

CARLA ADRIANA DE SOUZA

**Utilização de Resíduo de Concreto como Agregado Miúdo para
Argamassa de Concretos Estruturais Convencionais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2006

CARLA ADRIANA DE SOUZA

**Utilização de Resíduo de Concreto como Agregado Miúdo para
Argamassa de Concretos Estruturais Convencionais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2006

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

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONCRETO COMO AGREGADO MIÚDO PARA
ARGAMASSA DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONVENCIONAIS

Carla Adriana de Souza

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Comissão Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguiar
DEMC/UFMG – (Orientador)

Prof. Dr . Salomon Mony Levy
UNINOVE/SP

Prof. Dr . Flávio Antônio dos Santos
CEFET - MG

Dr^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa
CNPq / UFMG - MG

Belo Horizonte, 13 de junho de 2006.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que colaboraram desde o início, de maneira direta e indireta, para que esse projeto fosse concluído.

O meu agradecimento especial eu dedico a minha família, a Maria Teresa, a Filomena e ao Sílvio, sem a ajuda deles seria impossível finalizar esse trabalho.

Dedico este trabalho a Deus e a toda
minha família, em especial, à minha mãe.

... Terra, terra,
Por mais distante o errante navegante
Quem jamais te esqueceria?
De onde nem tempo e nem espaço,
que a força mãe dê coragem
Pra gente te dar carinho, durante toda a viagem
Que realizas do nada, através do qual carregas
O nome da tua carne
Terra, terra,
Por mais distante o errante navegante
Quem jamais te esqueceria? ...

(Caetano Veloso)

RESUMO

A construção civil como qualquer outro setor produtivo é gerador de resíduos devido a desperdícios e à demolição após o uso. Uma das aplicações para o resíduo é como agregado alternativo, em substituição ao natural, para a produção de concretos. O emprego desses resíduos como agregados para argamassas e concretos não estruturais é amplamente difundido. A utilização em substituição ao agregado em concretos estruturais tem sido pouco estudada, e na maioria das vezes, esses estudos se limitam a agregados graúdos. A utilização desses materiais como agregado miúdo para concreto estrutural poderia ser uma opção em função do volume de resíduos finos disponíveis. Dessa forma, faz-se interessante o estudo de compósitos cimentícios para fins estruturais confeccionados somente com agregado miúdo, no intuito de se avaliar apenas o efeito dessa granulometria. Neste trabalho, é analisado o desempenho de argamassas para concreto estrutural convencional confeccionadas com fator água/cimento igual a 0,5 e com agregados miúdos provenientes da britagem de concretos. Os resultados indicam que a substituição de até 25% da areia natural por agregados miúdos de concreto britado não afeta significativamente as propriedades mecânicas do composto. Por outro lado essa mistura, apesar de ser mais porosa, poderia contribuir para um composto mais durável que o concreto convencional no tocante a reação de ataque a sulfato.

Palavras-chave: argamassa para concreto estrutural, agregado reciclado, concreto britado.

ABSTRACT

In the production process of the construction area there is rubble, as in other industrial areas. However civil construction waste comes from building and demolition. This waste has become excessive and is a real problem worldwide. One solution for this problem can be to use this rubble as a recycled aggregate. Previous research has shown that recycled aggregate can be used in mortar and standard concrete. However, there are few researches to use recycled aggregates in structural concrete. Its application to structural concrete already exists however is not common yet and in the majority these researches applied just recycled coarse aggregates. Despite of the huge coarse aggregate amount, inside of rubble is possible to find a great amount of fine aggregate. An option for the recycled fine aggregate could be to replace the fine natural aggregate with the fine artificial aggregate without coarse aggregate to analyze the structural concrete behavior. The aim of this paper is to analyze the performance of the mortar of structural concrete manufactured with recycled fine aggregate. When the fine artificial replaces 25% of fine natural aggregate the results show that there aren't impacts in the mechanical properties.

Key-words: mortar of structural concrete, recycled aggregate, recycled concrete

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Desenvolvimento Sustentável	17
3.1.1. Impacto Ambiental da Construção Civil.....	18
3.1.2. Construção Sustentável	21
3.2. Concreto Estrutural.....	25
3.3. Agregados Naturais.....	28
3.3.1. Classificação	29
3.3.2. Caracterização	30
3.3.2.1. Massa Específica.....	30
3.3.2.2. Absorção, Umidade Superficial e Porosidade	30
3.3.2.3. Dimensões Máximas, Composição Granulométrica, Forma e Textura Superficial	32
3.3.2.4. Sanidade	32
3.3.2.5. Propriedades Térmicas.....	33
3.3.2.6. Substâncias Deletérias	33
3.4. Agregados de Resíduo de Construção.....	34
3.4.1. Histórico.....	35
3.4.2. Origem e Classificação.....	36
3.4.3. Características e Aplicações	37
3.5. Agregados Reciclados para Concreto Estrutural.....	47
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
4.1. Materiais	52
4.2. Métodos.....	55
4.2.1. Confeção dos Corpos-de-Prova	56
4.2.2. Resistência à Compressão.....	57
4.2.3. Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	57
4.2.4. Resistência à Abrasão.....	59
4.2.5. Absorção de Água	60
4.2.6. Carbonatação	61
4.2.7. Ataque por Sulfato	62

4.2.8. Reação dos Compósitos com o Meio Ácido	63
4.2.9. Análise Microestrutural	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
5.1. Caracterização das Matérias Primas.....	65
5.1.1. Cimento <i>Portland</i> CP III 32 - RS.....	65
5.1.2. Água	66
5.1.3. Areia Natural.....	67
5.1.4. Caracterização do Concreto Britado.....	68
5.2. Caracterização das Argamassas para Concretos	70
5.2.1. Resistência Mecânica.....	71
5.2.2. Resistência Abrasão.....	75
5.2.3. Massa Específica	76
5.2.4. Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	77
5.2.5. Absorção de Água	79
5.2.6. Carbonatação	81
5.2.7. Resistência a Sulfato.....	83
5.2.8. Reação dos Compósitos com o Meio Ácido	85
5.2.9. Análise Microestrutural	86
6. CONCLUSÕES	90
7. BIBLIOGRAFIA	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Total de lixo gerado por setor nos países da Comunidade Européia (1992-1997) (FONTE: European Environment Agency (EEA))	20
Figura 3.2 – Diagrama esquemático representativo do conceito de construção sustentável em um contexto global.	22
Figura 3.3 – Agentes externos que podem promover o desenvolvimento sustentável.	23
Figura 3.4 – Ciclo de vida dos materiais segundo DORSTHORST e HENDRIKS (2000).	24
Figura 3.5 – Representação esquemática das estágios do fenômeno de absorção de água por um agregado.	31
Figura 3.6 – Composição do resíduo de construção na Inglaterra (DETR, 2000) (FONTE: BRE).	39
Figura 3.7 – Taxa de RCD reciclado ($RCD\ Reciclado = \frac{Quantidade\ reciclada}{total\ produzido}$) (MULLER, 2006).	41
Figura 3.8 – Percentual de substituição do RCD em lugar do agregado natural (MULLER, 2006).	43
Figura 4.1 – Fluxograma do Projeto de Pesquisa.	52
Figura 4.2 – Britador de mandíbula usado na moagem dos resíduos de concreto.	54
Figura 4.3 – Fotografia da montagem para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto: módulo transversal.	59
Figura 4.4 – Fotografia do equipamento para ensaio de abrasão.	60
Figura 5.1 – Variação da resistência mecânica à compressão (valores medidos e média) em função do tipo de agregado miúdo utilizado, após 28 dias de fabricação.	72
Figura 5.2 – Variação da resistência mecânica à compressão (valores medidos e média) em função do tipo de agregado miúdo utilizado, após 150 dias de fabricação.	72
Figura 5.3 – Variação da resistência mecânica à compressão (valores médios) em função do tipo de agregado miúdo utilizado, após 28 e 150 dias de fabricação.	74
Figura 5.4 – Estimativa da resistência a abrasão.	75
Figura 5.5 – Variação percentual do peso específico do corpo-de-prova confeccionado com diferentes teores de material britado em relação a areia comum e a areia Normal.	77

Figura 5.6 – Estimativa do módulo de elasticidade, após 28 dias de fabricação, de corpos de prova de concreto fabricados com areia natural, areia natural Padrão e areia de resíduo de concreto.....	79
Figura 5.7 – Estimativa do módulo de elasticidade, após 150 dias de fabricação, de corpos de prova de concreto fabricados com areia natural, areia natural Padrão e areia de resíduo de concreto.....	79
Figura 5.8 – Capacidade de absorção percentual de água em peso após 60 dias de fabricação dos concretos fabricados com areia natural, areia natural Padrão e areia de resíduo de concreto.....	81
Figura 5.9 – Macrografia de amostras de concretos sujeitas a carbonatação forçada e aspersão com fenolftaleína.	81
Figura 5.10 – Resultados dos ensaios de compressão de corpos-de-prova aos 150 dias de idade após o ataque de sulfato de sódio.	83
Figura 5.11 – Resultado de ensaios de compressão de corpos-de-prova aos 150 dias de idade com e sem imersão em sulfato de sódio.....	84
Figura 5.12 – Resultado de ensaios de compressão de corpos-de-prova aos 150 dias de idade após imersão em NAOH	85
Figura 5.13 – Resultado de ensaios de compressão de corpos-de-prova aos 150 dias de idade com e sem imersão em NAOH	86
Figura 5.14 – Imagens do corpo de prova de concreto fabricado com areia (a) Comum, (b) Normal e (c) Britada.	87
Figura 5.15 – Imagens do corpo de prova de concreto fabricado com areia Normal e (a) 25%, (b) 50% e (c) 75% de concreto britado.	87
Figura 5.16 – Imagens do corpo de prova de concreto fabricado com areia comum e (a) 25%, (b) 50% e (c) 75% de concreto britado.	87
Figura 5.17 – Imagens do corpo de prova de concreto fabricado com areia Comum.	88
Figura 5.18 – Imagens do corpo de prova de concreto fabricado com areia IPT.	89
Figura 5.19 – Imagens do corpo de prova de concreto fabricado com concreto reciclado.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição do resíduo de construção no EUA (EPA, 1996).	38
Tabela 3.2 - Composição do resíduo de construção na Europa (MULLER, 2006).	39
Tabela 3.3 - Classificação dos RCD segundo a RILEM.	42
Tabela 3.4 - Exigências para a confecção do concreto com agregado reciclado.	43
Tabela 3.5 - Padrões e recomendações européias.	44
Tabela 3.6 - Norma DIN 4226-100.	44
Tabela 4.1 - Composição dos compostos confeccionados.	55
Tabela 5.1 - Propriedades físicas do cimento CP III 32 - RS (fornecidas pelo fabricante).	66
Tabela 5.2 - Propriedades químicas do cimento CP III 32 - RS.	66
Tabela 5.3 - Propriedades físicas e químicas da água utilizada no trabalho e fornecidas pela COPASA no período de 06/2006 à 08/2006.	66
Tabela 5.4 – Características físicas da areia natural.	67
Tabela 5.5 - Frações granulométricas obtidas por britagem com aberturas de 5 e 10mm após diferentes experimentos.	68
Tabela 5.6 - Caracterização da areia artificial segundo a norma NBR 15116 de 9/2004 - Agregados reciclados de resíduos.	69
Tabela 5.7 - Resultados do ensaio de desgaste superficial.	75

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos têm provocando uma contínua e crescente pressão sobre os recursos naturais do planeta, à medida que o desenvolvimento demanda uma quantidade razoável de matéria prima e gera um grande volume de resíduos. Do ponto de vista do desenvolvimento sustentável esses resíduos devem ser minimizados ou reaproveitados na cadeia produtiva. Todavia, a idéia de sustentabilidade ainda não está disseminada de forma abrangente. Na área de Construção Civil, esforços vêm sendo feitos nos últimos anos para conscientizar todos os envolvidos no processo sobre a problemática que o segmento vem enfrentando com a geração de resíduos e a depredação das jazidas naturais.

Das várias perdas, diretas e indiretas, identificadas no processo construtivo o que mais chama atenção é a geração de entulho. A quantidade de resíduos da construção e demolição produzidos mundialmente gira em torno de um bilhão de toneladas. (BUTLLER, 2005).

Resíduo ou entulho é geralmente o fruto da falta de controle do processo construtivo. Uma grande parte da geração desses resíduos, comumente denominados de RCD, poderia ser evitada durante a concepção e a execução do projeto. No entanto, é importante lembrar que a etapa de demolição faz parte do processo construtivo, gerando os chamados resíduos de construção e demolição (RCD). A prática da chamada desconstrução poderia minimizar a geração de resíduos de demolição, mas não pode eliminá-los. Além do desperdício de materiais, a geração de entulho também gera gastos com relação a sua deposição em aterros. Adotadas as técnicas para redução do volume de resíduos produzidos, uma segunda ação seria no sentido da reciclagem de resíduos.

A reciclagem de resíduos de construção e demolição já é uma prática mundial. O aproveitamento desse material na Comunidade Européia é em média de 28% do volume produzido. (VASQUEZ, 2005). Esse dado se comparado ao da Holanda, “que consegue um reaproveitamento de 90%” (MULLER, 2006), é um índice muito baixo, que mostra de forma clara as diferenças dentro da própria Europa. No Brasil identifica-se uma falta de índices sobre a produção e reciclagem de resíduos da construção. Em Belo Horizonte, onde se tem uma ação mais efetiva da prefeitura sobre o problema, a produção de resíduos da construção e demolição

está na casa dos 40% do volume total do resíduo recolhido na cidade, de acordo com informações obtidas nos órgãos competentes. (PORTAL PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2005).

Atualmente, esses resíduos em sua grande maioria são usados na confecção de base e sub-base de rodovias. Alguns estudos demonstram também a utilização em argamassas, blocos de concreto e em concretos sem fins estruturais. Estudos recentes, segundo Muller (2006), indicam ser possível recuperar o agregado graúdo do resíduo de concreto na confecção de novos concretos. Isso tem sido feito através de métodos de separação que envolvem técnicas sofisticadas como frequências ultra-sônicas. Os relatos da literatura sobre a utilização dos resíduos de construção e demolição como agregados de concretos para fins estruturais são muito restritos (SHAYAN e XU, 2003; LEVY, 2001; SILVA e PELISSER, 2005). Na comunidade europeia recomenda-se apenas o uso de agregados graúdos reciclados (MULLER, 2006). Na Austrália se estudam agregados graúdos e miúdos (SHAYAN e XU, 2003).

De acordo com Angulo *et al.* (2003), as possibilidades de aplicação de agregado miúdo reciclado, apesar de não ser universalmente recomendado, devem ser estudadas uma vez que corresponde a aproximadamente 50% da quantidade total de resíduo gerado. Por outro lado, a utilização da areia natural na quantidade imposta pela construção civil conduz a uma depredação ambiental. Dessa forma se torna importante o estudo da utilização do resíduo de concreto como agregado miúdo para concretos estruturais convencionais. Um primeiro passo para esse estudo, dentro do escopo de uma pesquisa científica, é a minimização das interferências entre os diversos materiais que compõe o concreto. Isto poderia ocorrer através do estudo da utilização do resíduo de concreto como agregado miúdo para argamassas que seriam matrizes de concretos estruturais convencionais, retirando-se assim o efeito do agregado graúdo nas variáveis estudadas.

Neste trabalho são analisadas as características mecânicas e a microestrutura de argamassas para concretos estruturais (ACE) fabricadas com agregados de granulometria controlada, obtidos a partir de concretos triturados. Esses resultados se inserem em uma pesquisa do Núcleo de BioConstrução que visa avaliar a viabilidade técnica de substituição da areia natural por agregados miúdos fabricados a partir de resíduos de demolição e construção.

2. OBJETIVOS

Avaliar o comportamento de argamassas para concretos estruturais convencionais fabricadas com agregados miúdos provenientes de resíduos de concreto. Sendo assim, os objetivos específicos deste trabalho são:

- fabricação de resíduos de concreto a partir de restos de concreto;
- determinação do teor ideal dos resíduos a serem utilizados como agregados;
- determinação da resistência mecânica a compressão dos compósitos fabricados;
- determinação da resistência à abrasão dos compósitos fabricados;
- determinação do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos fabricados;
- avaliação da permeabilidade através de ensaios de absorção de água dos compósitos fabricados;
- avaliação da permeabilidade através da massa específica dos compósitos fabricados;
- avaliação da permeabilidade através da análise da estrutura de poros por macroscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura dos compósitos fabricados;
- avaliação da resistência ao sulfato dos compósitos fabricados;
- avaliação da reatividade dos compósitos ao ataque do NaOH.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os tópicos relevantes do levantamento bibliográfico realizado. Inicialmente são alinhados os conceitos de desenvolvimento sustentável e construção civil sustentável. Em um segundo momento, são abordados tópicos sobre durabilidade e resistência, no intuito de se conceituar o concreto estrutural de forma mais ampla. A revisão bibliográfica sobre agregados, sejam esses naturais ou artificiais, é apresentada nos tópicos seguintes. A parte final da revisão bibliográfica se refere ao concreto estrutural confeccionado com agregados artificiais provenientes de resíduos da construção e demolição.

3.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Em 1987 alguns setores da sociedade buscavam sinalizar para a humanidade de forma sistemática que era o momento, mesmo que tardio, de se rever o nosso comportamento perante o meio-ambiente. A definição clássica de desenvolvimento sustentável foi estabelecida pela ONU no Relatório de Brundtland em 1987 (PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 21, 2000): é o “desenvolvimento que vai de encontro às necessidades do presente sem comprometer a habilidade de futuras gerações de encontrar suas próprias necessidades”. Entretanto, mesmo antes dessa conceituação o desenvolvimento sustentável já era praticado desde a antiguidade. Conforme é citado na literatura:

não podemos nos esquecer de que o conceito de sustentabilidade foi praticado por povos indígenas de todo o mundo, durante centenas de anos. Entretanto, poucos, se tanto, conseguiram unir a sustentabilidade com o que a mentalidade ocidental chama de “desenvolvimento”. As culturas que levaram uma vida considerada de alta sustentabilidade também eram aquelas consideradas extremamente “atrasadas” ou “subdesenvolvidas”. (PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 21, 2000).

Com a realização da Reunião de Cúpula do Rio, em 1992, foi organizada uma comissão que iria criar a AGENDA 21 GLOBAL (1992). Essa agenda ajudaria a esclarecer e conseqüentemente ampliar o conceito de desenvolvimento sustentável. Desde a publicação da AGENDA 21 GLOBAL, os conceitos de Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável têm sido introduzidos, de modo lento, mas firme, em todas as discussões sobre progresso e sua direção em todo e qualquer setor da

sociedade. Nos dias de hoje, esse conceito engloba idéias de que o homem seja sustentável em todas as dimensões dos seus atos, desde o social, passando pelo industrial e econômico, até o pessoal. Ser sustentável é estar em constante simbiose com o seu meio, respeitando e sendo respeitado, e visando o desenvolvimento econômico (UNITED STATES-GENERAL SERVICES ADMINISTRATOR, 2004). Ou seja, para se aplicar o desenvolvimento sustentável é necessário antes de tudo de “princípios éticos que vão guiar comportamentos uma vez que o desenvolvimento sustentável questiona relações entre gerações” (KIBERT, 2004). Desde 1992, diferentes setores envolvidos com grandes impactos ambientais se movimentaram em busca de se adequarem à Agenda 21 Global, dentre eles o da indústria da construção civil.

3.1.1. Impacto Ambiental da Construção Civil

Segundo o site Sinais Ambientais (2004) o Consumo Direto de Materiais (CDM) é uma medida relativa aos materiais utilizada pela economia. Trata-se de um indicador adaptado pelos Estados-Membros da União Européia anteriores a 1 de Maio de 2004 (UE15), que referencia a aproximação ao objetivo proposto de quebrar o elo entre utilização de recursos e crescimento econômico. Em comparação com os níveis do início de 1980, o CDM aumentou ligeiramente para cerca de seis mil milhões de toneladas em 2000. Manteve-se mais ou menos constante nas 16 toneladas per capita ao longo da segunda metade dos anos 90. O CDM é, pelo menos parcialmente, influenciado pelos ciclos econômicos: frente a um forte crescimento econômico (superior a uma taxa anual de aproximadamente 2 %) o CDM tende a aumentar, ao passo que se mantém constante ou diminui quando as taxas de crescimento são mais baixas. Os materiais não renováveis dominam o CDM: entre 1980 e 2000, apresentaram uma percentagem bastante constante de cerca de 75 %. Destes, os minerais destinados à construção representaram a maior parte, com mais de 40 %. Ou seja, o consumo de materiais de construção está intimamente relacionado ao crescimento econômico.

Além de ser um indicativo do crescimento econômico, o segmento da construção civil é, também, um dos responsáveis pelo impacto ambiental que ocorre atualmente no planeta uma vez que utiliza grandes volumes de recursos naturais

como matéria prima, conforme Maia e Fonseca (2006). Além disso, pode poluir o meio ambiente diretamente, quando gera resíduos devido a desperdícios, e indiretamente, quando consome produtos cuja fabricação polui o meio ambiente, como o cimento. Associa-se a esses dois efeitos, o fato de que durante sua vida útil uma construção consome energia e água para se manter, e que, após o uso, é demolida gerando entulho, ou seja, os impactos ambientais da construção civil não são pontuais, e sim em longo prazo.

Segundo o levantamento bibliográfico de Leite (2001), os valores de geração de resíduos são muito assustadores e por si só já constituem motivo suficiente para que sejam tomadas medidas sérias e rápidas para conter o avanço do problema. O U.S. Environmental Protection Agency (EPA) estimou que 136 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição foram gerados nos Estados Unidos em 1996.

De acordo com o Department for Environment, Transport and the Regions (DETR, 2000) mais de 90% dos minerais extraídos na Inglaterra são usados para suprir a indústria da construção com materiais. Cada ano cerca de 70 milhões de toneladas de materiais da construção, demolição e solo são considerados como resíduo. Desse material 13 milhões de toneladas não são usados.

A Comunidade Européia gera anualmente um total de 480 milhões de toneladas de resíduos inertes, deste total, 180 milhões correspondem a resíduos de construção e demolição com potencial de reaproveitamento (figura 3.1). Isso equivale à cerca de 0,5 toneladas/habitante/ano somente de resíduos de construção e demolição. Atualmente, em torno de 50 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição são reaproveitados. Esse valor corresponde à cerca de 28% do total gerado, o restante têm sido incinerado e depositado em aterros. (DORSTHORST e HENDRIKS, 2000).

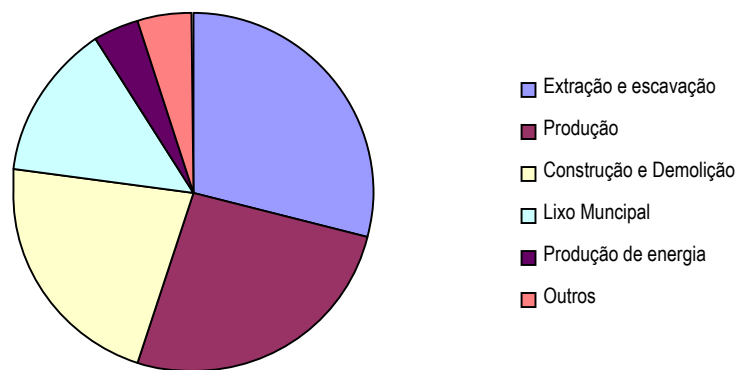


Figura 3.1 - Total de lixo gerado por setor nos países da Comunidade Européia (1992-1997) (FONTE: European Environment Agency (EEA))

Segundo Shayan e Xu (2003) na Austrália são produzidos aproximadamente 3 milhões de entulho por ano, dos quais a maioria é concreto. Aproximadamente 50% do material é reciclado como RCA e o restante é enviado aos aterros.

John (2000) cita que no Brasil estima-se um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concretos e argamassas. A este valor é necessário somar o volume de agregados utilizados em pavimentação, e as perdas.

John e Agopyan (2000) citam em seu artigo que a massa de RCD gerado nas regiões urbanas pode ser superior à dos resíduos domiciliares. As estimativas brasileiras são raras e os números apontam para uma produção anual entre 220 a 670kg/hab, com média de 510kg/hab. , Esses resíduos são um problema sério nas médias e grandes cidades brasileiras em função da grande quantidade gerada e à sua deposição ilegal. Nas cidades sem política adequada para esse resíduo a deposição clandestina varia de 20 a 50% do total gerado.

Outra grande fonte geradora de resíduos têm sido os desastres naturais e as guerras. Por exemplo, em 1995, em Beirute, no Líbano, a quantidade de resíduos espalhada pela cidade somava cerca de 20 milhões de toneladas. Na Bósnia também houve um grande volume de resíduos deixados pelo pós-guerra. Na Flórida, 100 mil residências foram destruídas, em 1992, pelo furacão Andrew. (LAURITZEN, 1998).

3.1.2. Construção Sustentável

A construção civil é um marcador de crescimento social/econômico, e seu desenvolvimento varia de país para país. Infra-estrutura, habitação, transporte, abastecimento de água e energia são produtos que refletem o grau de desenvolvimento da indústria da construção, e conseqüentemente o grau de desenvolvimento econômico local. Porém ao mesmo tempo em que ela beneficia o crescimento social ela gera um grande impacto ambiental, pois consome toneladas de recursos naturais, produz gases poluentes e gera entulho.

