreto tanto a resistência como a durabilidade necessitam ser consideradas na fase de projeto. A NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 15) estabelece vida útil como “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, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais”. A facilidade com a qual os fluidos, líquidos e gases, têm a capacidade de penetrar na estrutura e se difundir no seu interior, conduzindo agentes agressivos, é um fator decisivo para determinar o tempo de duração das estruturas de concreto (FIGURA 3.9).

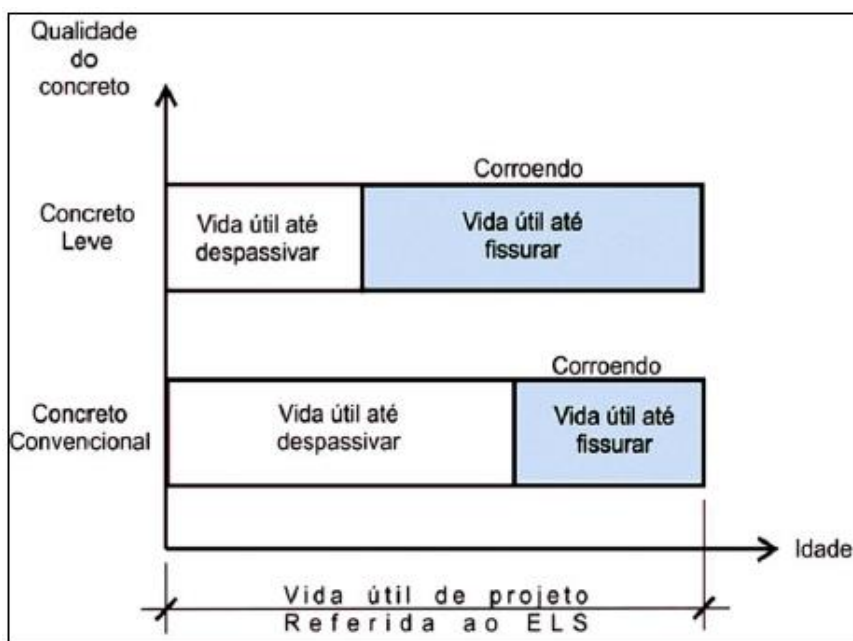


Figura 3.9 - Vida útil total de projeto  
Fonte: DAL MOLIN, 2011 apud REIS, 2013, p. 44.

De acordo com Reis (2013), o tempo de vida útil pode ser maior ou menor, decorrendo das peculiaridades das peças estruturais desde as tensões limites de cálculo às suas dimensões. O

surgimento de indícios tais como manchas, fissuras, destacamentos e corrosões são indicadores de diminuída vida útil e durabilidade (FIGURA 3.10).

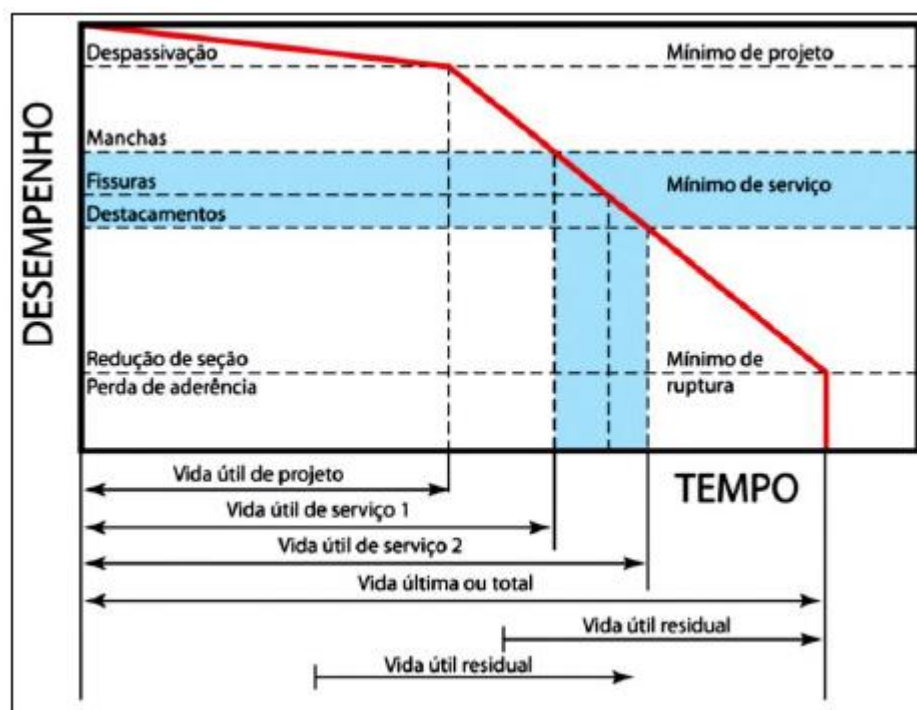


Figura 3.10 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto armado  
Fonte: HELENE, 1997 apud REIS, 2013, p. 44.

De acordo com Troian (2010) a perda de durabilidade do concreto armado está relacionada a diversos fatores que incluem a falta de conhecimento do ambiente ao qual será submetido, assim como especificações inadequadas e construções mal executadas que não seguem os parâmetros de qualidade normalizados, ou seja, as condições ambientais deverão ser avaliadas para garantir desempenho, qualidade e funcionalidade adequados às estruturas de concreto. A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta as classes de agressividade ambientais (CAA) a serem consideradas na execução de estruturas de concreto armado (Tabela 3.1).

