PRISCILA MEIRELES CARRIJO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA DE
AGREGADOS GRAÚDOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO DESEMPENHO
MECÂNICO DO CONCRETO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Civil.

São Paulo

2005

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

PRISCILA MEIRELES CARRIJO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA DE
AGREGADOS GRAÚDOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO DESEMPENHO
MECÂNICO DO CONCRETO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia de
construção civil e urbana.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Domingues
de Figueiredo

São Paulo

2005

Dedico esta obra primeiramente a Deus que é a base de tudo na vida. Aos meus pais Gilberto e Keula e aos meus irmãos Círcia e Willer que apesar da distância nunca deixaram de me apoiar. Dedico também à minha querida segunda família, Christiano, Kathrin, John Paul, Christian, Paola, Susan e Celso que sempre torceram por mim e minha felicidade. A todos vocês fica o meu eterno amor e gratidão.

"Se eu tivesse o dom de falar em outras línguas, dos anjos e dos homens, sem tê-las aprendido, e pudesse falar qualquer idioma que há na terra e nas hostes celestiais e, no entanto, não amasse os outros seria o sino ruidoso ou o símbalo estridente. Ainda que eu tivesse o dom da profecia, os conhecimentos de todos os mistérios e dos conteúdos científicos, ainda que eu tivesse toda fé a ponto de transportar montanhas, se não tivesse o amor eu não seria nada.

Ainda que eu distribuísse todos os meus bens aos famintos, excluídos e discriminados, ainda que entregasse meu coração e todo meu ser às chamas, se não tivesse amor, nada disso adiantaria e eu não seria nada.

O amor é paciente, o amor é prestativo, bondoso e benéfico; não é invejoso; não é egoísta e nem arrogante. O amor nada faz de inconveniente e não é escandaloso. Não busca os seus próprios interesses, não guarda rancor e não se irrita. Não se alegra com a injustiça mas se rejubila com a verdade. O amor tudo desculpa, tudo crê, tudo espera e tudo suporta.

O amor jamais acabará. As profecias desaparecerão, o dom das línguas cessará, o dom da ciência fenecerá. A nossa ciência é parcial e a nossa profecia é imperfeita. Quando chegar o que é perfeito o imperfeito desaparecerá."

Coríntios (13,1-10)

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho de pesquisa não é uma tarefa solitária, e sua conclusão exige muita dedicação e força de vontade. É por este motivo que muito tenho a agradecer a todas as pessoas que por inúmeras vezes me apoiaram com palavras e ações e torceram pelo meu sucesso.

Ao meu orientador prof. Dr. Antônio Domingues de Figueiredo pelo incentivo, confiança, ajuda em todos os momentos e exemplo de competência.

Ao prof. Dr. Vanderley Moacir John que também me orientou em toda minha trajetória e acreditou no meu potencial. Obrigada por toda a atenção e estímulo.

Ao prof. Dr. Carlos Eduardo Siqueria Tango e à profa. Dra. Denise Dal Molin por terem se disponibilizado a ler, criticar e contribuir para o melhoramento deste trabalho.

A todos os meus amigos da pós-graduação e integrantes da sala Olimpo, Evandro (Cabra), Clóvis, Paulo Barbosa, Manuelito, Gegê, Lili, Tati Cervo, Patrícia Neves, Patrícia Bauer, Tonhão, Leonardo Miranda, Thomas, Humberto, Marcelinho, Marcos Mitre, Fernanda, Leila Motta, Rui, Tati Tuchiya, Andréa Nince e em especial meus amigos Charles, Mairinha, Maurício e Ivie. Sem vocês todos essa jornada teria sido bem mais difícil. Obrigada pelos sorrisos, conselhos e pelo ótimo ambiente de trabalho.

Aos integrantes da sala Buraco Negro, principalmente ao Max, pela amizade, pelos favores e também pelos deliciosos jantares organizados.

Aos ajudantes do laboratório e estagiários Geisy, Hilton, Fernando, Maurício, Messias e Ismael, que foram fundamentais em várias etapas da pesquisa.

Gostaria de agradecer especialmente ao Sérgio Ângulo (Trecó), que foi para mim não somente um parceiro de pesquisa, mas um grande amigo. Obrigada por sempre estar disposto a ouvir, aconselhar, orientar e ajudar em todos os momentos que precisamos. Agradecer à você por tudo seria muito pouco. Obrigada também pelos deliciosos chocolates que trazia para mim quando viajava!!

Aos professores do Departamento de Construção Civil, Maria Alba, Paulo Helene, Silvia Selmo, Vahan Agopyan e Selmo Kuperman e ao professor do Departamento de Minas e de Petróleo Sergio Medici pela paciência e pelos ensinamentos.

A todos os técnicos do laboratório, Dorval Aguiar, Renata Monte, Reginaldo, Mário, Sr. João e em especial Adilson. Vocês foram para mim não somente amigos, mas também professores. Obrigada por toda a ajuda oferecida quando precisei.

Aos técnicos do laboratório do PEF que também me socorreram inúmeras vezes.

Ao prof. Dr Arthur Pinto Chaves do Departamento de Minas e de Petróleo pela atenção e ajuda oferecida. Ao técnico de laboratório do mesmo departamento, Tico por toda a ajuda durante várias etapas do trabalho, principalmente as que demandaram maior disposição física.

Aos professores e técnicos do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) pelo empréstimo do equipamento Sink and Float e por nos acolher de forma tão amigável.

Ao prof. da PUC Marco Antonio Carnio que gentilmente emprestou a pá misturadora da argamassadeira. Sem isso o término desta dissertação talvez teria que ser prorrogado.

À prof. Maria Elena pelas inúmeras reuniões, sugestões e contribuições. Obrigada pela enorme paciência.

A todos os funcionários da biblioteca pela ajuda nas pesquisas bibliográficas.

Agradeço também à Engrácia e à Fátima que literalmente “quebraram meu galho” por várias vezes, me orientando nos assuntos burocráticos dentro e fora da escola.

Ao pessoal da informática que sempre socorreram a mim e ao meu computador, Edson Timoteo e Patrícia.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da bolsa de estudo desta pesquisa.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), através do Fundo Verde e Amarelo, pelo financiamento das viagens, compra de materiais e equipamentos, contratação de pessoal, transporte de materiais, etc.

À Usina de Reciclagem de Itaquera pela doação dos agregados utilizados no trabalho.

Ao chefe do Laboratório de Química do IPT, Valdecir Quarcioni por ter realizado gratuitamente alguns testes de essencial importância para a pesquisa.

À ABCP por também ter realizado gratuitamente os ensaios de caracterização do cimento, em especial aos engenheiros Cláudio e Flávio.

Aos meus amigos de Uberlândia, especialmente o Dudu e a doidinha da Grécia que me ligavam várias vezes para me incentivar e animar.

Aos meus amigos fora da Poli que conquistei aqui em São Paulo. Vocês também contribuíram para que a minha vida e vivência nessa cidade se tornassem mais agradável.

À minha família, Raquel, Nathália, Glenda, John Tiborc, Simon e em especial aos meus pais e irmãos que mesmo de longe sempre torceram por mim e pelo meu sucesso. A saudade e enorme distância não foram suficientes para diminuir sua força e incentivo. Obrigada por terem me dado a chance, possibilidade e apoio financeiro e moral para continuar os estudos. Sei que muitos nunca terão essa chance. Obrigada pelos cuidados e conselhos em todos os anos de minha vida.

Não posso deixar de agradecer também a nossa ajudante Mariza, que por muitos anos cuida de mim, de minha família e de meus lindos e queridos cachorrinhos.

À minha segunda família, Christiano, Kathrin, John Paul, Christian, Paola, Susan e Celso que me recebeu de braços abertos, me incentivou, ajudou, orientou e apoiou. A vocês serei eternamente grata por terem me acolhido com tanto amor e carinho e que na ausência de minha família se tornaram meus pais, companheiros e amigos. Conviver com vocês durante todos esses anos foi maravilhoso. É uma felicidade saber que tenho pessoas como vocês, que sempre poderei confiar e contar.

A todos aqueles de alguma forma direta ou indireta contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

A Deus que sempre esteve presente em minha vida, mesmo nos momentos em que Dele me distanciei.

RESUMO

Em virtude de muitas dúvidas ainda existentes, referentes ao desempenho e durabilidade dos concretos com agregados de RCD reciclados, sua utilização até o momento é limitada, não chegando aos níveis desejáveis e necessários. Somam-se a essas, a falta de gestão, de ferramentas de controle de qualidade, de normalização e de melhoria nas operações unitárias de beneficiamento do RCD.

Os agregados reciclados apresentam características físicas e comportamento bastante heterogêneo, o que dificulta sua utilização com confiabilidade, principalmente em situações que demandam um maior controle e responsabilidade por parte do material empregado, como no caso de concretos estruturais. A porosidade e absorção dos agregados reciclados influenciam, de maneira significativa, as propriedades do concreto fresco e endurecido. Mesmo que estes sejam separados por fases (concreto, argamassa e cerâmica), é possível encontrar porosidades variadas dentro de uma mesma fase. Portanto, não se pode afirmar que o comportamento de concretos com agregados de mesma fase será homogêneo. Por este motivo, para esta pesquisa os agregados reciclados vermelho (predominância visual de cerâmica vermelha) e cinza (predominância visual de materiais cimentícios) foram separados em quatro faixas de densidade ($d < 1,9$; $1,9 < d < 2,2$; $2,2 < d < 2,5$; $d > 2,5$ g/cm³). Foram analisados os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água, índice de vazios, massa específica e consumo de cimento. Os resultados obtidos nos ensaios de avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos usando agregados vermelho e cinza e concretos com agregados convencionais foram analisados para quantificar a influência da porosidade dos agregados. Verificou-se que a influência da natureza mineralógica dos agregados (vermelho ou cinza) influenciou as propriedades de maneira menos intensa que sua porosidade. Além disso, os concretos produzidos com RCD de densidade inferior a 2,2 g/cm³ apresentaram menor resistência e módulo e maior absorção de água, tornando o concreto muito menos eficiente para aplicações estruturais. A separação dos agregados em faixas de densidade garantiu um comportamento bastante homogêneo dos concretos, quando se utilizou agregados da mesma faixa. Com isso, foi possível estabelecer uma correlação entre a porosidade dos agregados e o desempenho mecânico dos concretos. A separação por faixas de densidade se mostrou como um critério confiável de classificação e caracterização dos agregados para a fabricação de concretos, podendo ser utilizado em conjunto com a separação visual normalmente empregada.

ABSTRACT

Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates have yet not been widely used in concrete applications due to the many doubts relating to its performance and durability. The lack of an appropriate CDW recycling management, standardization, an innovative process technology as well as faster, cheaper and accurate quality control techniques also limits the use of this material.

The reliable use of recycled CDW aggregates, especially in major situations such as in structural concrete, is still difficult due to its heterogeneous physical characteristics and behavior. Fresh and hard concrete properties are significantly influenced by recycled aggregate porosity and water absorption. Even if aggregates are separated in phases by hand sorting (concrete, mortar and ceramics) it is possible to find different porosities within the same phase and, for that reason, concretes will also present heterogeneous behavior. In this direction, the two types of recycled aggregates used in this research – named red (mainly constituted of red ceramics) and grey (mainly constituted of cementitious materials) – were separated in four density classes ($d < 1.9$; $1.9 < d < 2.2$; $2.2 < d < 2.5$; $d > 2.5$ g/cm³). The compressive strength, elastic modulus, water absorption, specific weight and cement consumption of concretes were analyzed. The mechanical and physical properties of concretes were studied in terms of the recycled aggregate porosity and comparisons of results obtained with concretes using red or grey recycled aggregates and with ordinary aggregates were carried out. It was verified that the concretes properties were mostly influenced by the aggregates porosity when compared to its phase. Recycled aggregates with bulk specific gravity under 2.2 g/cm³ provided a significant reduction of the compressive strength and the elastic modulus and an increase of water absorption, producing concretes less efficient for structural applications. The behaviour of concretes produced by aggregates within the same density class was found to be homogeneous. A relation between porosity of aggregates and mechanical performance of concrete was verified. The heavy media separation can be used, together with the hand sorting, as an efficient and reliable aggregate quality control method for the production of concretes.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	1
1.1.1 Desenvolvimento sustentável na construção civil	3
1.1.2 Desenvolvimento insustentável na construção civil	5
1.2 Objetivo	6
1.3 Relevância da pesquisa	7
1.4 Estrutura da dissertação.....	9
2 RECICLAGEM DA FRAÇÃO MINERAL DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	11
2.1 Panorama da reciclagem no Brasil e no mundo.....	12
2.1.1 Dificuldades associadas ao crescimento da reciclagem.....	12
2.1.2 Algumas medidas já realizadas	13
2.1.3 Algumas recomendações normativas para definição, classificação e destinação do resíduo da construção civil	15
2.2 Composição dos resíduos de construção e demolição.....	18
2.3 Utilização de agregados reciclados de RCD.....	21
2.3.1 Processamento do RCD para utilização como agregado reciclado	21
2.3.2 Possíveis aplicações da fração mineral do RCD	27
2.3.3 Aplicação do agregado reciclado de RCD em concretos	28
3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS E DOS CONCRETOS RECICLADOS	31
3.1 Porosidade, permeabilidade e absorção dos agregados e concretos	31
3.1.1 Definições	31
3.1.2 Influência da porosidade e permeabilidade na durabilidade do concreto	33
3.1.3 Porosidade e absorção dos agregados reciclados	35
3.1.4 Influência da porosidade e absorção dos agregados reciclados nas propriedades do concreto fresco e endurecido.....	36
3.2 Influência dos agregados graúdos de RCD reciclados no desempenho mecânico do concreto.....	39
3.2.1 Influência da porosidade no desempenho mecânico do concreto.....	39
3.2.2 Influência dos agregados no desempenho mecânico do concreto	40
4 METODOLOGIA	47
4.1 Etapa I: Seleção e aquisição dos materiais	47
4.1.1 Cimento.....	47
4.1.2 Agregados miúdos naturais.....	47
4.1.3 Agregados graúdos naturais.....	48
4.1.4 Agregados graúdos reciclados	48

4.2	Etapa II: Beneficiamento e ensaios dos agregados graúdos reciclados	51
4.2.1	Britagem secundária	51
4.2.2	Peneiramento	52
4.2.3	Eliminação da fração fina (pulverulentos).....	52
4.3	Etapa III: Separação dos agregados graúdos reciclados por faixas de densidade	52
4.3.1	Separação com cloreto de zinco ($ZnCl_2$).....	53
4.3.2	Separação com bromofórmio ($CHBr_3$)	55
4.3.3	Separação dos agregados pelo equipamento <i>Sink and Float</i>	57
4.4	Etapa IV: Homogeneização dos agregados graúdos reciclados	60
4.5	Etapa V: Caracterização física dos materiais.....	61
4.5.1	Determinação da composição granulométrica dos agregados	61
4.5.2	Determinação da massa específica dos materiais	62
4.5.3	Determinação da absorção de água dos agregados graúdos	62
4.5.4	Caracterização do cimento.....	63
4.6	Etapa VI: Produção dos concretos	63
4.6.1	Definição dos traços dos concretos de referência e reciclados	63
4.6.2	Escolha do aditivo.....	65
4.6.3	Procedimentos na moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova	65
4.7	Etapa VII: Ensaio de laboratório dos concretos no estado fresco.....	67
4.7.1	Trabalhabilidade	67
4.7.2	Massa específica	67
4.8	Etapa VIII: Ensaio de laboratório dos concretos no estado endurecido.....	67
4.8.1	Resistência à compressão	68
4.8.2	Módulo de elasticidade	68
4.8.3	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	69
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
5.1	Agregados	71
5.1.1	Composição granulométrica	71
5.1.2	Massa específica	73
5.1.3	Absorção de água dos agregados graúdos reciclados	74
5.2	Separação visual das diferentes fases presentes nos agregados graúdos reciclados (catação).....	78
5.3	Cimento.....	80
5.3.1	Massa específica	80
5.3.2	Caracterização do cimento.....	80
5.4	Concretos	80
5.4.1	Resultados iniciais de resistência à compressão e módulo de elasticidade	80
5.4.2	Concretos no estado fresco.....	85
5.4.3	Teor de aditivo.....	88
5.4.4	Concretos no estado endurecido	91
6	CONCLUSÕES	115
6.1	Metodologia	115
6.2	Influência da densidade do agregado reciclado de RCD nas propriedades do concreto.....	117
6.3	Viabilidade do concreto estrutural com agregado de RCD reciclado.....	118
6.4	Propostas para futuras pesquisas	118
	ANEXO	121

Caracterização físico-mecânica	121
Composição Química	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Deposição ilegal do resíduo de construção e demolição na malha urbana.....	2
Figura 2-1 - Composição do RCD na Holanda, em massa (%). FONTE: BOSSINK; BROUWERS (1996)	19
Figura 2-2 - Variabilidade dos agregados graúdos de RCD reciclados em função de caçambas processadas (a) composição - catação, (b) absorção de água e (c) massa específica seca. Dados de (ANGULO, 2000).	20
Figura 2-3 - (a) Retirada manual de contaminantes; (b) Detalhe do aço retirado após a britagem do RCD.....	21
Figura 2-4 - Agregados graúdos reciclados. (a) fase cinza; (b) fase vermelha	22
Figura 2-5 - Desenho esquemático sobre o funcionamento do “Alljig” e do “Allflux”. Fonte: All Mineral.....	25
Figura 2-6 - Desenho esquemático sobre o funcionamento do “Allair”. Fonte: All Mineral	26
Figura 3-1 - Correlação entre o coeficiente de permeabilidade de uma pasta e sua porosidade capilar. FONTE: POWERS, 1958.	32
Figura 3-2 – (a) Relação entre porosidade e permeabilidade do concreto; (b) relação entre permeabilidade e resistência à compressão do concreto. FONTE: AL-AMOUDI et al. (1996) apud DE LARRARD (1999).	34
Figura 3-3 - Correlação entre massa específica aparente e absorção de água para as diferentes espécies minerais presentes nos agregados graúdos de RCD reciclados. FONTE: ANGULO, 2000.	36
Figura 3-4 - - Representação esquemática da umidade dos agregados. FONTE: NEVILLE (1982).	37
Figura 3-5 - Relação entre a porosidade total do concreto e (a) resistência à tração; (b) resistência à compressão. FONTE: GÓMEZ-SOBERÓN (2002).	40
Figura 3-6 - Resistência à compressão de concretos convencionais e reciclados. FONTE: CHEN et al. (2003).	42
Figura 3-7 - Resistência do concreto na presença de vários teores de substituição. Os primeiros números da legenda indicam teores de substituição dos agregados miúdos (%), e os segundos números, de agregados graúdos. FONTE: LEITE (2002).	43
Figura 3-8 – Módulo de elasticidade de concretos convencionais e reciclados. FONTE: CHEN et al. (2003).	45
Figura 4-1 – Peneirador mecânico utilizado na obtenção do material cinza	49
Figura 4-2 – Esteira transportadora e pilha do material vermelho obtido após britagem da Pv	49
Figura 4-3 - Esquema do processo de reciclagem da Pv para obtenção do material vermelho	50
Figura 4-4 - Esquema do processo de reciclagem da Pc para obtenção do material cinza... ..	50
Figura 4-5 - Britador de mandíbula	51
Figura 4-6 - Esquema do processo de britagem secundária dos agregados reciclados	51
Figura 4-7 - Representação esquemática da separação dos agregados graúdos reciclados por densidade	57

Figura 4-8 - Equipamento <i>Sink and Float</i> e ferro silício em pó	58
Figura 4-9 –Procedimentos na separação do material. (a) alimentação no cilindro maior; (b) retirada do material afundado (peneira do cilindro maior); (c) retirada do material flutuado (peneira do cilindro menor); (d) lavagem dos agregados.	59
Figura 4-10 - Sequência do processo de homogeneização dos agregados reciclados	61
Figura 4-11 - Pilha de homogeneização e retirada da alíquota.....	61
Figura 4-12 - Picnômetro a gás Hélio, marca Quantachrome, modelo MUP-SOC.....	62
Figura 4-13 - Misturador utilizado no preparo dos concretos	66
Figura 4-14 - Número de corpos-de-prova utilizados para cada ensaio realizado	67
Figura 4-15 - Ensaio de módulo de elasticidade	69
Figura 4-16 - Ensaio de absorção dos concretos	69
Figura 5-1 - Curvas da distribuição granulométrica dos agregados graúdos com os limites superior e inferior.	72
Figura 5-2 - Distribuição granulométrica da areia e limites superior e inferior da zona 4. ..	73
Figura 5-3 - Ganho de massa dos agregados reciclados em função do tempo de imersão na água.	77
Figura 5-4 - Perda de massa dos agregados reciclados devido sua desagregação no ensaio de absorção em função do tempo.	78
Figura 5-5 - Porcentagem em relação à massa total das diferentes fases presentes nos agregados graúdos reciclados.	79
Figura 5-6 - Expansão e fissuras observadas nos corpos -de-prova. (a) antes da desmoldagem; (b) após a desmoldagem.	81
Figura 5-7 - Efeito da expansão sobre a resistência à compressão dos concretos com agregados ciza.	82
Figura 5-8 - Efeito da expansão sobre a resistência à compressão dos concretos com agregados vermelhos.	82
Figura 5-9 - Efeito da expansão sobre o módulo de elasticidade dos concretos com agregados vermelhos.	83
Figura 5-10 - Efeito da expansão sobre o módulo de elasticidade dos concretos com agregados cinzas.	83
Figura 5-11 - Valores da medida da consistência dos concretos pelo abatimento do tronco de cone.	87
Figura 5-12 - Teor de aditivo adicionado ao concreto em função da massa específica dos agregados graúdos.	89
Figura 5-13 – Teor de aditivo em função da massa específica dos agregados graúdos.	90
Figura 5-14 - Massa específica do concreto fresco em função da massa específica dos agregados graúdos.	91
Figura 5-15 - Resistência à compressão dos concretos em função de sua relação a/c e massa específica dos agregados graúdos vermelhos.	93
Figura 5-16 - Resistência à compressão dos concretos em função de sua relação a/c e massa específica dos agregados graúdos cinzas.	94
Figura 5-17 - Resistência à compressão dos concretos em função da massa específica dos agregados, para cada relação a/c.....	95
Figura 5-18 - Resistência à compressão normalizada em função da massa específica dos agregados graúdos.	96
Figura 5-19 - Ruptura dos agregados reciclados nos concretos com agregados menos densos.	97

Figura 5-20 - Ruptura da pasta ao redor dos agregados nos concretos com agregados naturais e reciclados mais densos.	97
Figura 5-21 - Módulo de elasticidade em função da relação a/c dos concretos, para cada faixa de densidade de agregado cinza.	99
Figura 5-22 - Módulo de elasticidade em função da relação a/c dos concretos, para cada faixa de densidade de agregado vermelho.	99
Figura 5-23 - Módulo de elasticidade dos concretos em função da massa específica dos agregados graúdos, para cada relação a/c.	100
Figura 5-24 - Módulo de elasticidade normalizado dos concretos em função da massa específica dos agregados graúdos.	101
Figura 5-25 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos concretos, para cada faixa de densidade do agregado cinza.	102
Figura 5-26 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos concretos, para cada faixa de densidade de agregado vermelho.	102
Figura 5-27 - Diferença entre as curvas experimentais e teóricas da relação entre módulo e resistência dos concretos. (a) Convencionais; (b) Agregados cinza e vermelho de densidade 1,9 g/cm ³ ; (c) Agregado vermelho de densidade 1,9-2,2 g/cm ³ ; (d) Agregado cinza de densidade 1,9-2,2; (e) Agregado vermelho de densidade 2,2-2,5; (f) Agregado cinza de densidade 2,2-2,5; (g) Agregado vermelho de densidade 2,5; (h) Agregado cinza de densidade 2,5.	104
Figura 5-28 - Massa específica real do concreto em função da massa específica do agregado, para cada relação a/c.	106
Figura 5-29 - Massa específica real do concreto em função da relação a/c, para cada faixa de densidade dos agregados.	107
Figura 5-30 - Absorção de água dos concretos em função da massa específica dos agregados, para cada relação a/c.	107
Figura 5-31 - Índice de vazios dos concretos em função da massa específica dos agregados, para cada relação a/c.	108
Figura 5-32 - Relação entre absorção e resistência à compressão dos concretos com agregado cinza, para cada faixa de densidade.	110
Figura 5-33 - Relação entre absorção e resistência à compressão dos concretos com agregado vermelho, para cada faixa de densidade.	110
Figura 5-34 - Relação entre absorção e resistência dos concretos, para cada relação a/c. .	111
Figura 5-35 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão dos concretos com agregado vermelho.	112
Figura 5-36 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão dos concretos com agregado cinza.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 - Geração de resíduo de construção e demolição em algumas cidades brasileiras. FONTE: OLIVEIRA (2002) e LEITE (2001) apud OLIVEIRA; ASSIS; MATTOS (2004).....	6
Tabela 2-1 - Produção anual de RCD e porcentagem utilizada de alguns países europeus. FONTE: ALEJOS et al. (2004); LAURITZEN (2004).	14
Tabela 2-2 - Classificação, definição e destinação do resíduo de construção, de acordo com a Resolução CONAMA (2002)	16
Tabela 2-3 - Classificação do resíduo de construção e de finição segundo RILEM 121-DRG (1994).....	17
Tabela 2-4 - Classificação, definição e destinação do resíduo de construção segundo a Danish Concrete Association. FONTE: GLAVIND; HAUGAARD (1998).	18
Tabela 2-5 - Máxima quantidade de contaminantes permitida nos agregados reciclados de RCD. FONTE: ALEJOS et al. (2004).	22
Tabela 3-1 - Tolerância máxima no valor da consistência dos concretos reciclados conforme recomendações espanholas. FONTE: ALEJOS et al. (2004)	39
Tabela 3-2 - Redução de resistência dos concretos reciclados em comparação aos concretos convencionais. FONTE: JUAN e GUTIÉRREZ (2004b)	42
Tabela 3-3 - Média de redução do módulo de elasticidade dos concretos reciclados em comparação aos concretos convencionais, para diferentes teores de substituição. FONTE: JUAN e GUTIÉRREZ (2004b)	45
Tabela 3-4 - Coeficientes de correção para o cálculo do módulo de elasticidade em concretos reciclados. FONTE: JUAN e GUTIÉRREZ (2004b).....	46
Tabela 4-1 - Teores de cloretos solúveis para as amostras de referência, após separação em densidade e lavagem.....	55
Tabela 4-2 – Sais e sulfatos solúveis nos agregados antes e após lavagem com água	55
Tabela 4-3 - Valores de massa específica e absorção dos agregados separados nas densidades acima e abaixo de $2,2 \text{ g/cm}^3$	60
Tabela 4-4 - Traços para o consumo de cimento igual a 300 kg/m^3	64
Tabela 4-5 - Traços para o consumo de cimento igual a 400 kg/m^3	64
Tabela 4-6 - Traços para o consumo de cimento igual a 500 kg/m^3	65
Tabela 5-1 - Porcentagem retida acumulada dos agregados graúdos nas peneiras.	71
Tabela 5-2 - Módulo de finura, dimensão máxima e graduação dos agregados graúdos.	72
Tabela 5-3 - Porcentagem retida acumulada nas peneiras.	73
Tabela 5-4 - Módulo de finura, dimensão máxima e graduação da areia.	73
Tabela 5-5 - Resultados da determinação da massa específica dos agregados.....	74
Tabela 5-6 - Resultados dos ensaios de absorção dos agregados.	75
Tabela 5-7 - Absorção de água dos agregados reciclados de concreto e naturais. FONTE: GÓMEZ-SOBERÓN (2002)	75
Tabela 5-8 - Porcentagem de cada fase presente nos agregados graúdos reciclados em relação à massa total.	78

Tabela 5-9 - Comparação das resistências das metades superiores e inferiores de alguns corpos-de-prova.	85
Tabela 5-10 - Resistência média dos concretos e desvio padrão dos três corpos-de-prova ensaiados.	92
Tabela 5-11 – Módulo de elasticidade médio dos concretos e desvio padrão dos três corpos-de-prova ensaiados.	98
Tabela 5-12 - Coeficiente para cálculo do módulo de elasticidade em função da qualidade do agregado. FONTE: Levy (2001).	103
Tabela 5-13 - Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica real dos concretos.	105
Tabela 5-14 - Proposta para classificação dos concretos segundo HELENE (1983) de acordo com a porosidade e a absorção de água.	108
Tabela 5-15 - Aumento do consumo de cimento para cada faixa de densidade de agregado vermelho para se obter a mesma resistência.	112
Tabela 5-16 - Aumento do consumo de cimento para cada faixa de densidade de agregado cinza para se obter a mesma resistência.	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A Indústria da Construção representa uma das atividades humanas com maior impacto sobre o meio ambiente. O volume de recursos naturais utilizados pela mesma, muitos deles não-renováveis, corresponde a pelo menos um terço do total consumido anualmente por toda a sociedade (SILVA, 2000).