A conscientização do setor no que se refere à sustentabilidade se iniciou de forma sistemática em 1992 com a proposta de criação da Agenda 21 Global (1992). O passo seguinte foi à Agenda Habitat II (PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 21, 2000). Criada em 1995, ela enfatizava a importância socioeconômica do segmento da construção civil para o país. No entanto somente no ano de 2000, a busca do setor para o desenvolvimento sustentável se consolida através da confecção do relatório do CIB (The International Council for Research and Innovation in Building and Construction) “PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 21”. Esta agenda é a compilação de várias análises de diferentes experiências mundiais. Tem como resultado final indicações sobre como se deve comportar o setor da construção civil, sugerindo formas de se adaptar através da pesquisa e de novas aplicações para a área, o que promoveria em um futuro próximo, soluções que tornem o setor um segmento mais sustentável.

Para a Construção Sustentável da Agenda 21 (2000) foi utilizado como ponto de partida o conceito de Kibert de que a construção sustentável se daria pela criação e administração responsável de um meio ambiente de construção saudável fundamentado em princípios ecológicos e recursos eficazes. Esse conceito é ilustrado através da figura 3.2. Um processo tradicional de construção se foca nos custos, qualidade e tempo. Em um novo paradigma, a construção levaria em conta além desses três fatores, os recursos naturais, a biodiversidade e as emissões poluentes. No contexto atual de sustentabilidade (UNITED STATES GENERAL SERVICES ADMINISTRATOR, 2004), adicionam-se a esses seis fatores, a igualdade social e aspectos culturais, impedimentos econômicos e qualidade ambiental.

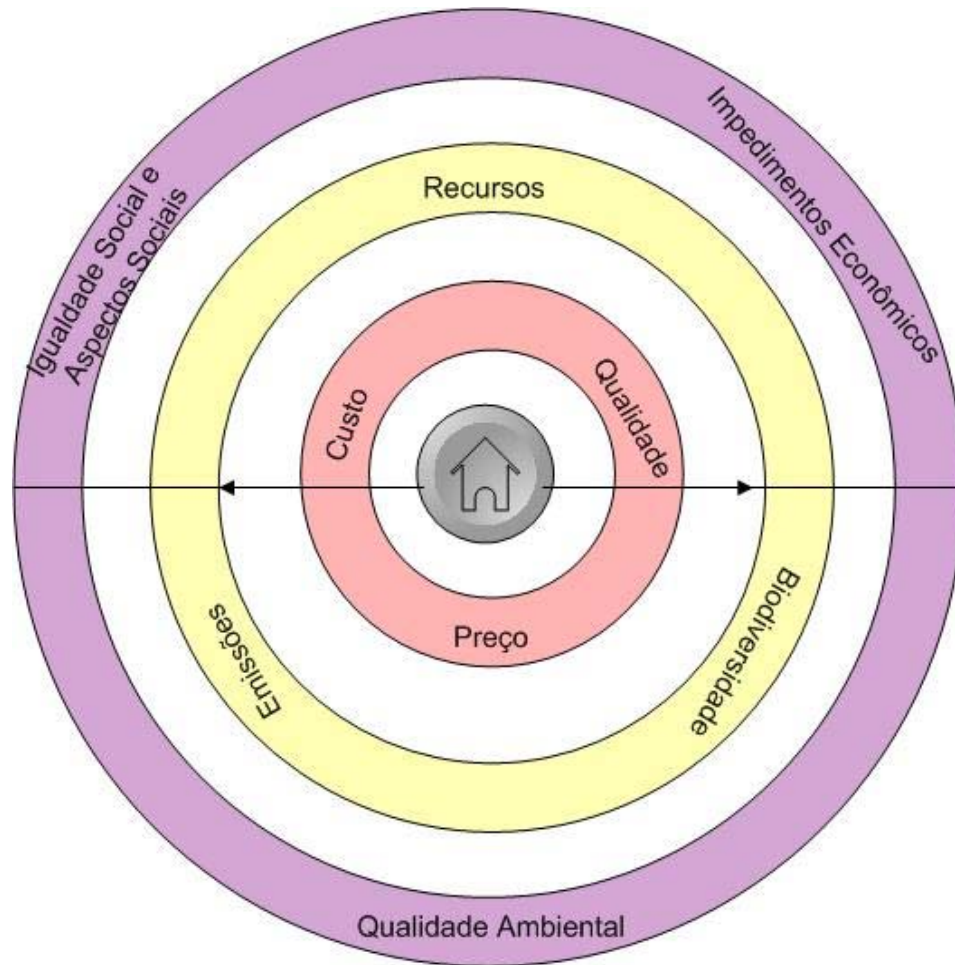


Figura 3.2 – Diagrama esquemático representativo do conceito de construção sustentável em um contexto global.

A situação é ainda mais complexa quando se analisa o núcleo do conceito de construção sustentável, isto é, a obra em si, pois esta envolve ações de diferentes setores da sociedade. A figura 3.3 ilustra os agentes envolvidos no processo cujas atitudes poderiam contribuir para a construção sustentável.

Em função do conceito de construção sustentável (figuras 3.2 e 3.3) constata-se que a construção civil possui muitas perspectivas que vão desde a questão ambiental, passando pelas questões biológicas e chegando por fim as questões sociológicas (políticas, econômicas ou culturais). Devido a isso, surge a necessidade de criar agendas locais, regionais e nacionais uma vez que cada região tem suas particularidades e o conceito de desenvolvimento sustentável deve ser aplicado de acordo com a realidade local, regional e nacional, respeitando-se todos os limites sociais encontrados.

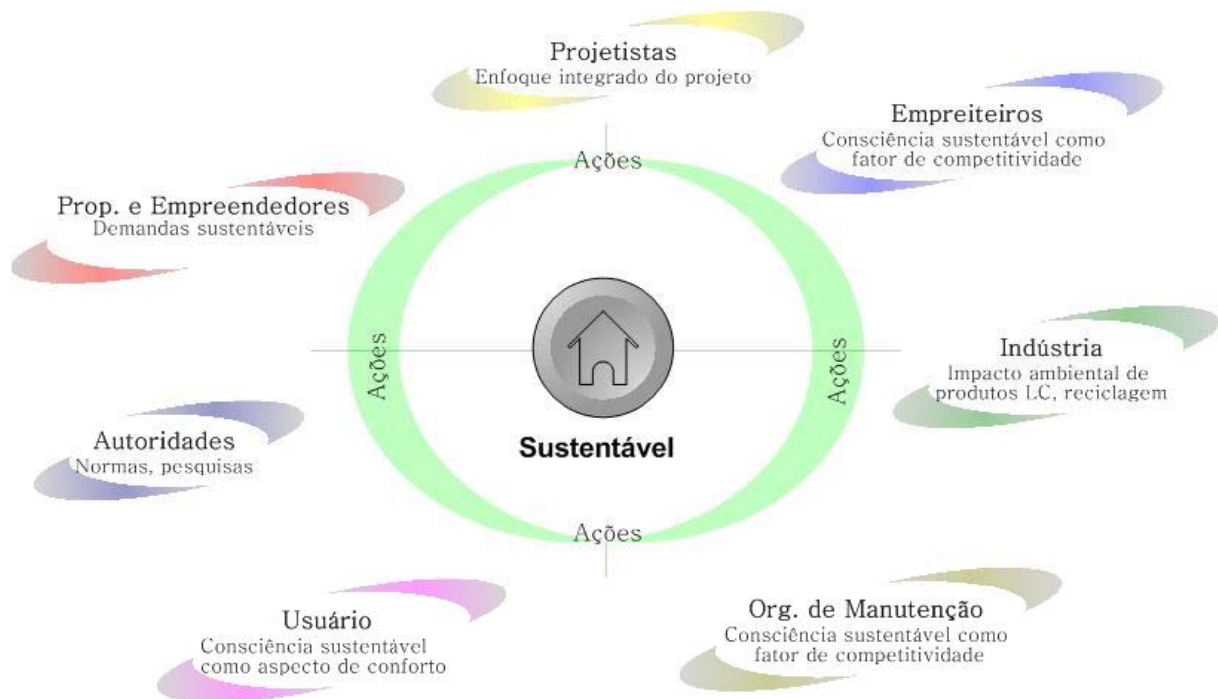


Figura 3.3 – Agentes externos que podem promover o desenvolvimento sustentável.

Alinhado o conceito de construção sustentável e nomeado os agentes capazes de atuar, torna-se necessário estabelecer os campos de ação. Supondo que os vértices do desenvolvimento sustentável no tocante a parte social seja a premissa de qualquer projeto, a implantação da construção sustentável passa basicamente por um projeto arquitetônico adequado, por uma gerência de projetos bem executada e pelos materiais a serem empregados. Dessa forma se terá um sistema construtivo onde ao longo da cadeia produtiva, se minimize o desperdício dos materiais, e cujo produto exija pouca manutenção e grande durabilidade (site *NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND ENVIRONMENT- 2006*). No entanto, John (2000) cita que por mais que o paradigma de obsolescência planejada seja abandonado, que os produtos sejam projetos para durar mais, em algum momento eles, inevitavelmente transformar-se-ão em pós-consumo. Estes materiais se bem gerenciados podem ser matéria prima para o próprio ou outros setores, formando assim um processo cíclico e não linear. Podemos citar como um bom exemplo dessa inter-relação à utilização da escória de siderurgia na confecção do cimento. O que seria considerado lixo de um segmento é a matéria prima do outro.

Dorsthorst e Hendriks (2000) em seu artigo citam o ciclo de vida dos materiais como ilustrado na figura 3.4. Como pode ser visto, o ciclo dos materiais

pode ser tratado de maneira geral, podendo ser adaptado a qualquer situação. Basicamente os pesquisadores propõem uma maneira inteligente de otimização e aproveitamento dos materiais em seu ciclo de vida.

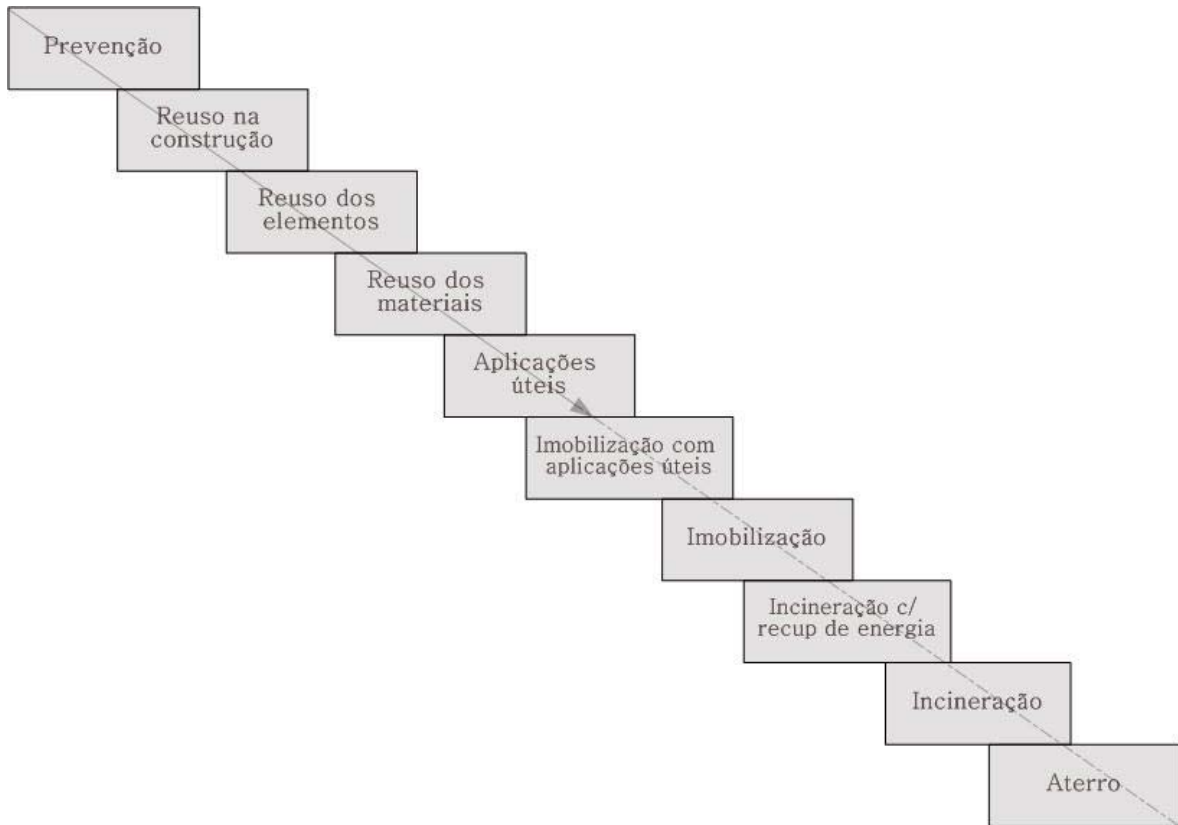


Figura 3.4 – Ciclo de vida dos materiais segundo DORSTHORST e HENDRIKS (2000).

Comumente a construção sustentável tem se baseado em ações que visam a prevenção através de gerência de projetos (grandes construtoras) e os rejeitos gerados se destinam à reciclagem, incineração e aterros sanitários. Atualmente, uma terceira forma de ação tem sido sugerida como prevenção na geração de resíduos e na maximização do potencial de uso dos materiais. Na conferência Rethinking Sustainable Construction 2006 – Next Generations Green Buildings (2006), fica claro que a reciclagem não deve ser o foco da construção civil sustentável, pois comumente a reciclagem envolve processos que demandam um alto gasto de energia e podem produzir subprodutos que poderiam causar danos ao meio ambiente. Por outro lado pensar a sustentabilidade apenas como gerência bem feita de projetos e obtenção de produtos de qualidade não elimina a geração de resíduos, pois ao longo da vida útil da construção mudam-se as necessidades dos usuários que demandam reformas ou demolição. Dessa forma o projeto deve levar em conta o aproveitamento individual desses materiais assim como a facilidade de desmontagem da construção. Nisso se baseia a desconstrução, que engloba o

conceito de projetar para desconstruir (DfD - *Design for Deconstruction*), ou seja, aumentar os recursos e a eficiência econômica, reduzir os impactos nas manutenções e eventuais demolições e recuperar componentes e materiais para reuso, reprodução e reciclagem, de acordo com Guy e Ciarimboli (2006). Um exemplo incipiente da aplicação desse conceito é o “Brexó da Construção” idealizado pela SLU / Prefeitura de Belo Horizonte, assim como os leilões de materiais usados do projeto “Onde Moras” que funciona desde 1996 em Londrina no Paraná coordenado e idealizado por Maurício Tadeu Alves da Costa.

Dos dados acima se conclui que a utilização de materiais duráveis na construção civil é um dos caminhos mais eficazes para o estabelecimento da construção sustentável. Dentre os materiais de construção civil, o concreto destaca como um dos materiais mais utilizados pelo homem. (MEHTA e MONTEIRO, 2005). Sendo assim torna-se importante associar o conceito de sustentabilidade ao concreto, em especial ao concreto utilizado para confecção de estruturas.

3.2. CONCRETO ESTRUTURAL

O conceito de concreto estrutural se confunde muitas vezes com o conceito de concreto de alta resistência, concreto de alto desempenho ou concreto inteligente. De forma a se ter uma visão mais clara optou-se inicialmente neste trabalho por conceitos baseados tanto na literatura internacional como na literatura nacional que é vasta e amplamente conhecida. Dessa forma concreto de alta resistência seria um concreto que possui resistências superiores às normalmente utilizadas. Concretos de alto desempenho são concretos que atendem as especificações para as quais foram projetados durante o tempo de vida previsto, possuindo fator água/cimento (a/c) no máximo de 0,4. Concreto estrutural é aquele utilizado para a confecção de dispositivos que se destinam a resistir a determinados valores de carga. Já um concreto inteligente se insere no conceito de desenvolvimento sustentável, devendo ser um concreto durável e que não gere resíduos, e que, se possível, absorva resíduos da sua cadeia produtiva ou de outras fontes.

Neste contexto considerou-se para estudo as especificações de concreto estrutural definidas na ABNT - NBR 6118 (2003), mesmo sendo elas muito abrangentes. Segundo essa norma o conceito de concreto estrutural é amplo e envolve a aplicação do concreto como material estrutural. Vai desde concreto simples, passando pelo concreto armado (armadura passiva, onde a armadura não é usada para produzir forças de protensão) até o concreto protendido (armadura ativa, aquela que se aplica um pré-alongamento inicial). A massa específica seca do concreto estrutural deve ser maior do que 2.000Kg/m^3 , não excedendo 2800Kg/m^3 . O valor mínimo da resistência à compressão, na referência de 28 dias, deve ser de 20MPa para concretos armados e 25MPa para concretos protendidos. O valor de 15MPa pode ser usado apenas em fundações e em obras provisórias. Além disso, a estrutura deve resistir a ações de agentes externos que podem ocorrer em qualquer momento da execução do projeto e deverá comportar-se adequadamente sob as condições previstas de uso, durante sua vida útil.

A vida útil de uma estrutura compreende o período onde a mesma não necessita de nenhuma manutenção ou reparo mantendo suas características, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelos projetistas e construtores. Após esse período de vida útil é que a estrutura de concreto pode começar a apresentar a deteriorização. Dentro desse panorama, é preconizado pela norma que as estruturas de concreto devem conservar sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente a sua vida útil.

Para que a estrutura se comporte de maneira a resistir os agentes externos, vários são os itens de qualidade necessários - requisitos relativos à sua capacidade resistente ou de seus elementos componentes correspondentes à segurança à ruptura, requisitos relativos à sua durabilidade, sob as influências ambientais previstas dizem respeito à conservação da estrutura, sem necessidade de reparos de alto custo, ao longo de sua vida útil, requisitos relativos a um bom desempenho em serviço, requisitos de qualidade da solução adotada, requisitos da qualidade da descrição da solução. Nesse último se inserem os itens referentes à segurança e durabilidade que são impostos pelas normas técnicas de projeto.

O desempenho da durabilidade de uma estrutura vai depender diretamente do nível de agressividade do meio. Esse nível de agressividade deverá estar previsto no projeto. A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente

das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto. Outro ponto que é crítico para a durabilidade é a qualidade do concreto que depende diretamente da relação água/cimento e do grau de hidratação. Esses dois fatores irão controlar o índice de absorção capilar de água, de permeabilidade por gradiente de pressão de água ou de gases, de difusividade de água ou de gases, de migração de íons, assim como todas as propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração, fluência, relaxação, abrasão e outras, ou seja, a durabilidade da estrutura.

Na norma brasileira, para o concreto estrutural a variação do fator água/cimento pode ser de 0,45 até 0,65, dependendo da classe de agressividade do meio ambiente. O tipo de cimento também influencia na durabilidade da estrutura, e deverá ser escolhido, quando possível, em função do meio agressivo em que a mesma está inserida.

Na consideração da durabilidade, também, devem ser levados em conta mecanismos importantes de envelhecimento e deterioração da estrutura de concreto. Os mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto são a lixiviação, expansão por ação de águas e solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos, expansão por ação das reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos, reações deletérias superficiais de certos agregados decorrentes de transformações de produtos ferruginosos presentes na sua constituição mineralógica.

Além dos mecanismos acima citados, a durabilidade da estrutura de concreto armado pode ser afetada por mecanismos de deterioração relativos à armadura. A despassivação por carbonatação e despassivação por elevado teor de íon de cloro (cloreto) são os exemplos desse tipo de deteriorização. Já os mecanismos de deterioração da estrutura de concreto armado como um todo, são todos aqueles relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, deformação lenta (fluência), relaxação entre outros.

Para se ter um concreto estrutural como preconizado na norma brasileira é necessário conhecer o meio em que a estrutura está inserida, e os materiais que serão utilizados, assim como o processo de confecção do concreto. Todos que participam de alguma das fases do projeto/construção com concreto estrutural estão envolvidos na questão da durabilidade, tendo cada um deles têm uma parcela de

responsabilidade. Muito se tem falado dos problemas ambientais relacionados ao uso da água e dos recursos naturais utilizados para fabricar o cimento. Porém, neste estudo será focado especialmente os agregados.

Na norma NBR 6118 (2003) não são estabelecidos os constituintes do concreto. Na literatura clássica o concreto é um composto constituído essencialmente de um meio aglomerante dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmento de agregados. (MEHTA e MONTEIRO, 2005). Os agregados podem ser definidos como materiais particulados de atividade química basicamente nula, constituído de partículas que cobrem uma extensa faixa de tamanhos. Nesse sentido se poderia ter concretos fabricados com agregados que correspondem à granulometria da areia natural. Seria um concreto relativamente caro. Por isso no dia a dia da construção civil se considera como constituinte básico do concreto os agregados de tamanhos superiores a 4,8mm. Visando não polemizar a área acadêmica com a prática corrente optou-se, neste trabalho, por chamar concretos estruturais fabricados sem agregados graúdos de argamassas para concreto estrutural (ACE). No entanto, a palavra concreto é utilizada algumas vezes para designar ACE, apenas no intuito de lembrar que o compósito cimentício estudado não se destina a revestimentos ao assentamento.

3.3. AGREGADOS NATURAIS

Muito já se estudou sobre os agregados naturais. Em função de ser um assunto de domínio geral dos envolvidos na área, neste tópico é apresentado, de forma bastante sucinta, uma revisão sobre agregados naturais baseada nos livros clássicos de Scandiuzzi e Andriolo (1946), Neville (1997), Somayaji (2001), Mehta e Monteiro (2005). Agregados são materiais granulares que na presença de um aglomerante dão origem ao concreto ou à argamassa. A palavra inerte foi utilizada até os anos 40 para identificar os agregados do concreto. Essa palavra era usada, pois se supunha que o agregado não afetava o comportamento do mesmo. Essa linha de raciocínio se manteve até início dos anos 40 quando estudos mostraram que esses materiais afetam química e fisicamente o concreto. Os agregados interferem nas propriedades dos compósitos cimentícios, pois são materiais predominantes (correspondem de 60 a 80%) na composição do concreto. Sendo

assim, é importante analisar pontos relevantes sobre a classificação e caracterização de agregados.

3.3.1. Classificação

De acordo com Somayaji (2001), os agregados podem ser classificados em função de sua natureza ou o método de fabricação, granulometria e densidade.

Quanto à natureza os agregados podem ser naturais ou artificiais (sintéticos). Os naturais são aqueles cuja origem são jazidas naturais. Eles podem ser ígneos, sedimentares e metamórficos. Ígneos são formados a partir do magma e suas características vão depender da forma de resfriamento do mesmo. Sedimentares são originários das rochas ígneas e sofreram alguma ação da natureza (vento, gelo, degelo, etc.) que resultou em uma estratificação e depósito em outro local. Já os metamórficos têm sua origem nos ígneos e sedimentares, porém, tiveram as suas características iniciais alteradas por ações químicas ou físicas e por consequência o resultado final é a alteração da textura original da rocha. Basicamente esses materiais naturais, além de possuírem sua classificação geológica, podem também ser classificados em materiais não-britados e britados (minerais e minerais manufaturados). Os primeiros são de origem sedimentar. Já os segundos são obtidos a partir de fratura de rochas.

Os agregados artificiais são provenientes de materiais previamente beneficiados. Comumente são provenientes de rejeitos industriais, urbanos e resíduos da construção e demolição. Ou seja, são agregados produzidos artificialmente, que normalmente sofrem algum tipo de tratamento para posteriormente serem utilizados na confecção do concreto.

Quanto à densidade os agregados podem ser leves, normais e pesados. A massa específica dos agregados normais gira em torno de 2650kg/m^3 . Acima ou abaixo dessa faixa se situam os agregados pesados e os leves respectivamente.

No tocante a granulometria os agregados podem ser classificados em graúdos e miúdos. No Brasil, no caso de concretos de cimento *Portland* os agregados miúdos compreendem uma faixa granulométrica que vai de $75\mu\text{m}$ até $0,0048\text{m}$. Os agregados graúdos têm seu tamanho na faixa que vai de $0,0048$ até $0,152\text{m}$. (NBR – 7211, 2005).

3.3.2. Caracterização

Os agregados são caracterizados em função da massa específica, do índice de absorção, do grau de umidade superficial, da porosidade, da sanidade, da distribuição granulométrica, da dimensão máxima, da forma e textura superficial.

3.3.2.1. Massa Específica

A massa específica determina o volume do material sólido (partículas isoladas) em relação aos poros que o compõe, podendo ser definida como absoluta ou aparente. Essa grandeza auxilia na definição da quantidade de agregados a serem utilizados durante a confecção de uma quantidade de concreto. O seu valor não determina a qualidade do agregado.

Para a quantificação da massa de partículas do material que ocupa uma unidade de volume é necessário que se utilize a grandeza denominada massa unitária. A necessidade dessa grandeza surge uma vez que é impossível dispor as partículas de forma harmoniosa de tal maneira que entre as elas não existam espaços em branco. A forma, o tamanho e compactação impactam na quantidade de vazios existentes entre as partículas. Ou seja, massa unitária é a transformação da massa em volume, onde o volume será ocupado tanto por partículas quanto por vazios.

3.3.2.2. Absorção, Umidade Superficial e Porosidade

Absorção, umidade superficial e porosidade são conceitos que se entrelaçam. A presença e a quantidade de poros de uma determinada partícula determinam a porosidade da mesma. A umidade superficial de um agregado é a soma da água em excesso mais a água absorvida por todos os poros do agregado.