A penetração de agentes agressivos presentes na forma de fluidos na estrutura porosa do concreto ocorre através da sua exposição ao ambiente, alterando suas propriedades e reduzindo seu desempenho com o decorrer do tempo. Na estrutura porosa do concreto, a água transporta íons agressivos que originam processos químicos causadores de transformações negativas ao funcionamento ideal do concreto. Os mecanismos de transporte mais relevantes são a permeabilidade, a difusão, a absorção capilar e a migração, sendo dependentes da



concentração, das condições ambientais e das características de porosidade do concreto que favoreçam ou não a permeabilidade dos agentes agressivos (REIS, 2013).

Tabela 3.1 - Classes de agressividade ao concreto de acordo com o meio ambiente

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana <sup>1,2</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1</sup> Industrial <sup>1,2</sup>	Grande
IV	Muito forte	Industrial <sup>1,3</sup> Respingo de maré	Elevado

- 1) Pode-se admitir um micro clima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).
- 2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras de região de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.
- 3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

A deteriorização pode ser originada por fatores externos e internos, os quais podem ser referentes a uma durabilidade inadequada, ao ocorrerem antes do término de vida útil do projeto, sendo que as distintas formas de deterioração podem ser físicas ou químicas.

As causas físicas compreendem o desgaste superficial por abrasão, erosão ou cavitação. As fissurações são decorrentes de mudança de volume, carregamento estrutural inadequado à estrutura e exposição a extremos de temperatura, a exemplo, os ciclos de gelo e degelo e situações de incêndio.

As ações químicas podem deteriorar o concreto em processos de expansão por reação com sulfatos, expansão por reação álcali-agregado e por lixiviação. Ao passo que, as armaduras podem ser corroídas em decorrência da carbonatação e da ação de íons cloretos (NEVILLE, 1997).

### a) Permeabilidade

Neville e Brooks (2013, p. 256) conceituam permeabilidade como “*a facilidade com a qual os líquidos ou gases podem se movimentar através do concreto*”. A segmentação dos capilares exerce grande influência na permeabilidade, reforçando o conceito de que a simples presença de elevada porosidade não fornece permeabilidade ao concreto, uma vez que, os poros capilares precisam estar conectados, sendo admissível que dois corpos porosos apresentem porosidades equivalentes, porém com permeabilidades distintas.

A permeabilidade está diretamente associada com a a/c, sendo menor para pastas com a/c menores. Uma mistura contendo a/c baixo atinge o estágio de segmentação dos poros em um período reduzido de cura úmida obtendo baixa permeabilidade, característica importante do ponto de vista da durabilidade.

De acordo com Reis (2013), a permeabilidade dos concretos produzidos com agregados naturais é ligeiramente menor do que a permeabilidade dos produzidos com agregados reciclados, sendo justificado pela característica mais densa assumida pelos agregados naturais quando relacionados aos agregados reciclados (FIGURA 3.11). Os concretos com agregados reciclados em sua composição apresentam uma forte tendência em assumir permeabilidade em proporção direta à capacidade de absorção.

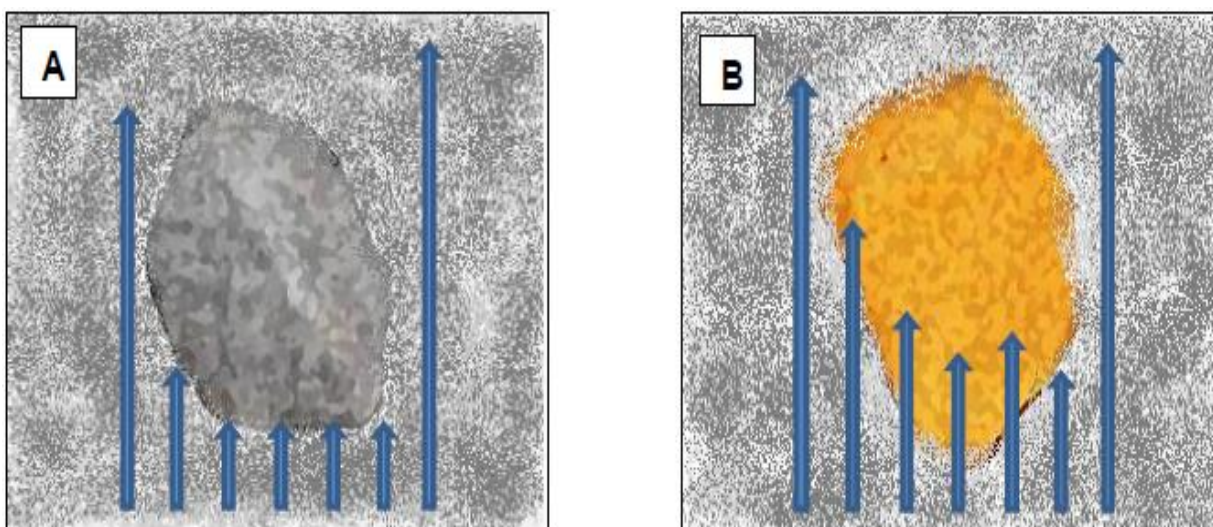


Figura 3.11- Permeabilidade dos agregados

A) Agregado atuando como barreira dificultando a passagem de água

B) Agregado de maior porosidade comportando-se como extensão dos vasos capilares

Fonte: REIS, 2013.