Várias são as fontes de geração de resíduos na construção civil. Por exemplo, a falta de qualidade dos bens e serviços, no setor da construção, pode dar origem às perdas de materiais, que saem das obras em forma de entulho e contribuem sobremaneira no volume de resíduos gerados (LEITE, 2001). Somam-se aos resíduos de construção, os de demolição, que podem ser originados pelo crescimento econômico e demográfico das cidades, pela necessidade de manutenção, recuperação e reforma das estruturas, entre outros.

Ao contrário do volume crescente dos resíduos de construção e demolição (RCD), as jazidas de agregados naturais para concreto estão se tornando mais escassas, fazendo com que se busque este material em lugares cada vez mais distantes, aumentando seus custos de produção, transporte e comercialização, conseqüentemente refletindo no custo total da obra.

No Brasil, a parcela de resíduos de construção e demolição (RCD) representa cerca de 45% em massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU) (PINTO, 1999). No exterior, este valor varia em torno de 13 a 67% (JOHN, 2000; HENDRIKS, 2000).

Apesar do grande volume de RCD gerado diariamente, percebe-se uma menor preocupação com estes, em relação ao RSU, por acreditar-se erroneamente que os RCD possuem pouca toxicidade. Entretanto, embora estes resíduos sejam considerados inertes pela NBR 10.004 (ABNT, 1987), componentes orgânicos como plásticos, tintas, óleos, asfaltos, madeiras, e ainda, materiais de pintura, substâncias de tratamento de superfícies, amianto e metais pesados, presentes nestes resíduos, podem contaminar o solo devido à lixiviação (NBR 1005 (2004), NEN 7343, NEN 7349 e NEN 7341¹) ou

¹ Normas holandesas para se determinar, através de testes de lixiviação, a análise dos riscos de contaminação ambiental, devido à interação da água com produtos contendo resíduos.

solubilização de certas substâncias nocivas e colocar em risco a saúde das pessoas (ÂNGULO; JOHN, 2002; LEITE, 2001).

A deposição irregular dos RCD (Figura 1-1) na malha urbana causa assoreamento dos cursos d'água, poluição dos aquíferos, entupimento de galerias e bueiros, degradação de áreas urbanas, proliferação de insetos, animais peçonhentos e roedores, afetando a saúde pública (PINTO, 1999; BRITO, 1998; OLIVEIRA; ASSIS, 1999). Segundo Schneider (2003), mais de 20% dos RCD são depositados ilegalmente dentro da cidade de São Paulo, gerando um custo de R\$45 x 10⁶/ano (SCHNEIDER, 2003).

Figura 1-1 - Deposição ilegal do resíduo de construção e demolição na malha urbana

Há atualmente a necessidade de uma maior reutilização e reciclagem do RCD, entretanto, só muito recentemente os estudos para a reciclagem destes começaram a receber maior impulso (SILVA, 2000).

Na União Européia são produzidos cerca de 180 milhões de toneladas de RCD por ano, ou seja, cerca de 480 kg/pessoa/ano, sendo que a taxa de reciclagem deste material varia de 5% (Grécia, Portugal e Espanha) a 80% (Bélgica) para os diferentes países (DORSTHOST; HENDRIKS, 2000). Os motivos desta grande variabilidade na taxa de reciclagem devem-se aos diferentes recursos naturais, distâncias de transporte, situações econômicas e tecnológicas e densidade populacional de seus países constituintes.

1.1.1 Desenvolvimento sustentável na construção civil

No início da década de 80, uma comissão internacional foi formada para planejar estratégias de ações em relação ao desenvolvimento e ambiente. Desta comissão, surgiu um documento – conhecido como Relatório de Brundtland – que definiu o conceito de desenvolvimento sustentável como: *“a humanidade deverá ter habilidades de desenvolver-se, relevando-se as necessidades essenciais para a erradicação da pobreza, dentro da limitação ecológica da Terra, sem comprometer as habilidades das gerações futuras”*.

Uma das propostas de desenvolvimento sustentável difícil de ser alcançada é a da “desvinculação” entre o desenvolvimento (ou crescimento) e a geração de impactos ambientais. Esta desvinculação poderia ser alcançada através de uma redução no consumo de materiais e matérias-primas naturais para a produção de um mesmo bem. Para isso, seria necessária uma melhoria do processo de construção e reciclagem, através do aperfeiçoamento dos projetos, substituição dos materiais tradicionais por outros mais eficientes e melhoria da durabilidade dos produtos.

Os relatos das primeiras utilizações do RCD ocorreram no Império Romano. Após a 2ª guerra mundial, a reciclagem do RCD foi uma atividade relevante na Europa como forma de reconstrução das cidades destruídas (WEDLER; HUMMEL, 1946 *apud* LEVY, 1997; HENDRIKS, 2000).

Atualmente, algumas administrações de municípios de médio e grande porte estão procurando equacionar o problema do RCD através da instalação de usinas de processamento, para o reuso do material reciclado (MACHADO; LATTERZA; MENDES, 1998). Como exemplo, a usina de reciclagem de Ribeirão Preto (SP), em operação desde o final de 1996, produz agregados reciclados originados de RCD, sem peneiramento, em bica corrida. Outras estações, como a de Itaquera em São Paulo, a de Belo Horizonte (MG) e a de Vinhedo (SP) também produzem agregados reciclados, sendo estes utilizados principalmente em pavimentação.

Algumas utilizações dos RCD já são bem difundidas, como o uso em base e sub-base de pavimentos, produção de concretos magros sem fins estruturais, fabricação de blocos de vedação, utilização em projetos de drenagem, entre outras aplicações com pequena exigência de desempenho mecânico. Entretanto, percebe-se que o mercado dos RCD deve crescer, e para isso, a sua utilização no concreto se torna essencial (BANTHIA; CHAN, 2000; DHIR *et al.* 1999), uma vez que cerca de 6 bilhões de tonelada/ano de concreto são produzidos mundialmente.

No Brasil o uso do RCD para a produção de concreto ainda é bastante restrito, apesar disso, crescem o número de pesquisas voltadas para esse objetivo (ZORDAN, 1997; LEITE, 2001; LEVY, 2001). No exterior, algumas organizações de pesquisa, como é o caso do Japão e Holanda, já possuem normas para utilização do RCD. Além disso, muitos estudos sobre o uso e comportamento destes materiais são realizados em países como Estados Unidos, Alemanha, Inglaterra, Dinamarca, França e Bélgica (RANVIDRARAJAH, et al., 1987; BARRA, 1996; HANSEN, 1992).

Segundo Angulo (2005), existem diversos órgãos nacionais e internacionais preocupados em como alcançar sustentabilidade nas atividades da construção civil tais como o CIB² (*International Council for Research and Innovation in Building and Construction*), o ISCOWA³ (*The International Society for the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials*); a RILEM⁴ (*Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des recherches sur les Matériaux et les construction*); a ANTAC⁵ (Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído) e o comitê técnico CT-206 do IBRACON⁶ (Instituto Brasileiro do Concreto).

Recentemente no Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002) publicou uma resolução que dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil e que entrou em vigor no início de 2003.

A definição de estratégias para minimização do uso de recursos não renováveis, economia de energia e redução de resíduos de construção, em especial, vem sendo amplamente estimulada por agências governamentais, instituições de pesquisa e pelo setor privado de diversos países (PINTO, 1999; HENDRIKS, 2000). Desta forma, políticas públicas estão impondo requisitos ambientais a inúmeras atividades econômicas e a demanda por produtos ambientalmente menos agressivos cresce em paralelo. No Brasil, elas estão sendo generalizadas por força de decretos municipais tais como os nº 37.952/99, nº 13.298/02, nº 42.217/02 da Prefeitura de São Paulo e a resolução nº 307 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) (ANGULO, 2005).

² <http://www.cibworld.nl>

³ <http://www.iscowa.org>

⁴ http://www.rilem.org/tc_urm.php

⁵ <http://www.antac.org.br/>

⁶ <http://www.ibracon.org.br/Comite/semi206-6.html>

1.1.2 Desenvolvimento insustentável na construção civil

O volume de água, energia e matérias-primas utilizado pela construção civil corresponde a pelo menos um terço do total consumido anualmente por toda a sociedade (SJOSTROM, 1992; JOHN, 2000).

De acordo com uma estimativa realizada, a indústria de concreto consome agregados naturais a uma taxa de aproximadamente 8 bilhões de toneladas por ano (MEHTA, 1999). No Brasil, os agregados naturais estão entre os bens minerais mais consumidos, sendo 90% da produção destinado à construção civil (WHITAKER, 2001), destes, 220 milhões de toneladas/ano⁷ são voltados somente para a produção de concretos e argamassas.

Atualmente na Europa, há um desperdício equivalente a 200 milhões de toneladas anuais entre concreto, pedras e recursos minerais valiosos (PALIARI; SOUZA; AGOPYAN; 2000). Tal volume de materiais seria suficiente para se construir uma rodovia com seis faixas de rolamento interligando as cidades de Roma e Londres.

Estima-se que no Brasil, para cada metro quadrado construído, 150 kg de resíduos são gerados, ou seja, para cada 250 m² de área construída há uma remoção de aproximadamente 10 caçambas de resíduos de construção (PINTO, 2000).

De acordo com Pinto (1996), os RCD correspondem a 2/3 em massa do total de resíduos coletados em cidades de médio e grande porte do Brasil. Estes resíduos geram custos tanto para o setor público, quanto para o privado. Com a deposição irregular dos RCD pela malha urbana, as prefeituras gastam em média entre R\$ 13/t a R\$ 32/t. Isto apesar dos geradores dos resíduos pagarem pela sua retirada das obras. Na Grande São Paulo é cobrado de R\$ 9/m³ a R\$ 20/m³ por esta remoção e, no interior paulista, de R\$3/m³ a R\$ 12/m³ (LEAL, 1999).

A Tabela 1-1 indica a quantidade de RCD gerada em algumas das principais cidades brasileiras.

⁷ JOHN, V. M. A construção e o meio ambiente. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm#topo. Acesso em: 2003, Setembro 23.

Tabela 1-1 - Geração de resíduo de construção e demolição em algumas cidades brasileiras.
FONTE: OLIVEIRA (2002) e LEITE (2001) apud OLIVEIRA; ASSIS; MATTOS (2004).

Cidades	População (10⁶)	Geração de resíduo (t/dia)	Resíduo/hab.dia (kg)
São Paulo - SP	10,00	10866	1,08
Porto Alegre - RS	1,20	350	0,29
Salvador - BA	2,23	1700	0,77
Ribeirão Preto - SP	0,46	1043	2,26
São José do Rio Preto - SP	0,32	687	2,14
Jundiaí - SP	0,29	712	2,45
Santo André - SP	0,63	1013	1,60
Belo Horizonte - MG	2,01	1200	0,60
Vitória da Conquista - BA	0,24	310	1,29
São José dos Campos - SP	0,50	700	1,40
Guaratinguetá - SP	0,10	60	0,60
Taubaté - SP	0,23	230	1,00
Ubatuba - SP	0,06	49	0,82
Caçapava - SP	0,07	54	0,77
Pindamonhangaba - SP	0,12	66	0,55
Tremembé - SP	0,03	9	0,27

Com isso, percebe-se a importância e a necessidade de novas pesquisas, com o intuito de se adquirir conhecimentos tecnológicos necessários e suficientes para a reutilização cada vez maior e melhor dos RCD.

1.2 Objetivo

O que se pretende com este trabalho é analisar a influência da porosidade média dos agregados reciclados de RCD (ou a massa específica) no comportamento mecânico e nas propriedades físicas do concreto, e verificar se é possível a produção eficiente de concretos estruturais produzidos com agregados oriundos de RCD.

Para isso, os agregados reciclados vermelhos (predominância visual de cerâmica vermelha) e cinzas (predominância visual de produtos cimentícios) foram separados em quatro diferentes intervalos de densidade. E através de ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água dos concretos, analisou-se a influência que a porosidade dos agregados graúdos reciclados exercem sobre estas propriedades mecânicas.

1.3 Relevância da pesquisa

A geração de resíduos sólidos na construção civil tem trazido preocupação quanto aos efeitos em relação ao meio ambiente, porque a sua deposição raras vezes obedece a um critério adequado.

Procurando definir usos para os reciclados graúdos, esta pesquisa pretende ampliar os conhecimentos já existentes referentes a este material, e com isso impulsionar sua utilização no mercado. Procura-se, com isto, possibilitar que os agregados graúdos reciclados sejam melhor direcionados para aplicações mais compatíveis à sua qualidade, evitando com isso que materiais nobres sejam desperdiçados em aplicações menos exigentes (*downcycling*).

Os agregados reciclados de RCD possuem geralmente uma alta variabilidade quanto a composição e origem, interferindo assim no comportamento dos materiais fabricados a partir destes. Com isso, o controle dessa variabilidade significaria em um controle também, da dispersão dos valores de resistência dos concretos produzidos a partir dos agregados reciclados.

Pelas pesquisas nacionais e internacionais analisadas até o momento, percebe-se uma falta de consenso entre os trabalhos, com relação ao comportamento e desempenho de concretos reciclados. Esta disparidade talvez possa ser explicada por motivos como: (1) a grande variabilidade na composição dos agregados reciclados (grande heterogeneidade), (2) a possível presença de impurezas, (3) pelas diferentes porosidades dos agregados, já que podem existir concretos tão ou mais porosos que cerâmicas. Percebe-se que a classificação dos agregados reciclados meramente por suas diferentes fases não é suficiente para proporcionar um maior domínio do comportamento do concreto que com ele será produzido.

Neste contexto, o trabalho proposto ganha importância pois, se verificou a possibilidade de estimar a faixa resistência, do módulo de elasticidade e da absorção do concreto a partir do conhecimento da massa específica dos agregados reciclados.

Assim, a obtenção de agregados reciclados que gerem materiais de comportamento mais homogêneo, através de sua separação por diferentes faixas de densidade, poderá possibilitar a utilização dos agregados em situações de maior responsabilidade, uma vez que o comportamento desse material já fora estimado.

Os resultados e os valores limites apresentados nas pesquisas nacionais e internacionais, das diferentes propriedades dos concretos reciclados, devem ser

tomados como uma orientação da tendência de seu comportamento, visto que cada agregado reciclado possui uma procedência, história e produção diferente, e conseqüentemente o concreto produzido com estes também. Por este motivo, análises mais detalhadas dos agregados reciclados ajudam a prever o comportamento dos concretos moldados a partir destes.

Em alguns trabalhos, os agregados reciclados são separados em praticamente duas fases: uma constituída de concreto e argamassa e outra de basicamente materiais cerâmicos, e então, os corpos-de-prova são moldados com as fases separadas (LEVY, 2001). Entretanto, os agregados reciclados de mesma fase podem possuir porosidades bastante variáveis. Por outro lado, podem ser encontrados agregados que, mesmo sendo de fases diferentes, possuam porosidades semelhantes. Sabendo-se que há uma correlação inversa entre o volume de poros e o nível de tensão que o concreto pode suportar, e levando-se em conta que podem existir concretos tão ou mais porosos que argamassas e materiais cerâmicos (conseqüentemente os agregados reciclados provenientes destes terão as mesmas características), não se pode afirmar que concretos moldados a partir da fase concreto e argamassa possuirão desempenho e durabilidade superior àqueles moldados com agregados reciclados de fase cerâmica.

Observa-se nas pesquisas desenvolvidas, um grande esforço em utilizar os resíduos de construção e demolição separados em fases para produção de novos materiais. Apesar de ser considerada uma situação ideal, ela é pouco prática e bastante subjetiva, pois a análise visual depende do operador que executa tal serviço. Além disso, separar as diferentes fases presentes nos RCD (concreto, argamassa, materiais cerâmicos, rocha e outros) durante o processo de demolição é uma prática difícil e de custo elevado. Assim, deve-ser pensar na utilização de agregados reciclados na condição misturada (LEITE, 2001).

Quase todo o RCD brasileiro é constituído por uma mistura de resíduos de concreto e alvenaria. Além disso, um estudo realizado por Angulo et al. (2003) mostrou que todas as fases minerais do RCD apresentam características muito variáveis, como a porosidade. Durante o processo de reciclagem, concretos antigos altamente porosos são misturados com concretos de alto desempenho e de baixa porosidade. Da mesma forma, cerâmicas vermelhas de baixa porosidade e de alta resistência são também misturadas com cerâmicas altamente porosas. Com isso, fica evidente que a separação das fases minerais presentes no RCD através da análise visual (catação), pode não ser uma ferramenta de controle de qualidade e decisão muito eficiente. Assim, a separação dos agregados de RCD reciclados através da combinação da catação com as

técnicas de separação em meio denso (separação em faixas de densidade), pode resultar em agregados com características mais homogêneas, uma vez que ainda não se sabe ao certo quais características dos agregados (natureza mineral, propriedades físicas ou ambas) possuem uma influência mais significativa nas propriedades do concreto reciclado (ANGULO et al., 2005). A utilização da separação em meio denso (sistema utilizado no programa experimental deste trabalho) é eficiente para a separação dos agregados em sua massa específica e absorção de água, entretanto, este método não faz distinção quanto a fase mineral destes. O contrário é observado para o método de catação.

É importante salientar que este trabalho está inserido num grupo de pesquisa do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica, orientado pelos professores Antônio Domingues de Figueiredo e Vanderley Moacir John. Em conjunto com esta pesquisa, está também em andamento a dissertação da mestranda Ivie Ferrari Della Pietra. Além disso, os resultados desta dissertação serviram de referência para uma parte da Tese do doutorando Sérgio Cirelli Angulo, também integrante do grupo de pesquisa.

1.4 Estrutura da dissertação

O conteúdo da presente dissertação encontra-se dividida da seguinte forma:

- Capítulo 1: onde são apresentados a justificativa do trabalho, o objetivo e a relevância da pesquisa.
- Capítulo 2: apresentação do panorama da reciclagem no Brasil e no mundo, discussão das dificuldades associadas à reciclagem, discussão dos problemas associados à geração do RCD, apresentação de algumas medidas já realizadas no Brasil e no exterior, classificação do RCD de acordo com recomendações normativas e a composição do RCD. É apresentada também a metodologia de processamento do RCD para sua utilização, inclusive em concretos estruturais.
- Capítulo 3: discussão de definições de porosidade, permeabilidade e absorção e sua influência na durabilidade dos concretos. Discussão da influência da porosidade e absorção dos agregados de RCD reciclados nas propriedades do concreto fresco e endurecido, principalmente na resistência à compressão e no módulo de elasticidade dos concretos, propriedades estas estudadas neste trabalho.

- Capítulo 4: apresentação da metodologia adotada no planejamento experimental desta dissertação. Especificação de todas as etapas seguidas, desde a obtenção dos agregados de RCD reciclados até os ensaios executados no concreto endurecido. Mostra inclusive alguns resultados preliminares que levaram à adoção de determinadas decisões e metodologias.
- Capítulo 5: apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados nos agregados e no concreto fresco e endurecido.
- Capítulo 6: apresentação das considerações finais e conclusões sobre os resultados obtidos no trabalho, além de sugestões para futuras pesquisas com os agregados de RCD reciclados.
- Após o capítulo de Conclusões, são inseridos os Anexos referentes à caracterização do cimento, seguindo da apresentação da referência bibliográfica.

2 RECICLAGEM DA FRAÇÃO MINERAL DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A construção civil é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento, e desde os primórdios da humanidade foi executada de forma artesanal, gerando como subproduto grande quantidade de resíduos minerais. Tal fato despertou a atenção dos construtores já na época da edificação das cidades do Império Romano, e desta época datam os primeiros registros de reutilização de resíduos na produção de novas obras.

Porém, a primeira aplicação significativa de RCD só foi registrada após o final da 2ª Guerra Mundial na reconstrução das cidades Europeias que tiveram seus edifícios totalmente demolidos. Os resíduos foram britados para produção de agregados visando atender à demanda na época. Assim, pode-se dizer que a partir de 1946 teve início o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem do resíduo de construção civil (WEDLER; HUMMEL, 1946 *apud* LEVY, 1997).

Em 1977, no Japão, foram propostas as primeiras normas (BCSJ, 1977) para utilização de agregado reciclado de concreto. Depois de 1982 as normas ASTM C 32-82 e C 125-79 incluíram o agregado graúdo reciclado de concreto nas especificações de agregado para concreto (HANSEN, 1992). A partir da década de 80, normas e recomendações também entram em vigor nos Países Baixos, na Dinamarca, na Rússia e na Alemanha, entre outros. Atualmente, mais estudos estão sendo desenvolvidos em países como França, Espanha, Bélgica, Noruega, Arábia Saudita, China e outros (QUEBAUD, 1996; BALLISTA; MACHADO, 2000 *apud* LEITE, 2001).

No Brasil, o primeiro estudo sistemático da utilização de resíduos da construção civil data de 1986 (PINTO, 1986). Atualmente, diversos estudos vêm sendo realizados por vários pesquisadores espalhados pelo país (LEVY, 2001; LEITE, 2001; MIRANDA, 2000; ANGULO, et al. 2004; BUTTLER, 2003).

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

Sabe-se que a construção civil é responsável por um impacto ambiental, cuja proporção pode ser considerada uma das maiores da sociedade, e para se atingir o desenvolvimento sustentável, a reciclagem tem se mostrado uma idéia altamente

atrativa. A utilização do RCD significaria uma solução de diversos problemas gerados pelos mesmos, que começam na exploração de jazidas de agregados naturais e terminam nos aterros de deposição final, representando um fator prejudicial à economia do país.

Entretanto, deve-se atentar para o fato de que a reciclagem só se torna uma política positiva, se o impacto ambiental e os recursos utilizados para a coleta, seleção e reciclagem de um material forem menores que o impacto ambiental e os recursos utilizados na produção do material virgem, mais os recursos necessários para a disposição segura do material após seu consumo (JOHN, 2000). Ou seja, de nada adianta reciclar, se o próprio processo causa um impacto ambiental maior que o da deposição do material em questão.

2.1 Panorama da reciclagem no Brasil e no mundo

2.1.1 Dificuldades associadas ao crescimento da reciclagem

O processo de pesquisa e desenvolvimento de técnicas para reciclagem de resíduo que resultem viáveis em determinado mercado é uma tarefa complexa, a qual envolve conhecimentos de ciências de materiais, ambientais, de saúde, econômicas, marketing, legais e sociais, além da avaliação de desempenho do produto em um cenário de trabalho multidisciplinar (JOHN; ÂNGULO, 2003).

Hoje em dia, a reciclagem se tornou uma medida constantemente defendida por ambientalistas, e está preste a se tornar opção tecnológica e até financeira dentro do processo construtivo. Diversas ações do poder público e de entidades empresariais já buscam regulamentar e induzir o processamento do RCD e a reutilização do material. Os principais usos atuais, como pavimentação e cobertura de aterros, demandam agregados com baixas requisições de qualidade, mas para outras aplicações, como concretos e argamassas, ainda falta conhecimento técnico científico que dê segurança quanto a aplicações práticas.

Onde foi implantada, a reciclagem trouxe benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Mas as quantidades de resíduos processados ainda não são suficientes para consumir todo o volume gerado e o poder público tem dificuldades para implantar novas recicladoras. De acordo com pesquisas, o custo de reciclagem do RCD em unidades como a de Belo Horizonte (M.G.), é da ordem de R\$5,00/t inferior aos preços dos agregados naturais (PINTO, 1999). Esses fatores tornam atraente a montagem de empresas recicladoras de RCD pela iniciativa privada. Atentos a este quadro,

empresários estudam o ingresso no negócio, mas vários fatores inibem esta iniciativa, como por exemplo, a preocupação em atingir maior faixa do mercado de materiais de construção. Sem isso, empresários que queiram reciclar, terão que se manter em estreita ligação com o poder público, que executa e contrata tais serviços.

Segundo John e Ângulo (2003), a reciclagem vai ocorrer apenas se o novo material entrar em escala comercial. Assim, a transferência de tecnologia, através da difusão dos conhecimentos por documentação e publicações, é uma etapa essencial do processo. O sucesso da reciclagem vai depender também da colaboração entre os diversos atores do processo: geradores do resíduo, potenciais consumidores, agências governamentais e instituições de pesquisa. É necessário convencer os consumidores finais de que o novo produto apresenta alguma vantagem competitiva e baixos riscos técnicos e ambientais.

2.1.2 Algumas medidas já realizadas

Felizmente, nações tecnologicamente desenvolvidas como Estados Unidos, Holanda, Japão, Bélgica França e Alemanha entre outras, já perceberam a necessidade de reciclar as sobras de construção civil, e têm pesquisado o assunto intensamente visando atingir um grau de padronização dos procedimentos adotados para obtenção dos agregados, atendendo desta forma aos limites que permitem atingir um padrão mínimo de qualidade (LEVY, 2001).

Algumas medidas já foram realizadas em países como a Bélgica, onde o resíduo deve obrigatoriamente ser reciclado sempre que uma construção se situar próxima a uma usina de reciclagem. Na Catalunha, Espanha, as construções que enviam seu resíduo às recicladoras, são isentas das taxas para o transporte e execução deste serviço. Em outros países da Comunidade Européia, inclusive na Holanda, as taxas cobradas pelos aterros desencorajam a deposição dos resíduos nos mesmos (PINTO, 2000).

No mundo, o país com melhor índice de reaproveitamento de material é a Holanda, com índice perto de 80%. Na Suécia, cerca de 90% de toda pedra natural, areia e cascalho do setor de construção e engenharia pesada é reutilizada. 60% do asfalto também é reutilizado e cerca de 80% de madeira é convertida em energia. Os resíduos provenientes de concreto, por outro lado, só são reutilizados em 20%. Em um ano, são geradas 6 milhões de toneladas de RCD devido a alteração e demolição de estradas, instalações e edifícios. Desse total, 43% é reutilizado, 7% é reciclado, 5% é incinerado para a produção de energia e 45% é encaminhado para aterros ou bota-foras (CIB, 2000).

No Japão, dois terços do resíduo de concreto demolido já é utilizado para pavimentação de rodovias. Além disso, o uso deste resíduo para a produção de novos concretos está sendo estimulado (VÁSQUEZ; BARRA, 2000).