Considera-se absorção como a capacidade de preenchimento de todos os poros de um agregado. Para defini-la basta medir a massa do agregado saturado e depois medir a massa do mesmo agregado levado à estufa. A absorção de um agregado pode ser definida em quatro estágios representados na figura 3.5 abaixo. Seco em estufa ou completamente seco, quando não apresenta nenhuma presença

de água. Seco ao ar, presença interna de água, porém todos os poros não estão preenchidos. Saturado superfície seca todos os poros estão preenchidos, porém não apresenta uma camada úmida na superfície. Saturado ou úmido, onde a superfície apresenta uma pequena película de água.

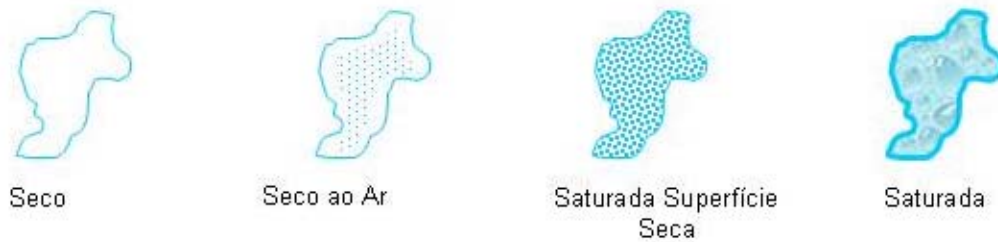


Figura 3.5 – Representação esquemática das estágios do fenômeno de absorção de água por um agregado.

Porosidade, absorção e umidade superficial são fatores relevantes no momento da confecção do concreto. Eles interferem diretamente no fator água/cimento do concreto. Um agregado mal saturado impacta diretamente na trabalhabilidade do concreto, uma vez que o agregado irá absorver a água destinada à hidratação do concreto. Um agregado com excesso de água irá conseqüentemente ter sua massa aumentada de maneira indesejável, além disso, a água em abundância traz problemas relacionados ao gelo e degelo e a estabilidade química do concreto. O ideal é que o agregado se apresente no momento da confecção do concreto na situação saturada superfície seca para que problemas, que afetam o tempo de pega, resistência, aderência entre o agregado e a pasta de cimento dentre outros, não ocorram.

3.3.2.3. Dimensões Máximas, Composição Granulométrica, Forma e Textura Superficial

As dimensões máximas, composição granulométrica, forma e textura superficial também são importantes características a serem levadas em consideração. A dimensão de um agregado vai influenciar diretamente na quantidade de água e cimento utilizado no concreto. Agregados com grandes superfícies específicas tendem a absorver maior quantidade de água. No entanto, não é possível estabelecer um tamanho ideal de agregado, pois seu tamanho máximo irá depender diretamente da aplicação do concreto.

A sua forma é definida a partir de certas características geométricas. O agregado pode ser anguloso, arredondado, alongado, lamelar dentre outros. Agregados mais arredondados poderão levar a problemas de aderência, que podem ser contornados com o uso de menor quantidade de água sem prejuízo da trabalhabilidade do composto uma vez que a forma esférica facilita a trabalhabilidade. Agregados na forma lamelar podem criar dificuldades no tocante a trabalhabilidade da mistura. Além da forma, os agregados possuem texturas superficiais peculiares. As superfícies ásperas, diferentemente das lisas, contribuem para uma maior aderência da pasta. Forma e textura são determinadas de acordo com a origem do agregado.

Composição granulométrica do agregado é definida pelas porcentagens que ficam retidas em diferentes peneiras. A composição granulométrica de um agregado influencia em sua trabalhabilidade e custo. Um agregado composto com todos os tamanhos de partículas resultará em um concreto com maior trabalhabilidade, mais denso, com maior estabilidade de volume e com menor custo. Por isso tem sido prática corrente a utilização de agregados cuja composição granulométrica é estabelecida artificialmente.

3.3.2.4. Sanidade

Sanidade é a capacidade de um agregado resistir às variações de volume que ocorrem devidos as intempéries ambientais. Gelo e degelo, umedecimento e secagem são exemplos dessas intempéries que podem aumentar o volume dos agregados afetando o seu comportamento no concreto. Essa característica deve-se

principalmente aos poros que compõe o agregado, pois, os mesmos podem ter tamanhos suficientes para permitir a entrada da água, porém não ter tamanho suficiente para drenar a mesma.

3.3.2.5. *Propriedades Térmicas*

Outro ponto que pode afetar o desempenho do concreto é a propriedade térmica do agregado. Ao todo são três: coeficiente de dilatação térmica, calor específico e condutividade térmica. Tanto o calor específico quanto à condutividade térmica irá impactar no concreto massa ou isolante. Caso o agregado possua um grande coeficiente térmico, esse valor irá influenciar no coeficiente térmico do concreto. Nos concretos estruturais elas não têm relevância.

3.3.2.6. *Substâncias Deletérias*

Por fim uma característica do agregado é o teor de substâncias deletérias. Elas podem ser encontradas tanto no agregado graúdo como no agregado miúdo. Sua presença influencia a trabalhabilidade do concreto, pega e endurecimento, além das reações químicas que podem ocorrer com a pasta do cimento, como por exemplo, reação álcali-agregado.

3.4. AGREGADOS DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO

O aumento da demanda na área de construção civil, e conseqüentemente de concreto, tem promovido um aumento no consumo das matérias primas o que ocasiona a diminuição das reservas naturais. Visando minimizar o impacto ambiental, diferentes materiais e resíduos têm sido utilizados como agregados em substituição aos naturais para confecção do concreto. Dentre eles destacam-se os resíduos de construção e demolição (RCD). Como os RCD são gerados dentro das cidades, pode existir uma grande vantagem competitiva, no tocante a logística, dos agregados reciclados com relação aos naturais. Entretanto, em ambos os casos, é necessário a produção em larga escala para que a operação seja lucrativa o que torna muitas vezes a atividade incompatível com a necessidade de ocupação da malha urbana, de acordo com Angulo *et al.* (2003).

Angulo (2000), considera RCD todo e qualquer resíduo oriundo das atividades de construção, seja ele de novas construções, reformas, demolições, que envolvam atividades de obras de arte, solos ou resíduos de vegetação presentes em limpezas de terreno. Leite (2001) cita em seu trabalho que este material pode ser definido como um resíduo proveniente de construções, reparos, reformas, e demolições de estruturas e estradas.

Para se evitar dúvidas quanto ao entendimento do que se trata resíduo da construção e demolição é apresentado abaixo o conceito da resolução 307, de 5 de julho de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Essa resolução que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, conceitua resíduos da construção civil como sendo os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

3.4.1. Histórico

A indústria da construção é uma das mais antigas em todo o mundo e lança mão de técnicas e materiais que não mudaram muito ao longo do tempo, como afirma Leite (2001). O concreto mais antigo encontrado até hoje data de 5600 a.C., sendo constituído por uma mistura de cal, argila e agregados, salientam Levy e Helene (2002). Como esse compósito existe há tanto tempo é bem provável que a sua reutilização já aconteceu bem antes do que se imagina atualmente.

No entanto, só em 1928, segundo Levy (2001), é que começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática, para avaliar o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados oriundos de alvenaria britada e de concreto.

Entretanto, segundo Levy e Helene (2002), é no ano de 1946 que podemos considerar o início do desenvolvimento da reciclagem de resíduos na construção. Nessa época, a construção civil europeia absorveu os resíduos da construção e demolição como sua matéria prima para as novas edificações. Dessa forma resolviam-se dois problemas, o primeiro relacionado às grandes quantidades de resíduos originadas pela II Guerra Mundial e o segundo a matéria prima que era necessária em alto volume para a reconstrução das cidades.

De acordo com Cincotto (1988), desde 1968 existem simpósios sobre o tema de utilização de resíduos na construção civil. Naquela época os estudos a respeito da utilização desses resíduos como matéria prima na área de construção ainda era incipiente e os recursos naturais mais abundantes do que os que temos hoje. Todavia, a investigação sistemática sobre o uso dos resíduos de construção e demolição utilizados como agregados na confecção do concreto ocorre nos final dos anos 70 com Buck e Yannas (1977).

Nos últimos quinze anos, ampliou-se mundialmente o volume de estudos sobre a utilização do resíduo da construção e demolição na construção civil. No Brasil podemos citar Pinto (1986) como um dos pioneiros nos estudos. Os trabalhos desse autor colocam o Brasil como um dos primeiros países na América Latina a pesquisar esse assunto. Butler (2005) nos lembra que o Brasil, felizmente, encontra-se em posição de vanguarda no que tange a parte normativa. A Resolução 307 do CONAMA publicada em 2003, e as normas técnicas de 2004 tratando dos resíduos de construção e demolição, ABNT - NBR 15112, NBR 15113, NBR 15114, NBR

15115 e NBR 15116, são os primeiros indícios de mudanças com relação a essa questão. Essas normas auxiliam e orientam a utilização do entulho como agregados reciclados estimulando a sustentabilidade no setor da construção civil.

3.4.2. Origem e Classificação

A origem do entulho ocorre não somente pelas perdas durante o processo de fabricação de pré-moldados e blocos, como também nas falhas do processo construtivo. Além disso, os resíduos são de naturezas diversas (pedras, concreto, cerâmicas vermelhas, etc.), pois são oriundos de execução de reformas e demolições de edificações e pavimentos, de usinas de concreto pré-misturado e de catástrofes naturais ou artificiais. Essa diversidade de origens impõe uma heterogeneidade ao RCD e a necessidade de controle de suas características físicas e químicas, quando se pensa nesse material como agregado de concreto. A partir de determinadas características é que se pode definir o tipo de tratamento e aplicação que será dado ao resíduo.

O primeiro passo para o controle das características do resíduo é a sua classificação baseada na origem. Com o foco apenas na produção, Souza *et al.* (2004) classifica o entulho segundo quatro critérios: forma da manifestação, momento de incidência na etapa de produção, suas causas e sua origem. Entretanto, a resolução 307 do CONAMA (2002) traz quatro tipos de classes de resíduos de construção e demolição:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a. de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b. de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c. de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Cavalcante e Cheriaf (1996) lembram que além da identificação das propriedades que classificam um resíduo como sendo utilizável ou não para o setor construtivo, também devem ser analisadas as características técnicas bem como o impacto ambiental devido ao uso. Leite (2001) comunga da mesma opinião. Segundo a autora, os resíduos, sejam eles quais forem, devem ser classificados, do ponto de vista do risco ambiental, para que possam sofrer o correto destino e manuseio. A separação do resíduo em cerâmica vermelha e concreto, baseada na cor usual desses materiais, poderia ser uma forma de classificação. No entanto de acordo com Angulo *et al.* (2004) a classificação em vermelho e cinza pode não ser significativa em termos de variação de porosidade e, potencialmente, de resistência mecânica dos agregados.

Muller (2006) classifica o RCD baseado em três critérios: tipo de atividade construtiva, origem e material. Quanto à atividade construtiva os RCD podem ser de construção, de atividades de manutenção, de demolição total ou parcial e de solo ou rochas provenientes de terraplanagens e fundações. Quanto à origem a autora classifica os resíduos em resíduos de edificações, de obras de infra-estrutura e de pavimentação rodoviária. Em função do tipo de material, os resíduos podem ser concreto, alvenaria, asfalto e RCD misturado.

3.4.3. Características e Aplicações

Um sistema construtivo mesmo que bem elaborado será um provável gerador de resíduos, pois em algum momento será submetido à manutenção e ou até mesmo à demolição. Devido a isso o resíduo nunca deixará de existir, todavia

pode ser minimizado. Além disso, o resíduo sempre possuirá as características locais de sua origem, e para uma mesma região, em função do período do ano, o RCD se notabiliza pela sua heterogeneidade.

De acordo com Leite (2001) quando se estuda a composição média dos resíduos de construção, devem ser considerados fatores como: a tipologia construtiva utilizada, as técnicas construtivas existentes, e os materiais disponíveis em cada local. Dentro deste contexto, ainda merecem interesse os índices de perdas de materiais mais significativos. Todos estes fatores determinam a composição do resíduo de construção e demolição.

Em 2005, Butler afirma que os resíduos provenientes de atividades da construção civil e demolições são constituídos por diferentes fases (cerâmica, argamassa, concreto, vidro, etc.), fato este que dificulta a separação eficiente das diferentes frações devido à heterogeneidade do material. Essa variabilidade é um dos limitantes para o uso dos agregados reciclados, mesmo como grãos.

Nos Estados Unidos (EUA) são produzidos mais de 10 milhões de toneladas/ano de resíduos de construção, segundo Meyer (2006). A tabela abaixo mostra uma estimativa da U.S. Environmental Protection Agency (EPA, 1996) sobre a porcentagem de materiais que compõe os resíduos de construção e demolição neste país.

Tabela 3.1 - Composição do resíduo de construção no EUA (EPA, 1996).

Tipo	Quantidade (%)
Concreto e Entulho Misturado	40-50%
Madeira	20-30%
<i>Drywall</i>	5-15%
Asfalto	1-10%
Metais	1-5%
Telhas	1-5%
Plásticos	1-5%

Na figura 3.6 pode-se visualizar a composição do resíduo característico da Inglaterra, em 2000 segundo o *Department for Environment, Transport and the Regions* (DETR). Muller (2006) apresenta a composição da Tabela 3.2 como característica do resíduo europeu.

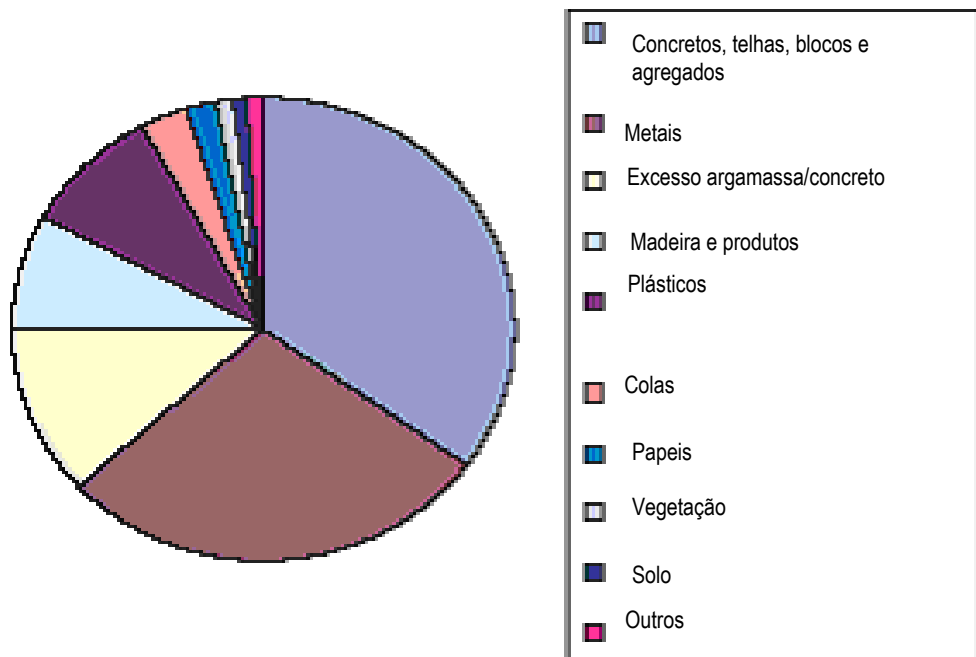


Figura 3.6 – Composição do resíduo de construção na Inglaterra (DETR, 2000) (FONTE: BRE).

Tabela 3.2 - Composição do resíduo de construção na Europa (MULLER, 2006).

Tipo	Quantidade (%)
Concreto	2-39%
Entulho Misturado	2-11%
Alvenaria RCD	42-92%
Asfalto	6-21%

No Brasil não existem dados que permitam caracterizar o entulho do país como um todo. Em função das especificidades do país acredita-se que o resíduo produzido seja basicamente de demolição, ou seja, pobre em concreto, de acordo com Angulo e John (2004).

Em função da heterogeneidade dos resíduos de construção, a estratégia para o desenvolvimento sustentável envolve além da minimização, o gerenciamento desses resíduos, que deve ser baseado no local onde é produzido. Esse gerenciamento vai desde a coleta, beneficiamento e destinação final em obras ou aterros sanitários. É na etapa de beneficiamento que se define as características e, conseqüentemente, o destino do RCD.

O beneficiamento se inicia nas áreas de triagem (dentro da própria obra ou em Áreas de Transbordo e Triagem - ATT's) onde ocorre a separação dos resíduos de acordo com os materiais que o compõe (madeira, metais, polímeros, e cerâmicos). Os resíduos compostos predominantemente por cerâmicos são destinados às usinas de reciclagem, que podem ser móveis ou fixas. Algumas delas, como a de São Bernardo do Campo, só recebem resíduos de concreto. As de Belo Horizonte, em número de três, trabalham com o entulho sem contaminação por matéria orgânica e gesso.

Usualmente a separação do entulho é feita de forma visual. De acordo com Angulo e John (2002) essa metodologia de avaliação da composição é bastante rudimentar o que dificulta a diferenciação das fases do concreto e argamassa. O método foi considerado impreciso e demorado. Para qualquer processo de reciclagem com escala comercial que vise outro mercado que não o de base de pavimentação, será fundamental que estejam disponíveis mecanismos rápidos e confiáveis para a caracterização dos lotes produzidos, de forma a certificar a qualidade e classificar de acordo com a potencialidade de uso. Os métodos podem ser secos ou úmidos sendo que os secos são mais econômicos. O jigue e a separação por líquidos densos têm sido estudados como possibilidades de melhoria no processo de segregação, segundo Angulo *et al.* (2002), entretanto ainda não são utilizados no mercado brasileiro.

Os resíduos não podem ser utilizados diretamente como matéria prima para materiais de construção, sendo necessário que após a sua descontaminação, que os mesmos sejam submetidos à britagem e separação granulométrica. Essas operações são feitas em usinas de reciclagem de resíduos. Todavia, a atual tecnologia empregada nas centrais brasileiras de reciclagem de RCD não permite que grande parte dos RCD reciclado tenha utilizações como os da Europa, salienta Angulo *et al.* (2002).

Em Belo Horizonte, referência mundial em gerenciamento de resíduos sólidos, as centrais de reciclagem possuem apenas coleta manual de plásticos e madeiras, alimentador (trator), britadores, transportador de correia, eletroímã para coleta de metais e jatos de água para evitar pó. Essas estações quando comparadas às estações européias são bastante rudimentares uma vez que não é aplicado nenhum tipo sofisticado de tecnologia (queima com maçarico, jigues, ventilação artificial).

De acordo com John (2000), a reciclagem de resíduos no Brasil como materiais de construção quando comparada aos países de primeiro mundo, é ainda tímida. O autor nos lembra que esse atraso tem vários componentes, dentre eles, os repetidos problemas econômicos e os prementes problemas sociais que ocupam a agenda de discussões políticas, deixando pouco espaço para discussões mais de longo prazo, como a questão do desenvolvimento sustentável. Abaixo a figura 3.7 nos mostra a taxa de reciclagem na Europa.

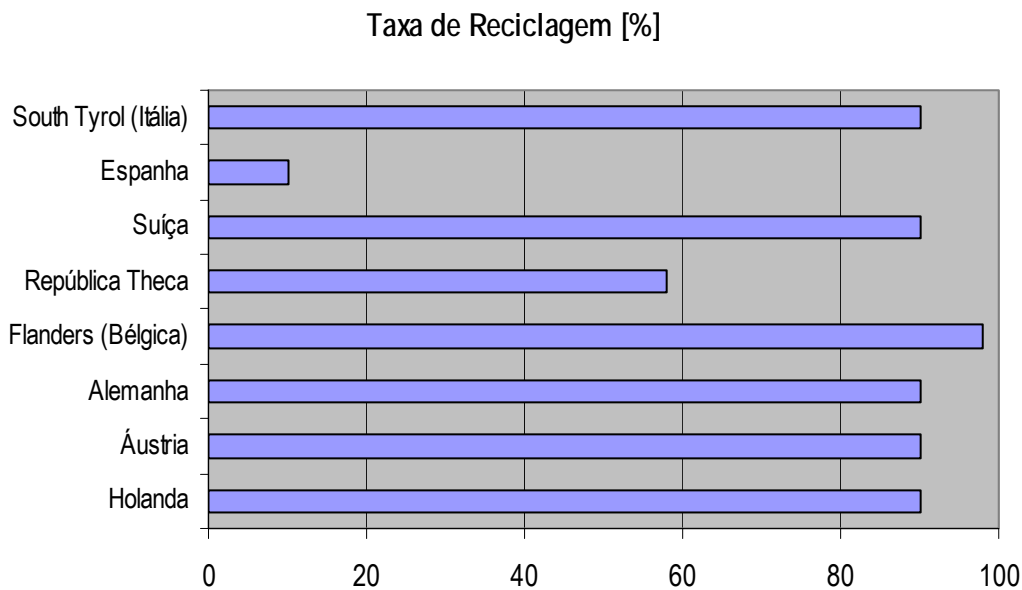


Figura 3.7 – Taxa de RCD reciclado (RCD Reciclado=Quantidade reciclada/total produzido) (MULLER, 2006).

Atualmente têm sido desenvolvidas na Alemanha técnicas alternativas para o beneficiamento do RCD, afirma Muller (2006). Essas técnicas visam à separação do agregado graúdo da pasta através da aplicação de impulsos ultra-sônicos, cavitação por erosão e remoção da pasta de cimento por tensões térmicas. A sinterização dos finos de RCD também tem sido estudada como forma de aproveitamento de resíduos.

Os materiais produzidos das usinas de reciclagem, além da heterogeneidade de composição, apresentam características específicas que exigem cuidados especiais para sua utilização como materiais de construção. Dentre elas, pode-se destacar a baixa massa específica, o alto teor de finos, alta porosidade e elevado teor de sílica. De acordo com Angulo *et al.* (2004), a cominuição transforma poros internos em rugosidades superficiais, reduz as partículas mais friáveis, liberando as

partículas minerais, com areia. Essas características limitam as possibilidades de uso dos RCD.

Em 1977, Buck já falava da importância de se utilizar o resíduo como agregado, uma vez que a necessidade de se encontrar uma nova fonte de agregados existia e que iria crescer. O mesmo autor observa que mesmo utilizando energia no processo de reciclagem, talvez até maiores do que o processo de extração do agregado natural, o processo de reciclagem seria ainda mais barato quando se incluir a energia gasta tanto para o transporte do concreto natural quanto para o gasto de energia para o transporte do resíduo até o local de sua deposição. Yannas (1977) sugere que a utilização de resíduos de concreto como agregado pode acontecer em áreas onde a deposição do resíduo do concreto é um problema ou em áreas onde o agregado natural não é facilmente encontrado.

Em função das suas características os RCD's têm sido utilizados como material para base e sub-base de pavimentação, agregados para concretos sem fins estruturais e aterros.

Quando o resíduo é rico em concreto ele apresenta grande potencial de reciclagem, devido à possibilidade de conhecimento das suas propriedades físicas e mecânicas e seu menor grau de contaminação por outros materiais, quando comparado com outros resíduos de construção. (BUTLLER, 2005)

Nestes casos, ele poderia ser utilizado como agregado para concretos e argamassas. Muller (2006) em trabalho recente destaca a utilização dos RCD's como agregados graúdos em substituição total ou parcial aos naturais para concretos usados em elementos interiores (pilares, paredes e placas cimentícias), e como placas decorativas em várias obras na Alemanha e Suíça.

Na Europa o uso de RCD como agregado para concreto, segue as recomendações da *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM RECOMENDATION, 1994) que os classifica em função da massa específica (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Classificação dos RCD segundo a RILEM.

	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Densidade (após secagem em forno)	≥1500kg/m ³	≥2000kg/m ³	≥ 2400kg/m ³
Composição	Agregados provenientes de resíduo de alvenaria	Agregados provenientes de resíduo de concreto	Mistura de agregados naturais e agregados reciclados

Na figura 3.8 abaixo se verifica o percentual de substituição do RCD em lugar do agregado natural em vários países. Nas tabelas seguintes (3.4 e 3.5) são descritas as exigências para a confecção do concreto com agregado reciclado e os padrões e recomendações europeias.

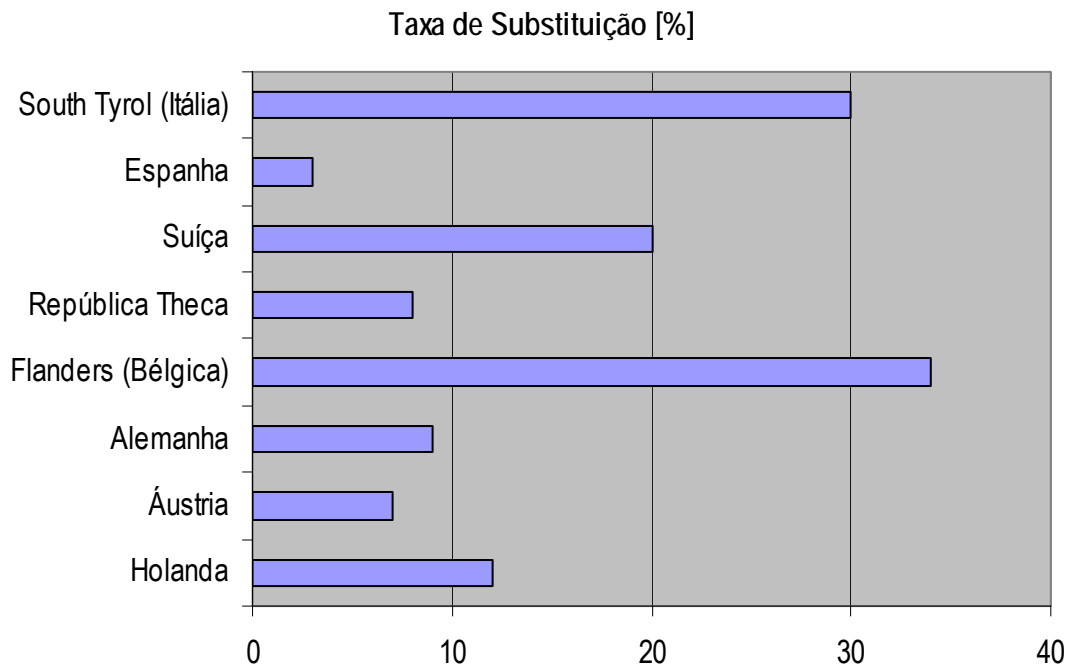


Figura 3.8 – Percentual de substituição do RCD em lugar do agregado natural (MULLER, 2006).