## **b) Corrosão das armaduras**

Os concretos estruturais apresentam uma alta alcalinidade inicial, resultante de alto potencial hidrogeniônico (pH) da solução aquosa presente nos poros do concreto (LACERDA, 2016). A hidratação do cimento causa reações químicas que originam o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), principal responsável por conceber alcalinidade ao concreto, apresentando pH em torno de 13, produzindo uma camada passivante por toda extensão das barras de aço que as protege da corrosão (WERLE *et al.*, 2011). O controle da penetração de agentes agressivos como a difusão do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e a migração de cloretos é determinado através da estrutura e umidade dos poros do concreto. O ideal para a produção de concretos estruturais com agregados reciclados é que a mistura proporcione uma estrutura de vazios semelhante à mistura de concreto produzida com a utilização de agregado natural. Tal característica cria uma barreira contra o avanço por difusão do ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) e da migração por cloretos, reduzindo a velocidade de penetração de tais agentes agressivos.

O processo de corrosão da armadura é desenvolvido quando ocorre a despassivação das armaduras, o pH baixa para menos que 11,0 e a camada de óxido de ferro é destruída. Este fenômeno ocorre nos concretos que apresentam permeabilidade suficiente para que a carbonatação ou soluções com cloretos possam penetrar até a armadura. Na parte interior da estrutura, ocorre o desenvolvimento de compostos ferrosos expansivos conduzindo a um aumento do volume da região ocupada pelo aço, as tensões de expansão são responsáveis por causar a fissuração e lascamento do concreto (NEVILLE e BROOKS, 2013).

## **c) Carbonatação**

De acordo com Lacerda (2016), a carbonatação é um processo lento, ao penetrar por difusão no interior do concreto, o  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera, se dissolve na umidade presente na mistura, formando o  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , que reage com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , dando origem ao carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). O pH reduz de aproximadamente 13 para, em média 9,4 reduzindo a alcalinidade da solução intersticial dos poros (AGUIAR, 2006), que, nos casos de estruturas armadas, despassiva o aço, dando origem a corrosão das armaduras. (CASTELLOTE *et al.*, 2009).

Na pesquisa desenvolvida por Pedro *et al.* (2014) foi realizado o teste acelerado de

carbonatação dos concretos com ARC e ARLRCU aos 7, 28, 56 e 91 dias. Os espécimes foram posicionados dentro de uma câmara de carbonatação a uma concentração de CO<sub>2</sub> de 5%. Para cada idade de teste e tipo de mistura, três desses espécimes foram divididos em quatro partes que foram pulverizadas com uma solução de fenolftaleína em 1%, para medir a profundidade da carbonatação.

Como resultado Pedro *et al.* (2014) afirmam que a profundidade de carbonatação aumentou com a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, esse aumento foi indiretamente proporcional a classe de resistência das misturas. Os espécimes que apresentavam maiores classes de resistência apresentavam menor a/c e maior teor de cimento, conduzindo a uma maior reserva alcalina disponível na matriz da pasta de cimento hidratado. Os autores relacionam o avanço da frente de carbonatação à porosidade das misturas, declarando que as misturas com maior porosidade apresentam maior avanço da frente de carbonatação. Os concretos fabricados a partir de ARLRCU apresentaram um desempenho inferior na resistência à carbonatação acelerada quando relacionados aos concretos produzidos com ARC nas classes de resistência mais baixas, porém para a classe de resistência mais elevada os espécimes produzidos com ARC apresentaram desempenho inferior aos espécimes produzidos a partir de ARLRCU.

A resistência a carbonatação dos CPs desenvolvidos por Evangelista e Brito (2009) foi medida em um estado acelerado, com espécimes em uma câmara de carbonatação com 5% de concentração de CO<sub>2</sub>. Os espécimes foram pulverizados com solução de fenolftaleína nas idades pré-determinadas, e a profundidade da carbonatação foi medida. A profundidade carbonatada aumentou com a elevação das taxas de substituição, ou seja, relacionando a variação da profundidade de carbonatação com a razão de reposição de agregados naturais por ARC, deduz-se que a profundidade de carbonatação aumenta quase linearmente com a elevação da taxa de substituição.

#### **d) Migração de cloretos**

Os cloretos podem estar presentes nos aditivos aceleradores de endurecimento mais usuais baseados em cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>), nos agregados, assim como na água de amassamento, nessas situações sua incorporação ocorre no processo de mistura. Os cloretos também podem estabelecer contato com o concreto e as armaduras através do meio externo, pelo ingresso dos

íons cloretos pela rede de poros em situações onde o concreto pode estar exposto a ambientes nocivos. Locais contendo ar atmosférico industrial, ambientes marinhos, saís de degelo utilizados em países frios e ácido muriático (HCl) empregados na lavagem de fachadas também são propícios a ocorrência de migração de cloretos (TROIAN, 2010).

Os íons cloretos podem ser encontrados no concreto em três fases: cloretos livres, cloretos fisicamente absorvidos e cloretos fixos, sendo que os íons que mais contribuem para o desenvolvimento da corrosão são os íons livres. Os cloretos podem sedimentar-se na superfície do concreto e através de chuvas ou umidade podem ser dissolvidos e transformados em uma solução aquosa que migra através da rede de poros penetrando a estrutura e atingindo a região interna, causando a despassivação do aço, que, por sua vez, dá início à corrosão das armaduras (TUTTI, 1982 *apud* TROIAN, 2010).