Com a intenção de se reduzir ao mínimo o consumo de matérias-primas e os resíduos para deposição final, algumas indústrias, obras, empresas, etc., já organizam sistemas produtivos tais que resíduos de uma indústria ou processo, possam ser a matéria-prima de outros.

O Ministério do Meio Ambiente na Espanha publicou o Plano de Resíduos de Construção e Demolição em 2001. O prazo para a implantação do Plano é de cinco anos e alguns de seus objetivos são: reduzir em 10% a produção de RCD e atingir um nível de 25% na reciclagem destes em 2006 (ALEJOS, 2004). Segundo os autores, a meta consiste em se alcançar valores de utilização próximos à média européia, como mostra a Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Produção anual de RCD e porcentagem utilizada de alguns países europeus. FONTE: ALEJOS et al. (2004); LAURITZEN (2004).

RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO				
País	Produção anual (kt)	Porcentagem utilizada	Aplicações da porcentagem utilizada	
Bélgica	7.000 (1990)	87%	agregados para concreto: 17%	estradas: 70%
França	24.000 (1990)	15%	agregados para concreto: 1,5%	estradas: 8,2%; enchimento: 5,3%
Grã-Bretanha	30.000 (1999)	45%	agregados para concreto: 2%	estradas: 9%; enchimento: 34%
União Européia	180.000 (1999)	28%	agregados para concreto: 2,2%	estradas: 9,5%; enchimento: 16,3%
Espanha	38.500 (2003)	10%	bases e subbases de estradas: 3%; Base para solos: 3,5%; Enchimento: 3,5%	
EUA	270.000	25%	_____	

No Brasil, instalações de reciclagem já foram implantadas em algumas cidades como Salvador, Brasília, Belo Horizonte, Ribeirão Preto, São José dos Campos, São Paulo, Guarulhos, Ribeirão Pires, Vinhedo, Piracicaba e Londrina (LEVY, 2001).

As vantagens econômicas da reciclagem dos resíduos de construção podem ser exemplificadas através das atividades de pesquisa que são desenvolvidas

principalmente por universidades situadas na Holanda, como a Delft University of Technology e a Rutgers University, e Institutos de pesquisa como o TNO. Tais pesquisas converteram-se em negócio lucrativo para significativo número de empresas privadas que executam atividades de pesquisa e desenvolvimento (JOHN, 2000).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002) no Brasil publicou uma Resolução, que dispõe sobre a gestão dos resíduos de construção civil. De acordo com esta, os geradores de resíduos deverão ter como objetivo prioritário, a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final; sendo que os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota-fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei. Ainda pela Resolução, para a implementação da gestão dos resíduos da construção civil, deverá ser elaborado pelos Municípios e Distrito Federal, o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, sendo que este deverá contemplar certos itens descritos pela mesma.

2.1.3 Algumas recomendações normativas para definição, classificação e destinação do resíduo da construção civil

Segundo John e Ângulo (2003), os especialistas das diferentes áreas devem evitar submeter os resíduos aos requisitos técnicos normativos ou tradicionais. A normalização tradicional pode servir de ponto de partida, mas, na prática, revela-se restritiva e limitante. As normas limitam-se à análise de matéria-prima específica, dentro de um processo industrial específico. No caso de agregados para concreto e pavimentação, a normalização está integralmente voltada para análise de agregados derivados de rochas naturais. SCHOUENBORG et al. (2004) afirmam que os métodos e normalizações tradicionais precisam ser modificados e substituídos para que sejam melhor verificadas as propriedades dos materiais alternativos.

Com isso, especialistas da área de engenharia civil no mundo, trabalham para que recomendações normativas voltadas para os resíduos da construção civil sejam elaboradas.

Para efeito da Resolução CONAMA (2002) são adotadas as seguintes definições:

- Resíduos da construção civil: são os provenientes das construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de aterros.

- Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia.

A Resolução classifica, define e orienta sobre a destinação final dos resíduos de acordo com a Tabela 2-2

Tabela 2-2 - Classificação, definição e destinação do resíduo de construção, de acordo com a Resolução CONAMA (2002)

CLASSES	DEFINIÇÃO	DESTINAÇÃO
A	são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados	deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura
B	são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, metais, vidros, madeiras e outros	deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir sua utilização ou reciclagem futura
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	deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas
D	são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros	

A norma brasileira NBR 10004 (1987) – “Resíduos sólidos – classificação” trata da classificação dos resíduos sólidos. Segundo a norma, estes são classificados segundo a presença de contaminantes em: classe I – resíduos perigosos, classe II – não inertes e classe III – inertes. Os resíduos de construção e demolição são classificados como resíduos de classe III.

Segundo Oliveira et al. (2004), algumas normas brasileiras estão em fase final de votação e ainda não possuem numeração, como:

- NBR...../04 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos. Áreas de seleção e transferência. Diretivas para projeto, implementação e operação;
- NBR...../04 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes. Áreas de seleção e transferência. Diretivas para projeto, implementação e operação;
- NBR...../04 – Resíduos sólidos da construção civil. Áreas de reciclagem. Diretivas para projeto, implementação e operação;
- NBR...../04 – Agregados reciclados dos resíduos sólidos da construção civil. Execução de pavimentos. Procedimentos;
- NBR...../04 – Agregados reciclados dos resíduos sólidos da construção civil. Emprego em pavimentos e preparação de concretos não-estruturais. Requerimentos.

O comitê RILEM 121-DRG (1994) publicou recomendações para a utilização dos agregados reciclados, classificando-os em três grupos (Tabela 2-3):

Tabela 2-3 - Classificação do resíduo de construção e definição segundo RILEM 121-DRG (1994)

GRUPOS	DEFINIÇÃO
I	agregados provenientes principalmente de materiais cerâmicos
II	agregados provenientes principalmente de concreto
III	agregados provenientes da mistura de agregados naturais (>80%) e dos outros dois grupos (quantidade de materiais do Grupo I < 10%)

Além disso, as especificações da RILEM (1994) indicam o campo de aplicação dos concretos contendo esses agregados em termos de classe de exposição e classes de resistência de acordo com o EUROCODE 2. Outras recomendações referem-se a aspectos relacionados ao meio ambiente e saúde, como por exemplo, contaminação dos agregados reciclados por metais pesados.

Na Alemanha, já existem algumas normas para a utilização de agregados reciclados de concreto, como por exemplo, DIN-1045 "Concrete and Reinforced Concrete".

A Danish Concrete Association (Dinamarca) publicou também algumas recomendações envolvendo agregados reciclados de concreto. De acordo com estas recomendações, os agregados reciclados são divididos em duas classes Tabela 2-4:

Tabela 2-4 - Classificação, definição e destinação do resíduo de construção segundo a Danish Concrete Association. FONTE: GLAVIND; HAUGAARD (1998).

CLASSES	DEFINIÇÃO	DESTINAÇÃO
GP1	agregados reciclados com massa específica superior a 2200 kg/m ³ , contendo basicamente resíduos de concreto com pequena quantidade de alvenaria	podem ser utilizados para concreto armado ou não-armado, em ambientes pertencentes à classe passiva ou moderada com resistências de até 40 MPa
GP2	agregados reciclados com massa específica superior a 1800 kg/m ³ , contendo reciclados de concreto e alvenaria ou somente alvenaria	podem ser utilizados para concreto armado ou não-armado, em ambientes pertencentes à classe passiva com resistências de até 20 MPa

Na Holanda, a norma NEM 5905:1997 especifica os agregados reciclados segundo critérios de qualidade, como por exemplo, formato das partículas, porcentagem de miúdos, distribuição granulométrica, massa específica, etc (HENDRICKS et al., 1998).

2.2 Composição dos resíduos de construção e demolição

Segundo Oliveira e Assis (1999), o resíduo de concreto é heterogêneo quanto à sua composição por constituir-se de um material proveniente de diferentes fontes, por exemplo, concretos que foram dosados, fabricados e aplicados com controle tecnológico e concretos que foram produzidos sem qualquer controle de qualidade, podendo este chegar a 60%. Como o setor da construção desenvolve várias atividades dentro do canteiro de obras, o resíduo gerado também pode ser composto por uma grande variedade de materiais. Tudo isso confere ao RCD uma alta heterogeneidade, e sua separação total seria praticamente impossível (LEITE, 2001). Podem também interferir na quantidade, composição e característica dos RCD alguns aspectos como: nível de desenvolvimento técnico da indústria da construção local; qualidade e treinamento da mão-de-obra disponível; técnicas de construção e demolição empregadas; programas de qualidade e redução de perdas empregadas; processos de reciclagem e reutilização adotados no canteiro de obras; disponibilidade e predominância de materiais na região; desenvolvimento econômico do local; demanda de novas construções (OLIVEIRA et al., 2004). Com isso, as características dos RCD

estão condicionadas aos parâmetros específicos de cada região onde foi originado e à variação destes parâmetros no decorrer do tempo.

Os RCD possuem diversos materiais como: asfalto, vidros, cerâmica, concreto, argamassa, pedra britada, madeira, blocos e tijolos, papel, tintas, gesso, plásticos, metais e outros constituintes em menor quantidade (JOHN; ÂNGULO, 2003; GRIGOLI, 2000; OLIVEIRA; ASSIS, 1999). Entre estes, madeira, plásticos, papéis e gesso são impurezas que, dependendo da quantidade, afetam negativamente a resistência do concreto reciclado (CHEN et al., 2003; HENDRICKS e XING, 2004).

Os resíduos da construção representam de 19 a 52% do RCD enquanto que os resíduos de demolição representam de 50 a 81% do RCD (ANGULO, 2000). Nos países em desenvolvimento, é necessário produzir um maior número de bens, com isso, o volume de resíduos de construção gerado é geralmente superior ao de demolição.

Os resíduos de construção e demolição são variáveis também em função das tecnologias construtivas adotadas. Pinto (1999) analisa que a madeira é muito mais presente nas construções americanas, japonesas e inglesas que nas brasileiras. O gesso é também bastante utilizado na Europa e nos Estados Unidos.

A Figura 2-1 mostra as composições do RCD na Holanda. Pode-se observar a predominância mineral nesses resíduos, fato também observado para o Brasil.

Figura 2-1 - Composição do RCD na Holanda, em massa (%). FONTE: BOSSINK; BROUWERS (1996)

Ângulo (2000) estudou a variação da participação das diferentes fases nos agregados gerados pela instalação de reciclagem de resíduos de construção e demolição piloto de Santo André, SP, retirando uma amostra representativa de cada contêiner, que foi

homogeneizada e quarteada. A determinação das fases foi realizada por catação manual. A variação da absorção de água e da massa específica seca também foi analisada para cada contêiner. Como mostrado na Figura 2-2, a participação das diferentes fases varia acentuadamente de um contêiner para o outro, o que é esperado, segundo o autor, em um resíduo que chega de diferentes processos de construção e demolição. A variação da massa específica seca e da absorção de cada contêiner também foi elevada.

Segundo Angulo e John (2002), a variabilidade na composição e nas características físicas destes agregados, principalmente absorção de água e massa específica, afetam as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

Figura 2-2 - Variabilidade dos agregados graúdos de RCD reciclados em função de caçambas processadas (a) composição - catação, (b) absorção de água e (c) massa específica seca. Dados de (ANGULO, 2000).

2.3 Utilização de agregados reciclados de RCD

2.3.1 Processamento do RCD para utilização como agregado reciclado

De um modo geral, para a reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição, basicamente são empregadas algumas etapas como: (1) britagem, que reduz as partículas através de ação mecânica externa como força de compressão (britagem por mandíbula) ou impacto (britagem por impacto); (2) peneiramento, utilizado para separar as partículas pelo seu tamanho, podendo ser utilizado também os classificadores, que separam as partículas leves e finas ($<0,15$ mm) dos agregados reciclados; (3) catação, geralmente manual e visual, que separa a fração mineral da não-mineral (retirada de contaminantes) e também a mineral em suas diferentes espécies, podendo esta ser realizada antes ou após a britagem.

Na reciclagem do RCD, a retirada de contaminantes⁸, de forma a preservar a qualidade do material reciclado e conseqüentemente do produto final, é essencial (Figura 2-3). Os valores limites de contaminantes variam de um país para o outro de acordo com suas regulamentações e recomendações, como mostra a Tabela 2-5.

Figura 2-3 - (a) Retirada manual de contaminantes; (b) Detalhe do aço retirado após a britagem do RCD

⁸ Madeira, gesso, plástico, papel, material orgânico, etc.

Tabela 2-5 - Máxima quantidade de contaminantes permitida nos agregados reciclados de RCD.
FONTE: ALEJOS et al. (2004).

Contaminantes	Quantidade máxima de contaminantes (% da massa total)		
	BS 8500-2	Australia	RILEM, Bélgica, Hong Kong
Materiais cerâmicos	5	2 (quantidade total)	< 20
Partículas leves	0,5		1
Asfalto	5		
Outros materiais (vidro, plástico, metal, etc)	1		

As usinas de reciclagem no Brasil empregam comumente a classificação visual (catação), com o objetivo de se melhorar a qualidade do agregado de RCD reciclado produzido. Geralmente, o RCD mineral é classificado visualmente em duas fases: cinza (composição predominante de componentes de construção de natureza cimentícia) e vermelho (composição predominante de componentes de construção de natureza cerâmica, especialmente do tipo vermelha) (Figura 2-4). Os agregados reciclados do tipo vermelho normalmente são destinados a obras de pavimentação e os do tipo cinza são utilizados em calçadas e blocos de concreto.

Figura 2-4 - Agregados graúdos reciclados. (a) fase cinza; (b) fase vermelha

Segundo John e Ângulo (2003), os diferentes ramos da engenharia, como a química, engenharia de tratamento de minérios e a metalurgia, dispõem de um arsenal de técnicas de processamento viáveis industrialmente que possibilitam separar de fases de interesse presentes em matérias-primas, utilizando técnicas de britagem, peneiramento, separação magnética, solubilizações parciais, reações químicas,

separação densitária via úmida em jigues, que exploram diferenças de densidade e tamanho de partículas, etc.

Na Europa, após a britagem do RCD, é possível empregar equipamentos de beneficiamento mineral para fazer uma separação baseada nas densidades das partículas via seca (classificador por corrente de ar ascendente) ou via úmida (jigue). Este último conta com a vantagem de reduzir o teor de sulfatos, cloretos e sais solúveis e o teor de materiais pulverulentos nos agregados,⁹ mas possui desvantagens como o elevado consumo de água, a geração de água contaminada e a necessidade de tratamento das lamas produzidas (ANCIA et al, 1999).

2.3.1.1 Possibilidades de separação por densidade dos agregados de RCD reciclados em escala piloto e industrial

Segundo Hendricks e Xing (2004), os metais pesados, materiais orgânicos e outros componentes presentes nos resíduos de construção e demolição são considerados impurezas que podem prejudicar a reciclagem, a reutilização e limitar a aplicação do RCD, assim como contaminar o solo através de sua lixiviação. Assim, com relação aos aspectos técnicos e ambientais, torna-se necessário melhorar a qualidade do RCD através da separação e retirada de componentes indesejáveis, e para isto, torna-se essencial a implantação de métodos de separação.

Separação em meio denso é um processo aplicado na separação de minerais segundo suas massas específicas mediante a utilização de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos ou suspensão estável de densidade pré-determinada. O meio denso utilizado deve apresentar uma densidade intermediária entre os diferentes tipos de minerais que se deseja separar, de maneira que os minerais com densidade inferior flutuem e aqueles com densidade superior afundem (LUZ, 1998).

Na separação de minerais em meio denso, existem dois campos de aplicação: estudos de laboratório e obtenção de produtos na indústria. Para estudos de laboratório, são utilizados líquidos orgânicos e soluções aquosas de sais inorgânicos. Já na obtenção de produtos na indústria, são utilizadas suspensões de finos de ferro-silício e/ou magnetita em água, pois os custos operacionais são muito altos quando se utilizam

⁹ CIOCCHI, L. Reciclagem de concreto. Disponível em: http://www.piniweb.com/revistas/techne/index.asp?mate6_cod=15906 Acesso em: 2003, Setembro 27.

líquidos orgânicos ou soluções aquosas de sais inorgânicos, além da alta toxicidade dos líquidos orgânicos.

A separação em meio denso é dividida em dois métodos básicos de separação: o “estático” e o dinâmico. A separação estática é feita em suspensões onde atuam somente forças gravitacionais, o que não implica que os equipamentos usados não possuam partes móveis, o necessário para prover a estabilidade do meio. Nela, as partículas a serem separadas devem ter tamanhos entre 3 e 150 mm, podendo ser ainda maior dependendo do equipamento da separação a ser utilizado.

A separação dinâmica é caracterizada pelo uso de separadores que empregam forças centrífugas cerca de 20 vezes maiores que a força da gravidade atuante na separação estática. São os chamados separadores centrífugos. Neste caso, o tamanho das partículas varia de 0,5 a 50 mm (LUZ, 1998). A vantagem da força centrífuga em relação à força gravitacional está em permitir uma maior capacidade de separação aos separadores dinâmicos.

Os equipamentos de concentração densitária possuem diversas aplicações na área de Engenharia de Minas e Metalúrgica tais como beneficiamento do carvão, do ferro, de agregados naturais entre outros.

Dentre os processos de separação em meio denso em escala industrial, a utilização de equipamentos denominados de jigues é bastante comum principalmente na Europa e Estados Unidos. Segundo Muller e Wienke (2004), este processo de separação é conhecido há séculos e na Europa, inicialmente, foram utilizados para o beneficiamento do carvão. Em seguida, eles foram utilizados pelas empresas produtoras de agregados naturais para a separação de lignita (PALOWITCH; DEURBROUCK). Recentemente, a utilização de jigues para reciclagem da fração mineral do RCD abre um novo mercado promissor (MULLER; WIENKE, 2004).

Existem disponíveis no mercado alguns equipamentos (Figura 2-5) que utilizam processos de jigagem à úmido (por exemplo, *Alljig* e *Allflux*). Estes equipamentos geralmente apresentam alta eficiência de separação e baixo custo de manutenção, entretanto, necessitam de um elevado consumo de água na operação, gerando um alto custo com a recirculação e tratamento desta. Também, algumas operações necessárias nas separações podem encarecer o processamento. Essas desvantagens são excluídas quando equipamentos de jigagem à seco (Figura 2-6) (por exemplo, *Allair*) são utilizados em separações (ÂNGULO, 2004).

Figura 2-5 - Desenho esquemático sobre o funcionamento do "Alljig" e do "Allflux". Fonte: All Mineral

Figura 2-6 - Desenho esquemático sobre o funcionamento do "Allair". Fonte: All Mineral

O uso de jigues para reciclagem da fração mineral do RCD em países como Áustria, Holanda e Estados Unidos já ocorre. A jigagem é normalmente realizada a úmido. O uso desta para a reciclagem da fração mineral do RCD tem por objetivo produzir um agregado reciclado sem a presença de fração não mineral para atender exigências legislativas da classificação de resíduos recicláveis e especificações para uso em concreto.

Alguns estudos já foram realizados e outros se encontram em andamento (ÂNGULO, 2005), para a verificação das características físicas e químicas da fração mineral do RCD separada em densidade, assim como a avaliação do comportamento mecânico de concretos reciclados moldados a partir deste material (WEIMANN et al., 2003).

Esta separação também foi base para a elaboração do programa experimental desta dissertação (capítulo 4).

2.3.2 Possíveis aplicações da fração mineral do RCD

A forma mais simples de reciclagem dos RCD é a sua utilização em pavimentação (base, sub-base) na forma de bica corrida ou ainda em misturas do resíduo com o solo (ZORDAN, 2003). Para esta finalidade, permite-se o reaproveitamento de todos os componentes minerais do RCD (tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, pedras, areias, etc.), sem a necessidade de separação de nenhum deles, e a produção dos agregados reciclados permite a utilização de uma menor tecnologia.

Agregados reciclados provenientes de concretos estruturais, normalmente apresentam melhor qualidade em relação aos, por exemplo, provenientes de argamassas, cerâmicas e concretos não-estruturais. Com isso, sua possibilidade de utilização se torna mais ampla. Os principais agentes geradores de resíduos de concreto são as fábricas de pré-moldados, usinas de concreto pré-misturado, demolições de construções e pavimentos rodoviários (BUTTLER, 2003).

Através de técnicas relativamente simples, os materiais de construção podem também ser reaproveitados na própria obra. Estes possuem algumas vantagens, como sua menor quantidade e maior homogeneidade, caso sejam previamente separados. Seu reaproveitamento pode ser recomendado em agregados para revestimento, argamassas de assentamento e enchimentos.

Alguns pesquisadores (LIMA 1999) afirmam que as aplicações simplificadas dos resíduos de construção e demolição, não requerem produtos com alto grau de pureza e rígido controle de qualidade. Assim, cria-se um círculo vicioso: as características do reciclado produzido não estimulam usos em argamassas ou concretos em escala significativa, e assim as recicladoras não se preocupam com a produção de agregados de qualidade adequada a estes usos (baixos teores de contaminantes, controle da granulometria etc.).

Os resíduos de construção civil podem encontrar um grande número de finalidades para reutilização, desde que devidamente tratados e analisados. É possível reciclar quase todo o RCD, desde que seja escolhido o uso adequado e se respeitem as limitações técnicas. Uma vez que o agregado tenha sido britado, peneirado e, se necessário, descontaminado, pode-se encontrar aplicações tais como:

- Enchimentos em geral (HANSEN 1992);
- Enchimento em projetos de drenagem (HANSEN 1992);
- Sub-base ou material de base para construção rodoviária (HANSEN 1992);

- Agregado para novos concretos estruturais e não-estruturais (HANSEN 1992);
- Argamassas de assentamento e revestimento (MIRANDA, 2000);
- Uso arquitetônico visando estética e decoração;
- Obras públicas, como bancos, calçadas, etc.

Segundo John e Ângulo (2003), os agregados reciclados de RCD devem apresentar alguns requisitos para aplicações em concretos e argamassas como: ser estáveis dimensionalmente no ambiente e quando dentro do aglomerante, resistir aos esforços de mistura, resistir a ciclos de molhagem e secagem (pode ser opcional), apresentar baixa solubilidade em água, apresentar estabilidade dimensional quando submetidos a molhagem e secagem e apresentar-se na forma granular ou poder ser transformados em grãos.

De acordo com John e Agopyan¹⁰, do ponto de vista técnico as possibilidades de reciclagem dos resíduos variam de acordo com a sua composição. As frações compostas predominantemente de rochas naturais e de concretos estruturais podem ser recicladas para a produção de concretos estruturais. A presença de fases mais porosas e de menor resistência mecânica, como argamassas e produtos de cerâmica vermelha e de revestimento, provoca uma redução na resistência dos agregados e um aumento da absorção de água. Tal aspecto é de fundamental importância para os concretos estruturais feitos com agregados de RCD e, por isso, foco principal desta dissertação.

2.3.3 Aplicação do agregado reciclado de RCD em concretos

Dentre todas as aplicações, a que vem despertando maior interesse é a utilização dos agregados para a produção de novos concretos. É, contudo, a aplicação que exige mais cuidados e estudos, tendo em vista o importante papel que os agregados desempenham no comportamento destes. No Brasil, a reciclagem de agregados na produção de concreto somente agora está sendo objeto de pesquisa.

Quando analisamos a possibilidade de utilizar um material alternativo, devemos ter conhecimento de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, assim como coletar informações sobre sua composição, estrutura, estabilidade e resistência (HENDRIKS, 2000). Ao se utilizar esse material como parte integrante de um concreto, as

¹⁰ JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>. Acesso em: 2003, Setembro 23.

propriedades deste concreto também devem ser examinadas através de análises em todos seus estágios: fabricação, estado plástico e endurecido.

Deve-se atentar para o fato de que o RCD possui, na maioria dos casos, propriedades bastante variáveis (ANGULO et al., 2001) e que o comportamento apresentado pelos concretos de agregados reciclados é bastante distinto em função da origem do agregado reciclado utilizado. Por esse motivo faz-se necessário caracterizar bem os materiais reciclados da construção civil (ANGULO, et al., 2003) antes da escolha de sua utilização. A grande variabilidade destes é um fator complicante para sua utilização, e no Brasil ainda não existe tecnologia de controle de qualidade sistemática.

Os resíduos obtidos diretamente das construções para a utilização como agregados reciclados geralmente estão em condições inferiores quando comparados aos agregados reciclados obtidos a partir da britagem de concretos moldados em laboratório; fato este explicado pela possível existência de contaminantes nos agregados oriundos de construções e demolições. Por este motivo, resultados de estudos obtidos a partir desses dois materiais podem diferir-se significativamente (TAVAKOLI; SOROUSHIAN, 1996).

Os RCD podem conter contaminações que podem afetar tanto a qualidade técnica do produto contendo o reciclado quanto significar riscos ambientais (JOHN; AGOPYAN, 2002). As contaminações geralmente são oriundas da fase de uso da construção e/ou de seu processo de transporte e estocagem (resíduos de natureza diferente são freqüentemente misturados nessas etapas). As caçambas colocadas junto ao meio-fio são constantemente contaminadas por outros tipos de resíduos, como restos de comida e até móveis velhos (JOHN; ANGULO, 2003).

Para o concreto, o gesso é uma das principais impurezas, sendo bastante nocivo a este dependendo da quantidade. Segundo John e Agopyan (2002) a presença de produtos de gesso – solúveis em água e que apresentam reações expansivas com o cimento Portland – é um limitador importante da reciclagem. A introdução de painéis de gesso acartonado na construção, no mercado brasileiro, significará em médio prazo um sério limitador às atividades de reciclagem.

A possível presença de sais nos resíduos de demolição retirados de obras expostas à atmosfera marinha pode levar à corrosão de armaduras quando estes são usados, por exemplo, em concretos armados, por este motivo, o emprego de agregados reciclados deve ser bem analisado em certos casos.

Existem estudos no país e no exterior os quais comprovam que do ponto de vista técnico, considerando-se as propriedades mecânicas, é perfeitamente viável a produção de concreto com RCD (LEVY, 1997).

Alguns pesquisadores da área já provaram que é possível produzir concretos com RCD, alcançando-se resistências superiores a 25 MPa (HANSEN, 1992; LEITE, 2002; I&T, 1995; BARRA, 1996), e estes podem ser usados em vários serviços com segurança, inclusive estruturais, como já ocorre em alguns países como Holanda, Bélgica, Inglaterra, Alemanha, Finlândia e Noruega (LEVY, 2001).

Segundo DEWAR et al. (1997), diversos estudos foram conduzidos pela Administração Federal de Rodovias (FHWA), algumas agências rodoviárias estaduais e a corporação de engenheiros do exército americano, para verificar a adequabilidade de utilização de agregados reciclados de concreto para a fabricação de novos concretos. Os autores afirmam que o uso de certos aditivos (redutores de água, incorporadores de ar e cinzas volantes) podem ser aplicados para a melhoria da trabalhabilidade, resistência e durabilidade dos concretos reciclados.

É fato que os agregados reciclados possuem uma maior porosidade e absorção que os agregados naturais, e que isto pode acarretar problemas em relação ao controle de produção do concreto (MARTINS, 1985; GRIGOLI, 2000). Esta absorção depende das propriedades dos agregados e interfere na consistência do concreto fresco e nas propriedades deste no estado endurecido. Uma melhor análise sobre as propriedades dos agregados reciclados, assim como sua influência nos concretos, se encontra detalhada no capítulo 3. As análises dessas propriedades serviram de base para o estabelecimento da metodologia experimental apresentada no capítulo 4.