Tabela 3.4 - Exigências para a confecção do concreto com agregado reciclado(MULLER, 2006).

	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Porção de agregado > 4mm		Acima de 100%	
Uso de areia reciclada < 4mm		Não recomendado	
Resistência mecânica máxima	C16/20	C50/60	Sem limite superior
Condições de exposição	⇒ Nenhum teste adicional para concreto usado sob condições secas ou em não-agressivos solos e/ou água, não exposição de gelo-degelo. ⇒ Testes adicionais para concretos usados sob outras condições de exposição.		

Tabela 3.5 - Padrões e recomendações europeias para a confecção do concreto com agregado reciclado (MULLER, 2006).

	Classificação		Substituição	
	Densidade	Composição	Agregados Miúdos	Agregados Graúdos
Bélgica	+	+	Permitido com restrições	Até 100%
Dinamarca	+	+	Limitado (20%)	Até 100%
Alemanha	+	+	Não permitido	Até 45%
Holanda	+	+	Limitado (20%)	Até 20%
Suiça	-	+	Permitido	Dependência da aplicação
Inglaterra	-	+	Não permitido	Até 20%

Os dados acima indicam que não existe uma concordância quanto ao controle e substituição do agregado. Cabe destacar que apesar da recomendação da RILEM alguns países aceitam o uso de finos.

Na Alemanha as restrições são ainda mais específicas e descritas na norma do *Deutsches Institut für Normung* - DIN 4226-100 (Tabela 3.6). Essa norma também exige que a fração fina menor que 0.063mm seja menor que 4% em massa, e que seja feito o controle do efeito de cloretos e sulfetos e da presença de contaminantes lixiviados. É interessante observar que a classificação não segue os parâmetros de classificação dos RCD's segundo a RILEM (Tabela 3.3).

Tabela 3.6 - Norma DIN 4226-100.

Constituintes [% em massa]	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
DIN 4225-100: Agregados reciclados	Resíduo de concreto + areia britada	Resíduo de construção + areia britada	Resíduo de alvenaria + areia britada	Resíduo misto + areia britada
Concreto e agregados naturais.	≥90	≥70	≤20	≥80
DIN 4226-1				
Clinker, tijolo	≤10	≤30	≥80	
Tijolo cal-areia			≤5	
Outros materiais minerais (Ex: tijolos quebrados, concretos de peso leve, gesso, argamassas)	≤2	≤3	≤5	≤20
Asfalto	≤1	≤1	≤1	
Substâncias externas	≤0.2	≤0.5	≤0.5	≤1
Densidade/após forno [kg/m ³]	≥2000	≥2000	≥1800	≥1500
Absorção máxima de água/ 10 min [%]	10	15	20	sem limite

Muller (2006) justifica tais recomendações em função dos efeitos provocados pelos agregados reciclados no concreto: redução da densidade, aumento da

capacidade de absorção de água, maior teor de cimento no concreto (soma do cimento antigo com o novo), aumento da amplitude de variação das propriedades. Como consequência desses efeitos há um aumento da porosidade devido ao agregado mais poroso que leva a uma perda de trabalhabilidade que deve ser compensada pelo uso de plastificante, mais baixa resistência à compressão e menor módulo de elasticidade. Além disso, deve-se dar atenção especial a características do concreto no tocante à retração por secagem, fluência e durabilidade.

Angulo e John (2002) citam que no Brasil, a quase totalidade do agregado produzido pela reciclagem de RCD é utilizada como base de pavimentação, apesar de outras utilizações incipientes como blocos de concreto para pavimentação e vedação. A reciclagem de RCD como agregados para base de pavimentação é um grande avanço, especialmente porque no Brasil mesmo em grandes cidades uma parcela das ruas não é pavimentada. Quando os resíduos após britagem são utilizados como agregados para base e sub-base, normalmente não se tem controle rígido da fração de finos. Entretanto os autores citam que os dados nacionais demonstram que o setor de pavimentação sozinho seria incapaz de consumir integralmente o RCD reciclado como base de pavimentação, até porque parte do agregado natural é utilizada no concreto asfáltico e não todo na base do pavimento.

No Brasil, a utilização desses resíduos como agregados para concreto em substituição aos naturais tem se limitado à fração graúda e praticamente apenas para concreto sem fins estruturais. Hamassaki *et al.* (1996) concluíram em seu trabalho que é viável o uso do resíduo de demolição como agregado fino para a confecção de argamassas. Além disso, os autores sugerem que o agregado de resíduo seja utilizado em argamassas de assentamento ou de revestimento internos.

Zordan (1997) encontrou resultados dos ensaios de compressão, abrasão e permeabilidade, realizados com o concreto confeccionado com entulho, que permitiu concluir que este tipo de concreto atende perfeitamente as exigências de fabricação de peças de concreto utilizadas em drenagem superficial de estradas - como, por exemplo, sarjetas, elementos utilizados na construção de passeios públicos como guias e blocos para calçamento e blocos de concreto para alvenaria sem função estrutural. O autor conclui que a parte graúda utilizada como agregado apresentava aspectos negativos para a resistência do concreto. Isto estaria relacionado à presença de materiais cerâmicos polidos, que ocasionaram a ocorrência de superfícies de ruptura nas suas faces lisas, devido à insuficiente aderência entre

essas faces e a pasta de cimento. Além disso, o autor observou que a absorção de água era bem superior à do agregado tradicional. Isto ocorreria devido tanto à sua grande porosidade como a maior quantidade de finos existentes neste resíduo. As arestas mais arredondadas e a quantidade de terra presente na parcela miúda do entulho possibilitou uma trabalhabilidade superior à oferecida pelos agregados tradicionais (areia e brita), para uma mesma relação a/c. O agregado miúdo de entulho provocou a alteração da coloração do concreto produzido, substituindo o cinza esverdeado característico do cimento por uma tonalidade mais próxima à cor terra.

Em um de seus estudos, Angulo *et al.*, (2003) cita que a fração do resíduo reciclado que pode ser utilizado como agregado graúdo corresponde a 50% do total analisado. Dessa forma, somente 50% da produção nas instalações de reciclagem que o material foi colhido poderiam ser utilizados como agregados para a produção de concretos.

Uma outra possibilidade para utilização de resíduos de demolição é o emprego, nos moldes investigados em países como Holanda, Japão e Espanha, como matéria-prima para cerâmica de revestimento, vidro e cimento. Tais potenciais de utilização são devidos à alta porcentagem de sílica presente na parcela mineral do resíduo da construção. Segundo a literatura de Angulo *et al.*, 2002, a substituição de até 30% da matéria-prima para a fabricação de cerâmica vermelha, de cerâmica de revestimento e de cimento poderia empregar algo em torno de 60% de todo o RCD produzido no Brasil.

Uma possibilidade pouco difundida na literatura, mas utilizada em poucos países é o emprego do RCD poderia ser como agregado para a confecção de concreto estrutural.

3.5. AGREGADOS RECICLADOS PARA CONCRETO ESTRUTURAL

Na literatura é muitas vezes difícil distinguir o uso de RCD para concreto estrutural (tabelas 3.5 e 3.6). Em muitos trabalhos analisam-se resíduos como agregados para concretos sem fins estruturais e em outros para concretos. Raramente são citados resíduos para concreto estrutural. Para efeito dessa revisão, foram considerados neste tópico os trabalhos que tratam especificamente de concretos estruturais ou de concretos duráveis.

Yannas (1977) sugere que o comportamento mecânico do concreto confeccionado com agregado de resíduo rico em argamassa se iguala ao comportamento mecânico do concreto de referência. Fato esse confirmado alguns anos depois por Hansen e Hedegard (1984) que observaram que misturas no concreto que compõe o resíduo têm pequeno ou nenhum efeito sobre as propriedades do concreto fresco confeccionado com esses resíduos.

Em 1997, Zordan realizou um estudo da utilização do entulho como agregado de concreto efetuando uma análise granulométrica e qualitativa para a classificação do mesmo como agregado. O que se notou após a execução dos testes foi que a diminuição do consumo de cimento auxiliou no aumento da resistência. Além disso, a resistência à abrasão mostrou em todos os casos ótima. Em sua conclusão Zordan (1997) indica a utilização do concreto com agregados de entulho para a infra-estrutura urbana, não indicando o mesmo para a confecção de concreto estrutural.

Levy e Helene (2001) confeccionaram, em sua pesquisa, concretos com substituições de agregados graúdos e miúdos naturais por agregados graúdos e miúdos de alvenaria ou de concreto. Os resultados de sua pesquisa indicam que concretos com substituições de até 50% de agregado reciclado graúdo ou miúdo não apresentam problema em relação à penetração de cloretos.

No seu estudo de 2002, Angulo E John após algumas análises não indicam a utilização de RCD em concretos com função estrutural. No entanto, em 2003 Angulo cita que agregados com massas específicas superiores a $2,2\text{kg/dm}^3$ são potencialmente adequados para usos como agregados graúdos em concretos estruturais comuns. Já em 2004, Angulo e John em seus estudos verificaram que nenhuma das amostras analisada atendeu a normalização internacional para o emprego destes agregados para concretos estruturais e apenas 50% das amostras

estavam em conformidade com as exigências físicas da normalização do uso destes agregados para concretos não-estruturais.

Shayan e Xu (2003) estudaram o concreto estrutural confeccionado com agregado reciclado com e sem adições de silicato de sódio, adições de cal e fumo de sílica. Eles concluíram que nenhuma vantagem particular foi encontrada com uso de silicato de sódio. Entretanto o fumo de sílica promoveu uma alta da resistência mecânica. Eles encontram valores de resistência de 50% a 60% maiores. A conclusão que eles chegaram foi que o uso combinado de agregado reciclado e fumo de sílica é uma boa opção para a produção do concreto de alta resistência. Seus dados indicam ser adequada a utilização dos agregados reciclados finos em substituição a até 50% da fração de agregado miúdo. Os RCA passaram satisfatoriamente nos testes de durabilidade - retração por secagem, reação álcali-agregado, carbonatação, resistência a sulfato, permeabilidade rápida a cloretos e proteção a corrosão - quando comparados ao concreto sem RCD.

Oliveira *et al.* (2004) mostram em seus estudos que a substituição de até 20% do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado não altera as características do concreto quando comparado ao concreto de referência (concreto feito com 100% de agregados naturais). Acima desses valores a resistência à compressão do concreto fica comprometida e ocorre o aumento da capacidade de absorção de água. Já o módulo de elasticidade apresenta valores similares nas misturas de até 40% de substituição e valores razoáveis quando o agregado natural é 100% substituído.

Em trabalho recente, Vieira, Dal Molin e Lima (2004) avaliaram o desempenho de concretos sob a ação de cloretos. Seus resultados indicam que o uso do agregado graúdo reciclado no concreto, em proporções convenientemente dosadas, não afeta a resistência à compressão e nem a durabilidade do concreto frente à corrosão das armaduras.

Em seu trabalho Gutiérrez e Juan (2004) estudaram a utilização de agregado reciclado de concreto para concreto estrutural. Após análises concluíram que algumas características do agregado reciclado se apresentaram abaixo do que é requerido para o agregado natural destinado ao concreto estrutural. A sugestão dos autores para contornar essa limitação do uso do agregado reciclado é misturar uma porcentagem de agregado reciclado ao agregado natural, dessa forma melhorando as características do agregado reciclado. A porcentagem indicada pelos

autores é substituir 20% de agregado natural pelo agregado reciclado graúdo. Entretanto os autores frisam que aos agregados reciclados a serem substituídos não podem absorver mais do que 7% de água e a densidade devem ser menor do que 2.251kg/m^3 . Tanto o limite de absorção quanto o limite da densidade estão de acordo com as normas japonesas. Um controle dos resíduos que chegam à usina e se destinam ao uso em concreto estrutural pode ser feito através de um teste de resistência mecânica no concreto original. Em estudos já efetuados anteriormente é sugerido utilizar um concreto como agregado para concreto estrutural quando o mesmo apresentar uma resistência a compressão maior que 25MPa.

Segundo os mesmos pesquisadores, duas particularidades devem ser consideradas na avaliação do agregado reciclado para que o mesmo possa ser utilizado na confecção do concreto estrutural: as novas propriedades desses agregados precisam ser controladas e a origem dos mesmos resulta em uma grande heterogeneidade na produção. Essas diferenças entre agregado reciclado e agregado natural nos levam a concluir que antes que as normas padrões sejam criadas é necessário efetuar dois trabalhos que antecedem a criação das mesmas. Primeiro é necessário confirmar se realmente os testes atuais aplicados para o agregado natural são adequados para avaliar os agregados reciclados. Além disso, é necessário o desenvolvimento de novos testes para avaliar as propriedades que são apresentadas pelos agregados reciclados. Segundo a uniformidade da produção de agregado reciclado nas usinas deve ser estudada de forma a se evitar as diversas influencias na qualidade final do concreto.

Silva e Pelisser (2005) mostram em seu estudo que o módulo de elasticidade para substituição de até 30% do agregado natural graúdo pelo agregado reciclado graúdo apresentou valores equivalentes ao que seria previsto de acordo com a norma ABNT NBR6118 a partir dos valores da resistência à compressão. Acima desses valores o módulo de elasticidade apresenta valores abaixo dos valores estimados pela mesma norma. Segundo os autores a resistência a compressão diminuiu de forma significativa com o aumento do fator água/cimento (a/c). Nesse caso os autores não associaram a perda da resistência devido à substituição de agregados naturais pelos agregados artificiais. Entretanto é possível concluir com essa pesquisa que o concreto confeccionado com a menor porcentagem de substituição de agregado (30%) apresenta os melhores resultados.

Muller (2006) cita que na Alemanha as diretrizes para a confecção do concreto armado seguem a filosofia de que o concreto confeccionado com agregado reciclado não pode apresentar alterações quando comparado ao concreto comum. Além disso, essas diretrizes aceitam para uso na produção do concreto estrutural com resistência na faixa de 30-37MPa somente agregados reciclados maiores que 2mm do tipo1 e tipo2 (Tabela 3.4), agregado fino proveniente dos britadores são excluídos para o uso como agregado. Os concretos produzidos não podem ser leves ou protendidos. Devem ser utilizados em ambientes secos ou de baixa umidade. O aumento do teor de RCD em substituição aos agregados naturais potencializa o ataque do meio ao concreto.

Segundo pesquisadores portugueses Evangelista e Brito (2006), apesar de não ser usual, é necessário o estudo para o emprego da fração miúda do RCD como agregado em função da quantidade gerada nas usinas de beneficiamento. Em seus estudos eles indicam que a fabricação de concretos com até 30% levam a produção de concretos duráveis.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Deseja-se que concretos estruturais apresentem bom desempenho mecânico e sejam duráveis. Sendo assim, o estudo do comportamento de concretos estruturais confeccionados com agregados miúdos provenientes de resíduos de concreto se inicia neste trabalho através da análise do comportamento das argamassas que comporiam a matriz do concreto estrutural convencional. Optou-se por uma argamassa com fator água/cimento igual a 0,5 e resistência mecânica a compressão em torno de 20MPa e consumo de cimento de 300kg/m³. Neste trabalho, diferentemente do usual, fixou-se o consumo de cimento na determinação do traço, no lugar de se especificar a trabalhabilidade. Isso ocorreu em função de trabalhos anteriores que mostraram a influência desse consumo sobre as propriedades do compósito, conforme Zordan (1997), Altheman (2002), Leite (2001).

A possibilidade de utilização do agregado reciclado miúdo para confecção de argamassa para concreto estrutural convencional se deu, neste trabalho, pela análise comparativa do desempenho de argamassas fabricadas com diferentes teores de resíduos e areia natural. Visando isolar o efeito das características regionais da areia natural o estudo utilizou uma areia padronizada nacionalmente (Normal) e areia típica da região metropolitana de Belo Horizonte. O procedimento experimental consistiu em submeter corpos-de-prova de concreto confeccionados com e sem adições de agregados reciclados a ensaios mecânicos/físicos, químicos e à caracterização microestrutural.

Os métodos adotados seguem os sugeridos em trabalhos nacionais considerados como referência nacional e internacional, de acordo com Zordan (1997), Leite (2001), Levy (2001) e Evangelista e Brito (2006). As simplificações adotadas nessa pesquisa (não utilização de agregados graúdos, resíduos apenas de concreto, consumo de cimento pré-fixado e comparação com areia Normal) visam isolar e minimizar as inúmeras variáveis a serem analisadas durante o projeto maior para estudo de Concretos Estruturais fabricados com agregado miúdo de RCD, no qual este trabalho constitui a primeira fase (Figura 4.1).

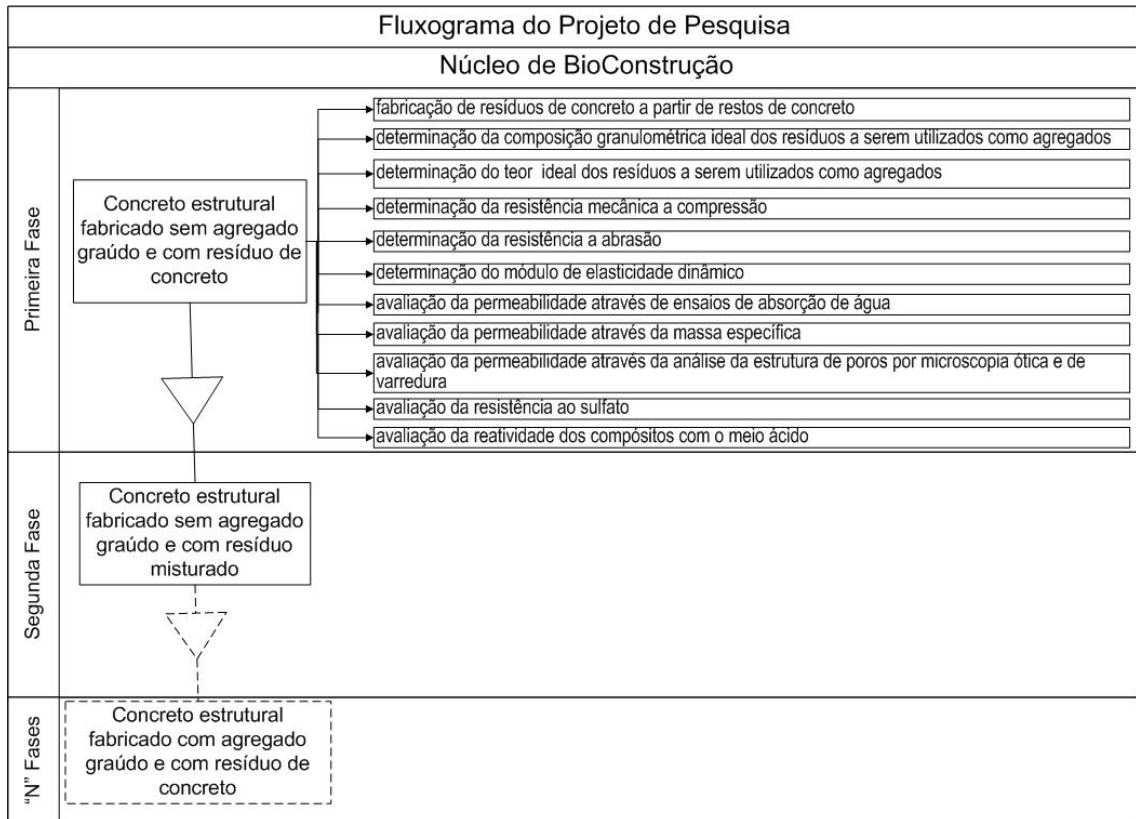


Figura 4.1- Fluxograma do Projeto de Pesquisa

4.1. MATERIAIS

Foram fabricados três tipos de concretos. Dois chamados de referência: um confeccionado com 100% de areia média natural, quartzosa, lavada, comprada na região metropolitana de Belo Horizonte, e o outro com 100% de areia beneficiada (material quartzoso, extraído do Rio Tietê, na região da cidade de São Paulo, produzido e fornecido pelo Instituto de Pesquisas tecnológicas do Estado de São Paulo segundo a NBR 7214(1982)). A areia Normal foi utilizada visando detectar as possíveis influências das características locais do agregado miúdo. Na fabricação dos concretos de resíduo foi empregado agregado miúdo obtido por britagem em laboratório de restos de concreto usinado (areia artificial).

Todos os concretos foram fabricados com cimento CP III 32 - RS e água potável disponibilizada para consumo. Essa classe de cimento foi escolhida por ser a mais empregada na região metropolitana de Belo Horizonte.

De acordo com experimentos preliminares, definiu-se que os parâmetros para a confecção dos concretos seria adoção da relação água/cimento fixa e igual a

0,5, e do teor de agregado de 67% em massa. No estudo de concreto é usual comparar compostos que poderão ser utilizados para um mesmo fim, para isso se mantém a consistência e não o fator água/cimento. Neste trabalho, diferentemente dos procedimentos correntes, optou-se por fixar a proporção dos constituintes, no lugar de se estabelecer o consumo de cimento e a consistência. Tal postura se deu em função da necessidade de se avaliar mesmo que qualitativamente a influência da porosidade/granulometria do agregado na consistência da mistura. O consumo de cimento variou em torno de 300kg/m^3 .

Os concretos foram fabricados sem agregado graúdo e com agregado miúdo de granulometria controlada. Testes preliminares indicaram que a composição granulométrica que permitiria melhor homogeneização, e um intervalo de grãos comuns aos três tipos de areia seria a mistura, em partes iguais, de materiais retidos nas peneiras de 0,3mm, 0,6mm e 1,2mm. Não foram utilizados finos abaixo de 0,3mm de modo a se ter maior controle da absorção de água pelo agregado. Foram utilizados três tipos de agregados miúdos: areia Normal, areia natural e resíduo de concreto. Os concretos fabricados com areia natural e Normal foram adotados como referência para o estudo.

A areia Normal utilizada foi produzida e fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. A areia natural foi caracterizada segundo as prescrições das normas NBR 9941(1987) – “Redução de amostra de campo de agregados para ensaios de laboratório”, NBR 9776(1987) – “Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco *Chapman*”, NBR 7219(1987) - “Agregado em estado solto – determinação da massa unitária”, e NBR 7219(1987) – “Determinação do teor de argila e materiais friáveis”. Para a obtenção da distribuição granulométrica adotada, a areia natural foi seca ao ar, peneirada, sendo utilizado apenas as frações retidas nas peneiras 0,3, 0,6 e 1,2mm.

A areia artificial foi produzida por quebra e britagem de corpos-de-prova de concreto em forma de cilindros de 10cm de diâmetro por 20cm de comprimento, coletados aleatoriamente na Usina de Concreto da empresa Lafarge Brasil S.A. – Unidade Olhos D’Água. As amostras coletadas foram transportadas ao laboratório onde tiveram seus tamanhos reduzidos. A quebra se deu em duas etapas. Primeiramente por prensagem/martelamento. Em seguida foi feita a trituração em um britador de mandíbula (figura 4.2).



Figura 4.2 – Britador de mandíbula usado para triturar os resíduos de concreto.

Foram testadas duas aberturas de britagem, 5 e 10mm, visando analisar a granulometria gerada pelo procedimento adotado. O material moído foi peneirado e separado por faixa granulométrica utilizando o mesmo procedimento adotado com areia natural. Como a areia artificial utilizada é proveniente de resíduos, ela foi avaliada segundo a norma NBR 15116(2004) – “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural” que atende às exigências do Comitê Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Deve ser ressaltado que esta norma se aplica a concretos para fins não estruturais. No entanto, na falta de exigências específicas, acredita-se que o agregado deve atender no mínimo a essa norma.

Além dos concretos de referência (concretos com 100% de areia natural e 100% de areia do IPT), foram produzidos diferentes grupos de concreto, nos quais se substituiu a areia natural e a areia Normal pela areia de resíduo de construção. Na tabela 4-1 podem ser vistas as diferentes substituições analisadas.

Tabela 4.1 - Composição dos compostos confeccionados.

Areia Artificial (%)	Areia Comum (%)	Areia IPT (%)
100%	0%	0%
0%	100%	0%
0%	0%	100%
25%	75%	0%
25%	0%	75%
50%	50%	0%
50%	0%	50%
75%	25%	0%
75%	0%	25%

4.2. MÉTODOS

Estabelecidas as composições a serem estudados, o procedimento experimental consistiu na confecção do compósito, moldagem, cura dos corpos-de-prova em câmara úmida e na realização de ensaios para avaliação do desempenho mecânico e durabilidade dos compostos cimentícios. Essas características foram avaliadas a partir dos seguintes testes:

- ✓ resistência mecânica a compressão nas idades de 28 e 150 dias;
- ✓ resistência a abrasão na idade de 60 dias;
- ✓ módulo de elasticidade dinâmico nas idades em torno de 28 e 150 dias;
- ✓ ensaios de absorção de água na idade de 60 dias;
- ✓ determinação da massa específica na idade de 28 dias;
- ✓ análise da estrutura de poros por macroscopia ótica e de varredura na idade de 60 dias;
- ✓ ensaio de carbonatação na idade de 100 dias;
- ✓ resistência ao sulfato na idade de 150 dias;
- ✓ reatividade dos compósitos com o meio ácido na idade de 150 dias.