De acordo com Helene (1993) *apud* Troian (2010), a migração é um mecanismo de penetração caracterizado pela presença de íons em campo elétrico com voltagens distintas originadas de uma diferença de potencial de uma fonte externa ou pela deflagração de pilhas de corrosão eletroquímica (FIGURA 3.12). As propriedades da mistura do concreto tais como a a/c, composição e tipo de cimento, temperatura e o cobrimento da armadura são características que influenciam a resistência à migração de íons cloreto (TROIAN, 2010).

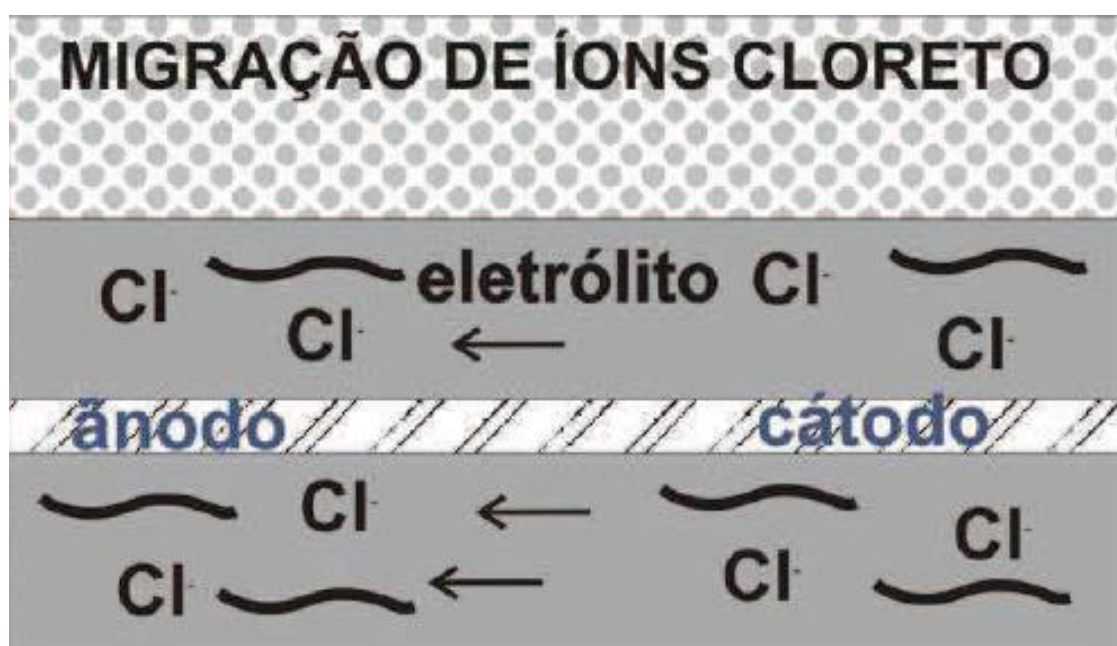


Figura 3.12 - Mecanismo de migração de íons cloreto  
Fonte: adaptado de HELENE, 1993 *apud* TROIAN, 2010, p. 36.

Pedro *et al.* (2014) desenvolveram o ensaio de resistência a penetração de cloretos em suas pesquisas, o teste de migração acelerada em regime não estacionário foi realizado em três espécimes por idade de teste e tipo de mistura. Estes foram submetidos a condições controladas de temperatura e umidade.

Os resultados foram analisados pelos autores que concluíram que os espécimes fabricados com ARC foram os que apresentaram menor desempenho de resistência à migração de cloretos em todas as classes de resistência. Os espécimes produzidos com ARLRCU apresentaram desempenho ligeiramente superior aos espécimes produzidos a partir de ARC, contudo, o desempenho foi acentuadamente inferior em relação ao concreto de referência. A redução na resistência à migração de cloretos identificada nos concretos produzidos com ARC é justificada por uma maior permeabilidade do ARC, causada principalmente pela argamassa aderida no resíduo. Conforme referido, esta característica do ARC leva o concreto reciclado a apresentar uma estrutura mais complexa em relação aos concretos produzidos com agregados naturais. Os espécimes de concreto produzido com ARC que apresentavam maior quantidade de microfissuras presentes na argamassa antiga do resíduo propiciaram maior permeabilidade favorecendo a penetração de cloretos. Os autores afirmaram que a largura das microfissuras presentes, está correlacionada com o coeficiente de difusão dos cloretos, isto é, a difusividade aumenta à medida que a largura das fissuras se eleva. Finalmente os autores verificaram que os concretos produzidos através de ARC e ARLRCU de média e alta resistência apresentavam coeficientes de migração de cloretos semelhantes ao concreto de referência. Os autores sugerem ainda que, aperfeiçoar a microestrutura das zonas de transição pode melhorar o desempenho do concreto.

O teste de migração de cloretos desenvolvido por Evangelista e Brito (2009) constatou que houve um aumento de cerca de 12% no coeficiente de migração de cloretos para os concretos produzidos a partir da substituição de agregados naturais por ARC miúdos em 30%, em relação ao concreto de referência. Uma diferença que aumenta para 33,8% foi constatada com a substituição dos agregados naturais por ARC miúdos em 100%, quando comparado ao concreto de referência. Os autores concluíram que a variação entre os coeficientes de migração é lógica, uma vez que o processo de penetração dos íons cloretos está diretamente relacionado à porosidade do concreto. O último cresce linearmente com o aumento da proporção de ARC, visto que, são mais porosos do que os agregados naturais, levando a uma permeabilidade crescente.