3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS DE RCD RECICLADOS E DOS CONCRETOS RECICLADOS

3.1 Porosidade, permeabilidade e absorção dos agregados e concretos

3.1.1 Definições

Segundo Powers (1960), nas pastas de cimento frescas, os espaços preenchidos pela água constituem em um sistema de poros capilares contínuo e interconectado. A formação da camada de gel no início da hidratação comprimem os capilares sem, no entanto, torná-los descontínuos, ou seja, há uma divisão dos poros capilares em segmentos que são interconectados pelos poros de gel. A medida em que a hidratação se completa, os poros capilares se tornam menos contínuos com a formação da camada de gel. Entretanto, se a relação água/cimento for muito alta (acima de 0,7), a completa hidratação não irá formar uma camada de gel suficiente para destruir a continuidade dos poros capilares.

A permeabilidade é definida como a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido. Segundo Mehta (1994), o tamanho e a continuidade dos poros na estrutura do sólido determinam a sua permeabilidade.

A permeabilidade de uma pasta depende principalmente de seus poros capilares, pois estes exercem uma menor resistência ao movimento da água em seu interior que os poros de gel, ou seja, a água consegue escoar com uma maior facilidade através deles. A Figura 3-1 mostra a relação entre a porosidade capilar e o coeficiente de permeabilidade de uma pasta¹¹.

Em geral, quando a relação água/cimento é alta e o grau de hidratação é baixo, a pasta de cimento terá alta porosidade capilar; ela conterá um número relativamente elevado de poros grandes e bem conectados e, portanto o seu coeficiente de permeabilidade será alto. À medida que a hidratação progride, a maioria dos poros é

¹¹ Coeficiente de permeabilidade (K) é determinado pela expressão de Darcy como sendo: $dq/dt = K (\Delta H / L \mu)$. Onde, dq/dt é a taxa de fluxo do fluido, μ , a viscosidade do fluido, ΔH , o gradiente de pressão, A, a área de superfície, e L, a espessura do sólido.

reduzida a um pequeno tamanho e também perderão as suas interconexões; deste modo, a permeabilidade diminui (MEHTA, 1994).

Figura 3-1 - Correlação entre o coeficiente de permeabilidade de uma pasta e sua porosidade capilar. FONTE: POWERS, 1958.

O Comitê C 9 da ASTM (American Society for Testing and Materials) define absorção na norma C 125 (Termos relativos a concreto e agregados para concretos) como sendo: Processo pelo qual um líquido penetra e se dirige para preencher os poros permeáveis em um corpo sólido poroso, resultando a penetração do líquido nos poros permeáveis.

Volume de poros permeáveis é a medida da proporção do volume total do concreto que é ocupada pelos poros, geralmente expressa em porcentagem. Enquanto o volume de poros é fator preponderante para a capacidade do concreto em resistir a cargas, a permeabilidade é afetada principalmente pela porosidade efetiva, que é definida pelo grau de continuidade do sistema de poros (SAMAHA; HOVER, 1992). Assim, caso o volume de poros seja grande e os poros estejam interligados, estes irão contribuir para o deslocamento de fluidos através do concreto, de modo que a permeabilidade também passa a ser alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos, a permeabilidade do concreto será baixa, mesmo com um elevado volume de poros.

Portanto, mais importante do que o diâmetro dos poros capilares é a sua distribuição e intercomunicabilidade, o que nem sempre é levado em conta (HELENE, 1993). Assim, concretos de reduzida relação água/cimento além de possuírem capilares de menor diâmetro, os mesmos se apresentam menos intercomunicáveis, resultando em menor massa de água absorvida (HELENE, 1993; SAMAHA, 1992).

3.1.2 Influência da porosidade e permeabilidade na durabilidade do concreto

Durabilidade é uma característica qualitativa dos materiais que indica a sua capacidade de atender ou não à vida útil exigida para os mesmos. A vida útil de um material é o tempo no qual o mesmo permanece em uso mantendo as características que foram exigidas no momento da concepção da edificação que ele compõe. Logo, a vida útil é a quantificação da durabilidade do material.

A durabilidade do concreto depende muito da facilidade com que os fluidos, tanto líquidos como gases, possam ingressar no concreto e deslocar-se no seu interior. O tamanho, volume dos poros e sua continuidade, assim como o entendimento do mecanismo de transporte de umidade no concreto, são fatores importantes para estimar a vida útil das estruturas de concreto, bem como garantir sua qualidade. Os principais fatores que controlam os mecanismos de transporte e a porosidade nos concretos convencionais são a relação água/cimento e o grau de hidratação (SUGIYAMA, 1996; LEITE, 2001).

As propriedades do concreto como, resistência, durabilidade e permeabilidade são diretamente influenciadas e controladas pelo número, tipo, tamanho e intercomunicabilidade dos poros presentes na pasta de cimento, nos agregados e na interface entre a pasta de cimento e os agregados (BASHEER et al., 2001). A Figura 3-2 mostra a correlação obtida por pesquisadores entre a porosidade e a permeabilidade do concreto e entre a permeabilidade e a resistência à compressão.

Em comparação com a pasta de cimento, os agregados naturais possuem geralmente um volume de poros muito menor, com isso, espera-se que a permeabilidade do agregado seja também muito menor e que, conseqüentemente, a permeabilidade dos concretos e argamassas sejam menores que das pastas. Apesar disso, segundo Mehta (1994), a permeabilidade da argamassa ou concreto é maior que a permeabilidade da pasta de cimento correspondente devido as microfissuras que estão presentes na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, e esta permeabilidade aumenta com o tamanho do agregado.

Figura 3-2 – (a) Relação entre porosidade e permeabilidade do concreto; (b) relação entre permeabilidade e resistência à compressão do concreto. FONTE: AL-AMOUDI et al. (1996) apud DE LARRARD (1999).

Os agregados reciclados de concreto, por sua vez, possuem uma camada de argamassa aderida ao mesmo, o que lhe confere uma maior porosidade. Além disso, entre o agregado grão natural e esta camada, há uma zona de transição, contribuindo também para o aumento da porosidade do agregado reciclado. Quando estes agregados são utilizados para a fabricação de novos concretos, há a formação de uma outra zona de transição entre o agregado reciclado e a nova argamassa. Com isso, o concreto reciclado possui uma maior porosidade e permeabilidade que o concreto convencional.

A porosidade dos agregados afeta negativamente a resistência à compressão, a resistência à abrasão, a absorção e o módulo de elasticidade dos concretos, foco deste trabalho, podendo influenciar na durabilidade destes, que são propriedades inter-relacionadas (GONÇALVES, et al., 2004). Como os agregados reciclados de RCD possuem geralmente uma porosidade maior que os agregados naturais, estas propriedades podem ser ainda mais influenciadas por estes. Alguns estudos mostraram que a permeabilidade à água dos concretos reciclados pode ser cerca de 2 a 3 vezes superior à permeabilidade dos concretos convencionais (QUEBAUD et al., 1999 apud LEITE, 2001). No entanto, são comumente adotados agregados reciclados com uma única faixa de porosidade, o que dificulta a correlação de suas propriedades.

3.1.3 Porosidade e absorção dos agregados reciclados

Algumas propriedades dos agregados, responsáveis por uma significativa influência nas propriedades do concreto, são a porosidade ou a massa específica, forma e textura das partículas, resistência, módulo de elasticidade, absorção e teor de impurezas (MEHTA, 1994). Estas afetam as proporções de dosagem e o comportamento do concreto fresco ou endurecido, ou seja, em última análise sua durabilidade (YAMAN, et al., 2002; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002). Nos agregados reciclados, estas propriedades são fortemente dependentes do material que os originou, do tipo de britador utilizado e da remoção de seus contaminantes (PEDROZO; LEITE; DAL MOLIN, 2000).

Embora as diversas propriedades dos agregados possam ser estudadas independentemente, é difícil definir um padrão de qualidade de um determinado agregado. Por este motivo, o desempenho no concreto deve ser usado como critério para definir a qualidade do agregado reciclado ou mesmo verificar sua adequabilidade.

Os agregados reciclados de concreto possuem argamassa aderida aos grãos, e sua porosidade depende da quantidade de argamassa aderida ao agregado original, da idade e da relação a/c do concreto que originou o agregado reciclado (TAVAKOLI; SOROUSHIAN, 1996; JUAN; GUTIÉRREZ, 2004a).

JUAN e GUTIÉRREZ (2004a) estudaram a influência da quantidade de argamassa aderida ao agregado natural nas propriedades de agregados reciclados de concreto. Segundo os autores, a porosidade da argamassa aderida influencia negativamente as propriedades dos agregados reciclados, conforme já mencionado. Assim, quanto maior a quantidade de argamassa aderida, menor a densidade do agregado, maior a absorção de água, maior a abrasão Los Angeles e maior a quantidade de sulfatos presentes. Os autores indicam também uma quantidade limite ideal de 44% de argamassa aderida ao agregado natural, pois com isso a absorção dos agregados reciclados será inferior a 8% e sua densidade será superior a 2,16 kg/m³. No entanto, o controle deste limite é difícil do ponto de vista prático.

Segundo Ângulo et al. (2003), a composição química e mineralógica dos agregados graúdos de RCD reciclados varia muito pouco. A principal diferença entre as partículas de argamassa e concreto presentes nos agregados graúdos de RCD reciclados é física, ou seja, nas propriedades de absorção de água e massa específica aparente da pasta de cimento endurecida (ÂNGULO; JOHN, 2001). Assim, pode-se afirmar que a massa específica aparente destes agregados é determinada pela porosidade e, como mostra a Figura 3-3, há uma única correlação entre estas duas propriedades.

Figura 3-3 - Correlação entre massa específica aparente e absorção de água para as diferentes espécies minerais presentes nos agregados graúdos de RCD reciclados. FONTE: ANGULO, 2000.

Logo, é de se esperar que, variando-se a porosidade do agregado, qualquer que sejam seus materiais constituintes, será possível quantificar sua influência nas propriedades do concreto endurecido. Este aspecto foi a base para o estabelecimento da metodologia experimental desta dissertação (Capítulo 4).

3.1.4 Influência da porosidade e absorção dos agregados reciclados nas propriedades do concreto fresco e endurecido

Diversas propriedades do concreto como, resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção, entre outras, são influenciadas pela porosidade e absorção dos agregados. A porosidade influencia a massa específica aparente dos agregados e, como consequência, também o volume de concreto para uma dada massa de agregado (DE LARRARD, 1999). A massa específica do concreto reciclado fresco tende a ser menor que a do concreto convencional devido a menor massa específica apresentada pelo agregado reciclado.

De Larrard (1999) também menciona que todas as propriedades do concreto, especialmente a reologia do concreto fresco, são afetadas pela absorção de água do agregado caso este seja utilizado na condição seca, e que esta interferência se torna ainda mais significativa no caso de agregados heterogêneos, como por exemplo, quando há uma mistura de agregados fracos e porosos com resistentes e não-porosos para a produção de um mesmo concreto, fato este que geralmente ocorre com os

agregados reciclados e que foram confirmados durante a realização do programa experimental desta dissertação.

Os agregados podem ter seus poros completamente encerrados dentro do sólido, ou mesmo superficiais. Além disso, pode existir uma grande variabilidade de tamanhos desses poros. Através destes, podem penetrar água e partículas de cimento da pasta quando na execução de novos concretos, e sua profundidade de penetração dependerá das dimensões, continuidade e volume total dos poros e da finura do cimento.

Dependendo do teor de umidade dos agregados, estes podem ir de completamente secos à úmidos. A quantidade de água livre, presente na superfície do agregado no estado úmido, é variável de um agregado para o outro. Esta depende da capacidade dos agregados de carregar a água, sendo então relacionada à sua área superficial. A Figura 3-4 esquematiza os estágios de absorção dos agregados.

Figura 3-4 - - Representação esquemática da umidade dos agregados. FONTE: NEVILLE (1982).

Experiências mostraram que caso o agregado utilizado na fabricação do concreto esteja na condição seca, este absorverá uma parte considerável da água de amassamento prejudicando a trabalhabilidade do concreto (LEITE, 2001).

Segundo Neville (1982) é também possível que o agregado grão sendo utilizado seco, as partículas fiquem imediatamente cobertas de pasta de cimento, impedindo a entrada de água necessária à saturação do agregado. Com isso, a relação a/c se torna efetivamente maior do que se fosse possível a total absorção de água pelo agregado. Este efeito é significativo principalmente no caso de misturas ricas.

Alguns pesquisadores acreditam que a água retida nos poros dos agregados grãos reciclados pode contribuir para a hidratação do cimento, como se fosse uma "cura

úmida interna" (MACHADO et al., 1998; BREMNER, 1998; DE LARRARD, 1999). Este fato foi observado em um estudo realizado com agregados leves, quando pesquisadores (ZHUTOVSKY et al., 2002) utilizaram a eficiência desta "cura úmida interna" para a redução da retração autógena e de fissuras nos concretos de baixíssima relação a/c, onde a retração não é eliminada pelos métodos tradicionais de cura. Entretanto, segundo os autores, outros fatores devem ser levados em consideração para que a "cura interna" seja eficiente: (1) o tamanho dos poros dos agregados: caso sejam muito pequenos, a água em seu interior não consegue migrar efetivamente para a pasta (deve haver um volume de poros "ótimo", para um determinado tamanho de agregado), e (2) o espaçamento entre os agregados no concreto: caso seja muito grande, não haverá tempo da pasta mais distante do agregado ter acesso à água, pois o concreto atingirá uma densidade que impedirá a difusão da mesma pela matriz.

Segundo BARRA (1996), a quantidade de água que o material reciclado pode absorver depende de fatores como a condição inicial de umidade do agregado, o tempo de permanência de contato deste com a água, se o agregado entra em contato primeiro somente com a água, ou com a pasta de cimento, entre outros.

A quantidade de água absorvida pelos agregados, desde o processo da mistura até o adensamento do concreto, acarreta problemas em relação ao controle da produção do mesmo. Esta absorção, que depende das propriedades dos agregados, afeta a consistência do concreto fresco e sua efetiva relação a/c, exercendo influência sobre propriedades deste no estado endurecido (MARTINS, 1985; GRIGOLI, 2000). Ou seja, a absorção de água pelos agregados leva a problemas como o proporcionamento dos constituintes do concreto e a determinação da consistência deste no estado fresco.

A quantidade total de água que entra na composição do concreto é a somatória da quantidade de água absorvida pelo agregado, da água superficial no agregado e da água na pasta de cimento. Portanto, segundo GRIGOLI (2000), a relação água/cimento é um fator complicante na determinação do traço de concretos preparados com agregados reciclados. A grande variabilidade da absorção dos agregados dificulta a determinação da quantidade total de água que deverá ser adicionada ao concreto. Caso o agregado esteja na condição úmida, a água de sua superfície se somará à água da mistura, acarretando um aumento da relação a/c do concreto. Conseqüentemente, caso o agregado esteja na condição seca, este irá absorver água da pasta, ocorrendo então o inverso.

Segundo Alejos et al. (2004), esses problemas podem ser evitados através de medidas como: (1) quantificação da quantidade adicional de água que deve ser adicionada ao concreto no momento de sua fabricação; (2) adição de superplastificantes; (3) pré-saturação dos agregados.

Alejos (2004) menciona que a utilização dos agregados reciclados na condição saturada superfície seca, reduz a grande variação da consistência dos concretos no estado fresco, tornando-a mais fácil de ser controlada. As recomendações espanholas para a tolerância da variação da consistência de concretos reciclados se encontram na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Tolerância máxima no valor da consistência dos concretos reciclados conforme recomendações espanholas. FONTE: ALEJOS et al. (2004)

Slump (cm)	Tolerância (cm)
Entre 0 e 2	± 1
Entre 3 e 7	± 2
Entre 8 e 12	± 3

No trabalho em questão, a absorção dos agregados reciclados foi compensada através da adição da mesma na água total de amassamento das misturas no momento da fabricação dos concretos. Diferentemente dos agregados naturais, a alta porosidade e absorção dos agregados reciclados exerce grande influência na trabalhabilidade dos concretos (JUAN; GUTIÉRREZ, 2004a; DE LARRARD, 1999). Quem governa a trabalhabilidade do concreto é o volume de água fora dos poros dos agregados, e para minimizar a influência destes poros e das possíveis trocas de água, resolveu-se compensar a água que é absorvida pelos agregados reciclados na fabricação de concretos, através da adição desta na água de amassamento, evitando com isso que haja uma redução significativa de sua consistência.

3.2 Influência dos agregados graúdos de RCD reciclados no desempenho mecânico do concreto

3.2.1 Influência da porosidade no desempenho mecânico do concreto

O concreto é um material poroso, e suas propriedades mecânicas variam com a quantidade, distribuição e intercomunicação destes poros (GOMÉZ-SOBERÓN, 2002). A porosidade, e conseqüentemente o desempenho mecânico do concreto, estão relacionados à sua relação a/c. A relação água/cimento-resistência no concreto pode ser explicada como uma conseqüência natural do progressivo enfraquecimento da

matriz devido ao aumento da porosidade com o aumento da relação a/c (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Sabendo que o maior volume de poros reduz o nível de tensão que o concreto pode suportar, considerando a distribuição, tamanho e intercomunicação destes poros (ZHANG, 1998), alguns autores estabeleceram correlações entre a porosidade do concreto e algumas de suas propriedades mecânicas como a resistência à compressão e à tração e o módulo de elasticidade (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002). As correlações mostraram que todas as propriedades mecânicas reduzem à medida que a porosidade total do concreto aumenta (Figura 3-5).

Figura 3-5 - Relação entre a porosidade total do concreto e (a) resistência à tração; (b) resistência à compressão. FONTE: GÓMEZ-SOBERÓN (2002).

3.2.2 Influência dos agregados no desempenho mecânico do concreto

O desempenho de um concreto está diretamente relacionado ao desempenho dos materiais utilizados para sua produção, bem como suas proporções. Os agregados, como parte fundamental das misturas, possuem influência determinante nas propriedades finais dos concretos. Os agregados naturais são geralmente densos e resistentes; portanto, a porosidade da matriz, bem como a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo é que normalmente determinam a característica de resistência dos concretos convencionais (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Com isso, parece razoável que as propriedades se modifiquem quando se substituem os agregados naturais por reciclados.

Dentre as propriedades mais importantes dos agregados a serem estudadas para sua utilização em concretos estão a granulometria, a absorção de água, a forma e textura, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes nos materiais (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Todas essas propriedades devem ser analisadas, pois as mesmas podem interferir de maneira

negativa no desempenho mecânico do concreto, principalmente no caso dos agregados reciclados, um material geralmente bastante heterogêneo com relação a essas propriedades e normalmente de qualidade inferior aos agregados naturais.

3.2.2.1 Influência dos agregados reciclados na resistência à compressão do concreto

A resistência à compressão dos concretos reciclados está situada entre 60% e 100% do concreto convencional (VÁZQUEZ et al., 2001; HANSEN, 1992; TOPÇU e GUNÇAN, 1995). Para Alejos et al. (2004), a perda de resistência quando se substitui 100% dos agregados naturais por reciclados é de 20% a 30%, entretanto quando o teor de substituição é abaixo de 20%, esta perda é geralmente menor que 5%. Com isso, um maior consumo de cimento é necessário para que concretos reciclados atinjam uma determinada resistência, e este consumo aumenta com a demanda de maiores resistências. Este aumento pode variar entre 7% a 17% quando 100% dos agregados naturais são substituídos (ALEJOS et al., 2004).

Segundo alguns autores, o teor de substituição de agregados naturais por reciclados influencia o desempenho mecânico do concreto negativamente (DELWAR et al., 1997). Algumas pesquisas mostraram que para um teor de substituição igual a 30%, de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto, a resistência não é afetada significativamente (LIMBACHIYA et al., 2000). Quando o fator de substituição for menor ou igual a 30%, e o concreto reciclado for produzido com agregados graúdos procedentes de concretos com relação a/c mais baixa possível, os valores de resistência à compressão deste podem se igualar à dos concretos de referência (TAVAKOLI; SOROUSHIAN, 1996).

Para alguns pesquisadores, a substituição de agregados graúdos naturais por reciclados, principalmente à elevadas taxas, reduz a resistência à compressão dos concretos, como mostra a Tabela 3-2, sendo esta redução mais significativa para concretos mais resistentes (PEDROZO; LEITE e DAL MOLIN, 2000; JUAN e GUTIÉRREZ, 2004b; KATZ, 2003). A porosidade interna elevada e a baixa resistência do grão influenciam esta propriedade negativamente.

De acordo com Barra (1996), à medida que a relação a/c diminui, o incremento de resistência para os concretos reciclados é menor que o incremento observado para o concreto convencional. Resultados de ensaios de resistência à compressão de concretos reciclados (teor de substituição igual a 100%) e convencionais moldados

com a mesma argamassa e mesma relação a/c , mostraram que a resistência à compressão do concreto convencional é maior que a do concreto reciclado, especialmente para baixas relações a/c (CHEN et al., 2003). A medida em que se aumenta a relação a/c , as diferenças entre as resistências reduzem, conforme mostra a Figura 3-6.

Tabela 3-2 - Redução de resistência dos concretos reciclados em comparação aos concretos convencionais. FONTE: JUAN e GUTIÉRREZ (2004b)

Concretos convencionais	Concretos reciclados	
	Teor de substituição	Redução de resist.
25-50 MPa	100%	10-15%
	<50%	5-10%

N = agregado natural; A e B = tipo de agregado reciclado utilizado; R = agregado reciclado lavado; S = agregado reciclado não lavado.

Figura 3-6 - Resistência à compressão de concretos convencionais e reciclados. FONTE: CHEN et al. (2003).

De acordo com Levy (2001), para baixas relações a/c , é elevada a influência que pequenas quantidades de materiais reciclados exercem na resistência à compressão. Para baixas relações a/c , o agregado reciclado torna-se o componente mais fraco, levando a uma redução na resistência do concreto reciclado (CHEN et al., 2003). Nesse caso, a resistência à compressão para concretos reciclados será limitada pela resistência inferior do agregado reciclado. Já para elevadas relações a/c , a resistência do agregado reciclado tem uma pequena influência na resistência do concreto

reciclado. Isso implica que neste caso, a resistência do concreto reciclado será dominada pela resistência da argamassa.

A Figura 3-7 mostra que independente do teor de reciclados, a medida em que se aumenta a relação a/c, há uma queda na resistência. Quando a relação a/c é baixa (pasta rica), a resistência do concreto natural é mais elevada que a dos concretos reciclados. A medida em que a relação a/c aumenta, os valores das resistências dos concretos com agregados reciclados podem ultrapassar aos do concreto natural.

Este fato é muito comum no caso de concretos em que não há uma compensação da água de absorção dos agregados reciclados na água total de amassamento da mistura. Com isso, a alta absorção destes pode ocasionar uma redução da relação água/cimento efetiva das misturas, elevando os resultados de resistência e módulo dos concretos reciclados, chegando a valores superiores aos dos concretos convencionais de mesma relação a/c.

Figura 3-7 - Resistência do concreto na presença de vários teores de substituição. Os primeiros números da legenda indicam teores de substituição dos agregados miúdos (%), e os segundos números, de agregados graúdos. FONTE: LEITE (2002).

3.2.2.2 Influência dos agregados reciclados no módulo de elasticidade do concreto

Com relação ao módulo de elasticidade, quando o teor de substituição de agregados naturais por reciclados é inferior a 20%, não ocorrem alterações significativas em seu valor. Entretanto, quando 100% dos agregados naturais são substituídos, quedas de 20% a 40% do módulo são observadas (Tabela 3-3), sendo esta diferença maior para concretos mais resistentes (ALEJOS et al., 2004a).

O módulo de elasticidade do concreto está intrinsecamente relacionado à massa específica, à fração volumétrica, ao módulo de elasticidade do agregado e da pasta de cimento e às características da zona de transição. Já o módulo de elasticidade do agregado está relacionado ao seu diâmetro máximo, à sua forma, textura, granulometria, composição mineralógica e principalmente à sua porosidade. Assim, a utilização de agregados mais porosos no concreto contribui para a redução do módulo de elasticidade deste (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Segundo Hansen (1992), geralmente os concretos reciclados apresentam uma redução entre 15% a 40% do módulo de elasticidade em relação aos concretos convencionais. No caso da utilização de agregados reciclados de concreto e argamassa, este fato se deve à camada de argamassa antiga aderida ao agregado original e à maior porosidade dos agregados reciclados (LEVY, 1997). Já no caso de agregados reciclados de material cerâmico, segundo Hendricks (1992), esta redução se deve também à maior porosidade dos agregados, ou seja, quanto menos densos, maior a redução.

Segundo alguns pesquisadores (HANSEN, 1992; CHEN et al., 2003), a diferença entre o módulo de elasticidade dos concretos reciclados e convencionais aumenta à medida que cresce o valor da resistência à compressão, quando se utiliza agregados graúdos reciclados com teores de substituição iguais a 100% (Figura 3-8). Para concretos com diferentes teores de substituição de agregados naturais por reciclados, à medida que se aumenta este teor, o valor do módulo de elasticidade reduz (DELWAR et al., 1997), como mostra a Tabela 3-3.

N = agregado natural; A e B = tipo de agregado reciclado utilizado; R = agregado reciclado lavado; S = agregado reciclado não lavado.

Figura 3-8 – Módulo de elasticidade de concretos convencionais e reciclados. FONTE: CHEN et al. (2003).

Tabela 3-3 - Média de redução do módulo de elasticidade dos concretos reciclados em comparação aos concretos convencionais, para diferentes teores de substituição. FONTE: JUAN e GUTIÉRREZ (2004b)

Concretos convencionais	Concretos reciclados	
Faixa de resist.	Teor de substituição	Redução do módulo
25-50 MPa	100%	40%
	50%	20%
	20%	10%

Segundo Alejos et al. (2004a), quando uma quantidade maior que 20% de agregados reciclados é inserida no concreto, um coeficiente de correção deve ser aplicado à equação (oferecida pela Instrução de Concreto Estrutural, Espanha) para determinações teóricas do módulo de elasticidade. Este coeficiente de correção está correlacionado com a porcentagem de agregados reciclados utilizados, sendo iguais aos valores da Tabela 3-4.

Tabela 3-4 - Coeficientes de correção para o cálculo do módulo de elasticidade em concretos reciclados. FONTE: JUAN e GUTIÉRREZ (2004b).

Concretos reciclados	
Teor de substituição	Coeficiente de correção
100%	0,63
50%	0,81
20%	0,91

É importante salientar que as pesquisas já realizadas não focam o processamento do agregado visando possibilitar a quantificação da influência da densidade do agregado de RCD nas propriedades do concreto. Normalmente, as constatações observadas ficam restritas às condições experimentais destes casos dificultando a extrapolação dos resultados experimentais. Por isso, cuidou-se, na realização do programa experimental desta dissertação, de estabelecer correlações entre as propriedades quantificáveis dos agregados de RCD e a dos concretos produzidos a partir dos mesmos.

4 METODOLOGIA

Para o presente estudo, a densidade foi considerada como o principal fator de diferenciação entre os agregados graúdos de RCD reciclados. Com isso, decidiu-se pela separação dos agregados, em escala piloto, em quatro diferentes faixas de densidade com o intuito de se realizar um estudo analisando a sua influência no comportamento mecânico do concreto moldado a partir destes.

Para atingir os objetivos propostos no trabalho, o procedimento experimental foi dividido nas seguintes etapas:

Etapa I: Seleção e aquisição dos materiais;

Etapa II: Beneficiamento e ensaios dos agregados graúdos reciclados;

Etapa III: Separação dos agregados graúdos reciclados por faixas de densidade;

Etapa IV: Homogeneização dos agregados graúdos reciclados

Etapa V: Caracterização física dos materiais;

Etapa VI: Produção dos concretos;

Etapa VII: Ensaios de laboratório dos concretos no estado fresco;

Etapa VIII: Ensaios de laboratório dos concretos no estado endurecido.