Em função das disponibilidades de equipamentos e ressaltando ser este trabalho uma pesquisa exploratória e não tecnológica, alguns desses ensaios não seguiram os padrões. Situação similar foi adotada por muitos pesquisadores neste campo, como Zordan (1997), John (2000), Levy e Helene (2001), Leite (2001) e Altheman (2002). Alguns ensaios foram realizados em datas que não coincidiram com os de resistência à compressão. Isto ocorreu devido a problemas inerentes a trabalhos experimentais (disponibilidade física e funcional dos equipamentos), e não

compromete a análise dos resultados, pois em função dos objetivos da pesquisa, analisou-se os resultados de cada ensaio isoladamente, sem relacioná-los, visando detectar apenas a influência do teor de substituição em cada propriedade medida.

4.2.1. Confeção dos Corpos-de-Prova

Como não foi utilizado o agregado graúdo, a mistura dos concretos seguiu o procedimento normalmente utilizado para produção de corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão do cimento. (NBR 7215, 1996). Não foi feita nenhuma compensação da taxa de absorção dos agregados reciclados, visando um maior controle da relação água/cimento durante a produção dos traços. Não foi utilizado nenhum parâmetro para controle da trabalhabilidade dos concretos. Isto ocorreu em função do fato de que trabalhos anteriores indicam serem os ensaios com componentes dinâmicos, como o de tempo de vibração VeBe, os mais adequados para estudo. Isso ocorreria uma vez que os concretos com agregados reciclados apresentam uma variabilidade muito alta nos ensaios de abatimento do tronco de cone, e por analogia nos ensaios de consistência usuais para argamassas. Além de apresentarem baixos valores de abatimento, apresentam maior facilidade de adensamento, de acordo com Zordan (2001). Isto estaria relacionado à forma mais arredondada dos grãos britados, que facilitaria a trabalhabilidade para uma mesma relação a/c, segundo Zordan (1997). A trabalhabilidade imposta nos trabalhos de Altheman (2002), fez com que os concretos muito pobres (180 a 242 kg de cimento/m³) tivessem seus valores de a/c bem elevados, impraticáveis na verdade.

Após a confecção dos compósitos, foi feita moldagem manual de corpos-de-prova cilíndricos de 5cm de diâmetro por 10cm de altura. Todos os corpos-de-prova foram moldados e curados de acordo com a prescrição do ensaio de resistência. Foram moldados em torno de 18 corpos-de-prova para cada traço estudado. A cura dos corpos-de-prova foi feita ao ar, nas primeiras 24 horas. Após esse período foram desmoldados e submetidos à cura em câmara úmida até a idade em que foram encaminhados para caracterização física, mecânica e microestrutural.

4.2.2. Resistência a Compressão

Para a realização desses ensaios foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10cm de altura. Os ensaios foram realizados nas idades de 28 e 150 dias. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados seguindo os procedimentos usuais (NBR 7215(1991) – “Determinação da resistência à compressão do cimento”) em uma máquina *Amsler* com controle manual de capacidade de aplicação da carga de até 100ton. Os corpos-de-prova forma retirados com antecedência de 24h da câmara úmida. Antes do ensaio, os corpos-de-prova foram capeados com enxofre, para que houvesse uma regularização das superfícies de aplicação de carga. Para cada idade foram ensaiados de 2 a 3 corpos-de-prova por traço de concreto.

4.2.3. Módulo de Elasticidade Dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade de concretos apresenta dificuldades, pois o concreto é um material que não obedece à lei de Hooke tanto sob esforços de compressão como de tração. Dessa forma, muitas vezes o termo é associado a uma dada resposta do material na curva tensão-defomação. Outras vezes o módulo é determinado de forma indireta através de fórmulas empíricas que relacionam a resistência à compressão e a massa específica. Neste trabalho, o módulo de Young (E) foi estimado pela frequência natural de vibração do material. O princípio fundamental do método se baseia na teoria de propagação da velocidade do som (vibração mecânica) em meios sólidos. Existe uma correlação entre a velocidade de propagação do som (v) em uma amostra de determinado tamanho e forma, sua massa específica (ρ) e suas características elásticas:

$$v \propto \left(\frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

Um método usual de determinação da frequência fundamental é o de ressonância. O método de frequência ressonante utiliza ondas geradas por impacto ou eletromecanicamente. Normalmente o módulo assim obtido é chamado módulo dinâmico, e é calculado a partir da frequência fundamental de vibração, da massa,

das dimensões, e da forma do corpo-de-prova, conforme Asby (1996), Coutinho e Gonçalves (1998), ASTM-C215, (2002) e Mindess *et al.* (2002).

$$E \propto (n^2 \rho) \quad (3.2)$$

A rigor esse método não poderia ser aplicado a materiais não homogêneos, como o concreto. No entanto, bons resultados têm sido obtidos desde que o corpo-de-prova tenha dimensões compatíveis com o tamanho dos agregados, e que seja feito um número adequado de medidas de modo a minimizar a influência da heterogeneidade do material. Como o ensaio não é destrutivo, inúmeras medidas podem ser feitas no mesmo corpo-de-prova. Também se pode avaliar de forma eficaz a evolução da propriedade com o passar do tempo, e correlacioná-la com a resistência mecânica, sem que os efeitos impostos pela moldagem afetem os resultados.

Neste trabalho os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foram feitos nas idades de 28-35 e 140-150 dias, através da determinação da frequência de vibração dos átomos utilizando ondas geradas eletromecanicamente. O período de medição foi estendido, pois o ensaio exige várias medidas por corpo-de-prova, calibrações e cuidados que impossibilitaram que todas as amostras fossem realizadas no mesmo dia. Foi utilizado um aparelho de frequência ressonante marca *Elle International* (figura 4.3). Os ensaios se basearam nas recomendações da norma *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens da American Society For Testing And Materials*. (ASTM-C215, 2002) para determinação do módulo longitudinal.

Aos corpos-de-prova foram aplicadas vibrações com frequência na faixa de 5.000 – 20.000Hz. A faixa de frequência e as voltagens adotadas se basearam em valores que levassem a obtenção da menor amplitude da frequência para uma dada frequência mínima. Foram feitas 10 medidas para cada corpo-de-prova, sendo que para um mesmo traço se tinha em média 18 corpos-de-prova. A figura 4.3 mostra a montagem para determinação do módulo de elasticidade dinâmico transversal do concreto.

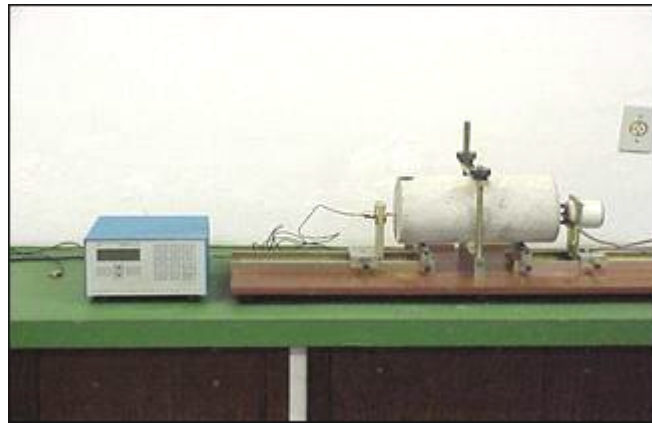


Figura 4.3 – Fotografia da montagem para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto: módulo transversal.

Para a determinação do módulo foi necessária a determinação da massa específica de cada corpo-de-prova. Sendo este um estudo comparativo, adotou-se o simples procedimento de verificação das massas dos corpos-de-prova cilíndricos após serem retirados da câmara úmida e secos ao ar.

4.2.4. Resistência à Abrasão

Os ensaios de resistência à abrasão visam estimar a vida útil esperada de uma dada superfície e/ ou avaliar os efeitos dos materiais e procedimentos de cura ou acabamento sobre esta propriedade, de acordo com Neville (1997) e Mehta e Monteiro (2005). No caso do concreto, ainda não existe no Brasil uma norma específica para desgaste à abrasão. Neste trabalho a exemplo de Altheman (2002), o desgaste superficial do concreto foi analisado com base no método descrito pela NBR 12.042 (1992) - “Materiais Inorgânicos - Determinação do Desgaste por Abrasão”. Os corpos-de-prova foram moldados manualmente, curados em câmara úmida e ensaiados aos 60 dias de idade. Para o desgaste dos corpos-de-prova foi utilizado o equipamento apresentado na figura 4.4.



Figura 4.4 – Fotografia do equipamento para ensaio de abrasão.

Para este ensaio, foram utilizados discos obtidos por corte a seco de corpos-de-prova cilíndricos de dimensões de 10x5cm. Foram ensaiados 2 corpos-de-prova para cada amostra de concreto. Na máquina de ensaio, o desgaste dos corpos-de-prova foi obtido através do atrito entre sua superfície de uso e a superfície de um anel de ferro fundido, que foi continuamente abastecido com areia (abrasivo) de granulometria 0,15mm, permanecendo em movimento de rotação até que foram atingidos os 1000m de percurso. Comumente após esse percurso é medida a perda de espessura do corpo-de-prova, que é a variável que determina o desgaste por abrasão. Devido a imprecisão das medidas, optou-se, neste estudo, em medir a abrasão, também, pela diferença de peso dos corpos-de-prova antes e após o ensaio.

4.2.5. Absorção de Água

A permeabilidade foi avaliada pela capacidade de absorção de água do corpo-de-prova. Para tal, foi considerada a variação de massa da amostra seca em

estufa antes e após 24h de imersão em banho de água à temperatura de 25°C. Esses ensaios foram realizados em amostras após 60 dias de cura. Foram ensaiadas 3 amostras nos traços analisados. Os corpos-de-prova foram colocados em uma estufa a 100°C, onde permaneceram pelo tempo necessário para que a massa de cada amostra se mantivesse constante após três medidas consecutivas, espaçadas de 1.800s. Ao serem retirados da estufa, os corpos-de-prova foram pesados e colocados submersos em água por 24h, e então novamente pesados. O índice de absorção de água foi calculado através da variação percentual da massa antes e após a imersão em água. Foram realizados dois testes para cada traço estudado.

4.2.6. Carbonatação

O processo de carbonatação natural é relativamente lento devido à baixa concentração do gás no meio ambiente. Comumente a análise do processo de carbonatação é feita acelerando-se a reação, a fim de se obter resultados mensuráveis em poucos dias. Para isto são utilizadas câmaras de gás carbônico (CO₂) para acelerar a reação através do controle da concentração do gás e da umidade relativa em seu interior. Segundo Levy (2001) não é possível realizar a comparação pura e simples de vários resultados produzidos por grande número de pesquisadores nacionais e estrangeiros, sobre carbonatação, uma vez que tais resultados foram obtidos em condições experimentais diferentes.

Neste trabalho, por falta de equipamentos, se fez um estudo bastante rudimentar, apenas no intuito de se avaliar comparativamente de forma grosseira a carbonatação dos concretos estudados. Utilizou-se como câmara um dispositivo artesanal (recipientes de vidros adaptados) que foram preenchidos com gases provenientes do cano de descarga de carros a gasolina. Segundo os fabricantes do catalisador do cano de descarga, o gás é saturado de CO₂ e contem em torno de 70% de água. Esses recipientes eram constantemente aquecidos, de forma a aquecer os gases, e aumentar, mesmo que pouco, a pressão no recipiente. Tal pressão não foi medida. Foram analisados dois corpos-de-prova para cada traço. Após 100 dias de cura os corpos-de-prova foram colocados nas câmaras artesanais por 28 dias. Cada corpo-de-prova foi então partido ao meio, e aspergido com

solução de fenolftaleína na face de ruptura. Esta solução mantém a cor vermelho carmim nas regiões com pH superior a 9; abaixo deste valor a mesma fica incolor. Dessa forma é possível distinguir a região carbonatada da não carbonatada. Foram feitas 2 leituras com paquímetro digital com aproximação de 0,01 mm em cada corpo-de-prova.

4.2.7. Ataque por Sulfato

Os métodos de avaliação da resistência ao ataque de sulfatos baseiam-se, de uma forma geral, em medir os efeitos das reações entre o sulfato e a pasta de cimento; com o objetivo de verificar as reações causadas pela expansão e determinar a queda da resistência mecânica, dada pela deterioração na coesão dos produtos de hidratação do cimento. Os mais usuais são os ensaios acelerados, que consistem em submeter as amostras a condições agressivas muito mais severas do que as encontradas nos ambientes onde são expostos os concretos e argamassas. Estes ensaios são comumente utilizados para verificar o desempenho de certos cimentos em determinados ambientes, como estações de tratamento de esgoto. No Brasil, não há nenhum ensaio normalizado sobre o ataque por sulfatos. No entanto, o método de Koch e Steinegger (1960) é muito difundido no país, segundo Altheman (2002). O método consiste em confeccionar prismas de argamassa com areia normal no traço 1:3 e a/c 0,60. Parte das amostras é curada por imersão em solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) a 10%, e parte permanece em água destilada. Após a cura, os prismas são ensaiados à flexão por tração. A resistência ao ataque por sulfato, definida como índice de resistência química (R_n), é dada pela razão da resistência à flexão dos prismas imersos na solução de sulfato pelos prismas imersos em água. Em seu método, Koch e Steinegger (1960) especificam que um cimento será resistente ao ataque de sulfatos quando o índice R_n atingir valor igual ou superior a 0,70 na idade de 77 dias.

O método acima visa avaliar a resistência do cimento ao ataque de sulfatos. Sendo assim, neste estudo exploratório cujo objetivo é avaliar a influência dos agregados reciclados na durabilidade do concreto, optou-se por uma adaptação do método. Corpos-de-prova cilíndricos de 5x10cm, confeccionados com areia comum, areia normal e areia de resíduo, após a cura por 150 dias em câmara úmida, foram

imersos em tanques contendo água destilada e solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) a 10% por 21 dias. O método propõe 77 dias, no entanto, por problemas operacionais, o ensaio foi realizado após 150 dias. Após a secagem natural por 24h os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão. Foram ensaiados 2 corpos-de-prova por cada traço analisado. A opção por ensaios de compressão se deu devido a informações da literatura, como Koch e Steinegger (1960), Marciano (1993, de que cura com sulfato altera as dimensões das amostras, causando grandes dispersões nos ensaios de flexo-tração, que é mais sensível por envolver pequenas tensões.

4.2.8. Reação dos Compósitos ao Ataque de NaOH

A reação álcali-agregado normalmente se dá pela reação da sílica presente no agregado e os álcalis do cimento. O produto dessa reação é um gel que na presença de umidade expande levando o concreto à fissuração. Shayan e Xu (2003) sugerem que a suscetibilidade do concreto à reação álcali-agregado pode ser avaliada através da comparação entre medidas de corpos-de-prova submetidos ou não à imersão em NaOH (concentração 1 molar) por 21 dias à 80°C. Os autores consideram que variações inferiores a 0,10% indicam ser o agregado não-reativo. Em função das disponibilidades do laboratório avaliou-se neste trabalho a reação álcali-agregado de forma similar só que à temperatura ambiente após 150 dias de cura. A essa adaptação do ensaio se deu o nome de reatividade dos compósitos com o meio ácido.

4.2.9. Análise Macroestrutural

A análise microestrutural foi realizada com dois objetivos: estimativa da porosidade das amostras, e análise da interface pasta-agregado miúdo. Para isso, amostras de 1cm de área superficial, obtidas por corte a seco com disco diamantado da parte interna de corpos-de-prova cilíndricos de cada traço, foram preparadas para análise da microestrutura. A análise macroscópica foi realizada por via ótica e eletrônica de varredura. Na análise ótica, as superfícies de interesse das amostras foram lixadas (lixas de 100 e 240 mesh) após o corte realizado a seco. A limpeza subsequente das mesmas foi feita utilizando ar comprimido, e as imagens foram

obtidas com uma lupa *Leica 376788*. Na análise por microscopia eletrônica, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura *Jeol JSM 6360LV* com imagem de elétrons secundários (MEV - SEI) e análise por espectrometria de energia dispersiva de raios-X *Thermo Noran Quest* (EDS). Para análise por microscopia eletrônica, a preparação consistiu em limpeza da superfície com ar comprimido e metalização.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com os métodos descritos no capítulo 4, e suas respectivas análises são relatados a seguir. Esses dados são apresentados em dois grandes grupos. O primeiro se refere à caracterização das matérias primas. O segundo à caracterização dos concretos fabricados. Analisaram-se os resultados de cada ensaio isoladamente, comumente sem relacioná-los, com o objetivo de detectar apenas a influência do teor de substituição em cada propriedade medida. Isto ocorreu pois alguns ensaios foram realizados em datas que não coincidiram com os de resistência à compressão devido a problemas inerentes a trabalhos experimentais.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Para fabricação dos concretos estudados foram utilizados cimento *Portland* CP III 32-RS, água, areia natural (comum e do IPT) e concreto britado.

5.1.1. Cimento *Portland* CP III 32 - RS

O aglomerante utilizado foi o cimento CP III 32 – RS, um cimento classe 32, com resistência à compressão média de 35MPa, que apresenta alta resistência aos sulfatos e baixo calor de hidratação, e que é inibidor da reação álcali-agregado. É constituído por clínquer de alta qualidade, escória de alto forno, gesso e materiais carbonáticos. As propriedades do cimento utilizado no estudo são apresentadas nas tabelas abaixo.

Tabela 5.1 - Propriedades físicas do cimento CP III 32 - RS (fornecidas pelo fabricante).

Propriedades	Valor
Retido na peneira 75mm (%)	$\leq 8,0$
Início de pega (h)	≥ 1
Fim de pega (h)	≤ 12
Resistência aos 3 dias (MPa)	≥ 10
Resistência aos 7 dias (MPa)	≥ 20
Resistência aos 28 dias (MPa)	≥ 32

Tabela 5.2 - Propriedades químicas do cimento CP III 32 - RS.

Componente	(%)
CaO	65,40
SiO ₂	19,06
Al ₂ O ₃	4,91
Fe ₂ O ₃	2,94
P.F.	$\leq 4,6$
SO ₃	$\leq 4,0$
CO ₂	$\leq 3,0$
Resíduo insolúvel	$\leq 1,5$

5.1.2. Água

A água utilizada para a confecção dos concretos foi a água potável disponibilizada pela COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais) na região metropolitana de Belo Horizonte. A composição da água no período dos experimentos segundo a empresa é a apresentada na tabela 5.3 abaixo.

Tabela 5.3 - Propriedades físicas e químicas da água utilizada no trabalho e fornecidas pela COPASA no período de 06/2006 à 08/2006.

Parâmetro	Unidade	Número de amostras		Valor Médio
		Mínimo	Analizados	
Cloro	Mg/L Cl	1857	2033	0,99
Coliformes totais	NMP/100mL	1857	2028	97,29%
Cor	UH	429	533	0,42
Escherichia Coli	NMP/100mL	0	56	100,00%
Fluoreto	Mg/L F	216	322	0,81
Turbidez	UT	429	533	0,25
PH	-	429	535	8,39

5.1.3. Areia Natural

Na confecção dos concretos empregou-se como agregado miúdo dois tipos de areia natural, ambas quartzosas. A primeira, uma areia comum lavada, disponível na região metropolitana de Belo Horizonte e adquirida em um depósito de construção. A segunda uma areia tratada, chamada de areia Normal. O uso da areia Normal se deu com o objetivo de detectar possíveis influências das características locais da areia natural.

Os resultados dos ensaios de análise granulométrica, massa específica, impurezas orgânicas, argila em torrões e material pulverulento da areia comum são apresentados de forma sucinta na tabela 5.4. A distribuição granulométrica da areia não é apresentada, pois no trabalho se utilizou apenas determinadas frações em peso fixo.

Tabela 5.4 – Características físicas da areia natural.

Descrição	Valores
Densidade real (kg/m ³)	2590
Módulo de finura	2,37
Impurezas orgânicas (ppm)	<300
Argilas em torrões (%)	1,1
Material pulverulento (%)	1,2

A análise desses dados indica que é uma areia de densidade normal, de acordo com Somayaji (2001). Segundo a norma NBR 7211 (2005) esse material pode ser utilizado como agregado miúdo para concreto. O módulo de finura não foi um dado relevante para o trabalho, pois se optou pela utilização de uma composição granulométrica específica. Para obtenção das quantidades adotadas, a areia natural foi seca ao ar, peneirada, sendo utilizado apenas as frações retidas nas peneiras 0,3, 0,6 e 1,2mm. Esses valores foram escolhidos, pois a porcentagem de material com 2,4mm nesta areia praticamente inexistente.

A areia Normal utilizada foi extraída do Rio Tietê, na região da cidade de São Paulo, beneficiada e fornecido pelo IPT do Estado de São Paulo. De acordo com o fabricante ela atende as especificações da normalização vigente.

5.1.4. Caracterização do Concreto Britado

O terceiro tipo de agregado miúdo utilizado nos estudos foi proveniente da britagem de corpos-de-prova de concreto fabricados na Usina de Concreto da empresa Lafarge Brasil S.A. – Unidade Olhos D'Água. Após a quebra por prensagem e martelamento, foram testadas duas aberturas de britagem, 5 e 10mm, visando analisar a granulometria gerada pelo procedimento adotado. Na tabela 5.5 são apresentadas as parcelas encontradas após a britagem seguida por peneiramento por 2 minutos. Foram apresentadas apenas as porcentagens retidas em detrimento das porcentagens acumuladas em função da especificidade do trabalho que adotou uma composição granulométrica fixa. Os parâmetros referentes à abertura e ao tempo foram escolhidos em função do equipamento e de procedimentos de peneiramento mais usuais, respectivamente.

Tabela 5.5 - Frações granulométricas obtidas por britagem com aberturas de 5 e 10mm.

Peneiras (mm)	Material Retido (g)						% Retida Média	
	Abertura 5mm			Abertura 10mm			Abertura 5mm	Abertura 10mm
6,3				455,5	5542,8		52	
4,8	281,3	300,3	431,6	3322,6	126,6	943	34	11
2,4	292	315,9	351,6	2964	174,6	1366,1	32	16
1,2	149,9	151,9	110,5	1234	102,8	465,1	14	8
0,6	105,1	95,9	49	784	60,3	654,7	8	6
0,3	66,6	53,3	22,1	443,5	30,1	217,9	5	3
0,15	2,2	1	0,2	14	0,5	1,3	0	0
Fundo	99,2	79,8	33,8	693	46	315,7	7	4
Total	996,3	998,1	998,8	9455,1	996,4	9506,6	100	100

A análise dos dados acima mostra que a britagem para a abertura de 5mm produz uma maior quantidade de material compreendido entre 4,8 e 1,2mm. Já na britagem com abertura de 10mm a maior fração gerada foi de 6,3mm. Como o trabalho foca o uso de agregado miúdo, e a distribuição granulométrica da areia comum utilizada (Tabela 5.4) e do IPT impõe o uso de material de 0,3 até 1,2mm, optou-se pela britagem seqüencial utilizando as duas aberturas.

O material britado foi peneirado e separado por faixa granulométrica utilizando o mesmo procedimento adotado com areia natural. Como o agregado artificial é proveniente de resíduos, ele foi avaliado segundo a norma NBR 15116

(2004), que atende às exigências do Comitê Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Caracterização da areia artificial segundo a norma NBR 15116 de 9/2004 - Agregados reciclados de resíduos.

Propriedades	Valor	De acordo com a norma
Composição Granulométrica	ABNT NBR 7181	Não se aplica
	ABNT NBR NM 248	Não se aplica
	Dimensão máxima característica	Não se aplica
	Teor de material passante na # 75mm	Não se aplica
Teor de material passante na # 042mm	Não se aplica	
Absorção de água do agregado miúdo	11%	Atende
Torrões de argila e materiais friáveis	1%	Atende
Índice de forma (agregado graúdo)	Não se aplica	
Índice de suporte Califórnia e expansibilidade	Não se aplica	
Composição de agregado graúdo	Não se aplica	
Percentual de materiais não minerais no agregado miúdo	0%	Atende
Teor de cloretos	0%	Atende
Teor de Sulfatos	0%	Atende

Observa-se pela análise da tabela 5.6 que não foi feita a caracterização granulométrica do resíduo de concreto, como preconiza a norma NBR 15116 (2004). Isso se deve ao fato de que foi pré-estabelecida uma composição granulométrica que independe das características do agregado. Por outro lado, a tabela 5.6 indica que o resíduo nos itens que foram analisados atende aos requisitos da norma NBR 15116 (2004). No entanto, deve ser ressaltado que esta norma se aplica a concretos para fins não estruturais, mas na falta de exigências específicas, acredita-se que o agregado deve atender no mínimo a essa norma. O índice de absorção de água atende a normalização brasileira. No entanto, a norma alemã sugere uma absorção máxima de 10%, só que as condições de ensaio são diferentes (tabela 3.6).