# 4

## ANÁLISE CRÍTICA

Apesar das óbvias vantagens ambientais, o material reciclado apresenta características e propriedades distintas das propriedades dos agregados naturais, limitando seu uso regular. A Tabela 4.1 apresenta as peculiaridades dos estudos realizados pelos autores analisados, assim como as Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente, mostram os resultados averiguados pelos mesmos em relação às propriedades adquiridas pelos concretos ensaiados e às características dos agregados reciclados.

Nas pesquisas desenvolvidas por Corinaldesi (2010), os percentuais de porosidade superiores e a dimensão média dos poros elevada, são fatores que contribuíram para percentuais de absorção de água proeminentes nos concretos de ARC. Assim como Corinaldesi (2010), González-Fonteboa *et al.* (2011) relataram que a porosidade dos ARC testados por ele também era superior à porosidade dos agregados naturais, da mesma forma relatada por Sérifou *et al.* (2013) ao desenvolver suas pesquisas com a utilização de ARLRCU.

Sérifou *et al.* (2013) afirmaram que, os ARLRCU apresentavam densidade inferior aos agregados naturais e suas propriedades mecânicas inferiores identificadas foram diretamente relacionadas a porosidade elevada do concreto obtido. Os CPs desenvolvidos por Sérifou *et al.* (2013), Pedro *et al.* (2014), Evangelista e Brito (2009) e Kebaïli *et al.* (2015) foram produzidos sem saturação prévia, fato que contribuiu para um desempenho inferior, assim como relata Kebaïli *et al.* (2015), afirmando que o estado seco dos agregados reciclados em conjunto com à forma angular e textura áspera das partículas, peculiaridades referentes aos agregados reciclados, influenciaram no aumento das tensões superficiais, gerando tensões nos capilares da pasta intersticial. Da mesma forma que Evangelista e Brito (2009), que relataram que a forma mais angular das partículas de ARC miúdos produziu maior fricção interna nos CPs ensaiados.

Tabela 4.1 - Peculiaridades dos estudos em concretos com agregados reciclados

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Cimento Portland</b>	<b>a/c</b>	<b>Condição de umidade dos agregados</b>	<b>ARC/ LRCU</b>	<b>Granulometria dos agregados reciclados (mm)</b>	<b>Taxas de substituição (%)</b>
Evangelista e Brito	2009	CEM I 42.5R	Indeterminado	Sem saturação prévia	ARC	0 - 1,19	30 e 100
Corinaldesi	2010	CEM II / A-L 42.5 R	0,40 – 0,60	Com saturação prévia	ARC	6,0 - 12,0 11,0 - 22,0	30 e 100
González- Fonteboa <i>et al.</i>	2011	CEM I 42,5R	0,50 – 0,65	Com saturação prévia	ARC	4,0 - 16,0	20, 50 e 100
Sérifou <i>et al.</i>	2013	CEM II 32.5 R	Indeterminado	Sem saturação prévia	LRCU	0 - 5,0 5,0 - 10,0	0, 50 e 100
Pedro <i>et al.</i>	2014	CEM I 42.5R	Indeterminado	Sem saturação prévia	ARC e LRCU	0 - 22,4	100
Kebaïli <i>et al.</i>	2015	CEM I 52.5R CE CP2	Indeterminado	Sem saturação prévia	ARC	4,0 - 10,0	40, 60 e 100



Tabela 4.2 - Propriedades dos concretos com agregados reciclados ensaiados em relação ao concreto de referência

Pesquisador	Ano	Resistência à compressão	Resistência à tração	Módulo de elasticidade	Profundidade Carbonatada	Migração de Cloretos
Evangelista e Brito	2009	≈	↓	↓	↑	↑
Corinaldesi	2010	↓	-	↓	-	-
González-Fonteboa <i>et al.</i>	2011	↓	≈	↓	-	-
Sérifou <i>et al.</i>	2013	↓	↓	-	-	-
Pedro <i>et al.</i>	2014	Para todas as classes de resistência: ARLRCU < ARC < concreto de referência	-	Classe de resistência elevada: ARLRCU ≈ ARC ≈ concreto de referência Classe de resistência baixa e média: ARLRCU < ARC < concreto de referência	Classe de resistência elevada: ARC < ARLRCU < concreto de referência Classe de resistência baixa e média: ARLRCU < ARC < concreto de referência	Para todas as classes de resistência: ARC < ARLRCU < concreto de referência
Kebaïli <i>et al.</i>	2015	-	-	-	-	-

Tabela 4.3 - Características dos agregados reciclados estudados em relação aos agregados naturais

<b>Pesquisador</b>	<b>Ano</b>	<b>Granulometria, Forma e textura</b>	<b>Porosidade</b>	<b>Absorção de água</b>
Evangelista e Brito	2009	↑ angularidade	↑	↑
Corinaldesi	2010	-	↑	↑
González-Fonteboa <i>et al.</i>	2011	-	Argamassa aderida conduziu à ↑ porosidade	Argamassa aderida conduziu à ↑ absorção de água
Sérifou <i>et al.</i>	2013	↑ angularidade	↑	↑
Pedro <i>et al.</i>	2014	-	↑	↑
Kebaïli <i>et al.</i>	2015	↑ angularidade e Grãos ásperos	↑	↑