Nesse capítulo são apresentados somente os procedimentos experimentais adotados no trabalho, sendo que todos os resultados e discussões encontram-se no capítulo 5.

4.1 Etapa I: Seleção e aquisição dos materiais

4.1.1 Cimento

Utilizou-se o cimento CII E 32 da Votorantim na execução dos concretos estudados, devido ao fato de ser um cimento utilizado largamente no mercado nacional em aplicações diversificadas.

4.1.2 Agregados miúdos naturais

Utilizou-se areia grossa lavada de rio como agregado miúdo natural, disponibilizada pelo laboratório do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Construção Civil, CPqDCC.

4.1.3 Agregados graúdos naturais

Os concretos de referência foram moldados com agregados 100% naturais. Utilizou-se brita de origem basáltica, de diâmetro máximo de 19,0 mm, disponibilizada pelo laboratório do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Construção Civil, CPqDCC.

4.1.4 Agregados graúdos reciclados

Os agregados graúdos reciclados foram doados pela usina de reciclagem de Itaquera, localizada na cidade de São Paulo. Nesta usina, o material que chega no caminhão para ser britado é separado em duas grandes pilhas (pilha cinza e pilha vermelha). A pilha cinza (Pc) é constituída predominantemente por produtos cimentícios e a vermelha (Pv) por produtos cerâmicos. O critério de avaliação executado na usina, para a decisão da separação do material nas duas pilhas é a análise visual.

O mesmo britador de impacto é utilizado para a britagem das duas pilhas (Pc e Pv), mas estas não são misturadas no momento da britagem. A pilha cinza (Pc), após britagem e peneiramento (Figura 4-1), origina agregados com quatro diferentes faixas granulométricas. Estes agregados reciclados foram chamados de *material cinza*:

- +40 mm;
- -40 mm à +20 mm¹²;
- -20 mm à +5 mm;
- -5 mm.

¹² -40mm indica o material passante na peneira de 40mm; +20mm indica o material retido na peneira de 20mm

Figura 4-1 – Peneirador mecânico utilizado na obtenção do material cinza

A pilha vermelha (Pv) origina a bica corrida após a britagem. Estes agregados, chamados de *material vermelho*, não possuem classificação quanto à sua granulometria, sendo observada a presença de uma grande quantidade de agregados miúdos e material pulverulento (Figura 4-2).

Figura 4-2 – Esteira transportadora e pilha do material vermelho obtido após britagem da Pv

Os contaminantes de ambas as pilhas (papel, plástico, madeira, etc.) são retirados manualmente, e um separador magnético auxilia na eliminação de impurezas (sucatas) como as armaduras das peças de concreto.

A Figura 4-3 e Figura 4-4 mostram o esquema do processo de reciclagem de Itaquera. Para a execução dos concretos reciclados, escolheu-se tanto a pilha que continha o material vermelho (bica corrida) quanto a constituída pelo material cinza de granulometria -20 à $+5$ ¹³ mm. O motivo da escolha do material cinza e vermelho se deve ao objetivo do trabalho, ou seja, após a separação de cada um dos materiais, separadamente, em quatro faixas de densidade, seria verificado se realmente há diferença entre o comportamento mecânico dos concretos moldados a partir do material vermelho e cinza, dentro da mesma faixa de densidade. Resumidamente, seria verificado se a maior influência do comportamento mecânico dos concretos se deve à diferença de fase (vermelho ou cinza) dos agregados graúdos reciclados ou à diferença entre as massas específicas destes.

Figura 4-3 - Esquema do processo de reciclagem da Pv para obtenção do material vermelho

Figura 4-4 - Esquema do processo de reciclagem da Pc para obtenção do material cinza

¹³ -20mm indica o material passante na peneira de 20mm; +5mm indica o material retido na peneira de 5mm

4.2 Etapa II: Beneficiamento e ensaios dos agregados graúdos reciclados

Foram coletadas cerca de 2 ton de agregados de RCD reciclados na Usina de Itaquera, sendo 1 ton constituída de material vermelho e 1 ton de cinza. Os materiais vermelho e cinza foram estocados separadamente no laboratório CPqDCC. O material vermelho foi mecanicamente peneirado na peneira de malha 9,5 mm. O objetivo foi a retirada do excesso de finos e assim facilitar a britagem secundária (item 4.2.1).

Para a execução dos concretos, foram utilizados somente agregados graúdos de granulometria considerada como B1 pela NBR 7211 (1983).

Foi observado que grande parte dos agregados graúdos obtidos na central de reciclagem tinham uma granulometria maior que a de interesse para o trabalho. Por este motivo, foi necessária uma britagem secundária para a adequação do material.

4.2.1 Britagem secundária

Ambos os materiais, vermelho e cinza, foram novamente britados separadamente através do britador de mandíbula localizado no laboratório da Engenharia de Minas e de Petróleo (Figura 4-5). A Figura 4-6 mostra um esquema do processo de britagem no laboratório.

Figura 4-5 - Britador de mandíbula

Figura 4-6 - Esquema do processo de britagem secundária dos agregados reciclados

4.2.2 Peneiramento

Uma quantidade razoável de finos foi gerada na britagem secundária, principalmente para o material vermelho. Portanto, os materiais vermelho e cinza foram novamente peneirados e os agregados menores que 9,5 mm foram retirados e descartados de modo a se evitar complicações maiores quanto à manutenção da trabalhabilidade dos concretos.

4.2.3 Eliminação da fração fina (pulverulentos)

É fato que um excesso de materiais pulverulentos ($< 75 \mu\text{m}$) presentes nos agregados pode afetar negativamente o desempenho mecânico do concreto, principalmente em baixas relações a/c (CHEN et al., 2003). Para De Larrard (1999), em comparação com os agregados lavados, os agregados revestidos com siltes, argilas ou materiais pulverulentos podem ter a aderência com a pasta de cimento prejudicada, chegando a reduzir a resistência à compressão dos concretos em até 30%.

Assim, para se eliminar a influência desta variável interveniente, optou-se pela retirada da fração miúda ($< 4,8 \text{ mm}$) e dos materiais pulverulentos ($< 0,075 \text{ mm}$) contidos nos materiais cinza e vermelho através de sua lavagem em água corrente.

Um outro motivo que justifica a retirada dos pulverulentos presentes nos agregados graúdos reciclados se deve à etapa de separação nas faixas de densidade (item 4.3). Os finos aderentes sujam o líquido utilizado para a separação dos agregados, reduzindo a eficiência do processo.

Após a lavagem, os agregados foram secos em uma lona. A secagem dos materiais é de extrema importância, uma vez que a água absorvida por estes pode interferir na densidade real do material, influenciando na sua separação por meio denso.

4.3 Etapa III: Separação dos agregados graúdos reciclados por faixas de densidade

A maioria dos equipamentos e métodos de separação de materiais em densidades possui basicamente o mesmo princípio: o material a ser separado é lançado em um líquido com determinada densidade, originando uma parte flutuante (densidade menor que o líquido) e uma imersa (densidade maior).

Como mencionado nos capítulos anteriores, para o presente estudo, a massa específica foi considerada como o principal fator de diferenciação entre os agregados graúdos de RCD reciclados. Com isso, decidiu-se pela separação dos agregados, em escala piloto,

em quatro diferentes faixas de densidade com o intuito de se realizar um estudo do comportamento mecânico do concreto moldado a partir destes. As faixas selecionadas foram as seguintes:

$$\left\{ \begin{array}{l} d < 1,9 \text{ g/cm}^3 \text{ (1,9)} \\ 1,9 < d < 2,2 \text{ g/cm}^3 \text{ (1,9-2,2)} \\ 2,2 < d < 2,5 \text{ g/cm}^3 \text{ (2,2-2,5)} \\ d > 2,5 \text{ g/cm}^3 \text{ (2,5)} \end{array} \right.$$

O objetivo desta etapa foi definir um método de separação, em escala piloto, dos agregados graúdos de RCD reciclados por densidade. Para isso, foi realizado um estudo comparativo entre três métodos de separação, onde se analisou a eficiência dos processos, a facilidade de execução, o custo e a interferência na qualidade do agregado.

4.3.1 Separação com cloreto de zinco (ZnCl)

Algumas vantagens como eficiência, facilidade de execução e baixo custo, podem ser atribuídas a este método de separação. Entretanto, além da impossibilidade de separações em densidades superiores a $2,2 \text{ g/cm}^3$, a influência que o cloreto exerce sobre o tempo de pega do cimento pode ser um fator limitante na sua utilização.

O princípio do método consta em se obter uma solução com uma densidade desejada e, ao se mergulhar os agregados nesta, separar os agregados que possuem densidade menor e maior que a densidade da solução, através da retirada da parcela flutuante e imersa formadas.

A metodologia consistiu na mistura de água com pó de cloreto de zinco, até que uma solução de densidade $1,9 \text{ g/cm}^3$ fosse obtida. Ao serem lançados nesta solução, os agregados reciclados originaram uma parcela flutuante e outra imersa, na qual ao serem coletadas, eram lavadas com água corrente até que esta ficasse visualmente límpida. Em seguida, os agregados separados eram secos em estufa, procedendo-se então à determinação do teor de sais, cloretos e sulfatos solúveis conforme a NBR 9917 (1987).

Segundo a NBR 9917 (1987), as amostras a serem ensaiadas devem ter granulometria inferior a $2,4 \text{ mm}$, mas a fração de finos deve ser removida. Entretanto, neste trabalho optou-se por incluí-los, pois durante a britagem das amostras para a execução dos

ensaios foi produzida uma grande parcela de finos, e estes poderiam conter uma quantidade significativa de cloretos solúveis que não deveria ser desprezada.

Os resultados iniciais indicaram teores elevados de cloretos solúveis. Os valores para as amostras de referência (sem separação) foram iguais a 0,0175% (175 ppm) e para as amostras processadas foram iguais a 0,695% (6950 ppm) (Tabela 4-1).

No que diz respeito ao agregado, a norma BS 812 (BSI, 1992) contém diretrizes para o teor máximo aceitável de íon cloreto no agregado. São os seguintes os limites de BS 812 (BSI, 1992) de íons cloreto em relação à massa total do agregado: para concreto protendido: 0,01%; concreto armado com cimento resistente a sulfatos: 0,03%; outros concretos armados: 0,05%.

Os teores de cloretos solúveis obtidos indicaram que o tempo de lavagem dos agregados após sua separação era insuficiente para assegurar a remoção do cloreto absorvido. Por este motivo foi analisado o tempo de lavagem que seria necessário para a remoção dos cloretos até níveis desejáveis. Assim, os agregados foram deixados submersos na água por períodos de 24h, 48h, 72h e 96h. Os teores de cloreto solúveis foram novamente analisados e para isso, escolheu-se o método do kit IGS-Chloride Test Set¹⁴, cedido pela Profa. Dra. Sílvia Selmo do Departamento de Construção Civil. Apesar deste método não fornecer um valor preciso do teor de cloretos, optou-se por sua utilização pois além de ser um método simples, rápido e de baixo custo, o intuito era somente a verificação de quanto tempo de lavagem seria necessário para a redução do teor de cloretos nos agregados.

Os resultados indicaram que após 24h de lavagem, o teor de cloretos dos agregados foi inferior a 0,1% (1000 ppm). As amostras lavadas por períodos de 48h, 72h e 96h apresentaram teores de cloretos inferiores a 0,05% (500 ppm). Com isso, concluiu-se que períodos de lavagem superiores a 48h não reduzem de maneira significativa o teor de cloretos presentes nos agregados. A Tabela 4-1 mostra um resumo de todos os resultados de determinação dos teores de cloreto obtidos.

¹⁴ Este método é geralmente utilizado para detecção de contaminação de íons cloreto em concretos e argamassas.

Tabela 4-1 - Teores de cloretos solúveis para as amostras de referência, após separação em densidade e lavagem

	Cloretos solúveis (%)	Cloretos solúveis (ppm)
Referência	0,018	175
Após separação	0,695	6950
Lavagem 24h	< 0,10	1000
Lavagem 48h	< 0,05	500
Lavagem 72h	< 0,05	500
Lavagem 96h	< 0,05	500

Para se analisar a influência que o teor de cloretos, contido na amostra lavada pelo período de 96h, poderia exercer no tempo de hidratação do cimento, foi realizado o ensaio de calor de hidratação através do calorímetro de condução localizado no laboratório de Microestrutura do Departamento de Construção Civil.

Os resultados obtidos para os agregados reciclados separados com a solução de cloreto de zinco e lavados por 96h foram comparados com os resultados para os agregados reciclados de referência. Concluiu-se que os teores de cloreto contidos nos primeiros influenciaram no tempo de hidratação do cimento.

Na Tabela 4-2 estão apresentados os resultados da determinação de sais solúveis e sulfatos nos agregados processados, após 24h de lavagem. A norma BS 3148 (BSI, 1980) recomenda limites abaixo de 0,1% (1000 ppm) para sulfato (apud NEVILLE, 1997).

Tabela 4-2 – Sais e sulfatos solúveis nos agregados antes e após lavagem com água

	Antes da lavagem	Após lavagem
Sais solúveis	0,85%	11,42%
Sulfatos solúveis	0,05%	0,14%

Como conclusão, os ensaios realizados mostraram que o método de separação pela solução de cloreto de zinco não se mostrou adequado, uma vez que o cloreto remanescente nos agregados reciclados, mesmo após sua lavagem, pode influenciar principalmente no tempo de hidratação do cimento e conseqüentemente nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

4.3.2 Separação com bromofórmio (CHBr_3)

O bromofórmio é um líquido incolor, de densidade igual a $2,89\text{g/cm}^3$ e solúvel em álcool etílico, éter, acetona e benzeno. Para as separações em densidades inferiores a

2,89g/cm³ são empregadas misturas de bromofórmio e álcool etílico, possibilitando a obtenção de densidades entre 1,58 e 2,89g/cm³.

A metodologia consistiu na mistura de álcool etílico e bromofórmio (CHBr₃), até que uma solução de densidade 2,5 g/cm³ fosse obtida. Com isso, uma quantidade de material cinza foi separada e lavada com álcool etílico para a retirada do bromofórmio absorvido. Os mesmos procedimentos foram realizados também para as densidades 2,2 g/cm³ e 1,9 g/cm³.

Durante a separação, a densidade da solução foi monitorada a cada duas horas, pois à medida que o álcool etílico evapora, sua densidade aumenta gradativamente. A taxa de aumento desta é de aproximadamente 0,1 g/cm³ por dia. A Figura 4-7 esquematiza o processo de separação dos agregados por densidade.

Apesar da eficiência deste método, da facilidade de execução e da possibilidade de separação em todas as faixas de densidade, o vapor do bromofórmio é tóxico, sendo necessária capela ou um ambiente bem ventilado para seu manuseio. Além desta desvantagem, o custo do método também se tornou um fator limitante, uma vez que devido a elevada absorção dos agregados reciclados, seria necessária uma quantidade significativa de bromofórmio para a separação dos 2000 kg de material.

Figura 4-7 - Representação esquemática da separação dos agregados graúdos reciclados por densidade

4.3.3 Separação dos agregados pelo equipamento *Sink and Float*

Dos três métodos de separação analisados, o da utilização do equipamento de concentração densitária fabricado pela Denver, denominado *Sink and Float*, se mostrou o mais adequado para a pesquisa, sendo este então adotado. O equipamento foi cedido pelo Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia (CETEM/MCT), Rio de Janeiro (Figura 4-8).

Figura 4-8 - Equipamento *Sink and Float* e ferro silício em pó

A metodologia consistiu na mistura de água com um pó de ferro silício (15% de silício e 85% de ferro) de peso específico $6,7 \text{ g/cm}^3$ (Figura 4-8), sendo obtida uma polpa que ao circular no equipamento garante a densidade requerida.

Primeiramente adicionava-se água ao equipamento numa quantidade suficiente que garantisse a circulação da mesma ao se ligar o equipamento. O ferro silício em pó era vagarosamente adicionado até que a polpa (ferro silício + água) chegasse à densidade requerida. A medição e monitoramento da densidade da polpa eram realizados com o auxílio de uma proveta graduada de 1000 ml, onde a polpa circulante era retirada pela abertura do cilindro superior e sua massa determinada. A massa da polpa era dividida pelo volume ocupado pela mesma na proveta, obtendo-se assim sua densidade. Após a adequação da densidade, iniciava-se a separação dos agregados reciclados.

Em cada um dos cilindros do equipamento (Figura 4-8) há uma peneira embutida. Os agregados reciclados eram lançados vagarosamente no cilindro maior (Figura 4-9a), o material afundado ficava retido na peneira deste cilindro e o material flutuado (densidade menor que a da polpa) caía e ficava retido na peneira do cilindro menor. A peneira do cilindro maior era movimentada para que os agregados de densidade intermediária também caíssem no cilindro menor. Terminado este processo, ambas as peneiras eram retiradas (Figura 4-9b e Figura 4-9c) e os agregados lavados com água corrente (Figura 4-9d). Observou-se que a lavagem imediatamente após a separação era suficiente para garantir a retirada do ferro silício aderido ao agregado.

Figura 4-9 –Procedimentos na separação do material. (a) alimentação no cilindro maior; (b) retirada do material afundado (peneira do cilindro maior); (c) retirada do material flutuado (peneira do cilindro menor); (d) lavagem dos agregados.

É importante salientar que o volume de agregados lançados no equipamento deve ser controlado pelo volume de material retido nas duas peneiras à medida que estas vão se enchendo e que a alimentação deve ser distribuída uniformemente ao longo de toda a área (ANDERY, 1980). A altura de material retido principalmente na peneira do cilindro maior deve ser tal que não prejudique a definição da parcela afundada e flutuada deste. Caso esta peneira se encha muito, os materiais lançados na mesma não possuirão uma altura suficiente que permita a definição correta das duas parcelas: afundada e flutuada. Os agregados devem ser lançados vagarosamente no

equipamento, garantindo tempo suficiente para a definição da parcela afundada e flutuada.

A cada três baldes de 8 dm³ de agregados separados, fazia-se o monitoramento da densidade da polpa conforme descrito anteriormente. Com isso, a variação da densidade foi mantida em $d \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. Imediatamente antes do monitoramento, parte da polpa circulante era retirada através de uma torneira situada no equipamento e recolocada. Isso fazia com que a polpa circulasse no equipamento e evitasse possíveis entupimentos devido a sedimentação do ferro silício.

Após a separação dos agregados em densidades acima e abaixo de 2,2 g/cm³, a eficiência do método foi verificada através de ensaios de absorção de água e massa específica aparente, conforme a norma NM 53 (Tabela 4-3).

Tabela 4-3 - Valores de massa específica e absorção dos agregados separados nas densidades acima e abaixo de 2,2 g/cm³

	densidade < 2,2g/cm ³	densidade > 2,2 g/cm ³
Massa específica calculada (g/cm³)	2,117	2,556
Absorção calculada (%)	7,493	2,011

Como conclusão, dentre os três métodos de separação analisados optou-se pela utilização do Sink and Float, uma vez que sua eficiência, facilidade e rapidez de execução, custo e possibilidade de separação em todas as faixas de densidade, tornaram-no o mais adequado para a pesquisa.

4.4 Etapa IV: Homogeneização dos agregados graúdos reciclados

A metodologia consistiu na distribuição dos agregados de maneira uniforme e ininterrupta ao longo de uma pilha alongada, em baldes de 8 dm³. As sucessivas camadas da pilha foram construídas com a direção de distribuição alternada. As extremidades da pilha, onde a heterogeneidade do agregado estava concentrada, foram retomadas e redistribuídas. Terminada a homogeneização, alíquotas de aproximadamente 10 kg foram retiradas do meio das pilhas e armazenadas para ensaios posteriores. A Figura 4-10 esquematiza este procedimento.

Figura 4-10 - Sequência do processo de homogeneização dos agregados reciclados

É importante ressaltar que na homogeneização, as quatro faixas de densidade obtidas na etapa de separação, assim como os dois tipos de materiais (vermelho e cinza) foram homogeneizados separadamente. A Figura 4-11 ilustra uma pilha de homogeneização e a retirada de uma alíquota.

Figura 4-11 - Pilha de homogeneização e retirada da alíquota

4.5 Etapa V: Caracterização física dos materiais

Todos os resultados e discussões da caracterização física dos materiais encontram-se no capítulo 5.

4.5.1 Determinação da composição granulométrica dos agregados

O estudo da composição granulométrica e do módulo de finura dos agregados miúdos naturais e graúdos naturais e reciclados foi realizado de acordo com as especificações da NBR NM 248 (2003).

4.5.2 Determinação da massa específica dos materiais

No estudo de dosagem de concretos, a determinação da massa específica de seus constituintes é importante, pois através da mesma pode-se calcular o consumo de materiais utilizados na produção das misturas. A massa específica de um material pode ser considerada como a massa deste por unidade de volume, incluindo seus vazios internos.

A massa específica dos agregados graúdos foi determinada de acordo com a NBR NM 53 (2003).

A massa específica dos demais materiais (cimento e areia) foi determinada utilizando-se o equipamento picnômetro à gás Hélio, marca Quantachrome, modelo MUP-SOC (Figura 4-12). A amostra seca em estufa a 110°C e resfriada em dessecador por 24 horas foi colocada na célula e pressurizada.

Figura 4-12 - Picnômetro a gás Hélio, marca Quantachrome, modelo MUP-SOC

4.5.3 Determinação da absorção de água dos agregados graúdos

Determinou-se a absorção dos agregados graúdos reciclados por um período de 24 horas, conforme preconizado pela norma NBR NM 53, sendo esta considerada como o valor da absorção total dos agregados.

Análises da absorção dos agregados reciclados em função do tempo também foram realizadas. Para isso, uma alíquota de aproximadamente 3 kg de agregados previamente lavados foi seca em estufa, resfriada até a temperatura ambiente e após a determinação de sua massa seca, esta foi submersa na água. O monitoramento do ganho de massa foi realizado ao longo de 24 horas, em intervalos de tempo iguais a: 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300 e 1440 min. A cada intervalo de tempo, os

agregados eram retirados da água e secos com um pano até a condição saturado superfície seca.

4.5.4 Caracterização do cimento

As características químicas, físicas e mecânicas do cimento foram determinadas gratuitamente pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABNT) e encontram-se no Anexo (Capítulo 0)

4.6 Etapa VI: Produção dos concretos

4.6.1 Definição dos traços dos concretos de referência e reciclados

Devido ao fato dos agregados reciclados no referente estudo possuírem diferentes valores de massa específica (item 5.1.2), os concretos foram dosados em volume, e não em massa, como se faz normalmente. Para isso, a definição dos traços dos concretos foi baseada nos valores das massas específicas calculadas de acordo com o item 4.5.2..

De acordo com os resultados de massa específica (item 5.1.2) caso os concretos fossem dosados em massa, o consumo volumétrico correspondente ao agregado reciclado seria maior que o do agregado convencional por este ser mais denso, resultando numa distorção entre os volumes de concreto convencional e reciclado produzidos a partir de um mesmo traço unitário (LEITE, 2001; DE LARRARD, 1999).

Com isso, para todas as misturas, foram mantidos fixos o volume dos agregados graúdos em 40% e da água em 20%. Três diferentes consumos de cimento foram adotados: 300, 400 e 500 kg/m³.

Primeiramente foi calculado o volume de cada material para 1 m³ de concreto. A partir dos resultados de volume, obteve-se a massa de cada componente multiplicando-se os volumes pelos valores das respectivas massas específicas. As Tabela 4-4, Tabela 4-5 e Tabela 4-6 mostram os valores de volume e massa adotados para cada uma das 27 misturas. Nas tabelas, a sigla C indica o material cinza, V indica o material vermelho e o número subsequente indica a faixa de densidade. A sigla A.G. se refere a agregado graúdo.

Tabela 4-4 - Traços para o consumo de cimento igual a 300 kg/m³

Consumo cimento = 300kg/m³										
Faixa de densidade		natural	C1,9	V1,9**	C1,9-2,2	V1,9-2,2	C2,2-2,5	V2,2-2,5	C2,5	V2,5
Traço		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Massa esp. agregado		2,675	1,78	1,74	2,11	2,02	2,53	2,49	2,6	2,62
Volume para 1m³	Vol. Água (l/m³)	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
	Vol. A.G. (l/m³)	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
	Vol. Cim. (l/m³)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Vol. Areia (l/m³)	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
Massa para 1m³	Massa água (kg/m³)	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
	Massa A.G. (kg/m³)	1070,00	712,00	696,00	844,00	808,00	1012,00	996,00	1040,00	1048,00
	Massa cim. (kg/m³)	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
	Massa areia (kg/m³)	795,00	795,00	795,00	795,00	795,00	795,00	795,00	795,00	795,00
Traço unitário	cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	areia	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
	A.G.	3,57	2,37	2,32	2,81	2,69	3,37	3,32	3,47	3,49
	água/cimento	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
	Teor de argamassa	0,51	0,61	0,61	0,56	0,58	0,52	0,52	0,51	0,51
	Água/mat. secos (%)	9,24	11,07	11,17	10,31	10,51	9,49	9,56	9,37	9,33

Tabela 4-5 - Traços para o consumo de cimento igual a 400 kg/m³

Consumo cimento = 400kg/m ³										
Faixa de densidade		natural	C1,9	V1,9	C1,9-2,2	V1,9-2,2	C2,2-2,5	V2,2-2,5	C2,5	V2,5
Traço		T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
Massa esp. agregado		2,675	1,78	1,74	2,11	2,02	2,53	2,49	2,6	2,62
Volume para 1m ³	Vol. Água (l/m ³)	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
	Vol. A. G. (l/m ³)	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
	Vol. Cim. (l/m ³)	133,33	133,33	133,33	133,33	133,33	133,33	133,33	133,33	133,33
	Vol. Areia (l/m ³)	266,67	266,67	266,67	266,67	266,67	266,67	266,67	266,67	266,67
Massa para 1m ³	Massa água (kg/m ³)	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
	Massa A. G. (kg/m ³)	1070,00	712,00	696,00	844,00	808,00	1012,00	996,00	1040,00	1048,00
	Massa cim. (kg/m ³)	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
	Massa areia (kg/m ³)	706,67	706,67	706,67	706,67	706,67	706,67	706,67	706,67	706,67
Traço unitário	cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	areia	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77
	A.G.	2,68	1,78	1,74	2,11	2,02	2,53	2,49	2,60	2,62
	água/cimento	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	Teor de argamassa	0,51	0,61	0,61	0,57	0,58	0,52	0,53	0,52	0,51
	Água/mat. secos (%)	9,19	11,00	11,09	10,25	10,45	9,44	9,51	9,32	9,28

Tabela 4-6 - Traços para o consumo de cimento igual a 500 kg/m³

Consumo cimento = 500kg/m³										
Faixa de densidade		natural	C1,9	V1,9	C1,9-2,2	V1,9-2,2	C2,2-2,5	V2,2-2,5	C2,5	V2,5
Traço		T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
Massa esp. agregado		2,675	1,78	1,74	2,11	2,02	2,53	2,49	2,6	2,62
Volume para 1m³	Vol. Água (l/m³)	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
	Vol. A.G. (l/m³)	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
	Vol. Cim. (l/m³)	166,67	166,67	166,67	166,67	166,67	166,67	166,67	166,67	166,67
	Vol. Areia (l/m³)	233,33	233,33	233,33	233,33	233,33	233,33	233,33	233,33	233,33
Massa para 1m³	Massa água (kg/m³)	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
	Massa A.G. (kg/m³)	1070,00	712,00	696,00	844,00	808,00	1012,00	996,00	1040,00	1048,00
	Massa cim. (kg/m³)	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
	Massa areia (kg/m³)	618,33	618,33	618,33	618,33	618,33	618,33	618,33	618,33	618,33
Traço unitário	cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	areia	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
	A.G.	2,14	1,42	1,39	1,69	1,62	2,02	1,99	2,08	2,10
	água/cimento	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
	Teor de argamassa	0,51	0,61	0,62	0,57	0,58	0,52	0,53	0,52	0,52
	Água/mat. secos (%)	9,14	10,93	11,02	10,19	10,38	9,39	9,46	9,27	9,23

*material cinza de densidade 1,9 g/cm³ **material vermelho de densidade 1,9 g/cm³ *** volume de agregado graúdo

Devido a insuficiência de material cinza na faixa de densidade 1,9 g/cm³, foram moldados somente os concretos com relação água/cimento igual a 0,4. Ou seja, os traços T11 e T2 não foram realizados.