A massa específica real média dos concretos britados medida pelo método de *Chapman* foi de 2410kg/m³, 4% inferior à da areia comum. Esse resíduo não se encaixa perfeitamente na classificação dos RCD segundo a RILEM (tabela 3.3): seria do tipo III só que proveniente apenas de resíduos de concreto. Isto poderia estar relacionado à utilização de concretos mais pesados para confecção dos agregados, uma vez que a massa específica do concreto estrutural deve ser maior

2.000Kg/m³, não excedendo 2800Kg/m³ (item 3.2). Tomando como referência a norma alemã, o resíduo seria do tipo I (tabela 3.6)

5.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS PARA CONCRETOS

Com as matérias primas descritas acima foram fabricados três tipos de concretos. Dois chamados de referência: um confeccionado com 100% de areia comum e o outro com 100% de areia Normal. Na fabricação das argamassas de resíduos para concretos, terceiro tipo, foi empregado como agregado miúdo o concreto obtido por britagem em laboratório de restos de concreto usinado. Também foram avaliados compósitos confeccionados com diferentes combinações de agregados naturais e de concreto britado.

Todos os compósitos foram fabricados utilizando cimento *Portland* CP III 32, na proporção de 1kg de aglomerante por 3kg de agregado miúdo, água potável, e fator água/cimento igual a 0,5. O consumo de cimento foi de 300kg/m³, sendo a trabalhabilidade das argamassas variável. Neste trabalho, diferentemente da prática usual, fixou-se o consumo de cimento na determinação do traço, no lugar de se especificar a trabalhabilidade. Isso ocorreu em função de trabalhos anteriores que mostraram que menores teores de cimento promovem a manutenção dos níveis de resistência quando da utilização de resíduos como agregados, conforme Zordan (1997), Altheman (2002) e Leite (2001). Isto poderia estar relacionado ao fato de que ao se fixar a trabalhabilidade, varia-se o teor de agregado miúdo na argamassa. No caso de agregados que absorvem mais água a compensação da água adicionada pela adição de cimento, de forma a se manter a relação a/c constante, pode na verdade levar a uma mistura com uma relação água efetiva/cimento menor, e conseqüentemente, maior resistência relativa.

Esses compósitos foram avaliados quanto às propriedades mecânicas e durabilidade. A caracterização mecânica se deu através de ensaios de compressão axial, de resistência a abrasão e de frequência ressonante. A durabilidade foi avaliada em função do comportamento do composto cimentício quanto à densidade, a capacidade de absorção de água, a possibilidade de ocorrência de reações de carbonatação, reações com sulfato e reações com o meio ácido. A permeabilidade também foi avaliada através de análise microestrutural.

5.2.1. Resistência mecânica

Nas figuras 5.1 e 5.2 são apresentados os valores de resistência à compressão dos concretos após 28 e 150 dias de fabricação, respectivamente, em função do tipo de agregado miúdo utilizado. No mesmo gráfico são apresentados no eixo das ordenadas a amplitude dos valores experimentais (linhas) e os valores médios obtidos para a resistência (barras). No eixo das abscissas é locado tipo de agregado, adotando-se a seguinte nomenclatura:

- concreto com 100% agregado miúdo proveniente de areia Normal: IPT (I);
- concreto com 100% agregado miúdo proveniente de areia comum: Comum (C);
- concreto com 100% agregado miúdo proveniente de concreto britado: Britado (B);
- concreto com 25% agregado miúdo proveniente de concreto britado e 75% de areia Normal: 25B-75I;
- concreto com 25% agregado miúdo proveniente de concreto britado e 75% de areia comum: 25B-75C;
- concreto com 50% agregado miúdo proveniente de concreto britado e 50% de areia Normal: 50B-50I;
- concreto com 50% agregado miúdo proveniente de concreto britado e 50% de areia comum: 50B-50C;
- concreto com 75% agregado miúdo proveniente de concreto britado e 25% de areia Normal: 75B-25I;
- concreto com 75% agregado miúdo proveniente de concreto britado e 25% de areia comum: 75B-25C.

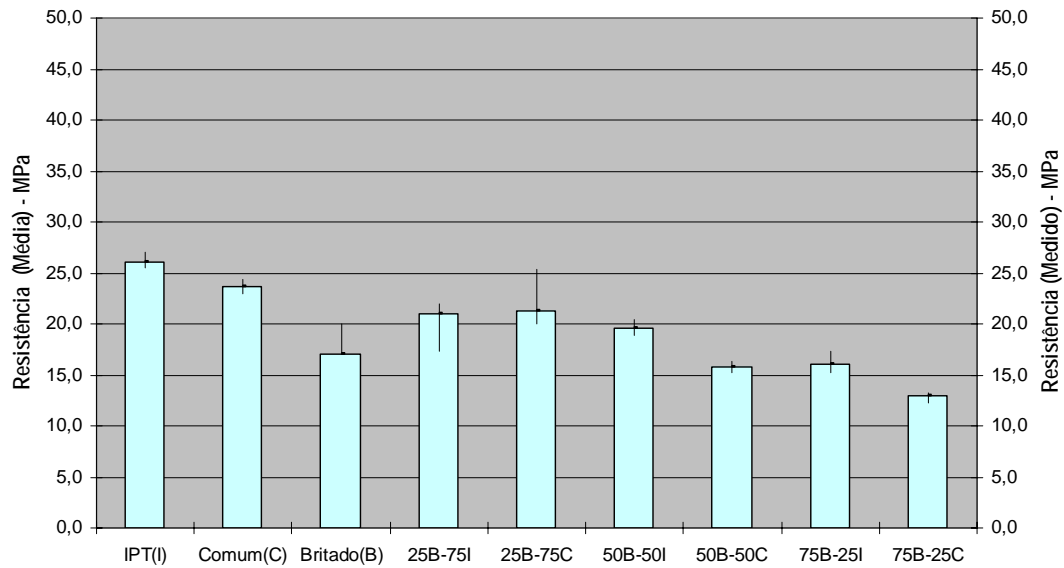


Figura 5.1 – Variação da resistência mecânica à compressão (valores medidos e média) em função do tipo de agregado miúdo utilizado, após 28 dias de fabricação.

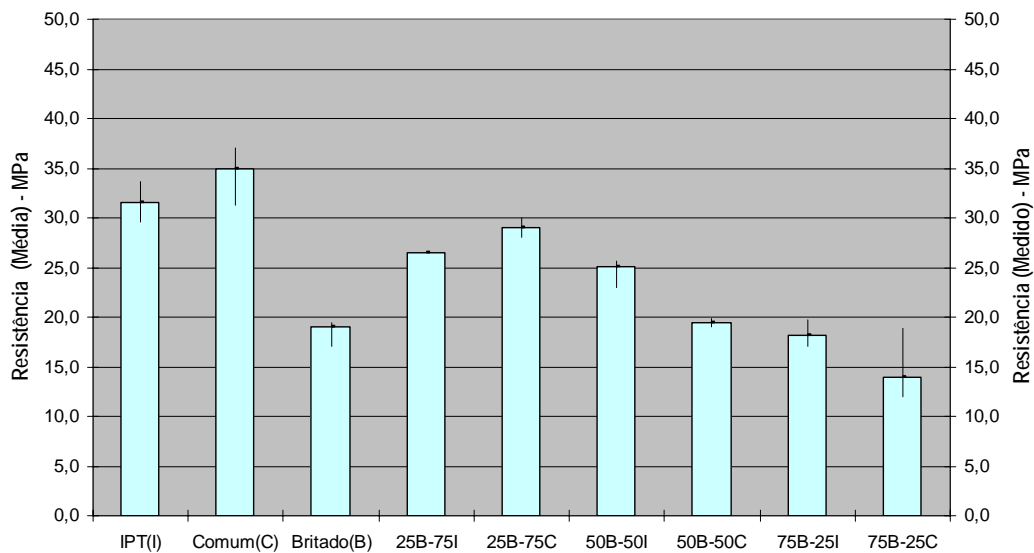


Figura 5.2 – Variação da resistência mecânica à compressão (valores medidos e média) em função do tipo de agregado miúdo utilizado, após 150 dias de fabricação.

Os dados das figuras 5.1 e 5.2 indicam que a dispersão dos valores obtidos experimentalmente varia retratando as dificuldades experimentais comumente encontradas. Para uma análise mais abrangente tais resultados são aceitáveis. No

entanto, em trabalhos em laboratórios rigorosos espera-se variações de apenas 1MPa, segundo relato de um grande experimentador cubano, Professor Vitervo O'Reilly Dias ao orientador desse trabalho em um curso sobre concreto de alto desempenho no IBRACON 2006. A utilização de areia Normal em substituição a areia comum conduz a um aumento de aproximadamente 9,2% na resistência a compressão do concreto. A utilização de agregados de concreto britado como único agregado miúdo leva ao abaixamento de aproximadamente 25 e 30% na resistência dos compósitos tomando-se como referência concretos fabricados com areia Normal e comum, respectivamente. Observa-se que a diferença percentual entre as areias Normal e comum se mantém similar mesmo no concreto britado. Esses dados não podem ser comparados diretamente com os da literatura em função das diferenças entre a natureza da substituição (comumente se substitui agregados graúdos e miúdos), fatores a/c e consumo de cimento utilizados. Isto ocorre, pois os pesquisadores, como Leite (2001), Altheman (2002), Vieira, Shayan e Xu (2003) e Vieira, Dal Molin e Lima (2004), têm se preocupado em fixar o consumo de cimento e variar o fator a/c. Esses resultados da literatura indicam que concretos com substituição de até 50% de agregado miúdo e graúdo natural por RCD podem apresentar uma queda em torno de 30% na resistência a compressão. Muller (2006) cita que a utilização de agregados reciclados miúdos e graúdos levam ao abaixamento de 32% da resistência e a 16% no caso de agregados graúdos. Dessa forma era de se esperar uma maior diferença quando se usa apenas agregados miúdos reciclados. Os índices alcançados podem ser conseqüência do melhor empacotamento e molhabilidade dos grãos devido à composição granulométrica adotada.

Os dados indicam que a substituição de 25% do agregado comum por britado pouco altera a resistência mecânica aos 28 dias. Quaisquer outras substituições abaixam a resistência mecânica dos concretos de resíduo em relação aos de referência.

A resistência de concretos de baixas resistências confeccionados com agregados naturais é função basicamente da porosidade da pasta e da zona de transição, sendo que a resistência do agregado natural não afeta o comportamento mecânico do compósito. (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

Se considerarmos a porosidade dos agregados de concreto e conseqüentemente sua maior absorção de água é de se esperar que os concretos com agregados britados apresentem uma relação a/c efetiva menor, e conseqüentemente um sistema mais resistente. No entanto, os resultados anteriores mostram uma tendência inversa, ou seja, os resultados indicam que no caso de concretos confeccionados com RCD's a resistência do composto depende da porosidade (resistência) do agregado britado.

Na figura 5.3, são apresentados de forma conjunta os dados das figuras 5.1 e 5.2, de modo a facilitar a análise da evolução da resistência ao longo do tempo.

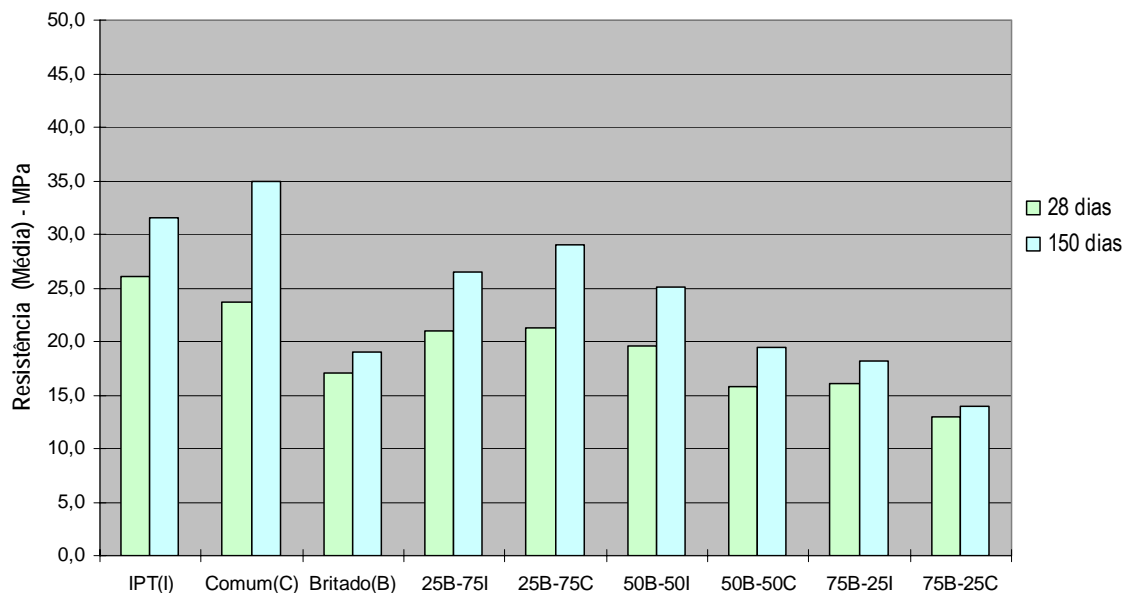


Figura 5.3 – Variação da resistência mecânica à compressão (valores médios) em função do tipo de agregado miúdo utilizado, após 28 e 150 dias de fabricação.

A análise da evolução da resistência do concreto com a idade indica que o comportamento de concretos fabricados com agregados naturais e britados é típico, ou seja, a resistência a compressão aumenta com o passar do tempo. Observa-se que esse aumento é menos significativo quando se usa o agregado de concreto. Isso poderia estar relacionado à ausência de água necessária às reações de hidratação do cimento em função da maior capacidade de absorção do agregado britado e de se utilizar uma mesma relação a/c em todos os experimentos.

Nos concretos com substituições parciais não é possível identificar um modelo de comportamento da resistência com o tempo. Em alguns a resistência cresce mais que em outros. Isto também poderia estar relacionado à disponibilidade de água para as reações. No entanto, fica claro que a substituição de 25% de natural por britado parece não afetar o crescimento da resistência com a idade.

5.2.2. Resistência Abrasão

Os resultados dos ensaios de resistência à abrasão na idade de 60 dias são apresentados na tabela 5.7 e na figura 5.4. Os dados se referem à perda de massa ou de altura do corpo-de-prova após ser submetido a um desgaste por abrasão.

Tabela 5.7 - Resultados do ensaio de desgaste superficial.

	IPT(I)		Comum(C)		Britado(B)		25B-75I		25B-75C		50B-50I		50B-50C		75B-25I		75B-25C	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Massa(g)	177,2	161,2	166,0	130,2	149,0	70,2	174,7	158,7	171,7	157,5	163,8	152,8	156,5	148,2	163,3	147,2	143,8	104,0
H _{max} (mm)	41,0	39,0	41,0	32,0	40,0	22,0	41,0	37,0	40,0	38,0	41,0	40,0	39,0	37,0	41,0	38,0	40,0	29,0
H _{mim} (mm)	40,0	37,0	38,0	30,0	40,0	18,0	39,0	36,0	39,0	35,0	38,0	36,0	37,0	37,0	40,0	36,0	37,0	26,0
H _{média} (mm)	40,5	38,0	39,5	31,0	40,0	20,0	40,0	36,5	39,5	36,5	39,5	38,0	38,0	37,0	40,5	37,0	38,5	27,5
Abrasão (mm)	2,5		8,5		20,0		3,5		3,0		1,5		1,0		3,5		11,0	
Abrasão (g)	9,0		21,6		52,9		9,2		8,3		6,7		5,3		9,9		27,7	

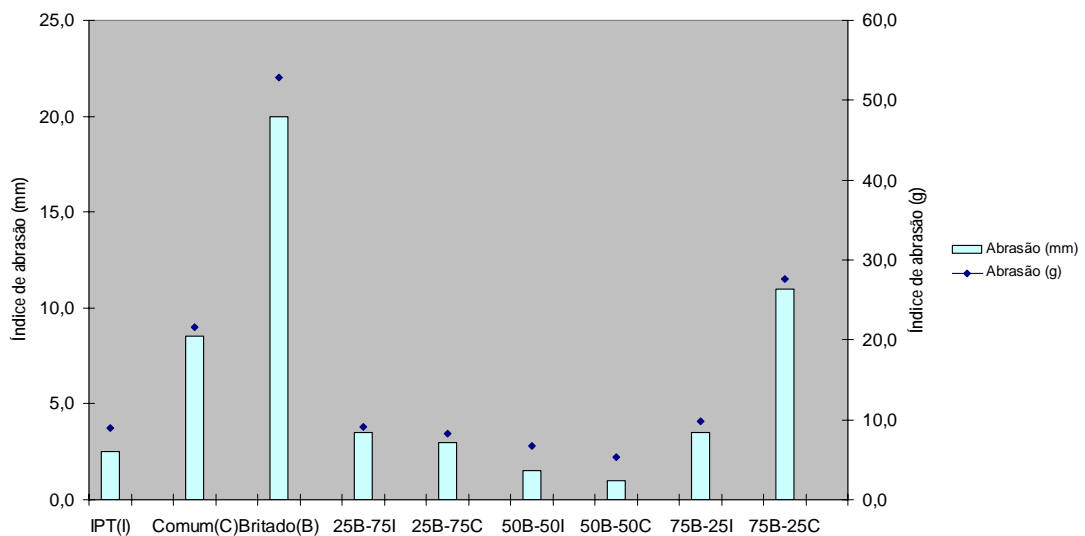


Figura 5.4 – Estimativa da resistência a abrasão.

Não foram observadas grandes dispersões tanto nos resultados quanto nas medidas de perda de massa. No tocante à altura do corpo-de-prova, as medidas dependiam da posição final analisada. No entanto, as mesmas tendências são observadas nas análises por peso e por altura.

Sabe-se que a resistência à abrasão é afetada pelos materiais constituintes, pela relação a/c, pelos procedimentos de cura e tratamento superficial. Como todas as variáveis, com exceção dos agregados miúdos, foram mantidas constantes, as variações obtidas se referem apenas à influência do material.

A utilização de 100% de agregado de concreto leva a uma diminuição da resistência à abrasão, medida em altura da ordem de 8 vezes à do concreto com 100% de agregado Normal, e 2,3 vezes em relação à areia comum. Se a análise for feita em termos de perda de massa, esses números são de 5,8 e 2,4 respectivamente. Observa-se a mesma tendência nas medidas por perda de massa e diminuição de altura. Para todas as misturas com substituições até 50%, o índice de perda é similar ou menor aos dos compostos com agregado Normal e comum. Zordan (1997) em estudos com agregados de entulho mostrou que a resistência à abrasão manteve-se ótima nos concretos com RCD. Isto estaria relacionado ao fato de que a resistência a abrasão é muito influenciada pelo agregado graúdo, que não está presente nas amostras deste trabalho, segundo Mehta e Monteiro (2005). O resultado para substituição com predominância do agregado britado (75%) apresenta uma perda de resistência à abrasão mais significativa, 28% em relação ao concreto de areia Normal e 22% em relação ao concreto de areia comum. No tocante a resistência à abrasão os resultados indicam que seria possível a substituição de até 50% da areia por agregado britado de granulometria controlada.

5.2.3. Massa Específica

A figura 5.5 mostra a variação percentual do peso específico médio do corpo-de-prova de concreto em relação ao peso da amostra confeccionada com 100% de areia comum ou 100% de areia Normal, após 28 dias de cura. Observa-se que o concreto confeccionado com 100% de agregado britado apresenta uma variação em torno de 2,8% tanto em relação ao concreto de areia comum como ao de areia Normal. Ou seja, a substituição do agregado natural (comum ou tratado)

pele agregado britado leva a uma diminuição de peso da ordem de 2,8%. Comportamento semelhante é obtido quando se substitui 75% dos agregados por agregado britado. A substituição do agregado miúdo natural quer na forma de areia natural ou Normal parece não afetar o peso específico do concreto. Substituições em torno de 50% levam os concretos 2% mais leves quando comparados a compostos com agregados miúdos naturais e agregados miúdos normais. Resultados similares foram obtidos por Altherman (2002). Esses resultados são coerentes com a massa específica dos agregados. O concreto britado é em torno de 4% mais leve que a areia usada, sendo que a proporção de agregado usado na mistura foi de 67% em massa. Segundo Leite (2001), a menor massa de concretos reciclados deve-se ao agregado e ainda, uma quantidade maior de vazios incorporados ao concreto com este material.

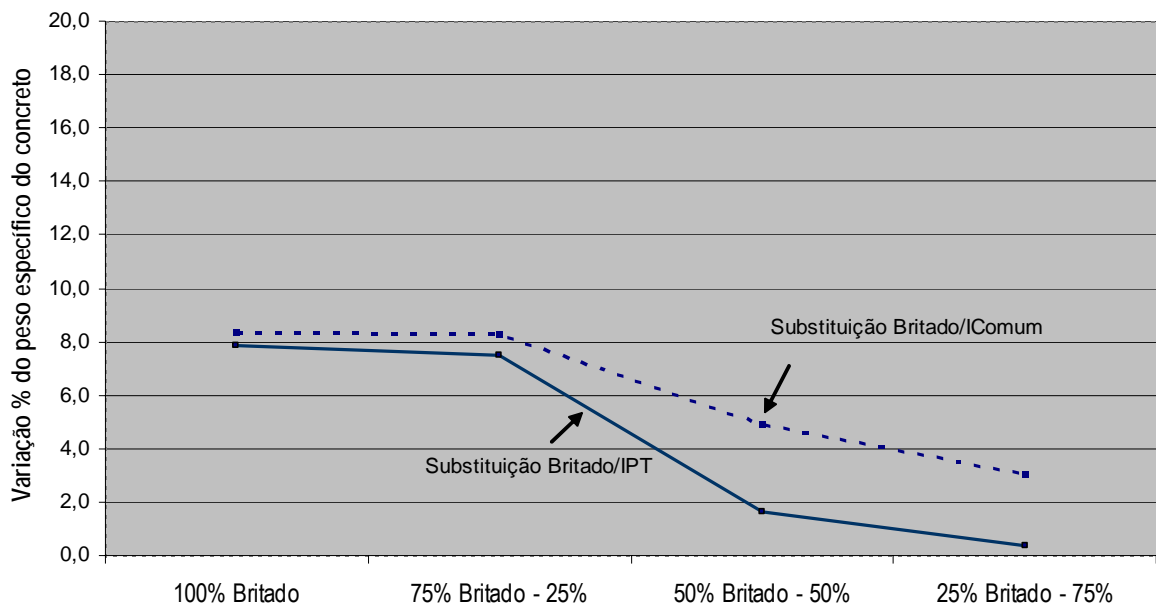


Figura 5.5 – Variação percentual do peso específico do corpo-de-prova confeccionado com diferentes teores de material britado em relação a areia comum e a areia Normal.

5.2.4. Módulo de Elasticidade Dinâmico

Os resultados das figuras 5.6 e 5.7 se referem aos valores de módulo de elasticidade obtidos através da determinação de freqüências ressonantes de corpos-de-prova fabricados com areia natural, areia Normal e com agregado de resíduo de

concreto, nas idades de 28 e 150 dias. Cada dado se refere à média de 10 medições por corpo-de-prova, sendo que foram analisados em torno de 18 amostras para cada traço, totalizando 180 medidas em média para descrever esta característica.

De acordo com a literatura, o módulo de Young é influenciado basicamente pelo módulo da pasta e do agregado, pelas ligações entre esses componentes e pelos poros e vazios do composto. O módulo parece depender muito mais das características físicas do agregado graúdo, tais como volume, tamanho, distribuição de poros, do que da sua composição mineralógica, como afirmam Mehta e Monteiro (2005) e Coutinho (1997). Muller (2006) sugere que a adição de agregados finos reciclados leva a uma variação de 39% no módulo. Se a substituição for apenas de agregados graúdos a variação ficaria em torno de 20%.

Neste trabalho o módulo de Young do composto confeccionado com britado variou em torno de 22% em relação ao com areia natural, valor menor que o sugerido por Muller (2006) para agregados graúdos e miúdos. Provavelmente isto estaria relacionado à utilização da distribuição granulométrica utilizada, que influenciaria na a massa específica do concreto, afetando a rigidez do compósito. No entanto, os resultados não refletem na mesma intensidade a permeabilidade observada pelo ensaio de absorção de água. Adições de até 25% de agregado de concreto parecem não afetar o módulo de elasticidade dinâmico. As dispersões observadas nas medidas após 150 dias de cura são maiores, o que poderia dificultar a análise dos dados. No entanto, considerando-se a variância dos dados, pode-se afirmar que o tempo maior de cura não afetou o módulo de Young dinâmico de todos os traços, indicando não haver ocorrido reações que alterassem as ligações atômicas.