Kebaïli *et al.* (2015) concordam com Corinaldesi (2010), González-Fonteboa *et al.* (2011), Sérifou *et al.* (2013), Pedro *et al.* (2014) e Evangelista e Brito (2009) quando afirmam que os agregados reciclados apresentam como característica um aumento na absorção de água e baixa densidade. Pedro *et al.* (2014) encontraram desempenho mecânico inferior nos concretos desenvolvidos com ARC em relação aos produzidos com ARLRCU. Ao comparar os concretos produzidos com diferentes classes de resistência ele definiu que as classes mais elevadas eram as que apresentavam menores teores de absorção de água. Essa afirmação se relaciona diretamente aos conceitos defendidos por Kebaïli *et al.* (2015) ao afirmarem que a densidade de empacotamento das partículas granulares é menor nos concretos com resistências mecânicas inferiores. Pedro *et al.* (2014) concordam com Corinaldesi (2010) ao afirmar que a argamassa aderida ao ARC foi responsável por elevar as taxas de porosidade nos CPs e comparou o ARC com o ARLRCU ressaltando que as taxas de porosidade foram mais elevadas nos CPs de ARC em relação aos CPs de ARLRCU. Os autores apoiam a afirmação de Pedro *et al.* (2014) ao correlacionarem a resistência mecânica à absorção de água e à porosidade dos agregados.

Com a ampla capacidade de discussão dos autores envolvidos é possível definir que a

porosidade é uma característica que apresenta relação direta com as propriedades do concreto. A argamassa aderida nos resíduos resulta em concretos menos densos e com maiores percentuais de absorção de água, resultando em concretos com resistência mecânica inferiores e com baixa durabilidade em relação aos concretos produzidos com agregados naturais. A saturação prévia dos ARC e dos ARLRCU se faz necessária para a aquisição de resultados de desempenho mais satisfatórios, visto que, é possível garantir um melhor controle sobre a a/c ideal utilizada na mistura. Alterações nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto produzido são evitadas, fornecendo maior segurança para que as pesquisas sobre a utilização de agregados reciclados em substituição de agregados naturais em concretos se transformem em prática na construção civil.

Ao realizar seus ensaios de resistência mecânica, Corinaldesi (2010) concluiu que os ARC graúdos com maiores dimensões eram resultantes de concretos com classes de resistência mais elevadas, sendo menos friáveis. Sérifou *et al.* (2009) concordam com Corinaldesi (2010) e ainda afirma que a granulometria assumida pelos agregados influencia diretamente na resistência mecânica do concreto produzido a partir dos mesmos. Pedro *et al.* (2014) relacionaram o módulo de elasticidade do concreto produzido a partir de agregados reciclados diretamente ao módulo de elasticidade dos agregados utilizados, afirmando que os ARC e ARLRCU com melhores resistências mecânicas, resultavam em CPs com melhores resultados de módulo de elasticidade.

A aplicação de ARC graúdos pode resultar em concretos com melhores propriedades em relação à utilização de agregados miúdos. Isso discorre do fato de que ao serem submetidos ao processo de tratamento os resíduos de concreto são esmagados e triturados, todavia, os grãos submetidos a tais processos e que não resultarem em partículas menores são àqueles mais resistentes.

Corinaldesi (2010) encontrou valores de resistência mecânica, menores em relação ao concreto de referência, contudo tais valores foram considerados aceitáveis para a produção de concretos estruturais, para percentuais de substituição de ARC em até 30% e produzidos com baixa a/c. González-Fonteboa *et al.* (2011), relataram que a resistência à tração dos CPs produzidos a partir de ARC foi semelhante à resistência à tração dos CPs de referência, mas identificou ligeira queda na resistência à compressão e pior módulo de elasticidade nos concretos fabricados com ARC, relacionando a redução de resistência às misturas produzidas

com a/c elevados. Sérifou *et al.* (2009) assim como Corinaldesi (2010) propõem usos para o concreto fabricado a partir de ARLRCU, garantindo que é possível aplicar a mistura em blocos de concreto e pavimentos.

É sugerida a utilização de aditivo superplastificante na produção de concretos com agregados reciclados, o uso do aditivo será responsável por fornecer trabalhabilidade adequada ao concreto sem a necessidade de elevada a/c.

Corinaldesi (2010) e González-Fonteboa *et al.* (2011), concordam com Sérifou *et al.* (2013) ao afirmar que quanto maior a taxa de substituição por agregados reciclados menor será a resistência mecânica. Evangelista e Brito (2009) afirmaram que os resultados dos seus ensaios demonstraram que a resistência à compressão variou minimamente em relação ao concreto de referência, que o módulo de elasticidade reduziu em no máximo 18,5%, e a resistência à tração apresentou valores inferiores ao concreto de referência em até 30%. Pedro *et al.* (2014) afirmaram que os CPs produzidos com ARC apresentaram resistência mecânica superiores aos CPs produzidos com ARLRCU, e que os CPs produzidos a partir de ambos os resíduos apresentaram bom desempenho com rigidez semelhante aos CPs de referência.

É possível perceber que a qualidade dos agregados reciclados utilizados nos desenvolvimentos dos CPs influencia nos resultados de resistência mecânica. González-Fonteboa *et al.* (2011) utilizaram resíduos de concreto estrutural, os quais provavelmente já apresentavam valores de resistência elevados, o que pode ter influenciado para que não houvesse queda no desempenho dos CPs fabricados a partir de ARC em relação aos CPs de concreto convencional. É recomendável que a qualidade do resíduo seja caracterizada anteriormente à sua utilização como agregado reciclado. Essa qualidade pode ser determinada pela utilização de resíduos com valores de resistência mecânica mais elevada e com a composição homogênea.