4.6.2 Escolha do aditivo

Com o objetivo de se evitar que variações na trabalhabilidade influenciassem na condição de compactação do material e, conseqüentemente, nas suas propriedades mecânicas, optou-se pela utilização do aditivo superplastificante Glenium 51 a base de policarboxilatos, doado pela MBT Brasil. Isto também evitou variações nas relações a/c e, conseqüentemente, na qualidade da pasta de modo a se garantir uma redução nas variáveis intervenientes.

4.6.3 Procedimentos na moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova

Todos os concretos foram compostos de agregados graúdos reciclados e naturais e agregados miúdos naturais. Os agregados graúdos reciclados foram separados nas quatro faixas de densidade descritas no item 4.3 e suas duas naturezas minerais (material vermelho e cinza), separadas pela usina de Itaquera, foram mantidas.

Para a fabricação dos concretos, os agregados graúdos reciclados foram lavados e secos em estufa a temperatura de aproximadamente 110°C. Os agregados graúdos e miúdos naturais foram somente secos em estufa. Após secagem, esses foram resfriados à temperatura ambiente para seu manuseio e utilização.

Na metodologia de dosagem adotada, os agregados graúdos reciclados juntamente com sua respectiva água de absorção eram primeiramente inseridos na batedeira – da marca Perfecta Curitiba, modelo 043002126, de capacidade 20 litros (Figura 4-13) – e deixados em repouso. Após 10 minutos (item 5.1.3), a batedeira era ligada e inseria-se metade da água de amassamento, o cimento, a areia e por último o restante da água de amassamento do traço em questão. O aditivo era adicionado até que o concreto atingisse visualmente uma consistência plástica (item 5.4.3) e com isso, fazia-se sua medida pelo abatimento do tronco de cone conforme NBR NM 67. A medida da massa específica e do teor de ar do concreto no estado fresco era realizada conforme NBR 9833 e por último, os corpos-de-prova eram moldados de acordo com a NBR 5738, identificados e cobertos com plásticos para que se evitasse a perda excessiva de água. Os corpos-de-prova eram desmoldados após um período de 24 horas e curados, conforme NBR 5738, em câmara úmida com temperatura constante de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade superior a 95% por 28 dias.

Para cada traço de concreto foram moldados cinco corpos-de-prova de diâmetro igual a 10cm e altura de 20 cm. Devido ao pequeno volume de concreto para cada traço, as misturas foram realizadas não em betoneira, mas em uma batedeira (Figura 4-13), com a observação de que a pá de alumínio da batedeira foi trocada por uma de ferro (item 5.4.1). Esta batedeira é geralmente utilizada para preparo de argamassas e pastas de cimento.

Figura 4-13 - Misturador utilizado no preparo dos concretos

4.7 Etapa VII: Ensaios de laboratório dos concretos no estado fresco

4.7.1 Trabalhabilidade

Foi determinada a trabalhabilidade dos concretos produzidos através da medida do abatimento do tronco de cone, conforme preconizado pela NBR NM 67 (1998).

4.7.2 Massa específica

Foram determinados as massas específicas e os teores de ar dos concretos no estado fresco de acordo com a NBR 9833 (1987).

4.8 Etapa VIII: Ensaios de laboratório dos concretos no estado endurecido

Após cura dos corpos-de-prova em câmara úmida por 28 dias, foram realizados ensaios de resistência à compressão (NM 101), módulo de elasticidade tangente inicial (NBR 8522) e absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real (NBR 9778) do concreto no estado endurecido.

Dos cinco corpos-de-prova moldados (CP1 ao CP5) para cada traço, três foram destinados a ensaios de resistência à compressão, três a ensaios de módulo de elasticidade e dois a ensaios de absorção (Figura 4-14).

Figura 4-14 - Número de corpos-de-prova utilizados para cada ensaio realizado

Deve-se atentar pelo fato de que uma maior variabilidade nos resultados é esperada, em comparação com os concretos convencionais, uma vez que a maior heterogeneidade dos agregados reciclados contribui para que tal fato ocorra.

4.8.1 Resistência à compressão

A grande popularidade do ensaio de resistência à compressão se deve principalmente ao fato de que, além de sua facilidade de execução, muitas das características do concreto estão relacionadas à mesma, além da importância intrínseca da resistência à compressão nas obras de concreto.

Após 28 dias de cura em câmara úmida, os corpos-de-prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, adotando-se a metodologia preconizada pela NM 101. Pelo fato de haver uma quantidade limitada de corpos-de-prova para a execução dos ensaios, estes foram retificados no lado superior e capeados com enxofre em ambos os lados, assegurando com isso uma boa regularização da superfície de aplicação de carga e conseqüentemente menor variabilidade nos resultados obtidos. Para a determinação do valor de f_c foi considerado o valor médio de três corpos-de-prova por traço. Isto porque, para os concretos produzidos com agregados de RCD reciclados não se pode considerar que os resultados menores de f_c , para os corpos-de-prova gêmeos, estejam associados a erros de ensaio como ocorre para concretos convencionais onde a resistência de um exemplar é a maior entre dois corpos-de-prova.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados utilizando-se uma prensa universal servo controlada com capacidade de 200 kgf de marca Shimadzu, do laboratório CPqDCC.

4.8.2 Módulo de elasticidade

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade tangente inicial dos concretos foi realizado também através da prensa universal servo controlada com capacidade de 200 kgf de marca Shimadzu, segundo a NBR 8522 (1983). De acordo com a norma, escolheu-se o plano de carga I para a elaboração do ensaio, ou seja, foram aplicados, no total, nove ciclos de carregamento e descarregamento com cargas equivalentes a 30% da resistência à compressão prevista e 5 kgf/cm^2 respectivamente. Dos nove ciclos totais, quatro são destinados às medidas de deformação para o cálculo do módulo. As medidas de deformação foram obtidas através de um extensômetro mecânico que possui um relógio comparador de precisão de 0,01 mm (Figura 4-15).

Figura 4- 15 - Ensaio de módulo de elasticidade

4.8.3 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para o estudo da absorção de água dos concretos, optou-se pela análise da absorção por imersão, pois esta caracterizaria melhor o volume dos poros, uma vez que permite avaliar a quantidade total de água absorvida. Analisando-se esta propriedade, pretende-se também constatar quem exerce maior influência sobre a porosidade e a absorção do concreto, o tipo de agregado utilizado (vermelho e cinza) ou a sua massa específica.

Estes ensaios foram realizados de acordo com o preconizado pela norma brasileira NBR 9778 (1987), ou seja, os corpos-de-prova foram secos em estufa e após sua constância de massa, foram imersos em água por três dias e levados à fervura para posterior pesagem em balança hidrostática (Figura 4-16). Este ensaio é um elemento útil na escolha do procedimento de mistura e na quantificação do traço.

Figura 4- 16 - Ensaio de absorção dos concretos

O objetivo fundamental da proposição desta metodologia foi avaliar o grau de influência da densidade do agregado reciclado nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, com um mínimo de interferência de variáveis intervenientes e minimizar a variabilidade dos resultados dado o escasso volume de material disponível. Os resultados obtidos a partir da utilização dessa metodologia se encontram apresentados no próximo capítulo.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Agregados

5.1.1 Composição granulométrica

5.1.1.1 Agregados graúdos

Os resultados da composição granulométrica dos agregados graúdos naturais e reciclados para cada faixa de densidade estão apresentados na Tabela 5-1 e

Tabela 5-2.

As curvas da distribuição granulométrica (Figura 5-1) indicaram que os agregados possuem uma granulometria contínua. Além disso, mostraram que a medida em que o agregado de RCD reciclado se tornou mais denso, a quantidade de material retido na peneira de 12,5 mm aumentou, caracterizando uma distribuição acumulada tendendo ao limite superior estabelecido, mas todos os agregados reciclados se encaixaram dentro dos limites da faixa de graduação do agregado natural que é Brita 1. Vale a pena ressaltar que os materiais menos densos são mais sujeitos à ruptura na britagem, diminuindo assim a dimensão da partícula. Os agregados graúdos reciclados apresentaram também módulo de finura semelhante ao do agregado natural, entretanto um pouco maior que este.

Tabela 5-1 - Porcentagem retida acumulada dos agregados graúdos nas peneiras.

			Peneiras (mm)					
sigla	densidades	material	19	12,5	9,5	6,3	4,8	<4,8
d1	d<1,9	vermelho	0	64	93	97	98	100
		cinza	0	52	91	98	98	100
d2	1,9<d<2,2	vermelho	0	67	97	100	100	100
		cinza	0	72	98	100	100	100
d3	2,2<d<2,5	vermelho	1	82	99	100	100	100
		cinza	1	78	99	100	100	100
d4	d>2,5	vermelho	0	81	99	100	100	100
		cinza	0	79	99	100	100	100
natural			2	38	76	99	99	100

Tabela 5-2 - Módulo de finura, dimensão máxima e graduação dos agregados graúdos.

sigla	densidades (g/cm ³)	tipo de material	módulo de finura	dimensão máxima (mm)	graduação
d1	d<1,9	vermelho	6,91	19	Brita 1
		cinza	6,9		
d2	1,9<d<2,2	vermelho	6,97		
		cinza	6,98		
d3	2,2<d<2,5	vermelho	7		
		cinza	7		
d4	d>2,5	vermelho	7		
		cinza	6,99		
natural			6,78

Figura 5-1 - Curvas da distribuição granulométrica dos agregados graúdos com os limites superior e inferior.

5.1.1.2 Agregados miúdos

Os resultados da composição granulométrica do agregado miúdo estão apresentados na Tabela 5-3 e Tabela 5-4.

De acordo com a curva da distribuição granulométrica (Figura 5-2), o agregado miúdos natural também ficou dentro dos limites superior e inferior estabelecidos pela NBR

7211 (1983). A graduação do agregado miúdo (Tabela 5-4) se encaixou na Zona 4 (areia grossa).

Tabela 5-3 - Porcentagem retida acumulada nas peneiras.

material	Peneiras (mm)							
	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	<0,15
areia natural	0	1	6	62	75	90	98	100

Tabela 5-4 - Módulo de finura, dimensão máxima e graduação da areia.

módulo de finura	3,31
dimensão máxima (mm)	4,8
graduação	Zona 4, areia grossa

Figura 5-2 - Distribuição granulométrica da areia e limites superior e inferior da zona 4.

5.1.2 Massa específica

Os resultados da determinação da massa específica dos agregados naturais e reciclados, graúdos e miúdo, encontram-se na Tabela 5-5.

Conforme dito anteriormente (item 4.5.2), é necessário conhecer a massa específica dos materiais constituintes do concreto para realizar um estudo de dosagem, pois através da mesma pode-se calcular o consumo de materiais utilizados na produção das misturas.

Os resultados mostraram que a massa específica dos agregados graúdos reciclados foi menor em relação aos naturais. Com isso, percebe-se que caso os concretos fossem dosados em massa, o volume de material reciclado correspondente à massa de agregado natural seria maior, resultando numa distorção entre os volumes de concreto convencional e reciclado produzidos a partir de um mesmo traço unitário (LEITE, 2001). Por este motivo, foi necessário realizar uma compensação da massa de material reciclado a ser utilizada nas misturas de concreto. Para isso, o volume de agregados graúdos foi mantido fixo em 40% para todas as misturas (item 4.6.1).

Tabela 5-5 - Resultados da determinação da massa específica dos agregados.

tipo de agr.	sigla	densidades	material	massa esp. (g/cm ³)
graúdo	d1	d<1,9	vermelho	1,74
			cinza	1,78
	d2	1,9<d<2,2	vermelho	2,02
			cinza	2,11
	d3	2,2<d<2,5	vermelho	2,49
			cinza	2,53
	d4	d>2,5	vermelho	2,62
			cinza	2,6
	natural			2,68
miúdo	areia natural		2,65	

Como se pode observar, a massa específica dos agregados reciclados variaram de acordo com os intervalos de separação e não em função da natureza mineral do agregado (cinza e vermelho), ou seja, os agregados vermelho e cinza dentro da mesma faixa de densidade tiveram valores de massa específica bem semelhantes, como era esperado. Os agregados de diferentes faixas de densidade apresentaram valores de massa específica significativamente diferentes. Além disso, os valores de massa específica determinados ficaram, em sua maioria, dentro dos limites dos intervalos de separação previstos, confirmando a eficiência do método de separação utilizado (item 4.3).

5.1.3 Absorção de água dos agregados graúdos reciclados

Diferentemente dos agregados naturais, a alta absorção dos agregados reciclados exerce grande influência na produção de concretos (JUAN; GUTIÉRREZ, 2004a). Assim, deve-se compensar a água que é absorvida pelos agregados reciclados na fabricação de concretos, através da adição desta na água de amassamento, evitando com isso que haja uma diminuição excessiva da relação água/cimento efetiva das misturas e

uma redução significativa de sua consistência (DE LARRARD, 1999). Por este motivo, determinou-se a absorção total dos agregados graúdos reciclados por um período de 24 horas (NBR NM 53). A absorção dos agregados graúdos e miúdos naturais foi considerada igual a zero. Os resultados se encontram na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 - Resultados dos ensaios de absorção dos agregados.

tipo de agr.	sigla	densidades	material	absorção (%)
graúdo	d1	d<1,9	vermelho	15,32
			cinza	14,65
	d2	1,9<d<2,2	vermelho	9,01
			cinza	8,05
	d3	2,2<d<2,5	vermelho	2,84
			cinza	2,03
	d4	d>2,5	vermelho	1,4
			cinza	1,51
natural			0	
miúdo	areia natural			0

Assim como ocorreu na massa específica, a absorção variou também em função dos intervalos de separação e não em função da natureza mineral (cinza e vermelho), sendo esta maior para os agregados de menor densidade, diminuindo à medida que os agregados ficaram mais densos, como era de se esperar.

De um modo geral, a literatura indica valores de absorção dos agregados reciclados de concreto em torno de 6% a 7% e para os agregados reciclados de argamassa os valores se situam entre 15% e 17% (CHEN et al., 2003). A Tabela 5-7 indica valores de absorção de água para agregados reciclados e naturais de tamanhos variados. Nota-se que os agregados reciclados possuem valores de absorção de até seis vezes superior aos agregados naturais de mesmo tamanho.

Tabela 5-7 - Absorção de água dos agregados reciclados de concreto e naturais. FONTE: GÓMEZ - SOBERÓN (2002)

	Agregados reciclados de concreto			Agregados naturais		
Tamanho das partículas (mm)	10-20	5-10	0-5	12-20	5-12	0-5
Absorção de água (%)	5,828	6,806	8,16	0,876	1,134	1,49

Os agregados graúdos reciclados utilizados neste trabalho estão dentro da faixa granulométrica 10-20 mm de acordo com a Tabela 5-7. A média da absorção obtida

para os agregados deste trabalho foi igual a 6,85%, valor este próximo ao obtido pelo pesquisador Gómez-Soberón (2002), de 5,83%.

A bibliografia mostra que caso os agregados reciclados sejam pré-saturados antes da fabricação do concreto, estes absorvem cerca de 50% da taxa total de absorção somente nos primeiros 10 minutos de imersão (PEDROZO; LEITE; DAL MOLIN, 2000), após esse período a absorção se torna bastante lenta. Além disso, segundo NEVILLE (1995), a absorção dos agregados reciclados se torna mais lenta ou é interrompida pelo revestimento das partículas com a pasta de cimento quando todos os materiais são misturados na betoneira.

Assim, apenas essa quantidade de água que o agregado absorve nos primeiros 10 minutos deve ser adicionada à água de amassamento no concreto, e os agregados deverão ser pré-umedecidos através da mistura primeiramente dos agregados e dessa água de absorção durante 10 minutos, antes de adicionar os demais materiais na betoneira (JUAN; GUTIÉRREZ, 2004a; MENDES; MORALES; CARBONARI, 2004).

Tendo isso em vista, decidiu-se que seria necessário saber, para os agregados reciclados deste estudo, o tempo a partir do qual a absorção tornava-se lenta, sendo este o tempo de pré-umedecimento que seria adotado para a confecção dos concretos.

Para cada faixa de densidade dos agregados reciclados foi monitorada a absorção de água em função do tempo. Assim, obteve-se a curva de ganho de massa em função do tempo, determinando com isso o instante em que a absorção se tornava lenta. Observou-se que em 10 minutos de imersão, os agregados absorviam de 70 a 86% da absorção total determinada anteriormente pela NBR NM 53. Levando-se em conta que cada agregado necessitaria de uma quantidade de água a ser compensada nas misturas, para se facilitar a etapa de fabricação dos concretos, estipulou-se que a quantidade de água a ser adicionada à água total de cada traço seria fixada em 70% da taxa total de absorção de cada agregado. Apesar de alguns agregados possuírem uma absorção em 10 min. superior a 70%, este valor foi adotado levando-se em consideração que ao se compensar apenas parcialmente a taxa de absorção dos agregados reciclados, evita-se que haja uma redução significativa da relação a/c das misturas e também que os agregados liberem água para o concreto e conseqüentemente reduzam a resistência mecânica deste.

Nos resultados da absorção em função do tempo observou-se que, após o intervalo de 10 minutos de imersão, ocorreu uma perda de massa em todas as amostras, fato este incoerente já que deveria haver um ganho de massa devido a absorção dos agregados

(Figura 5-3). Conclui-se que, em decorrência da menor resistência dos agregados reciclados, o atrito gerado durante seu manuseio no momento das secagens, ocasionou uma desagregação deste material, reduzindo com isso sua massa. Esta redução foi notada somente após o intervalo de 10 minutos, pois a partir deste tempo a absorção dos agregados se torna bem menor, com isso a perda de material pela desagregação se tornou mais significativa que sua absorção.

Figura 5-3 - Ganho de massa dos agregados reciclados em função do tempo de imersão na água.

Por esse motivo, a curva da absorção pelo tempo obtida foi utilizada somente para verificação do tempo ideal de pré-umedecimento dos agregados e também da quantidade de água que deveria ser adicionada à água de amassamento. Devido ao problema de desagregação do material mencionado anteriormente, o valor considerado como absorção total dos agregados foi o obtido através da NBR NM 53 (Tabela 5-6), assim, a água que foi adicionada à água de amassamento nos concretos foi igual a 70% deste valor.

A Figura 5-4 compara os valores da absorção total dos agregados obtidos através dos dois métodos utilizados: NBR NM 53 e absorção pelo tempo. Pode-se perceber claramente que os resultados de absorção do segundo método foram inferiores aos do primeiro, chegando a diferenças de até 30%. À medida que a densidade e a resistência

Pelo gráfico da Figura 5-5 pode-se perceber que a quantidade da fase cimentícia foi maior e bastante elevada para os agregados vermelho e cinza nas faixas de densidade 1,9 e 1,9-2,2 g/cm³. À medida que a faixa de densidade aumentou, a quantidade desta fase reduziu, sendo esta ligeiramente maior para os agregados vermelhos. Para a fase rocha natural, o inverso foi observado. Maiores quantidades de rocha foram encontradas para os agregados nas faixas de densidade superiores (2,2-2,5 e 2,5 g/cm³), principalmente para os agregados cinzas. A quantidade de cerâmica vermelha foi maior para os agregados na faixa de densidade 1,9 g/cm³, principalmente para os vermelhos, reduzindo com o aumento da densidade dos agregados. Para a cerâmica branca, a variação da quantidade entre as diferentes faixas de densidade foi bem pequena, sendo ligeiramente maior para as duas faixas inferiores.

Com isso, pode-se resumir que para a faixa de densidade 1,9 g/cm³, foi encontrada basicamente cerâmica vermelha e materiais cimentícios. A faixa de 1,9-2,2 g/cm³ era constituída praticamente somente de materiais cimentícios. A faixa de 2,2-2,5 g/cm³ era composta da fase cimentícia e de rochas naturais. Por último, a faixa de densidade de 2,5 g/cm³ era constituída principalmente de rochas naturais e uma quantidade menor de materiais cimentícios.

Figura 5-5 - Porcentagem em relação à massa total das diferentes fases presentes nos agregados graúdos reciclados.

Pode-se perceber com isso que praticamente todas as fases estão presentes nas diferentes faixas de densidade e que as fases cimentícia e cerâmica vermelha foram encontradas tanto nos agregados vermelhos quanto cinzas.

5.3 Cimento

5.3.1 Massa específica

A massa específica do cimento, determinada com o picnômetro à gás Hélio, foi igual à $3,0 \text{ g/cm}^3$.

5.3.2 Caracterização do cimento

As resultados da análise de caracterização do cimento encontram-se no Anexo.

5.4 Concretos

5.4.1 Resultados iniciais de resistência à compressão e módulo de elasticidade

Para a fabricação dos concretos, utilizou-se uma batedeira da marca Perfecta Curitiba (item 4.6.3) geralmente utilizada na mistura de argamassas. Esta batedeira é composta por uma cuba de aço inox e uma pá misturadora de alumínio. Observou-se que durante a mistura dos concretos ocorria um grande atrito entre os agregados, a pá misturadora e a cuba, principalmente entre base da cuba e a parte inferior da pá misturadora, pois o espaçamento entre os mesmos era menor que a dimensão máxima característica dos agregados. Um desgaste ao longo de toda a pá misturadora era também observado.

Na desmoldagem de alguns corpos-de-prova (24 horas após a moldagem), foi observada a ocorrência de uma significativa expansão (Figura 5-6a), assim como o surgimento de diversas fissuras visíveis a “olho nu” principalmente na metade superior dos concretos (Figura 5-6b). As expansões medidas entre o topo da fôrma e o topo dos corpos-de-prova chegaram a ter valores de até 5mm. A ocorrência de fissuras foi observada principalmente na metade superior dos corpos-de-prova. Apesar disso, ensaios desses concretos no seu estado endurecido (resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água) foram realizados após um período de cura em câmara úmida por 28 dias. Conforme esperado, os resultados dos ensaios mostraram uma significativa redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade para esses concretos.

Figura 5-6 - Expansão e fissuras observadas nos corpos-de-prova. (a) antes da desmoldagem; (b) após a desmoldagem.

A expansão e o surgimento de fissuras foram observados somente para os concretos compostos de agregados naturais e de agregados reciclados das duas faixas superiores de densidade ($d > 2,5 \text{ g/cm}^3$ e $2,2 < d < 2,5 \text{ g/cm}^3$). Para estes concretos, a redução da resistência à compressão (Figura 5-7 e Figura 5-8) e do módulo de elasticidade (Figura 5-9 e Figura 5-10) foi mais significativa, sendo inclusive seus resultados, inferiores quando comparados aos valores obtidos para os concretos compostos de agregados mais porosos ($1,9 < d < 2,2 \text{ g/cm}^3$ e $d < 1,9 \text{ g/cm}^3$).

Observou-se também que principalmente para os concretos de referência, a influência da expansão aumentou a medida em que a relação a/c reduziu. Entretanto, isso não significa que os concretos compostos de agregados nas faixas de densidade $1,9 < d < 2,2 \text{ g/cm}^3$ e $d < 1,9 \text{ g/cm}^3$ não foram também afetados, apesar de visualmente não ter sido observada nenhuma alteração destes. Este fato pode ser explicado pelo motivo de que os agregados de maior densidade, por possuírem uma maior dureza que a pá misturadora de alumínio da bateadeira, proporcionava riscos na pá liberando com isso partículas de alumínio para os concretos no momento de sua execução. Observou-se que os agregados de menor densidade quebravam-se no momento da mistura dos concretos, devido ao atrito entre estes, a pá misturadora e a cuba da bateadeira, conforme descrito anteriormente.

Figura 5-7 - Efeito da expansão sobre a resistência à compressão dos concretos com agregados ciza.

Figura 5-8 - Efeito da expansão sobre a resistência à compressão dos concretos com agregados vermelhos.

Figura 5-9 - Efeito da expansão sobre o módulo de elasticidade dos concretos com agregados vermelhos.

Figura 5-10 - Efeito da expansão sobre o módulo de elasticidade dos concretos com agregados cinzas.

Sabe-se que aditivos de pó de alumínio são adicionados ao concreto para facilitar a formação de pequenas bolhas de hidrogênio, geralmente com o objetivo de produzir

concretos de baixa densidade (450 a 600 kg/m³), estes chamados de concretos aerados ou celulares. Na fabricação desses concretos, uma quantidade de 0,2% a 0,5% de pó de alumínio, em relação à massa de cimento, é suficiente para se gerar poros entre 0,1 a 1,0 mm de diâmetro (HOLT; RAIVIO, 2004).

Segundo RIXON e MAILVAGANAM (1999) maiores expansões são obtidas em misturas ricas. Geralmente, uma mínima quantidade de cimento de 280 kg/m³ e uma máxima relação água/cimento de 0,5 são necessárias para se obter valores de expansão desejáveis no concreto. O tipo de agregado também influencia o grau de expansão, agregados de maior módulo de elasticidade resultam em um aumento deste.

O alumínio incorporado às misturas de concreto reage com os álcalis da pasta de cimento, com isso, ocorre uma corrosão das partículas de alumínio, originando bolhas de hidrogênio que ficam presas na matriz (Equação [1]). Este fato ocorre nas primeiras horas de hidratação do cimento, gerando uma expansão no concreto e um aumento de seu volume (fato observado em alguns corpos-de-prova do trabalho). Uma de suas principais consequências é o surgimento de fissuras visíveis nos concretos e com isso um significativo aumento da absorção de água e redução da resistência à compressão em todas as idades (AUBERT et al., 2004, BERTOLINI et al., 2004 e PERA et al., 1997).

Conforme já descrito, o surgimento de fissuras nos corpos-de-prova foi observado principalmente em sua metade superior. Por este motivo, decidiu-se realizar estudos comparativos de resistência à compressão entre as duas metades (superior e inferior) de alguns concretos em que foram observadas expansões e fissuras. Para isso, os corpos-de-prova foram cortados ao meio, utilizando-se uma serra elétrica de disco rotativo, as duas metades foram ensaiadas nas mesmas condições e seus resultados comparados (Tabela 5-9). Os resultados obtidos mostraram que em alguns concretos, a resistência à compressão da parte inferior do corpo-de-prova chegou a valores até 124% superiores à sua parte superior. Com isto, ficou comprovado que a expansão realmente exerceu uma grande influência negativa sobre a resistência dos concretos, tornando-se então necessário o descarte dos corpos-de-prova afetados.

Tabela 5-9 - Comparação das resistências das metades superiores e inferiores de alguns corpos-de-prova.