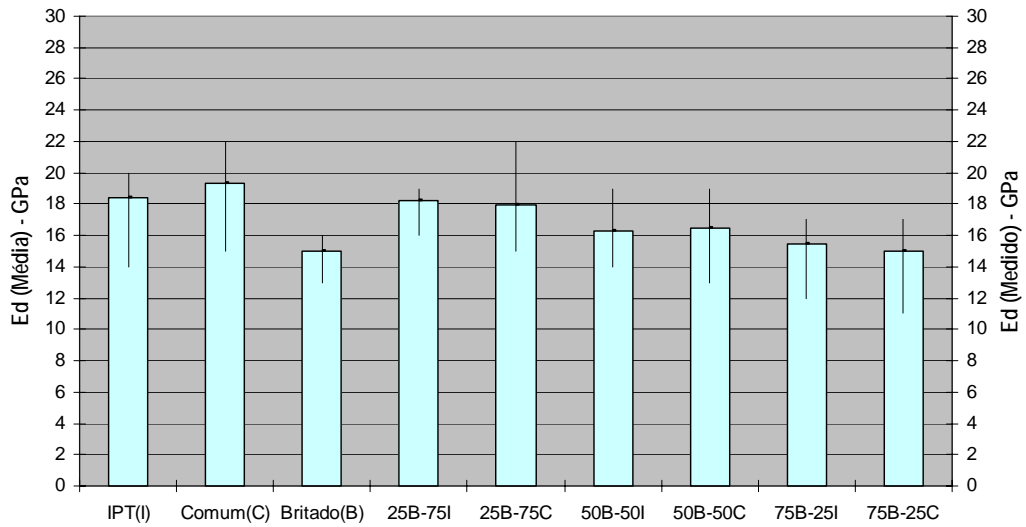


Figura 5.6 – Estimativa do módulo de elasticidade, após 28 dias de fabricação, de corpos-de-prova de concreto fabricados com areia natural, areia Normal e areia de resíduo de concreto.

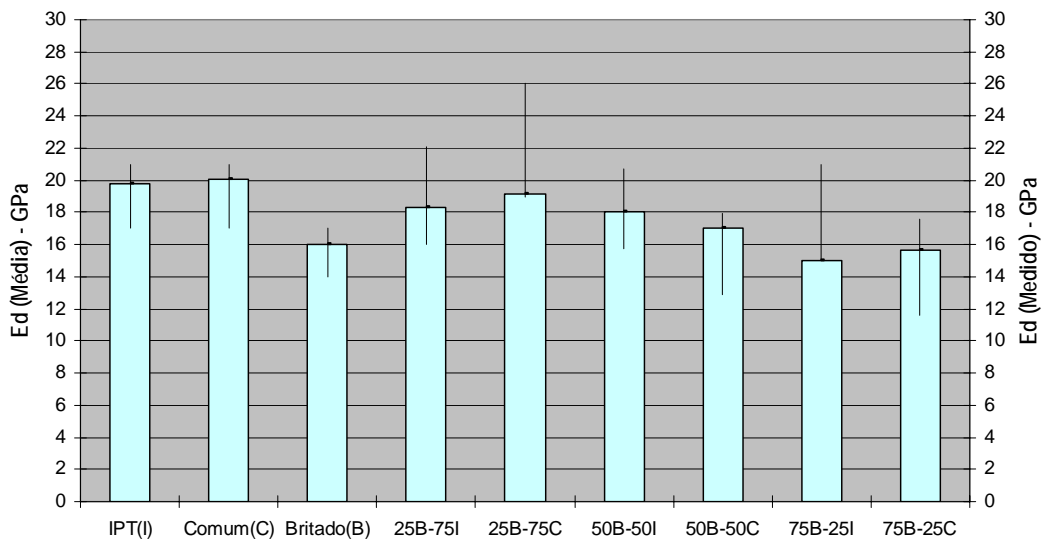


Figura 5.7 – Estimativa do módulo de elasticidade, após 150 dias de fabricação, de corpos-de-prova de concreto fabricados com areia natural, areia Normal e areia de resíduo de concreto.

5.2.5. Absorção de Água

A água funciona como veículo de transporte dos íons agressivos ao concreto e/ou à armadura. Sendo assim, no estudo de durabilidade do concreto a

permeabilidade, a porosidade e absorção de água são propriedades para análise da durabilidade do concreto. Pela estrutura de poros abertos interconectados (permeabilidade) penetram, se difundem, ou percolam todos os agentes agressivos do meio ambiente. Essa característica física pode ser calculada pela taxa de difusão do ar nos concretos confeccionados. Neste processo determina-se, a partir de um modelo físico desenvolvido, o coeficiente de permeabilidade ao ar da superfície do concreto e a profundidade teórica de penetração. Para isto um vácuo é criado dentro de uma célula posicionada na superfície do concreto por bombeamento durante um certo período; então o bombeamento é interrompido e a taxa de aumento de pressão dentro das câmaras é medida. Com os valores obtidos se classifica o concreto em muito ruim, ruim, normal, bom, muito bom. Em função do tamanho da amostra não foi possível realizar tal procedimento com o equipamento disponível. Por outro lado, o estudo da absorção de água de um concreto também é método eficaz na avaliação da permeabilidade/durabilidade do composto. Levy (2001) considera que a absorção por imersão caracterizaria melhor a estrutura dos poros, uma vez que permite avaliar a quantidade total de água absorvida ao contrário da absorção capilar que só ocorre em casos especiais em que o concreto não esteja saturado. Optou-se, então, pela avaliação da permeabilidade através do método de absorção de água por imersão.

Quando se monitora a absorção de água, na realidade está se procurando determinar o total dos poros permeáveis na estrutura de concreto, uma vez que possibilita o conhecimento da forma pela qual os agentes agressivos se difundirão ou penetrarão através do interior da massa de concreto. Conhecendo-se esta estrutura é possível prever o tempo que os agentes agressivos levarão para alcançar a armadura, desencadeando assim o início do processo de corrosão.

Na figura 5.8 são apresentados os resultados da avaliação da permeabilidade através da capacidade de absorção percentual de água em peso, após 60 dias de fabricação. Como era de se esperar, o concreto fabricado com areia reciclada absorve 64% a mais de água se comparada à areia natural. As substituições parciais da areia Normal aumentam a permeabilidade do concreto para adições de 75% de britado. Estes resultados são intrigantes se lembrarmos que a variação de massa específica do agregado é de 4%. Segundo Zordan (1997), a maior absorção de água seria devido à porosidade do concreto que deu origem areia artificial.

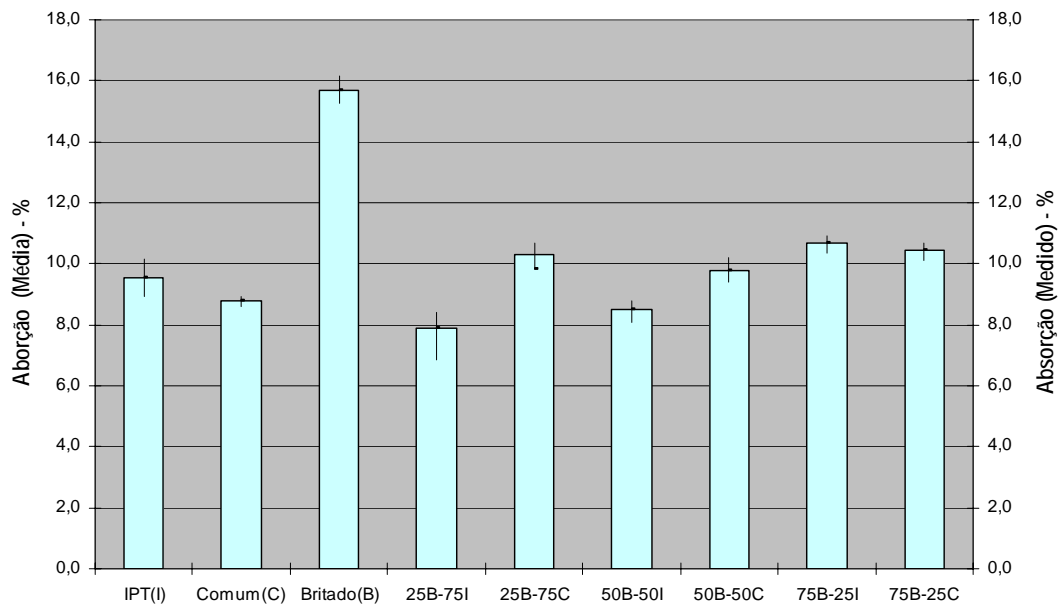


Figura 5.8 – Capacidade de absorção percentual de água em peso após 60 dias de fabricação dos concretos fabricados com areia natural, areia Normal e areia de resíduo de concreto.

5.2.6. Carbonatação

O ataque por CO_2 aos concretos produzidos foi analisado na idade de 100 dias. Na figura 5.9 pode ser visualizada uma das amostras após a carbonatação forçada, quebra das mesmas no sentido longitudinal e transversal, e aspersão com solução de fenolftaleína na face de ruptura. Essa solução mantém a cor vermelho carmim nas regiões com pH superior a 9; abaixo deste valor a mesma fica incolor. Dessa forma é possível distinguir a região carbonatada da não carbonatada.

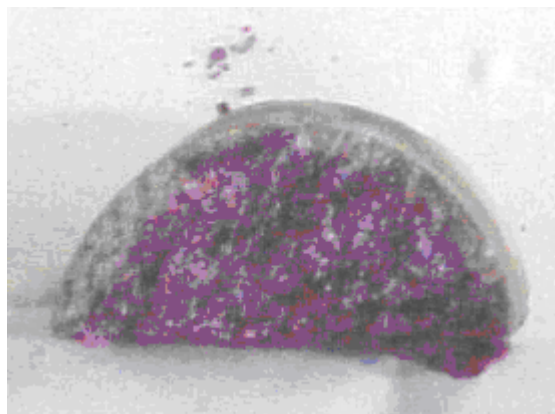


Figura 5.9 – Macrografia de amostras de concretos sujeitas a carbonatação forçada e aspersão com fenolftaleína.

Foram feitas tentativas de leituras com paquímetro digital da espessura da região carbonatada com aproximação de 0,01 mm em cada corpo-de-prova. Do ponto de vista qualitativo, se poderia dizer que a profundidade de penetração não foi afetada pela presença/teor de resíduos. Novos testes devem ser realizados, mas a análise qualitativa associada à alta permeabilidade dos compósitos com RCD indicam que a durabilidade de um concreto talvez não possa ser atrelada exclusivamente à sua porosidade. No entanto, não foi possível a obtenção de dados quantitativos, pois a espessura da camada variava muito em cada amostra. Isso poderia indicar que o método utilizado levou a reações em regiões preferenciais.

Levy (2001) e Altheman (2002) mostram que o risco de carbonatação em estruturas com 100% de reciclados, para determinados consumos de cimento e relações a/c, pode ser menor que em estruturas em concreto com agregados convencionais. Nos concretos produzidos com agregados reciclados, independentemente de sua granulometria, e de sua origem (alvenaria ou concreto), a carbonatação e a difusão do CO₂ estaria relacionada muito mais à relação a/c e ao consumo de cimento do que com ao tipo de agregado reciclado. Nos estudos de Levy (2001), os resíduos miúdos de alvenaria demonstram excelente desempenho como redutores da carbonatação, uma vez que, com a substituição de 50 % de areia natural por areia de alvenaria proporcionou uma redução na profundidade de carbonatação em torno de 33%. Resultados diferentes foram obtidos por Evangelista e Brito (2006), que trabalharam apenas com resíduos de concreto. Os autores efetuaram substituições de 100 e 30% de agregados miúdos britados de concreto com fator a/c igual a 0,52 levou a um aumento progressivo da frente de carbonatação. A penetração após 21 dias para o concreto de referência foi de 2,8mm. Para o concreto com 30% de agregado britado foi de 3,8mm e para o concreto com 100% a penetração passou para 5,8mm. Sendo assim, os autores acreditam que a resistência a carbonatação é diretamente relacionada aos poros da estrutura. Logo, se poderia pensar que os concretos triturados usados neste trabalho apresentam características dos resíduos de alvenaria. No entanto, são necessários novos ensaios, se possível, em câmaras de carbonatação ou com longa exposição ao meio ambiente de laboratório para que se conclua sobre o assunto.

5.2.7. Resistência a Sulfato

Na literatura, a resistência ao ataque de sulfato é avaliada através da análise comparativa das resistências a flexo-tração de prismas de concreto imersos em solução de sulfato. Os produtos das reações com o sulfato têm um volume maior que os compostos iniciais, dessa forma preenchem os poros da argamassa aumentando a resistência do composto. Quando todo o espaço vazio for preenchido é que começa o efeito negativo das reações que se traduzem por uma diminuição da resistência mecânica, segundo Altheman (2002).

Na figura 5.10 pode-se visualizar a amplitude dos valores medidos (linhas) e a média (barras) das resistências à compressão obtidas para concretos imersos por 21 dias em solução de sulfato de sódio aos 150 dias de idade. A ocorrência do ataque pelo sulfato pode ser avaliada através da figura 5.11, na qual são apresentados conjuntamente a resistência para corpos de concretos imersos em água destilada ou em sulfato de sódio.

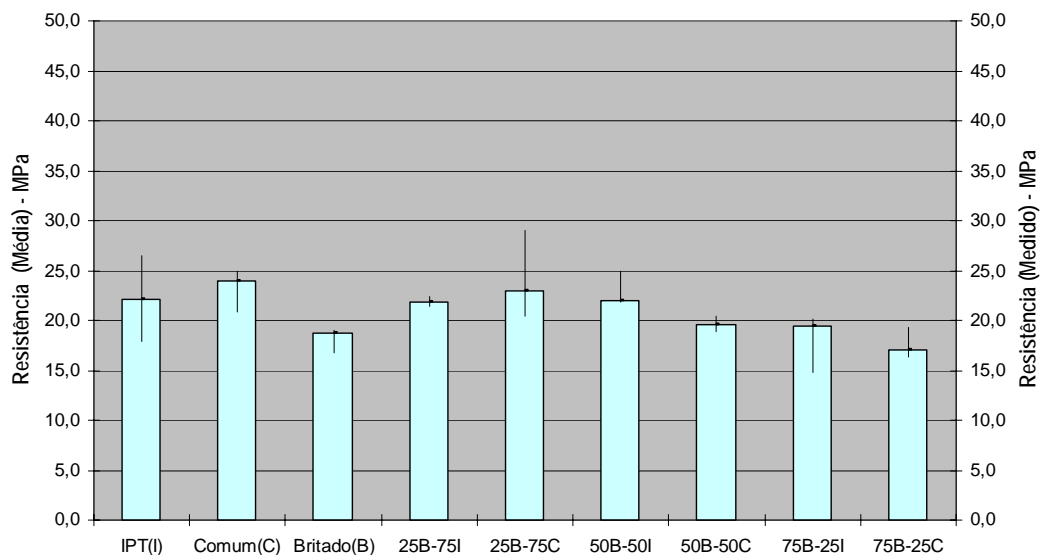


Figura 5.10 – Resultados dos ensaios de compressão de corpos-de-prova aos 150 dias de idade após o ataque de sulfato de sódio.

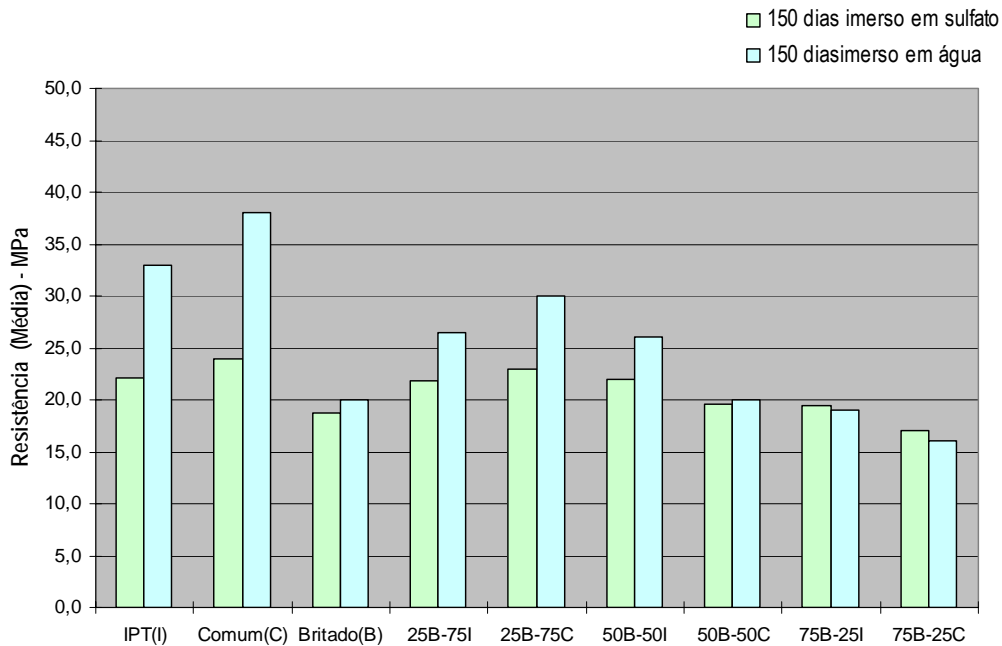


Figura 5.11 – Resultado de ensaios de compressão de corpos-de-prova aos 150 dias de cura e com 21 dias com e sem imersão em solução Na_2SO_4 .

Os dados indicam que os concretos com predominância de agregados naturais, areia comum ou tratada, têm sua resistência diminuída após serem expostos a ação do sulfato de sódio, indicando que no consumo utilizado a característica de resistência ao sulfato do cimento não foi suficiente para proteger o composto. No entanto, os concretos de agregados britados ou mantém o mesmo nível de resistência, ou apresentam valores em torno de 2% maiores. De acordo com o relatório de Altheman (2002) espera-se uma redução da resistência de concretos fabricados com agregados miúdos e grãos reciclados, no entanto, quando se utilizam concretos sem agregado grão o concreto de agregado reciclado apresenta uma resistência à flexão em média 3% maior do que o compósito de agregado natural. Os estudos de Shayan e Xu (2003) indicam que para as substituições de até 50% os concretos apresentam satisfatória resistência aos ataques de sulfatos quando em soluções de 5% de Na_2SO_4 , pois mantém sua resistência mecânica.

5.2.8. Reação dos Compósitos ao Ataque do NaOH

A reação álcali-agregado leva a um aumento das dimensões do concreto na presença de umidade. Essa reação só ocorre se o agregado for reativo aos álcalis do cimento. Como se utilizou agregados confeccionados a partir de concretos, considerou-se importante avaliar a reatividade do composto. Não foram observadas, através de medições com paquímetro digital, alterações nas dimensões do corpo-de-prova. Os resultados no tocante à resistência à compressão após a exposição dos corpos-de-prova ao NaOH são apresentados na figura 5.12. A influência do meio alcalino externo no comportamento dos diferentes traços pode ser melhor analisada na figura 5.15 onde os dados da figura 5.13 são apresentados comparativamente com os obtidos para a resistência a compressão dos concretos após 150 dias de cura mantido em água destilada e sujeito ao ataque de NaOH.

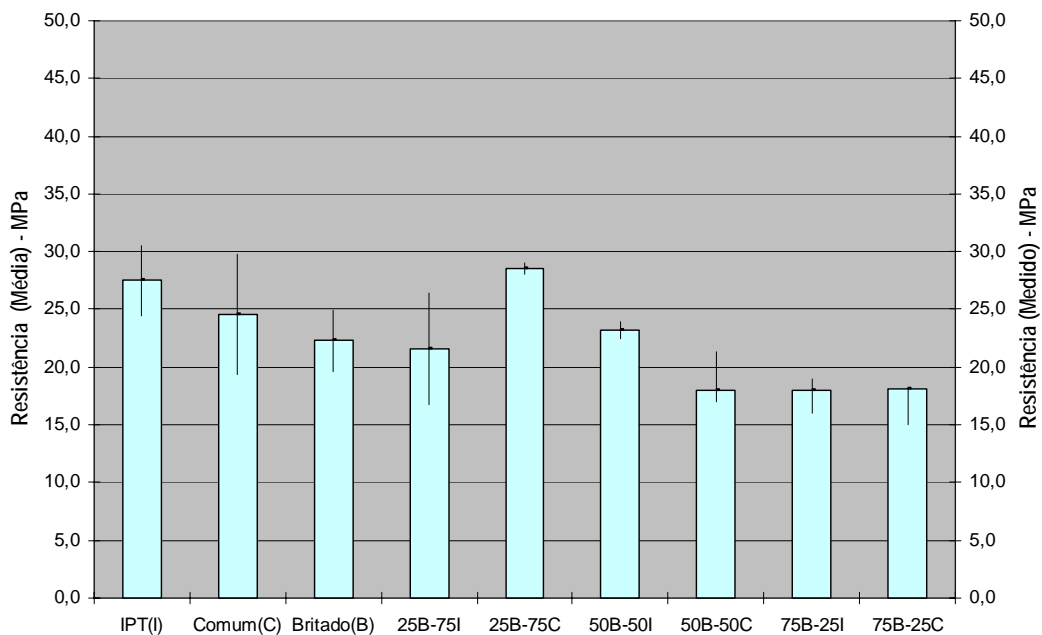


Figura 5.12 – Resultado de ensaios de compressão de corpos-de-prova aos 150 dias de idade após imersão em NaOH

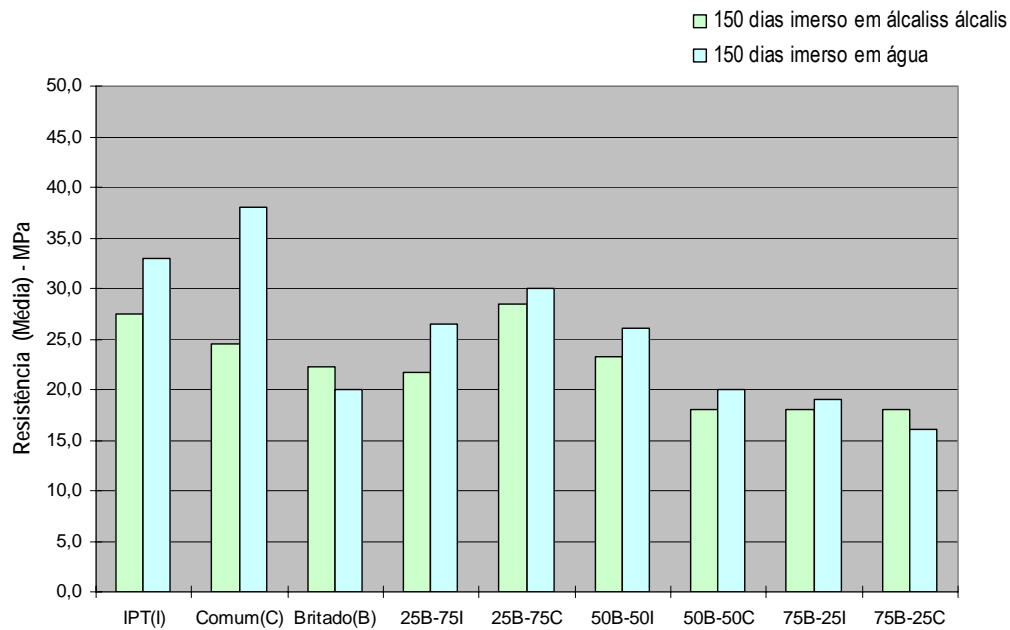


Figura 5.13 – Resultado de ensaios de compressão de corpos-de-prova aos 150 dias de idade com e sem imersão em NaOH

Após a imersão em NaOH, ocorre uma queda da resistência mecânica à compressão nos concretos com agregados naturais. Essa fissuração, aparentemente não evitada pelo uso de Cimento CPIII – RS poderia ser provocada pela reação álcali-agregado em pequena proporção. Observa-se que a presença de agregado miúdo britado conduz à manutenção ou a menor queda da resistência mecânica do concreto sob ação do NaOH. Isto poderia ser relacionado a uma menor fissuração da mistura uma vez que o agregado artificial é mais poroso que o natural e absorveria a expansão ocorrida

Shayan e Xu (2003) concluíram que agregados reciclados estudados por eles não são reativos, no entanto, os autores acreditam que essa reatividade depende do agregado utilizado.

5.2.9. Análise Microestrutural

Nas figuras de 5.14 a 5.16 são apresentadas as macroestruturas do concreto nas várias situações estudadas, obtidas por macroscopia ótica.

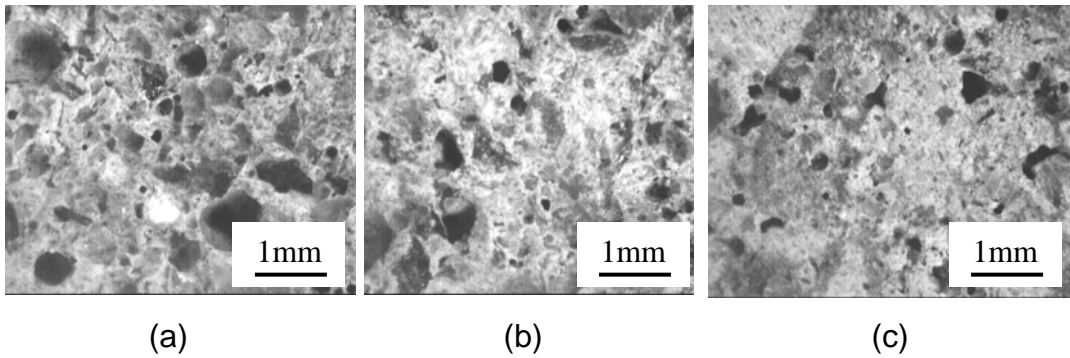


Figura 5.14 – Imagens do corpo-de-prova de concreto fabricado com areia (a) Comum, (b) Normal e (c) Britada.