Pedro *et al.* (2014) concordam com Evangelista e Brito (2009) ao afirmar que as taxas de avanço da frente de carbonatação e a migração de cloretos foi aumentada com a elevação da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados. Com taxas mais elevadas para os concretos reciclados de menores resistências. Pedro *et al.* (2014) relataram que o avanço da frente de carbonatação foi maior nos CPs desenvolvidos com ARLRCU para classes de resistência baixa e média em relação aos CPs produzidos à partir de ARC, contudo para a classe de resistência mais elevada testada o ARLRCU apresentou um menor avanço na frente

de carbonatação quando comparado ao ARC. Os resultados de Evangelista e Brito (2009) concordam com os resultados de Pedro *et al.* (2014) e os autores afirmam que os CPs desenvolvidos com ARC apresentaram valores excessivamente inferiores aos valores dos CPs do concreto de referência.

Pedro *et al.* (2014) afirmam que os resultados dos ensaios de migração de cloretos mostraram que os CPs desenvolvidos com ARC foram os menos resistentes aos cloretos em relação aos CPs produzidos com ARLRCU. Ambos os resíduos apresentaram alta divergência em relação ao concreto de referência apresentando baixa durabilidade. Os resultados encontrados por Evangelista e Brito (2009) apoiam os resultados de Pedro *et al.* (2014), o ensaio de migração de cloretos determinou aumento do coeficiente de migração em até 33,8% nos CPs produzidos com ARC.

A durabilidade reduzida dos concretos reciclados é relacionada à alta porosidade e absorção de água, peculiar dos concretos desenvolvidos com a incorporação de ARC e ARLRCU. Os concretos produzidos com maior a/c e com baixa resistência mecânica conduzem a um concreto com reserva alcalina inferior e com mais poros interconectados comprometendo o desempenho durável. A argamassa aderida ao ARC é responsável por conferir maior permeabilidade aos resíduos contribuindo para baixar a durabilidade do concreto a ser produzido. Os concretos produzidos com agregados reciclados são aplicáveis em pavimentos, blocos de concreto e até em concretos estruturais, as características dos agregados devem ser avaliadas assim como as propriedades dos concretos produzidos através dos mesmos, permitindo clareza sobre a durabilidade, vida útil e desempenho mecânico a ser alcançado.

# 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso dos agregados reciclados no Brasil e no mundo ainda é pouco difundido, pois o processo costuma ser trabalhoso e oneroso. A necessidade de intensificar os estudos para melhorar os custos e o processo de transformação dos resíduos em agregados reciclados é evidente. Diversos países se beneficiariam do uso de agregados reciclados ao dinamizar a economia, estimular o desenvolvimento tecnológico e científico, destinar os resíduos e preservar o meio ambiente.

Através deste estudo foi possível perceber de forma clara como todas as características dos agregados estão intimamente relacionadas e como elas podem influenciar nas propriedades dos concretos produzidos, as quais também se relacionam fortemente entre si.

A resistência mecânica e a durabilidade são propriedades influenciadas pela porosidade, absorção de água, granulometria, forma e textura dos agregados.

O uso dos agregados reciclados em concreto estrutural caracteriza-se em uma proposta revolucionária, porém a sua utilização requer cautela, sendo evidente a necessidade de mais estudos científicos sobre o tema. As características dos agregados destinados à produção estrutural devem ser minuciosamente estudadas para avaliar a viabilidade de aplicação. Os agregados reciclados podem ser utilizados como, por exemplo, em aplicações de subprodutos na produção de blocos de concreto e pavimentações.

# 6

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto: Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. NBR 7211: *Agregados para concreto: Especificação*. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR 7221: *Agregado: Índice de desempenho de agregado miúdo contendo impurezas orgânicas: métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. NBR 7809: *Agregado graúdo: Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro: Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 9775: *Agregado miúdo: Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman: Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248: *Agregados: Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR NM 30: *Agregado miúdo: Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR NM 45: *Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52: *Agregado miúdo: Determinação da massa específica e da massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53: *Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2009.

ABREU, F. S. *Análise da durabilidade de concreto leve de argila expandida com camada protetora submetida a meio agressivo ácido*. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014, 57p.

ABREU, I. L. R.; LACERDA, E.; MAGALHÃES, A. G. *Influência da utilização dos agregados reciclados na profundidade de carbonatação do concreto*. Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto. Bonito: IBRACON, 2015.

AGUIAR, J. E. *Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis*. Dissertação (Pós-graduação em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, 2006, 173 p.

ASTM C 117, *Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 4 p.

- ASTM C 127, *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, 5 p.
- ASTM C 128, *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, 6 p.
- ASTM C 136, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, 5 p.
- ASTM C 29, *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 5 p.
- ASTM C 295, *Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, 9 p.
- ASTM C 39, *Standard Test Method for compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 8 p.
- ASTM C 566, *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, 3 p.
- ASTM C 70, *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, 3 p.
- ASTM C 78, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 4 p.
- ASTM D 3398, *Standard Test Method for Index of Aggregate Particle Shape and Texture*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, 4 p.
- BAZUCO, R. S. *Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos*. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999, 112p.
- BRASILEIRO, L. L. *Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural no Concreto Asfáltico*. *Dissertação de Mestrado* – Centro de Ciências da Natureza, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2013, 118 p.
- BRITO FILHO, J. A. *Cidades Versus Entulhos*. Anais do 2º Seminário de desenvolvimento sustentável e a de reciclagem na construção civil. São Paulo: IBRACON, 1999 *apud* PORTO, M. E. H. C. *Estudo de viabilidade de implantação de uma usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição no município de Campos dos Goytacazes-Rj*. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia Ambiental). Instituto Federal Fluminense, 2011, 150 p.
- BUTTLER, A. M. *Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados*. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, 2003, 199 p.
- BUTTLER, A. M.; CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. Blocos de alvenaria estrutural produzidos com agregados reciclados de concreto. In: *Reciclagem de resíduos para a construção civil*. CHAUD, E. (Org.). 1ª Edição. FUMEC, 2007.
- CARVALHO, E. F. T. Agregados para concretos. In: *O concreto sem mistérios*. 1ª Edição. UFOP, 2012, 392p.
- CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical Changes and Phase