Traço	Faixa de densidade	a/c	Resistência corpo-de-prova (MPa)	Resistência metade superior (MPa)	Resistência metade inferior (MPa)	Aumento da resistência da metade inferior em relação a superior(%)
T25	v2,2-2,5	0,40	28,55	22,22	31,90	43,59
T24	c2,2-2,5	0,40	33,26	28,89	30,38	5,16
T18	v2,5	0,50	28,47	19,05	28,57	49,94
T9	v2,5	0,67	17,26	12,00	13,64	13,66
T26	c2,5	0,40	23,76	19,84	32,75	65,03
T17	c2,5	0,50	23,73	18,41	30,41	65,18
T8	c2,5	0,67	16,01	10,60	13,67	29,01
T1	natural	0,40	21,10	14,08	15,45	9,74
T10	natural	0,50	16,98	13,03	29,18	124,03

Assim, os concretos de resultados duvidosos, dosados anteriormente com a pá misturadora de alumínio, foram refeitos utilizando-se uma nova pá de aço carbono produzida especialmente para o trabalho. Nos concretos refeitos não foi observado nenhum tipo de expansão (observou-se inclusive uma pequena retração) e suas fissuras ficaram a níveis normais e desejáveis. Os resultados dos ensaios destes concretos encontram-se nos itens subseqüentes.

5.4.2 Concretos no estado fresco

5.4.2.1 Trabalhabilidade

Observou-se que o ensaio de abatimento do tronco de cone apresentou uma variabilidade alta para os concretos reciclados, mesmo após se ter compensado parte da água de absorção dos agregados. Entretanto, outros fatores além da alta absorção dos agregados reciclados podem também influenciar no valor da consistência do concreto, como por exemplo, sua forma heterogênea e angular e sua textura rugosa, características que causam uma redução na água livre e maior travamento nas misturas de concreto no estado fresco, além de sua massa específica inferior (LEVY, 1997; HENDRIKS e PIETERSEN, 1998; DE LARRARD, 1999). Por esses motivos, geralmente concretos com agregados reciclados apresentam menor abatimento que as misturas executadas com agregados naturais de mesmo traço.

Essa maior consistência e menor abatimento foram verificados e analisados por alguns pesquisadores (HENDRICKS; PIETERSEN, 1998). MANSUR et al. (1999) que estudaram

concretos reciclados e convencionais, onde a absorção dos agregados reciclados empregados foi compensada através de sua imersão por um período de 24 horas, sendo estes utilizados na condição saturada superfície seca. Mesmo assim, os concretos reciclados mostraram valores de abatimento até 44% menores em relação aos concretos de referência.

A consistência plástica fixada inicialmente em 80 ± 10 mm de abatimento para este estudo ficou difícil de ser mantida, mesmo após se compensar a água de absorção dos agregados, pois a quantidade de aditivo adicionada ao concreto no momento de sua fabricação variava bastante para cada relação a/c, faixa de densidade e traço, variando inclusive para o mesmo traço. Como exemplo disso pode-se citar o estudo de um traço em que o abatimento mudou de 60 mm para 140 mm, quando foi adicionado somente 0,1% a mais de aditivo na mistura (em relação a massa de cimento). Pelo exposto, verificou-se que na prática seria difícil de se manter uma baixa variação no valor da consistência dos concretos reciclados e este se tornou um parâmetro muito instável.

Com isso, adotou-se a metodologia de, inicialmente, inspecionar visualmente o ponto de consistência plástica dos concretos, para depois ser realizada a medida de abatimento. Primeiramente era fixada uma quantidade de aditivo (20g), e este era gradativamente adicionado ao concreto até que se chegasse visualmente ao ponto de consistência plástica. A quantidade de aditivo adicionada na mistura foi calculada diminuindo-se a quantidade inicial (20g) da remanescente.

Apesar de algumas misturas possuírem valores baixos de abatimento (50mm), estas se apresentaram trabalháveis e de fácil adensamento (Figura 5-11). Segundo Neville (1995), o concreto deve apresentar uma trabalhabilidade tal que possibilite o adensamento até um máximo de compacidade com uma quantidade de energia razoável, e, que o abatimento não mede a facilidade de adensamento do concreto, não refletindo seu comportamento em condições dinâmicas. Assim, segundo Leite (2001), pode ser considerado que, independente dos valores de abatimento obtidos para os concretos com agregados reciclados, na verdade, a maior ou menor facilidade com que os mesmos podem ser adensados é que pode ser considerado como parâmetro para limitar seu uso. Além disso, ainda segundo Neville (1995), os agregados reciclados, por serem mais porosos, incorporam uma maior quantidade de ar às misturas e, apesar da maior aspereza conferida ao concreto, e das propriedades físicas dos agregados, que favorecem o travamento das misturas e a redução do valor do abatimento, estas se apresentam mais trabalháveis pois quanto maior a quantidade de ar aprisionado, menor é a resistência ao adensamento.

Ainda pela Figura 5-11, nota-se que a variação dos valores do abatimento foi de 90 ± 40 mm, considerada relativamente elevada. A maior variabilidade foi observada para os concretos de relação água/cimento igual a 0,67.

Assim, por esses motivos, a medida do abatimento não foi considerada um parâmetro fixo nos concretos e seus resultados demonstraram a ineficácia do método para determinação desta propriedade em concretos reciclados.

Pela Figura 5-11 pode-se observar também que, principalmente para os concretos de relação a/c iguais a 0,5 e 0,67, o abatimento aumentou com a massa específica do agregado graúdo. Este fato pode ser explicado pelo fato de que os agregados menos densos, além de possuírem uma elevada absorção, podem não ter uma massa suficientemente grande para vencer a resistência que a pasta fresca exerce nos mesmos, e por isso, os valores do abatimento podem ser menores apesar de se apresentarem trabalháveis.

Figura 5-11 - Valores da medida da consistência dos concretos pelo abatimento do tronco de cone.

Segundo Leite (2001), o ensaio de abatimento do tronco de cone (slump) só avalia a mistura do ponto de vista estático, sendo necessário introduzir na medida da trabalhabilidade um componente dinâmico, no qual se consiga avaliar a capacidade de compactabilidade de misturas de concreto.

De Larrard (1999) também menciona que a medida de consistência pelo abatimento do tronco de cone muitas vezes não é o método mais adequado de se avaliar a trabalhabilidade de um concreto, e que este deve ser utilizado apenas como uma fácil ferramenta de controle de qualidade do mesmo. O autor menciona que, em certos casos, uma medida chamada de *placeability*, relativa ao esforço necessário para se compactar uma mistura com um determinado volume, deveria ser especificada, ao invés da medida do abatimento. Além disso, ainda segundo De Larrard (1999), a medida do abatimento é um teste tecnológico que proporciona índices somente qualitativos, e deve ser interpretado em termos dos materiais específicos utilizados na produção de determinado concreto.

De qualquer forma, esta dificuldade para a obtenção de uniformidade no abatimento dos concretos produzidos com agregados de RCD irá representar uma dificuldade grande para a execução do controle de qualidade de recebimento em obra.

5.4.3 Teor de aditivo

Os gráficos da Figura 5-12 e Figura 5-13 indicam o valor do teor de aditivo adicionado às misturas de concreto, em relação à massa de cimento, para cada tipo de agregado. Na Figura 5-13, tem-se uma média dos teores encontrados nas três relações água/cimento (a/c) da Figura 5-12, para cada faixa de densidade dos agregados graúdos. Vale ressaltar que o aditivo foi adicionado aos concretos para que os mesmos obtivessem visualmente uma consistência plástica e não o mesmo valor de abatimento.

Pode-se observar pelos dois gráficos que o teor de aditivo utilizado foi bastante elevado para os concretos com agregados de massa específica iguais a 1,74 e 1,78 g/cm³. Este fato pode ser explicado pela elevada porosidade e absorção destes agregados, que reduz a quantidade de água livre das misturas e conseqüentemente sua trabalhabilidade, demandando com isso uma maior quantidade de aditivo para se obter um determinado abatimento. Para os agregados de massa específica entre 2,02 e 2,60 g/cm³, principalmente para as relações a/c de 0,4 e 0,5, o teor de aditivo permaneceu praticamente constante, reduzindo somente para os agregados de densidade acima de 2,62 g/cm³.

Figura 5-12 - Teor de aditivo adicionado ao concreto em função da massa específica dos agregados graúdos.

Ao se comparar, para os agregados de densidades 1,74, 2,02 e 2,11 g/cm³, a quantidade de aditivo utilizada nas três relações a/c, percebe-se que o teor foi maior para a relação a/c de 0,67. Isto pode ser explicado pelo fato de que, como o volume de cimento para as relações a/c de 0,4 e 0,5 é maior, o cimento pode ter preenchido os poros destes agregados, melhorando assim a trabalhabilidade, demandando com isso uma menor quantidade de aditivo. Ou seja, a quantidade de cimento disponível para se preencher os poros dos agregados é maior para essas duas relações a/c.

Observa-se que variações de até 50% dos teores de aditivo foram encontradas para os agregados de densidade 2,02 e 2,11 g/cm³ (Figura 5-12). Como o parâmetro considerado como fixo nos concretos frescos foi a análise visual da consistência plástica, esta variabilidade do teor de aditivo se deve ao fato da dificuldade associada a esta análise, gerando assim erros por se tratar de um parâmetro subjetivo.

Figura 5-13 – Teor de aditivo em função da massa específica dos agregados graúdos.

5.4.3.1 Massa específica

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a massa específica do concreto no estado fresco depende da massa específica do agregado e da sua porosidade, bem como da sua textura, forma e tamanho.

Pelo gráfico da Figura 5-14, pode-se notar que a massa específica do concreto fresco variou em função da relação a/c e da massa específica do agregado utilizado, reduzindo a medida que se aumentou a relação a/c e se diminuiu os valores de massa específica dos agregados. A maior porosidade intrínseca ao agregado reciclado é uma das maiores causas para que esta redução ocorra. A pasta aderida ao agregado natural é uma das grandes responsáveis pela alta porosidade dos agregados reciclados, e à medida que a massa específica dos agregados reduz, a porosidade dos agregados aumenta devido a presença de uma maior quantidade de pasta aderida.

Pelo gráfico, percebe-se também que as retas obtidas para os concretos com relação a/c iguais a 0,4 e 0,5 foram praticamente coincidentes e com comportamento similar à da reta de relação a/c igual a 0,67. Com isso, verifica-se que a variação da massa específica dos concretos frescos foi bem mais sensível à variação da densidade do agregado que da relação a/c das misturas. Enquanto a massa específica dos concretos aumentou em 3,5% quando a relação a/c passou de 0,67 para 0,4, este aumento foi

de aproximadamente 20% quando a massa específica dos agregados passou de 1,74 para 2,68 g/cm³.

Figura 5-14 - Massa específica do concreto fresco em função da massa específica dos agregados graúdos.

5.4.4 Concretos no estado endurecido

O objetivo deste item é avaliar a relevância do critério massa específica dos agregados graúdos reciclados no comportamento mecânico dos concretos.

5.4.4.1 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão para os concretos com agregados naturais e reciclados vermelho (v) e cinza (c), para cada faixa de densidade estão apresentados na Tabela 5-10.

Sabe-se que a resistência dos materiais está intimamente relacionada à sua porosidade. Quanto mais porosos estes se apresentam, menor tende a ser sua resistência. Como já se sabe, os dados da Figura 5-15 e Figura 5-16 mostram que, a resistência à compressão de todos os concretos reduz a medida em que se aumenta a porosidade da pasta, ou seja, a medida em que se aumenta a relação a/c dos concretos.

Tabela 5- 10 - Resistência média dos concretos e desvio padrão dos três corpos-de-prova ensaiados .

Traço	Faixa de densidade	Tipo de agregado	Dens. agregado calculada (g/cm ³)	a/c	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão
T21	v1,9	vermelho	1,74	0,4	27,67	1,68
T12	v1,9	vermelho	1,74	0,5	24,04	0,29
T3	v1,9	vermelho	1,74	0,67	16,82	0,24
T20	c1,9	cinza	1,78	0,4	28,47	0,41
T23	v1,9-2,2	vermelho	2,02	0,4	31,65	1,10
T14	v1,9-2,2	vermelho	2,02	0,5	25,77	1,13
T5	v1,9-2,2	vermelho	2,02	0,67	16,13	0,11
T22	c1,9-2,2	cinza	2,11	0,4	32,28	1,20
T13	c1,9-2,2	cinza	2,11	0,5	29,05	0,41
T4	c1,9-2,2	cinza	2,11	0,67	17,37	0,61
T25	v2,2-2,5	vermelho	2,49	0,4	43,35	0,85
T16	v2,2-2,5	vermelho	2,49	0,5	29,42	1,61
T7	v2,2-2,5	vermelho	2,49	0,67	20,31	0,38
T24	c2,2-2,5	cinza	2,53	0,4	42,59	1,03
T15	c2,2-2,5	cinza	2,53	0,5	29,68	0,60
T6	c2,2-2,5	cinza	2,53	0,67	20,70	0,07
T27	v2,5	vermelho	2,62	0,4	42,08	0,62
T18	v2,5	vermelho	2,62	0,5	32,71	0,76
T9	v2,5	vermelho	2,62	0,67	20,55	0,73
T26	c2,5	cinza	2,60	0,4	44,55	0,29
T17	c2,5	cinza	2,60	0,5	33,60	0,79
T8	c2,5	cinza	2,60	0,67	22,15	0,68
T19	natural	natural	2,68	0,4	45,23	0,65
T10	natural	natural	2,68	0,5	35,57	1,16
T1	natural	natural	2,68	0,67	23,20	0,27

Nota-se também pelos gráficos que a resistência à compressão dos concretos reciclados tiveram valores inferiores à dos concretos naturais e que esta reduziu à medida que a massa específica dos agregados diminuiu. Percebe-se que, para os concretos com agregados de densidade inferior à faixa de 2,2-2,5 g/cm³, à medida em que se reduz a relação a/c dos concretos, a diferença dos valores da resistência destes para aqueles aumenta. Para os concretos com agregados naturais e nas faixas de densidade 2,5 g/cm³ e 2,2-2,5 g/cm³, os valores da resistência ficaram muito próximos, para todas as relações a/c.

Ao se comparar as resistências dos concretos com agregado vermelho (Figura 5-15) com a resistência dos concretos com agregado cinza (Figura 5-16), nota-se que ambos possuem comportamentos bastante semelhantes e por isso pode-se dizer que, a

diferença entre a natureza mineralógica dos agregados reciclados não influenciou de maneira significativa na resistência dos concretos, ou seja, a influência mais importante foi devido à diferença das porosidades dos agregados.

Os valores indicaram que a classificação dos agregados pela densidade pode ser utilizada como uma tecnologia de controle de qualidade mais confiável que a classificação visual pela natureza mineral, normalmente empregada.

Figura 5- 15 - Resistência à compressão dos concretos em função de sua relação a/c e massa específica dos agregados grãos vermelhos.

Figura 5-16 - Resistência à compressão dos concretos em função de sua relação a/c e massa específica dos agregados graúdos cinzas.

De acordo com a Figura 5-17, pode-se perceber que o decréscimo da resistência, quando agregados menos densos foram incorporados ao concreto, foi mais intensa à medida que se reduziu a relação a/c. Enquanto que para os concretos de relação a/c igual a 0,67 o decréscimo máximo de resistência ficou em torno de 30% quando a densidade do agregado passou de 2,68 para 1,74 g/cm³, esta redução foi de 38% para os concretos de relação a/c igual a 0,4. Analisando-se os concretos com agregados de mesma densidade, a medida em que se aumentou a densidade do agregado, o decréscimo da resistência com o aumento da relação a/c também foi maior. Enquanto que para os concretos de agregados de densidade igual a 1,74 g/cm³ a redução máxima de resistência, quando a relação a/c passou de 0,4 para 0,67, se situou na faixa de 43%, este decréscimo foi de 49% para os concretos com agregados de densidade igual a 2,68 g/cm³. Isto mostra que o agregado oriundo de RCD torna o concreto de maiores resistências muito mais susceptível à sua variação de densidade.

Figura 5-17 - Resistência à compressão dos concretos em função da massa específica dos agregados, para cada relação a/c.

Ao se analisar o gráfico da Figura 5-18, verifica-se que os concretos de relação a/c superiores a 0,5 foram menos sensíveis aos efeitos negativos da porosidade dos agregados reciclados. Enquanto os concretos com agregados de densidade 1,74 g/cm³ de relação a/c 0,4 possuem valores de resistência iguais a 60% dos concretos de referência, as resistências dos concretos de relações a/c iguais a 0,5 e 0,67 com os mesmos agregados se situam em torno de 68% dos concretos com agregados naturais.

Os resultados de resistência encontrados neste trabalho estão de acordo com os dados encontrados na bibliografia, pois segundo alguns pesquisadores, a resistência à compressão dos concretos reciclados está situada entre 60% e 100% do concreto convencional (VÁZQUEZ et al., 2001; HANSEN, 1992; TOPÇU e GUNÇAN, 1995).

Figura 5-18 - Resistência à compressão normalizada em função da massa específica dos agregados graúdos.

5.4.4.2 Análise visual da ruptura dos concretos

Após os ensaios de resistência à compressão, os concretos foram levados à ruptura completa, para que estes fossem analisados. O intuito foi o de verificar se a ruptura dos concretos estava ocorrendo nos agregados graúdos ou na pasta de cimento. Para esta análise, uma solução de fenolftaleína com álcool etílico foi jogada nos corpos-de-prova imediatamente após sua ruptura.

A análise mostrou que nos concretos com agregados reciclados nas faixas de densidade 1,9 e 1,9-2,2 g/cm³, a ruptura ocorreu nos agregados (Figura 5-19). Para os concretos com agregados naturais e na faixa de densidade 2,5 g/cm³, a ruptura aconteceu na pasta, ao redor dos agregados, como mostra a Figura 5-20

Figura 5-19 - Ruptura dos agregados reciclados nos concretos com agregados menos densos.

Figura 5-20 - Ruptura da pasta ao redor dos agregados nos concretos com agregados naturais e reciclados mais densos.

5.4.4.3 Módulo de elasticidade

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade para os concretos com agregados naturais e reciclados vermelho (v) e cinza (c), para cada faixa de densidade estão apresentados na Tabela 5-11.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), quanto maior a quantidade de agregados densos no concreto, maiores são os valores de módulo obtidos. Isto pode ser observado na Figura 5-21 e Figura 5-22, pois, assim como ocorreu na resistência à compressão, o valor do módulo dos concretos convencionais e dos concretos com agregados nas duas faixas de densidades superiores ($2,5 \text{ g/cm}^3$ e $2,2\text{-}2,5 \text{ g/cm}^3$) foram bastante semelhantes e bem superiores ao valor do módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados de densidade na faixa de $1,9\text{-}2,2 \text{ g/cm}^3$ e $1,9 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 5-11 – Módulo de elasticidade médio dos concretos e desvio padrão dos três corpos-de-prova ensaiados.

Traço	Faixa de densidade	Tipo de agregado	Densidade agregado calculada (g/cm ³)	a/c	Média def. tangente inicial (GPa)	Desvio padrão
T21	v1,9	vermelho	1,74	0,4	20,00	1,94
T12	v1,9	vermelho	1,74	0,5	18,25	0,47
T3	v1,9	vermelho	1,74	0,67	16,34	0,37
T20	c1,9	cinza	1,78	0,4	19,50	0,18
T23	v1,9-2,2	vermelho	2,02	0,4	21,76	0,48
T14	v1,9-2,2	vermelho	2,02	0,5	21,62	0,72
T5	v1,9-2,2	vermelho	2,02	0,67	17,40	0,47
T22	c1,9-2,2	cinza	2,11	0,4	24,75	1,34
T13	c1,9-2,2	cinza	2,11	0,5	23,91	0,73
T4	c1,9-2,2	cinza	2,11	0,67	19,31	1,21
T25	v2,2-2,5	vermelho	2,49	0,4	35,92	0,53
T16	v2,2-2,5	vermelho	2,49	0,5	29,10	1,23
T7	v2,2-2,5	vermelho	2,49	0,67	25,32	0,62
T24	c2,2-2,5	cinza	2,53	0,4	32,52	1,08
T15	c2,2-2,5	cinza	2,53	0,5	31,91	0,68
T6	c2,2-2,5	cinza	2,53	0,67	27,54	2,33
T27	v2,5	vermelho	2,62	0,4	35,56	0,52
T18	v2,5	vermelho	2,62	0,5	32,28	0,57
T9	v2,5	vermelho	2,62	0,67	30,95	0,88
T26	c2,5	cinza	2,60	0,4	34,01	0,34
T17	c2,5	cinza	2,60	0,5	32,29	0,33
T8	c2,5	cinza	2,60	0,67	29,35	0,00
T19	natural	natural	2,68	0,4	32,42	0,86
T10	natural	natural	2,68	0,5	29,78	0,86
T1	natural	natural	2,68	0,67	27,07	0,33

Figura 5-21 - Módulo de elasticidade em função da relação a/c dos concretos, para cada faixa de densidade de agregado cinza.

Figura 5-22 - Módulo de elasticidade em função da relação a/c dos concretos, para cada faixa de densidade de agregado vermelho.

Semelhante aos resultados de resistência à compressão, ao se comparar os valores do módulo de elasticidade dos concretos com agregado cinza (Figura 5-21) e vermelho

(Figura 5-22), nota-se que estes possuem comportamentos bastante semelhantes, e por isso pode-se dizer que a diferença entre a natureza mineralógica dos agregados reciclados também não influenciou de maneira significativa no módulo dos concretos, ou seja, a influência mais importante foi devido à diferença das densidades agregados, especialmente quando comparamos os concretos com agregados de densidades acima e abaixo da faixa de 2,2-2,5 g/cm³.

Pelas curvas obtidas no gráfico da Figura 5-23, pode-se perceber que o decréscimo do módulo de elasticidade foi semelhante para todas as relações a/c dos concretos. Apesar disso, pode-se perceber que a redução do módulo foi mais sensível à variação da massa específica dos agregados que à redução da relação a/c dos concretos. Quando a massa específica dos agregados passou de 2,68 para 1,74 g/cm³, houve uma máxima redução no módulo de 50%, contra uma diminuição máxima de 15% quando a relação a/c passou de 0,4 para 0,67.

Figura 5-23 - Módulo de elasticidade dos concretos em função da massa específica dos agregados graúdos, para cada relação a/c.

A Figura 5-24 mostra mais uma vez que o decréscimo do módulo de elasticidade, quando agregados menos densos são utilizados no concreto, foi semelhante para todas as relações a/c. Os módulos para os concretos com agregados na faixa de densidade de 1,74 g/cm³ ficaram em torno de 60% dos concretos de referência.

Figura 5-24 - Módulo de elasticidade normalizado dos concretos em função da massa específica dos agregados graúdos.

Os resultado de módulo de elasticidade encontrados nesta dissertação também estão de acordo com os encontrados na bibliografia. Segundo alguns autores, quando 100% dos agregados naturais são substituídos por reciclados, são observadas quedas de 20% a 40% do módulo (ALEJOS et al., 2004a).

5.4.4.4 Relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade

Segundo Leite (2001), existe uma relação direta entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto, pois ambas propriedades são afetadas diretamente pela porosidade dos constituintes do concreto, porém de forma diferenciada.

A Figura 5-25 e Figura 5-26 mostram a relação entre o módulo e a resistência dos concretos com agregados cinza e vermelho, para todas as faixas de densidade. Pode-se perceber que independente da natureza mineral do agregado e de sua faixa de densidade, o módulo de elasticidade cresceu com a resistência à compressão do concreto. Entretanto, nos concretos com agregados nas faixas de densidade inferiores (1,9-2,2 e 1,9 g/cm³), o módulo de elasticidade foi um pouco mais sensível à variação da resistência, ou seja, sua variação foi maior para menores variações de resistência.

Ao se comparar a relação entre o módulo e a resistência para concretos com agregados vermelho e cinza, nota-se que ambas as naturezas mineralógicas se comportaram de maneira semelhante quando as mesmas foram utilizadas nos concretos.

Figura 5-25 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos concretos, para cada faixa de densidade do agregado cinza.

Figura 5-26 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos concretos, para cada faixa de densidade de agregado vermelho.

O módulo de elasticidade pode também ser determinado teoricamente através de modelos matemáticos que o relacionam com a resistência à compressão, entretanto, segundo Levy (2001), alguns desses modelos apresentam resultados muito maiores do que aqueles obtidos experimentalmente. Segundo os diferentes códigos e normas, alguns modelos podem ser dos tipos:

- Proposição de Helene para a NB 1 da ABNT

$$E_c = 4700 \cdot f_{ck}^{0,5} \text{ em MPA; sendo } E_c = 0,9E_{ci}$$

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

$$E_c = 43 \cdot \gamma_c^{1,5} \cdot f_c^{0,5} \cdot 10^{-6} \text{ em Gpa; onde } \gamma_c = \text{massa unitária do concreto em t/m}^3$$

- CEB/FIP Model Code 90, de 1993 – item 2.1.4.1

$$E_{ci} = (\alpha_E \cdot 21500 \cdot [(f_c)/10]^{1/3}); \text{ onde } \alpha_E \text{ depende da natureza do agregado, a saber}$$

Tabela 5-12 - Coeficiente para cálculo do módulo de elasticidade em função da qualidade do agregado. FONTE: Levy (2001).

Natureza	μ_E
basalto e diabásico	1,2
granito e gnaisse	1
calcáreo	0,9
arenito	0,7

Foram escolhidos dois desses modelos (Proposição de Helene e CEB/FIP) para verificação e comparação dos módulos de deformação obtidos experimentalmente com os calculados teoricamente. Pelos dados da Figura 5-27, percebe-se que para os concretos com agregados reciclados nas faixas de densidade de 1,9 e 1,9-2,2 g/cm³, para ambas naturezas mineralógicas, o valor dos módulos teóricos foram superiores ao obtido experimentalmente, estando isto de acordo com a bibliografia (LEVY, 2001). Para esses concretos, o modelo teórico proposto por Helene se aproximou mais dos dados obtidos experimentalmente. O inverso ocorreu para os concretos com agregados nas faixas de densidade 2,2-2,5 e 2,5 g/cm³, ou seja, os valores experimentais foram superiores aos obtidos através de ambos os modelos teóricos, tanto para o agregado cinza quanto vermelho (Figura 5-27). Esta diferença foi ainda maior para os concretos com agregados de densidade 2,5 g/cm³. Para as duas faixas de densidade, o modelo teórico CEB/FIP Model Code 90 se aproximou mais dos dados obtidos experimentalmente. Já para os concretos de referência (Figura 5-27a), a curva dos resultados experimentais se situou entre as duas curvas teóricas analisadas.

Figura 5-27 - Diferença entre as curvas experimentais e teóricas da relação entre módulo e resistência dos concretos. (a) Convencionais; (b) Agregados cinza e vermelho de densidade 1,9 g/cm³; (c) Agregado vermelho de densidade 1,9-2,2 g/cm³; (d) Agregado cinza de densidade 1,9-2,2; (e) Agregado vermelho de densidade 2,2-2,5; (f) Agregado cinza de densidade 2,2-2,5; (g) Agregado vermelho de densidade 2,5; (h) Agregado cinza de densidade 2,5.

Os resultados são bem coerentes e mostra que os modelos teóricos estão ajustados para agregados de densidade regular e quando se utilizam agregados mais porosos há uma sensível redução de módulo para a mesma faixa de resistência, o que torna crítica a previsão de flechas quando da utilização desse tipo de agregado.

5.4.4.5 Absorção de água, índice de vazios e massa específica real

Os resultados de absorção, índice de vazios e massa específica real dos concretos estão apresentados na Tabela 5-13.