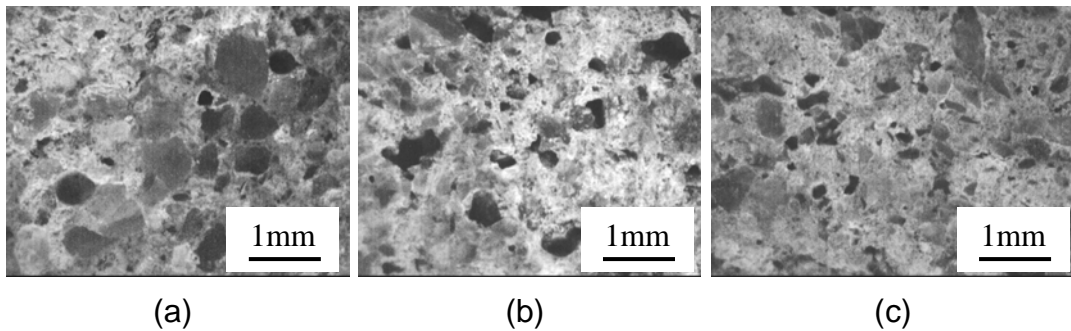


Figura 5.15 – Imagens do corpo-de-prova de concreto fabricado com areia Normal e (a) 25%, (b) 50% e (c) 75% de concreto britado.

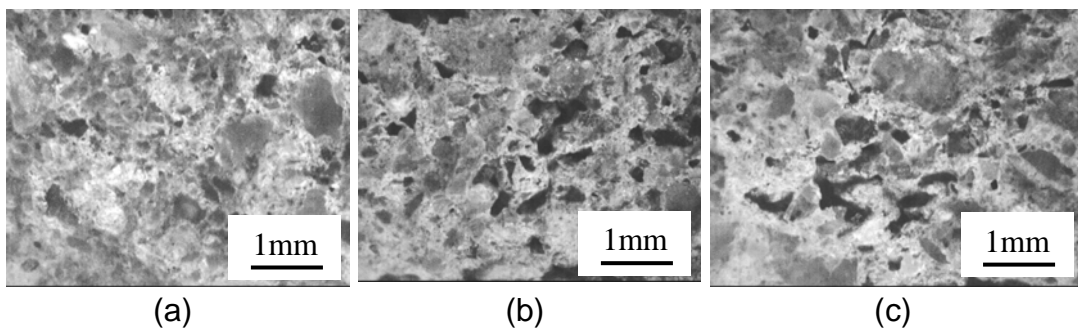


Figura 5.16 – Imagens do corpo-de-prova de concreto fabricado com areia comum e (a) 25%, (b) 50% e (c) 75% de concreto britado.

A análise da figura 5.14 aparentemente revela que o concreto com resíduos apresenta menos e menores poros. Também é observado que as amostras com agregado de concreto britado apresentam estrutura similar independente da

porcentagem de substituição. Em função do método de preparação das amostras (cuidado no preparo e limpeza da superfície com jato de ar), dos dados de absorção e módulo de elasticidade, acredita-se que o aumento/resolução empregados não foram suficientes para revelar um grande número de poros finamente distribuídos. Essa distribuição poderia estar relacionada à forma dos grãos obtida no processo de moagem. Por outro lado, a utilização de técnicas comumente utilizadas para metais, materiais basicamente homogêneos, pode não ser adequada para a análise da pasta de cimento.

Nas figuras de 5.17 à 5.19 são apresentadas as microestruturas obtidas no MEV-SEI e as difratometrias das áreas analisadas de concretos fabricados com 100% de areia comum, 100% de areia normal e 100% de concreto britado. Não foram realizadas análises nos outros traços, pois se verificou após as primeiras análises que a técnica ótica parece ser mais eficaz no tocante a preparação da amostra, de acordo com Ruach-Nir *et al.* (2006) e Lowinska-Kluge e Jozwiak (2006). Nos compostos, é detectada a presença de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado. Não é possível constatar a ocorrência de maior porosidade nos concretos com areia artificial, provavelmente, pois essa os poros seriam no agregado artificial. Facilmente se identifica os grãos de areia natural, ricos em sílica. No entanto, no concreto com resíduos, provavelmente devido à composição do concreto, a visualização da interface não é tão clara. As pastas são ricas em silicatos de cálcio, e identifica-se a presença de hidróxido de cálcio na areia de concreto britado.

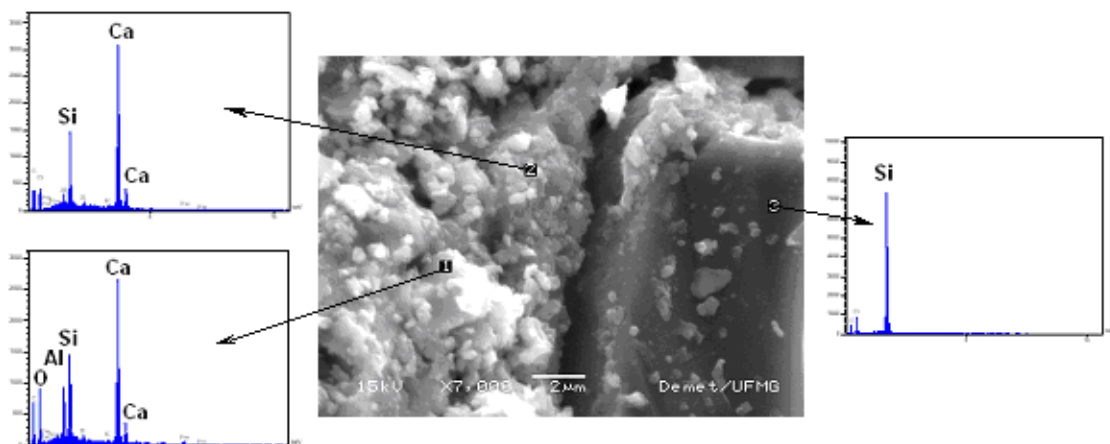


Figura 5.17 – Imagens do corpo-de-prova de concreto fabricado com areia Comum.

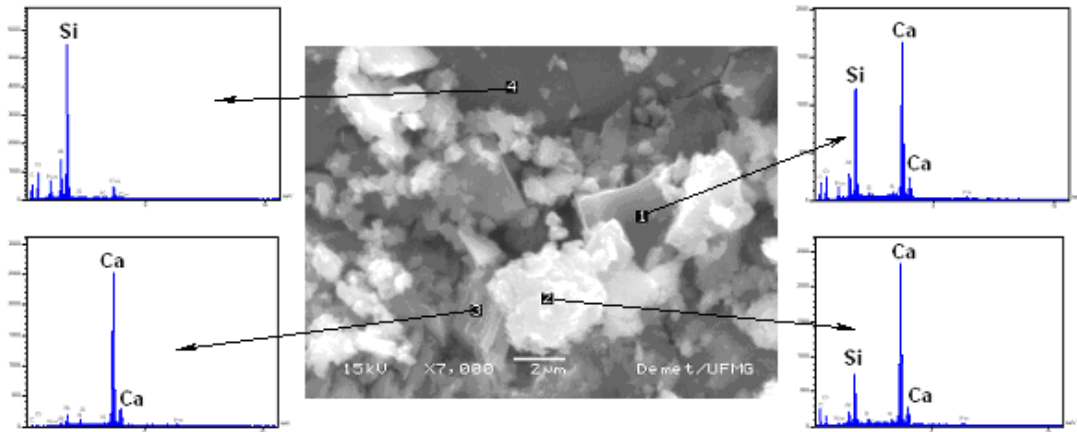


Figura 5.18 – Imagens do corpo-de-prova de concreto fabricado com areia IPT.

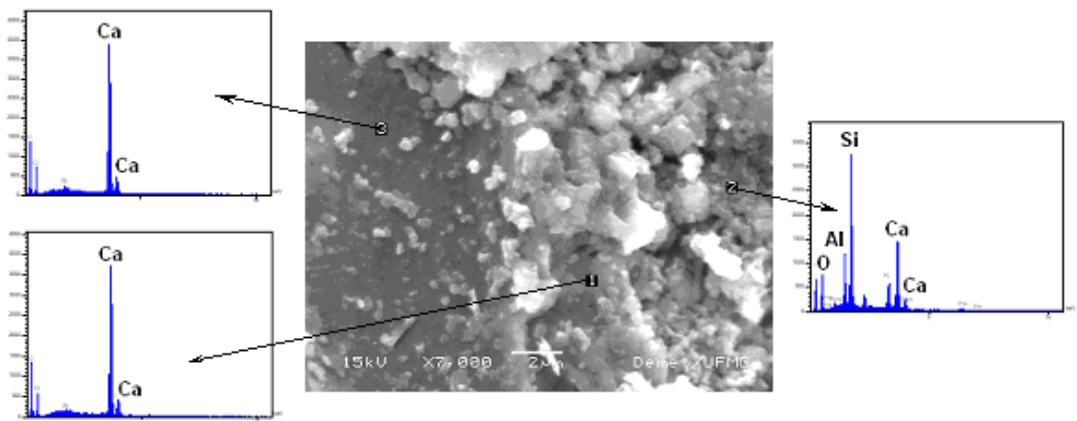


Figura 5.19 – Imagens do corpo-de-prova de concreto fabricado com concreto reciclado.

6. CONCLUSÕES

A utilização de agregado miúdo de concreto britado com granulometria controlada em substituição a 25% do agregado natural parece não afetar a massa específica do concreto.

A utilização de agregado miúdo de concreto britado com granulometria controlada em substituição a 100% do agregado natural conduz a uma redução em torno de 2,8% da massa específica do concreto.

Os dados indicam que a substituição de 25% da areia comum por agregado britado não altera de forma significativa a resistência mecânica aos 28 dias. Quaisquer outras substituições abaixam a resistência mecânica dos concretos de resíduo em relação aos de referência.

No tocante a resistência a abrasão os resultados indicam que seria possível a substituição de até 50% da areia por agregado britado de granulometria controlada.

O concreto fabricado com areia reciclada absorve 64% a mais de água se comparada à areia natural.

Adições de até 25% de agregado de concreto parecem não afetar o módulo de elasticidade dinâmico.

As substituições parciais da areia Normal aumentam a permeabilidade do concreto para adições de 75% de britado. No caso da areia comum ocorrem aumentos da ordem de 16%.

Concretos fabricados com 100% de areia comum, areia Normal e agregados de concreto britado parecem ter a mesma resistência ao ataque de CO₂ após 21 dias de exposição.

A maior permeabilidade das argamassas para concreto não parecem tornar esses materiais mais vulneráveis à carbonatação.

A presença de agregado miúdo britado conduz à manutenção da resistência mecânica do concreto sob ação do NaOH.

O agregado miúdo de concreto poderia influir no grau de fissuração da mistura uma vez sob a ação do NaOH, já que sua presença conduz à manutenção ou menor queda da resistência mecânica do concreto sob ação do NaOH.

A análise da microestrutura realizada não possibilitou a visualizar a alta permeabilidade que a areia artificial impõe ao concreto, mostrando serem os poros finos e bem distribuídos os responsáveis pela alta permeabilidade do composto.

O concreto britado apresenta grande potencialidade de uso como agregado miúdo para concretos estruturais de resistência à compressão em torno de 20MPa.

Este trabalho encerra a primeira etapa de estudo criterioso para utilização de RCD's como agregados miúdos para concretos estruturais. A seguir faz-se necessário o estudo da influência da granulometria e dos agentes contaminantes minerais isoladamente.

7. BIBLIOGRAFIA

- Agenda 21 Global. In: *Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano - Eco-92*. Rio de Janeiro; 1992.
- Altheman, D., Zordan, S. E. *Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil* (Relatório ao Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- *American Society for Testing and Materials (ASTM) C215 of 2002: Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional frequencies of concrete specimens*.
- Angulo, S. C.; John, V. M. *Variabilidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*. *E-MAT – Revista de Ciência e Tecnologia e de Materiais de Construção Civil*. 2004; 1(1):22-32.
- Angulo, S.C, John, V. M., Ulsen, C. Kahn, H. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. *Anais da I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. (CD-ROM). São Paulo; 2004.
- Angulo, S.C, Kahn, H, John, V. M., Ulsen, C. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: IBRACON Ct-206 – Meio Ambiente. *Anais do VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações, 2003*. (CD-ROM). São Paulo; 2003.
- Angulo, S.C, Kahn, H., John, V. M., Ulsen, C. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: IBRACON Ct-206/IPEN. *Anais do V Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2002*. (CD-ROM). São Paulo; 2002.

- Angulo, S.C, John, V. M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. *Anais do IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2002*. Foz do Iguaçu; 2002. p. 1613 -1624.
- Angulo, S. C., Miranda, L.F.R, Selmo, S.M.S, John, V.M. Utilização de pilhas de homogeneização para controle de agregados miúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. *Anais do Construção 2001*, Lisboa: Instituto Superior Técnico; 2001. v. 2, p. 713 -720.
- Angulo, S.C. *Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados* (Tese de Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- Ashby, M.F., Jones, D. R. H. *Engineering materials 1: an introduction to their properties & applications* second ed. Great Britain: Butterworth Heinemann, 1996. Gorbachev M. *Perestroika*. Expanded ed. London: Fontana/Collins; 1987.
- Ashby, M.F., Jones, D. R. H. *Engineering materials 2: an introduction to microstructures, processing & design* second ed. Great Britain: Butterworth Heinemann, 1996.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7211 de 2005: *Agregados para concreto*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6118 de 2004: *Projeto de estrutura de concreto – procedimento*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 15112 de 2004: *Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos - Áreas de Transbordo e Triagem - Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 15113 de 2004: *Resíduos Sólidos da Construção Civil e Resíduos Inertes - Aterros - Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação*. Rio de Janeiro.

- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 15114 de 2004: Resíduos Sólidos da Construção Civil - Áreas de Reciclagem - Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 15115 de 2004: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil - Execução de Camadas de Pavimentação - Procedimentos.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 15116 de 2004: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil - Utilização Em Pavimentação e Preparo de Concreto Sem Função Estrutural – Requisitos.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 5738 de 1980: Moldagem e Cura de Corpos-De-Prova de Concreto, Cilíndricos ou Prismáticos.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7215 de 1996: Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7214 de 1982: Areia Normal Para Ensaio de Cimento.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7219 de 1987: Determinação do Teor de Materiais Pulverulentos nos Agregados.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7218 de 1987: Determinação do Teor de Argila e Materiais Friáveis.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9976 de 1987: Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos Por Meio do Frasco de Chapman.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9941 de 1987: Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório.* Rio de Janeiro.

- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 12042 de 1992: Materiais Inorgânicos - Determinação do Desgaste por Abrasão.* Rio de Janeiro.
- *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7215 de 1991: Determinação da Resistência À Compressão do Cimento.* Rio de Janeiro.
- Brito, L. A. Utilização de Entulho de Construção Civil como Agregado Graúdo para a Confecção de novos Concretos. *Anais do IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Materiais Reciclados e suas Aplicações, 2001.* São Paulo; 2001. p. 203 – 214.
- Buck, A D. Recycled Concrete as a source of aggregate. *American Concrete Institute Journal.* May 1977; 212-219.
- Buttler, A. M. Agregados reciclados na produção de artefatos de concreto. *Revista do Concreto - IBRACON.* Fevereiro de 2005: 26 - 29.
- Cavalcante, J. R.; Cheriaf, M. Ensaio de Avaliação para Controle Ambiental de Materiais com Resíduos Incorporados. *Anais do Workshop Sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção, 1996.* São Paulo: Epusp/Antac, 1997. p..31–107.
- Cincotto, M. A. Utilização de subprodutos e resíduos na Indústria da Construção Civil. *Anais do Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil. , 1988.* Florianópolis; 1988. p.171-181.
- *Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) Resolução 307 de 5 de julho de 2002.*
- Coutinho, A. S. *Fabrico e propriedades do betão* 3 ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.
- Department of the environment, transport and the regions: London (DETR). Building A Better Quality Of Life. In: *A Strategy for More Sustainable Construction.* (CD-ROM). April; 2000.

- *Deutsches Institut Für Normung Din 4226-100 von 2002: Gesteinskörnungen Von Beton Und Mörtel, Teil 100.*
- Dias, J. F., Agopyan, V., Silva, T. J. Proposta de procedimento para determinação da absorção de agregados reciclados de resíduos sólidos da Construção Civil para emprego em concreto. In IBRACON - Inovações Tecnológicas Para O Concreto. *Anais do: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005.* São Paulo; 2005. p. 1088-1097.
- Dorsthorst, B. J. H.; Hendriks, Ch. F. Re-use of construction and demolition waste in the Europe. *Proceedings of Symposium in Construction and Environment: Theory into Practice, 2000, São Paulo, Brazil.* (CD-Rom). São Paulo: CIB; 2000.
- Etxeberria, M., Vásquez. E., Marí, A., Barra, M., Hendriks, Ch. F., Maasackers, M. H. J. V., The role and influence of recycled aggregate. *Proceedings of International Rilem Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures 8-11 November 2004.* (CD-Rom). Barcelona; 2004.
- Evangelista, L., Brito, J. Carbonation and chloride penetration in concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Anais SIABE 06/ INCOS 06 – II Simpósio Íbero-Americano sobre “Concreto Estrutural”.* Rio de Janeiro: IBRACON, Setembro 2006. Cd, P. 1-12.
- Gutierrez, P. A., Juan, M. S. *Utilization Of Recycled Concrete Aggregate For Structural Concrete International Rilem. Conference On The Use Of Recycled Materials In Buildings And Structures 8-11 November 2004,* Barcelona, Spain. Abstract Id Number: 348 10 Páginas.
- Guy, B, Ciarimboli, N. Dfd – *Design For Disassembly In The Built Environment: A Guide To Closed-Loop Design And Building.* Distribuído na Conferência Rethinking Sustainable Construction 2006 – Next Generations Green Buildings, Sarasota, Florida, Eua.
- Hamassaki, L. T.; Sbrighi Neto, C.; Florindo, M. C. Uso de Entulho como Agregado para Argamassas de Alvenaria. In: *Workshop Sobre Reciclagem e*

Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: Epusp/Antac, 1997. 170 P. P.107–115.

- Hansen, T. C., Hedegard, S.E. Properties of recycled aggregate concretes as affected by admixtures in original concretes. *American Concrete Institute Journal*. January-February 1984; 81(3): 21-26.
- [Http://dataservice.eea.europa.eu/atlas/viewdata](http://dataservice.eea.europa.eu/atlas/viewdata). Acesso em 04/05/2005.
- [Http://portal1.pbh.gov.br/pbh/](http://portal1.pbh.gov.br/pbh/). Acesso em 22/04/2005.
- [Http://www.pms.ba.gov.br/limpurb/1.htm](http://www.pms.ba.gov.br/limpurb/1.htm) Acesso em 22/04/2005.
- [Http://www.reciclagem.pcc.usp.br/](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/) Acesso Em 04/05/2005.
- [Http://reports.pt.eea.europa.eu/signals-2004/pt/pt_signals_web.pdf](http://reports.pt.eea.europa.eu/signals-2004/pt/pt_signals_web.pdf). Acesso em 22/08/2006.
- [Http://dataservice.eea.europa.eu/atlas/viewdata/viewpub.asp?Id=392](http://dataservice.eea.europa.eu/atlas/viewdata/viewpub.asp?Id=392). Acesso em 22/08/2006.
- [Http://www.rilem.net/](http://www.rilem.net/). Acesso em 28/06/2005.
- John, V. M. Pesquisa e Desenvolvimento de Mercado Para Resíduos. In: Epusp/Antac. *Anais do Workshop Sobre Reciclagem E Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção, 1996*. São Paulo; 1997. p. 21 – 30.
- John, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento* (Tese de Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- John, V.M.; Agopyan, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: *Seminário - Reciclagem de Resíduos Sólidos Domésticos*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - Sp. 2000.

- Kibert, C. J.; Sendzimir, J.; Guy, G. B. Construction Ecology And Metabolism. In: *Cib Symposium In Construction And Environment: Theory Into Practice, 2000, São Paulo, Brazil*. (CD-Rom). São Paulo: Cib, 2000.
- Kibert, C. J. Toward an ethics of sustainability - 2004. *Disponível em: <http://wb.dp.ul.eu/cibert/bcn6585/papers-ethics&justice/extendedethics-kibert-2005/expandedethics4712-feb05.doc>* - Acesso em 15/04/2006.
- Koch, A.; Steinegger, H. A Rapid Method for Testing The Resistance of Cements to Sulphate Attack. *Wiesbaden*. 1960; 13(7): 317-324.
- Lauritzen, .E K. *The Global Challenge Of Recycled Concrete*. In: Dhir, R. K.; Henderson, N. A.; Limbachiya, M. C. (Eds.). *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 505-519.
- Leite, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição* (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- Levy, S. M., Helene, P. R. L Propriedades Mecânicas de argamassas produzidas com entulho de construção civil. In: *Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como materiais de construção, 1996, São Paulo. Anais...* São Paulo: Epusp/Antac, 1997. 170 P. P.137 - 146.
- Levy, S. M. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria* (Tese de Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.
- Levy, S. M., Helene, P. R. L. Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. 2002
- Lowinska-Kluge, A., Jozwiak, K. A Study Of The Resistance Of Concrete To Corrosion Using Sem And Microanalysis. *The Americas Microscopy And Analysis*, January, 2006. p.15-17.

- Maia, M. F. F., Fonseca, R. A. S. *A gestão da areia utilizada na construção civil*. (Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Educação Ambiental). Centro de Estudos e Pesquisa Educacionais de Minas Gerais: 2006.
- Marciano, Z. A. N. *Desenvolvimento de um método acelerado para avaliação de argamassa de cimento Portland expostas à soluções agressivas de sulfato de sódio* (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concrete – microstructure and properties* 3ª ed. Usa: Mcgraw-Hill, 2005.
- Meyer, C. *The us Concrete Industry and Sustainable Development Department of Civil Engineering And Engineering Mechanics Columbia University, New York, NY* In: *VII Seminário Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem na construção civil*, CT-MAB 206, Ibracon, Sao Paulo, June 30, 2006.
- Mindes, S. Young, J. F. Darwin, D. *Concrete* 2 ed. USA: Prentise Hall, 2002.
- Muller, A Lecture: Closed Loop Of Rubble? In: *VII Seminário Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem na construção civil*, CT-MAB 206, Ibracon, Sao Paulo, June 30, 2006.
- *National Institute Of Public Health And Environment*. Disponível em: <http://www.onderzoekinformatie.nl/en/oi/nod/organisatie/org1236213/>. Acesso em 06/7/2006.
- Neville, A. M. *Propriedades do concreto* 2 ed. São Paulo:Pini, 1997.
- Oliveira, M. J. E., Assis, C. S., Terni, A. W. Study On Compressed Stress, Water Absorption And Modulus Of Elasticity Of Produced Concrete Made By Recycled Aggregate In: *International Rilem Conference on the Using of Recycled Materials and Building and Structures. Proceedings*. 9-11 November, 2004 Barcelona, Espanha.

- Para a Construção Sustentável da Agenda 21. In: *Tradução do Relatório CIB - Publicação 237*. Novembro, 2000. p. 17.
- Pinto, T. P. *Metodologia para a Gestão Diferenciada de resíduos sólidos da Construção Urbana*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 190p. 1999.
- Pinto, T.P. *Utilização de resíduos de construção - estudo do uso em argamassas* (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1986.
- Ruach-Nir, I., Zrihan, O., Tzabari, Y. A Capsule for Dynamic In-Situ Studies of Hydration Processes Y Conventional Sem. *The Americas Microscopy And Analysis*, July, 2006, p.9-11.
- Sakata, K., Fuji, T., Ayano, T. Drying Shrinkage Of Recycled Concrete. *Anais do IV International Aci/Canmet Conference On Quality Of Concrete Structures And Recent Advances In Concrete Materials And Testing IV Hpc Olinda – Pe – Brazil*. 2005. p. 70-86.
- Scanduzzi, L., Andriolo, F.R. *Concreto e seus materiais ed.* São Paulo: Pini, 1946.
- Shayan, A.; Xu, A. Performance and properties of Structural Concrete Made With Recycled Concrete Aggregate. *ACI Materials Journal*, September-October, 2003. 371- 380.
- Silva, D. S., Pelisser, F. Concreto com agregado reciclado. *Anais do 47º Congresso Brasileiro de Concreto, São Paulo, 2005*, São Paulo: Ibracon, 2005. p. 246-258.
- Somayaji, S. *Civil engineering materials* 2 ed. Great Britain: Prentice Hall, 2001.
- Souza, U. E. L., Paliari, J. C., Agopyan, V., Andrade, A. C. *Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: Uma*

abordagem progressiva ambiente construído. Porto Alegre, Out./Dez. 2004; 4(4): 33-46,.

- Souza, C. A, Maia, M. F. F., Aguilar, M. T. P., Cetlin, P. R. Utilização de areia artificial obtida de resíduo de concreto para confecção de concreto estrutural. In: *VII Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, CT-206, São Paulo, 2006.
- *United States. General Services Administrator - Office Of Government Wide Policy Sustainable Development And Society October 2004.*
- *U.S. Environmental Protection Agency (EPA).* Disponível em: <http://www.epa.gov/>, acesso em 02/03/2005.
- Vieira, G. L., Dal Molin, D. C.C., Lima, F. B. Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduo de construção e demolição. *Engenharia Civil*. Minho. 2004; 19: 5-18.
- Vazquez, E. Draft of Spanish Regulations for the used of Recycled Aggregate in the Production of Structural Concrete. In: *International Rilem Conference on the use o Recycled Materials i Buildings ad Structures, Barcelona, Spain, 2004.*
- Vazquez, E. *Revista do Concreto - IBRACON*. Fevereiro de 2005; 30 - 29.
- Yannas, S.F. Waste concrete as aggregate for new concrete. *American Concrete Institute Journal*. August 1977; 74(37): 373-376.
- Zordan, S. E. *A Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto*. Campinas (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 1997.
- Zordan, S. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. *Anais do IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem a Construção Civil: Materiais Reciclados e suas Aplicações*. São Paulo, 2001. p.43-56