Analysis of OPC Pastes Carbonated at Different CO<sub>2</sub> Concentrations. *Materials and Structures*, v. 42, n. 4, (2009), p. 515-525.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 307: *Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil*, 2002.

CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behavior of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*. v.24, (2010), 1616-1620.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: *Concreto: Ciência e tecnologia*, 2011 apud REIS, F. J. L. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pará, 2013, 141 p.

DJERBI TEGGUER, A. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Construction and Building*. v.27, (2012), 112-116.

EGUCHI, K.; TERANISHI K.; NAKAGOME A.; KISHIMOTO H.; SHINOZAKI K.; NARIKAWA M. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*, v. 21, (2007), 1542-1551.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, v.32, (2009), 9-14.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; CARRO, L. D.; SEARA-PAZ, S. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 25, (2011), 2335-2342.

HELENE, P. R. L. *A nova ABNT NBR 6118 e a vida útil das estruturas de concreto*. 4º Congresso Ibero-Americano de Patologia da Construção, Porto Alegre, v.1, p. 1-30, 1997 apud REIS, F. J. L. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pará, 2013, 141 p.

HIGA, L. H. *Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010, 92p.

JOHN, V. M. Good practices for more sustainable housing. In: *Challenges of sustainable construction*, Publicado por Caixa Economica Federal, Brasília, 2010.

KEBAÏLI, O.; MOURET, M.; ARABI, N.; CASSAGNAREBE, F. Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example. *Journal of Cleaner Production*. v. 87, (2015), 752-761.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. *Agregados para a construção civil*. Publicado por Departamento nacional de produção mineral, 2013.

LACERDA, E. *Contribuição ao estudo do efeito do uso de aditivos incorporadores de ar no avanço da frente de carbonatação em compósitos de matriz cimentícia*. Dissertação (Pós-graduação em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016, 140 p.

LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados*

*de resíduos de construção e demolição*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001, 270p.

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

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

MEHTA, P. K.; *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. Coordenador HELENE P. R. L. Tradução CARMONA FILHO, A.; DAL MOLIN, D. C. C.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. R.; 151. PREZZI, M.; SELMO, S. M. S. 1ª Edição. Pini, 1994, 573p.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*, Tradução GIAMMUSSO, S. E. 2ª edição. Pini, 1997, 828 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. *Tecnologia do Concreto*, Tradução CREMONI, R. A. 2ª edição. Bookman, 2013. 448p.

NOGUEIRA, J. R. S. *Avaliação da influência do método de mistura nas propriedades de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015, 115 p.

OLORUNSOGO F.T.; PADAYACHEE N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and concrete research*, v. 32, (2002), 179-185.

PASCHOALIN FILHO J. A.; STOROPOLI J. H.; DIAS A. J. G. Evaluation of compressive strength and water absorption of soil-cement bricks manufactured with addition of pet (polyethylene terephthalate) wastes. *Acta Scientiarum Technology*, v. 38, (2016), 164-171.

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

POLESELLO, E.; ROHDEN A. B.; MOLIN, D. C. D.; MASUERO, A. B. *Proposta para utilização total dos resíduos gerados por usinas dosadoras de concreto*. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Canela: ENTAC, 2010.

REIS, F. J. L. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pará, 2013, 141 p.

REZENDE, L. B.; *Tratamento e disposição de concreto residual em centrais dosadoras*. Anais da 38ª Reunião do IBRACON. Ribeirão Preto, 1996 *apud* BUTTLER, A. M. *Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, 2003, 199p.

SCHWING STETTER, Disponível em: <[www.schwingstetter.com.br](http://www.schwingstetter.com.br)> acesso em: 4 de dezembro de 2017, 16:30.

SÉRIFOU, M.; SBARTAĬ, Z. M.; YOTTE, S.; BOFFOUÉ, M. O.; EMERUWA, E.; BOS, F. A Study of Concrete Made with Fine and Coarse Aggregates Recycled from Fresh Concrete Waste. *Journal of Construction Engineering*, v. 2013, (2013).

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A.; ALAEJOS, P.; SÁNCHEZ DE JUAN, M. Durability of

recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 40, (2013), 1054-1065.

TROIAN, A. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010, 127 p.

TUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982, 469 p. *apud* TROIAN, A. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010, 127 p.

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G.; MASINI, E.A; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, v. 40, (2013), 1168-1173.

WEDLER, B.; HUMMEL, A. *Trümmerverwertung und ausbau von brandruinen*. Wilhelm Ernest & Sohn, Berlin, 1946 *apud* LEVY, S. M. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001, 194 p.

WERLE, Ana Paula; KAZMIERCZAK, Claudio; KULAKOWSKI, Marlova Piva. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 2, (2011), 213-228.

XIAO, J.; LI, W.; FAN, Y.; HUANG X. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). *Construction and Building Materials*, v. 31, (2012), 364-383.