Tabela 5-13 - Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica real dos concretos.

Traço	Faixa de densidade	a/c	Média absorção após fervura (%)	Desvio padrão absorção	Média índice de vazios (%)	Desvio padrão ind. vazios	Média massa específica real (g/cm ³)	Desvio padrão massa esp. real
T20	c1,9	0,4	12,68	0,03	23,11	0,07	2,34	0,001
T21	v1,9	0,4	12,92	0,08	23,27	0,11	2,31	0,001
T12	v1,9	0,5	13,70	0,13	24,47	0,20	2,32	0,004
T3	v1,9	0,7	14,22	0,09	24,69	0,08	2,26	0,007
T22	c1,9-2,2	0,4	10,40	0,19	20,74	0,35	2,49	0,002
T13	c1,9-2,2	0,5	10,23	0,16	20,37	0,30	2,48	0,001
T4	c1,9-2,2	0,7	10,90	0,22	20,71	0,36	2,37	0,002
T23	v1,9-2,2	0,4	10,89	0,29	21,22	0,56	2,50	0,003
T14	v1,9-2,2	0,5	11,08	0,33	21,48	0,66	2,42	0,003
T5	v1,9-2,2	0,7	11,42	0,03	21,07	0,04	2,30	0,002
T24	c2,2-2,5	0,4	6,92	0,14	15,13	0,30	2,57	0,006
T15	c2,2-2,5	0,5	7,75	0,29	16,58	0,51	2,54	0,006
T6	c2,2-2,5	0,7	7,99	0,16	16,97	0,33	2,53	0,003
T25	v2,2-2,5	0,4	7,91	0,08	16,97	0,15	2,57	0,002
T16	v2,2-2,5	0,5	7,83	0,15	16,70	0,26	2,54	0,001
T7	v2,2-2,5	0,7	8,41	0,08	17,74	0,15	2,54	0,000
T26	c2,5	0,4	6,50	0,31	14,41	0,56	2,58	0,007
T17	c2,5	0,5	7,04	0,37	15,33	0,69	2,57	0,008
T8	c2,5	0,7	7,54	0,06	16,57	0,13	2,56	0,000
T27	v2,5	0,4	6,70	0,03	14,93	0,06	2,61	0,001
T18	v2,5	0,5	7,21	0,01	15,93	0,01	2,62	0,006
T9	v2,5	0,7	7,26	0,23	15,86	0,42	2,59	0,002
T19	natural	0,4	6,55	0,20	14,56	0,34	2,60	0,008
T10	natural	0,5	6,62	0,14	14,52	0,26	2,56	0,002
T1	natural	0,7	7,06	0,20	15,64	0,35	2,56	0,001

A seguir são apresentados e discutidos gráficos de absorção de água, índice de vazios e massa específica real dos concretos, em função de sua relação a/c e da massa específica dos agregados utilizados.

Pelos gráficos da Figura 5-28 e Figura 5-29, percebe-se a tendência decrescente do valor da massa específica real do concreto em função tanto do aumento da relação a/c quanto da redução da massa específica dos agregados. Este comportamento foi muito semelhante ao da massa específica no estado fresco, como era de se esperar. Pela Figura 5-29, nota-se que os valores de massa específica real foi bastante semelhante para os concretos de referência e com agregados reciclados nas faixas de densidade 2,2-2,5, 2,5 g/cm³. À medida que agregados menos densos foram inseridos no concreto, a massa específica real reduziu de maneira significativa. Percebe-se também que a natureza mineralógica do agregado não influenciou esta propriedade de maneira significativa. Ambos os gráficos mostram que a redução da massa específica dos concretos foi mais sensível à redução da densidade dos agregados que à diminuição da relação a/c dos concretos.

Com relação a absorção de água e o índice de vazios dos concretos, nota-se uma tendência crescente de seus valores em função do aumento da relação a/c e da redução da massa específica dos agregados, conforme a Figura 5-30 e Figura 5-31. Também neste caso, o aumento da absorção e do índice de vazios foi mais sensível à redução da massa específica dos agregados que ao aumento da relação a/c dos concretos, e a natureza mineralógica do agregado também não influenciou essas propriedades de maneira significativa.

Figura 5-28 - Massa específica real do concreto em função da massa específica do agregado, para cada relação a/c.

Figura 5-29 - Massa específica real do concreto em função da relação a/c, para cada faixa de densidade dos agregados.

Figura 5-30 - Absorção de água dos concretos em função da massa específica dos agregados, para cada relação a/c.

Figura 5-31 - Índice de vazios dos concretos em função da massa específica dos agregados, para cada relação a/c.

Helene (1983) propôs, com base em critérios gerais de durabilidade, uma classificação para concretos convencionais em função da porosidade e da absorção de água, conforme apresentada na Tabela 5-14.

Tabela 5-14 - Proposta para classificação dos concretos segundo HELENE (1983) de acordo com a porosidade e a absorção de água.

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

De acordo com a proposta da Tabela 5-14, para os concretos deste estudo, verifica-se que somente os concretos de referência e os com agregados reciclados na faixa de densidade $2,5\text{g/cm}^3$ de relações a/c 0,4 e 0,5, se enquadraram na classificação de concretos normais, quanto a propriedade porosidade. Todos os demais concretos ficaram na classificação concretos deficientes. Quanto à absorção de água, todos os concretos se enquadraram na classificação concretos deficientes. A permeabilidade do

concreto é um dos principais fatores determinantes da durabilidade e a porosidade dos agregados afeta negativamente esta propriedade. Com isso, concretos com agregados menos densos ficam mais susceptíveis à influência de agentes externos e podem ter sua durabilidade reduzida. Além disso, esses concretos ficam muito mais sujeitos à deformação lenta que aqueles produzidos com agregados convencionais. Apesar dos valores elevados de absorção e índice de vazios obtidos, estes estão de acordo com os resultados encontrados na bibliografia (LEVY, 2001).

5.4.4.6 Relação entre absorção e resistência à compressão do concreto

Conforme já mencionado, as propriedades do concreto, como por exemplo a resistência, são diretamente influenciadas pelo número, tipo, tamanho e intercomunicabilidade dos poros presentes na pasta de cimento, nos agregados e na interface entre a pasta de cimento e os agregados (BASHEER et al., 2001). Por este motivo, análises da relação entre a absorção e a resistência à compressão dos concretos com agregados vermelho e cinza, para cada faixa de densidade e relação a/c foram realizadas.

Os resultados da Figura 5-32 e Figura 5-33 mostraram que, para a mesma resistência, a absorção dos concretos com agregados naturais e nas faixas de densidade 2,2-2,5 e 2,5 g/cm³ foi semelhante, aumentado aproximadamente 14% para os agregados menos densos. A partir da faixa de densidade 2,2-2,5 g/cm³, a absorção aumentou significativamente quando agregados menos densos foram inseridos no concreto. Pelos dados percebe-se também que a absorção dos concretos com agregado vermelho foi ligeiramente superior à do agregado cinza, entretanto, a relação entre a absorção e a resistência de ambos foi semelhante, ou seja, a natureza mineralógica dos agregados não interferiu de maneira tão significativa quanto a variação de sua densidade.

Figura 5-32 - Relação entre absorção e resistência à compressão dos concretos com agregado cinza, para cada faixa de densidade.

Figura 5-33 - Relação entre absorção e resistência à compressão dos concretos com agregado vermelho, para cada faixa de densidade.

Pela observação do gráfico da Figura 5-34, percebe-se que os concretos de menor relação a/c foram muito mais afetados quanto à perda de resistência com o aumento

da porosidade medida pela absorção do concreto. Isto pode ser explicado pela maior fragilidade da pasta de menor a/c e, conseqüentemente, pelo fato de ser muito mais susceptível à concentração de tensões originada pela maior porosidade do agregado. De qualquer forma, os resultados obtidos foram muito coerentes e de acordo com o esperado, mostrando a forte dependência que a resistência do concreto guarda de sua porosidade.

Figura 5-34 - Relação entre absorção e resistência dos concretos, para cada relação a/c.

5.4.4.7 Análise da viabilidade econômica dos concretos

Ao se verificar a viabilidade econômica de um concreto, a análise do consumo de cimento torna-se importante pois, na maioria das vezes, este possui um custo bem superior ao dos outros constituintes do concreto. Por este motivo, análises do consumo de cimento para representar o custo do concreto foram realizadas e encontram-se apresentadas nas Figura 5-35 e Figura 5-36. Para todos os concretos, à medida que agregados menos densos foram utilizados, ocorreu um aumento no consumo de cimento para se obter a mesma resistência.

A Figura 5-35 representa o consumo de cimento para os concretos com agregados vermelhos, para cada faixa de densidade. Pode-se observar que para a mesma resistência, a diferença entre o consumo dos concretos com agregados naturais e agregados reciclados nas faixas de densidade $2,5 \text{ g/cm}^3$ e $2,2\text{-}2,5 \text{ g/cm}^3$ foi de

aproximadamente 8,8%, sendo considerada relativamente pequena. Esta diferença foi ainda menor entre os concretos com agregados reciclados nas faixas de densidade 2,5 g/cm³ e 2,2-2,5 g/cm³, chegando a valores de no máximo 3,3%. Entretanto, o uso de agregados nas faixas de densidade 1,9-2,2 e 1,9 g/cm³ levou a relações consumo/resistência mais altas e portanto menos vantajosas que os agregados naturais e os demais agregados reciclados. Como exemplo, ao se analisar o consumo de cimento necessário para se atingir uma resistência de 28MPa, os valores da Tabela 5-15 foram encontrados.

Figura 5-35 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão dos concretos com agregado vermelho.

Tabela 5-15 - Aumento do consumo de cimento para cada faixa de densidade de agregado vermelho para se obter a mesma resistência.

Resistência	Tipo de agregado	Consumo de cimento (kg/m ³)	Aumento do consumo (%)
28 MPa	natural	340	0,00
	v2,5	360	5,88
	v2,2-2,5	370	8,82
	v1,9-2,2	440	29,41
	v1,9	500	47,06

Fazendo a mesma análise para os concretos com agregados cinza, pode-se observar na Figura 5-36 que para a mesma resistência, a diferença entre o consumo dos concretos com agregados naturais e agregados reciclados nas faixas de densidade 2,5

g/cm^3 e $2,2\text{-}2,5 \text{ g/cm}^3$ foi também de aproximadamente 8,5%. Assim como nos concretos com agregados vermelhos, as faixas de densidade $1,9\text{-}2,2$ e $1,9 \text{ g/cm}^3$ levaram a relações consumo/resistência mais altas e portanto menos vantajosas que os agregados naturais e os demais agregados reciclados. Como exemplo, ao se analisar o consumo de cimento necessário para se atingir uma resistência de 28MPa, os valores da Tabela 5-16 foram encontrados:

Figura 5-36 - Consumo de cimento em função da resistência à compressão dos concretos com agregado cinza.

Tabela 5-16 - Aumento do consumo de cimento para cada faixa de densidade de agregado cinza para se obter a mesma resistência.

Resistência	Tipo de agregado	Consumo de cimento (kg/m^3)	Aumento do consumo (%)
28 MPa	natural	340	0,00
	c2,5	350	2,94
	c2,2-2,5	370	8,82
	c1,9-2,2	425	25,00
	c1,9	500	47,06

Pode-se perceber pelos resultados que para ambos tipos de agregados (vermelho e cinza), a relação consumo/resistência aumentou com a redução da densidade dos agregados, mas este aumento foi bastante semelhante para ambos agregados. Ou seja, para concretos de mesma resistência, o uso de agregados de menor densidade acarretou em um aumento no consumo de cimento, entretanto a natureza

mineralógica dos agregados não influenciou de maneira tão significativa quanto a densidade dos mesmos.

Vale ressaltar que isto aumenta o custo financeiro e ambiental pois o que se “economiza” ambientalmente com a aplicação de agregados de RCD muito leves se gasta aumentando o consumo de cimento.

6 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos no programa experimental desta dissertação, três principais conclusões foram obtidas:

- É necessário um cuidado especial na elaboração e execução da metodologia de avaliação do concreto produzido com agregados de RCD para garantir a confiabilidade dos resultados.
- A porosidade do agregado, ou seja, a sua densidade, é uma propriedade mais relevante que a natureza mineral do RCD que lhe deu origem e afeta diretamente suas propriedades mecânicas (resistência e módulo) e físicas (absorção e densidade).
- Concretos produzidos com RCD de baixa densidade (inferior a $2,2 \text{ g/cm}^3$) irão apresentar menor resistência e módulo e maior absorção de água, tornando o concreto muito menos eficiente para aplicações estruturais. Simultaneamente, estes concretos irão demandar um consumo de cimento muito elevado, resultando em concretos mais caros e menos eficientes do ponto de vista de sustentabilidade. Além disso, a produção de concretos estruturais utilizando os agregados de RCD em escala industrial é tecnicamente factível com a implantação de separadores de agregados por densidade (jigues) nas usinas de processamento, e pode vir a ser comercialmente interessante quando o custo ambiental for levado em consideração.

A seguir são apresentadas as principais verificações obtidas para cada uma das conclusões principais.

6.1 Metodologia

Os resultados mostraram que a massa específica dos agregados graúdos reciclados foi menor em relação aos naturais. Por este motivo, os concretos não foram dosados em massa, de acordo com o método tradicional, mas em volume. Ou seja, foi necessário realizar uma compensação da massa de material reciclado a ser utilizada nas misturas de concreto. Com isso, evitou-se que ocorressem distorções entre os volumes de concreto convencional e reciclado produzidos a partir de um mesmo traço unitário.

Os agregados reciclados tiveram valores de absorção elevados, fazendo com que fosse necessária a compensação desta água de absorção, através da adição da mesma na água de amassamento dos concretos durante a execução das misturas, para que fosse evitada uma redução da relação a/c efetiva dos concretos.

A absorção variou também em função dos intervalos de separação e não em função da natureza mineral (cinza e vermelho), sendo seus valores maiores para os agregados de menor densidade, diminuindo à medida que os agregados ficaram mais densos.

No monitoramento do ganho de massa em função do tempo de saturação dos agregados reciclados, observou-se que em 10 minutos de imersão, estes absorveram uma quantidade superior a 70% da absorção total. Após esse tempo, foi observada também uma perda de massa em todas as amostras, em decorrência da segregação gerada nos agregados reciclados, devido o atrito durante seu manuseio no momento das secagens.

Nos concretos inicialmente executados com uma pá misturadora de alumínio, foi observada uma significativa redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade. Isto devido a expansão e o surgimento de fissuras gerados nos concretos, em decorrência à incorporação de pó de alumínio devido o atrito entre a pá misturadora e os agregados. Esta influência foi maior para os concretos com agregados naturais e com agregados reciclados nas duas faixas superiores de densidade ($d > 2,5 \text{ g/cm}^3$ e $2,2 < d < 2,5 \text{ g/cm}^3$). Por este motivo, uma pá de aço carbono foi utilizada em substituição à de alumínio.

Observou-se que o ensaio de abatimento do tronco de cone apresentou uma variabilidade alta para os concretos reciclados, mesmo após se ter compensado parte da água de absorção dos agregados, e a consistência plástica fixada inicialmente em $80 \pm 10 \text{ mm}$ de abatimento ficou difícil de ser mantida. Com isso, adotou-se a metodologia de adicionar o aditivo superplastificante nas misturas até que se atingisse visualmente uma consistência plástica, para depois ser realizada a medida de abatimento.

O teor de aditivo utilizado nas misturas foi bastante elevado para os concretos com agregados na faixa de densidade de $1,9 \text{ g/cm}^3$. A elevada absorção destes agregados reduz a quantidade de água livre das misturas e conseqüentemente sua trabalhabilidade, demandando com isso uma maior quantidade de aditivo para se obter um determinado abatimento.

6.2 Influência da densidade do agregado reciclado de RCD nas propriedades do concreto

Nos concretos frescos, a massa específica variou principalmente em função da massa específica do agregado utilizado, reduzindo à medida que se diminuiu o valor de massa específica dos agregados. A maior porosidade intrínseca ao agregado reciclado é uma das maiores causas para que esta redução ocorra.

Os resultados de resistência à compressão dos concretos reciclados foram inferiores à dos concretos naturais, e estes reduziram à medida que a massa específica dos agregados diminuiu. O decréscimo da resistência, quando agregados menos densos foram incorporados ao concreto, foi mais significativo à medida que se reduziu a relação a/c. Para os concretos com agregados de densidade inferior à faixa de 2,2-2,5 g/cm³, a medida em que se reduziu a relação a/c, a diferença dos valores da resistência destes para aqueles aumentou. Isto está de acordo com o observado na literatura, pois para concretos de baixa relação a/c, o agregado reciclado se torna o componente mais fraco, limitando a resistência do concreto. Para os concretos com agregados naturais e nas faixas de densidade 2,5 g/cm³ e 2,2-2,5 g/cm³, os valores da resistência ficaram muito próximos, para todas as relações a/c, isto significa que a qualidade destes agregados, no comportamento mecânico dos concretos, pode ser considerada similar.

A análise visual da ruptura dos corpos-de-prova mostrou que nos concretos com agregados reciclados nas faixas de densidade 1,9 e 1,9-2,2 g/cm³, a ruptura ocorreu nos agregados, comprovando a menor resistência destes em comparação com a pasta. Para os concretos com agregados naturais e na faixa de densidade 2,5 g/cm³, a ruptura aconteceu na pasta, ao redor dos agregados.

O valor do módulo dos concretos convencionais e com agregados nas duas faixas de densidades superiores (2,5 g/cm³ e 2,2-2,5 g/cm³) foram bastante semelhantes e bem superiores ao valor do módulo de elasticidade dos concretos com agregados de densidade na faixa de 1,9-2,2 g/cm³ e 1,9 g/cm³. Isto está em concordância com a bibliografia, pois quanto maior a quantidade de agregados densos no concreto, maiores devem ser os valores de módulo obtidos.

A resistência e o módulo de elasticidade dos concretos com agregado vermelho e cinza ficaram bem próximas, assim, a diferença entre a natureza mineralógica dos agregados reciclados não influenciou de maneira tão significativa quanto a variação das porosidades dos agregados. Os valores indicaram que a classificação dos

agregados pela densidade pode ser utilizada como uma tecnologia de controle de qualidade mais confiável que a classificação visual pela natureza mineral, normalmente empregada.

A massa específica real do concreto reduziu com o aumento da relação a/c e com a redução da massa específica dos agregados. A natureza mineralógica dos agregados também não influenciou esta propriedade de maneira tão significativa quanto a sua densidade.

Com relação a absorção de água e o índice de vazios dos concretos, nota-se uma tendência crescente de seus valores em função do aumento da relação a/c e da redução da massa específica dos agregados. Também neste caso, esta propriedade foi mais sensível à redução da massa específica dos agregados que à natureza mineralógica e à relação a/c dos concretos.

6.3 Viabilidade do concreto estrutural com agregado de RCD reciclado

Para todos os concretos, à medida que agregados menos densos foram utilizados, ocorreu um aumento no consumo de cimento para se obter a mesma resistência. Entretanto, este aumento não foi muito significativo para os concretos com agregados reciclados nas faixas de densidade 2,5 g/cm³ e 2,2-2,5 g/cm³, em comparação ao concreto de referência. Já para os concretos com agregados reciclados nas faixas de densidade inferiores a 2,2 g/cm³, as relações consumo/resistência foram altas, tornando estes concretos economicamente menos vantajosos que os concretos de referência e com agregados nas duas faixas de densidade superiores. Este comportamento foi semelhante para os concretos de ambas naturezas mineralógicas.

Os resultados da pesquisa poderão contribuir para a elaboração de futuras normas, para que se possibilite a utilização de agregados reciclados na fabricação de concretos para todo e qualquer tipo de uso, incluindo estrutural.

6.4 Propostas para futuras pesquisas

Durante a execução desta pesquisa, algumas dificuldades, limitações e dúvidas foram constatadas, e como numa única pesquisa é impossível vencer todas as possibilidades de estudo sobre o comportamento de determinado material, são sugeridos alguns temas para investigações futuras.

- Avaliação do comportamento de concretos quando diferentes teores de substituição de agregados são empregados. Sugere-se a avaliação da substituição de agregados naturais por reciclados de diferentes densidades e também da substituição de agregados reciclados de uma determinada densidade por outra.
- Realização de estudos de dosagem com agregados reciclados para que se encontre um método confiável, que possa ser aplicado à estes materiais.
- Realização de estudos com o intuito de se adequar os métodos de avaliação da consistência do concreto convencional para o concreto com agregados reciclados. Ou melhor, obter um método de medida de consistência que avalie corretamente a trabalhabilidade de concretos reciclados.
- Avaliação da durabilidade de concretos quando agregados naturais são substituídos total ou parcialmente por reciclados, principalmente quando agregados de menor densidade são utilizados. Realizar estudos que avaliem, neste caso, a absorção, os mecanismos de transporte interno da água, a profundidade de carbonatação, a difusão de CO_2 , a penetração de cloretos e outros que melhor avaliem o concreto reciclado do ponto de vista da durabilidade.
- Avaliação da fluência de concretos com agregados reciclados de RCD separados por densidade.
- Realização de pesquisas para se avaliar a influência dos agregados miúdos reciclados de RCD, separados em faixas de densidade, em termos de desempenho mecânico e durabilidade dos concretos.
- Análise da influência que os materiais pulverulentos e as impurezas presentes nos agregados reciclados exercem nas propriedades mecânicas e durabilidade dos concretos.
- Avaliação de uma melhor maneira para se compensar a água de absorção dos agregados reciclados durante o preparo das misturas, para que se evite a redução ou o aumento da relação a/c efetiva dos concretos.
- Avaliação da influência que o teor e a qualidade da pasta aderida ao agregado natural exerce sobre o concreto.
- Realização de estudos para que se conheça melhor a interface pasta/agregado dos concretos reciclados.

- Avaliar os concretos reciclados em termos de desgaste por abrasão, principalmente quando agregados menos densos são utilizados.

ANEXO

Resultados de caracterização do cimento CP II-E-32 - Votoran

Caracterização físico-mecânica

Ensaio	Métodos de Ensaio	Resultados	Limites da NBR 11578/91
Finura – resíduo na peneira de 75µm (%)	NBR 11579/91	2,9	≤ 12,0
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23/01	3,02	–
Área específica (cm ² /g) ^a	NBR NM 76/98	3790^a	≥ 260 m ² /kg
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR NM 43/03	26,0	–
Início de pega (h:min)	NBR NM 65/03	4:40	≥ 1h
Fim de pega (h:min)	NBR NM 65/03	6:00	≤ 10h
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)	NBR 11582/91	0,0	≤ 5
Resistência à compressão (MPa) - (NBR 7215/96)	3 dias	15,6	≥ 10,0
	7 dias	24,2	≥ 20,0
	28 dias	36,6	≥ 32,0

a. 379 m²/g

Composição Química

Ensaio	Métodos de Ensaio	Resultados	Limites da NBR 11578/91
Perda ao fogo - PF	NBR NM 18/04	5,33	≤ 6,5%
Dióxido de silício total - SiO ₂	NBR NM 11-2/04	22,82	***
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃	NBR NM 11-2/04	6,63	***
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃	NBR NM 11-2/04	2,43	***
Óxido de cálcio total – CaO	NBR NM 11-2/04	55,59	***
Óxido de magnésio – MgO	NBR NM 11-2/04	3,77	≤ 6,5%
Anidrido sulfúrico - SO ₃	NBR NM 16/04	1,87	≤ 4,0%

Óxido de sódio - Na ₂ O	NBR NM 17/04	0,08	***
Óxido de potássio - K ₂ O	NBR NM 17/04	0,61	***
Enxofre – S	NBR NM 19/04	0,23	***
Anidrido carbônico - CO ₂	NBR NM 20/04	4,61	≤ 5,0%
Resíduo insolúvel – RI	NBR NM 15/04	1,34	≤ 2,5%
Óxido de cálcio livre- CaO (livre)	NBR NM 13/04	0,46	***
Equivalente alcalino em Na ₂ O (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)		0,48	***

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAEJOS, P.; SÁNCHEZ, M.; DAPENA, E.; VÁZQUEZ, E.; BARRA, M.; ETXEBERRIA, M.; MARÍ, A.; AGULLO, L.; MARÍNEZ, F.; FONTEBOA, B.; POLANCO, A.; FRANCISCO, G.; ALEZA, F.; PARRA, J. L.; BURÓN, M. Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete. **International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures**. Espanha, 2004. p. 511-525.

ANCIA, P. *et al.* The use of mineral processing techniques for the improvement of the building rubble characteristics. In: Global symposium on recycling, waste treatment and clean technology. San Sebastian. Espanha, 1999.

ANDERY, P. ABIB **Tratamento de minérios e hidrometalurgia: in memoriam professor Paulo Abib Andery**. Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco, Recife. 1980. p. 115-133.

ANGULO, S. C. **Caracterização e controle de qualidade de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados**. Tese em andamento (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. 140p.

ANGULO, S. C. **Uso de novas tecnologias na reciclagem da fração mineral de resíduos de construção e demolição**. Relatório apresentado à FINEP. Convênio 23.01.0673.00.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. 155p.

ANGULO, S. C.; KAHN, H.; JOHN, V. M.; ULSEN, C. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. CT 206. São Paulo, 2003. **Ibracon** (em CD-ROM).

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. Disponível em:

http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Construção%202001_angulo_miranda_selmo_john.pdf. Acesso em: 2004 Janeiro, 07.

ANGULO, S. C.; ULSEN, C.; CARRIJO, P. M.; SILVA, R. M.; JOHN, V. M.; KAHN, H. Characterization of brazilian construction and demolition waste coarse recycled aggregate. Disponível em:

http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/characterization_CDW_aggregate_angulo%20et%20al.PDF. Acesso em 2005, Janeiro 08.

ANGULO, S.C.; JOHN, V. M. Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição. **Câmara Ambiental da Construção**. 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água - NBR NM 53**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado para concreto - NBR 7211**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica - NBR NM 248**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis - NBR 9917**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica - NBR 9778**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação do módulo de elasticidade estática e diagrama – tensão – deformação - NBR 8522**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - NBRNM 67**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - NM 101**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova - NBR 5738**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar aprisionado pelo método gravimétrico. Método de ensaio - NBR 9833**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto - NBR 5739**. Método de ensaio 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – Classificação - NBR 10.004**. Rio de Janeiro, 1987

AUBERT, J. E.; HUSSON, B.; VAQUIER, A. Metallic aluminium in MSWI fly ash: quantification and influence on the properties of cement-based products. **Waste Management**. Vol. 24, pp. 589-596, 2004.

BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete. **Concrete International**, v. 22, n. 06, p. 41-45, 2000.

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado**. Barcelona, 1996. Tese (doutorado). Universitat Politècnica de la Catalunya, 223p.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D., **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review**. Construction and Building Materials. v. 15, p. 93-103, 2001.

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; CASSAGO, D.; CURZIO, A.; COLLEPARDI, M. MSWI ashes as mineral additions in concrete. **Cement and Concrete Research**. Vol. 34, pp. 1899-1906, 2004.

BOSSINK, B. A.; BROUWERS, H. J. H. Construction waste: quantification and source evaluation. **Journal of Construction Engineering Management**, p. 55-60. 1996.

BREMNER, T.W. Lightweight aggregate concrete. In: 40º Congresso Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro, 1998. **Ibracon** (em CD-ROM).

BRITO, J.A. Cidade versus entulho. **Areia&Brita**. Out-dez/1998. p.22-26.

BRUNDTLAND, G. H. **Our common future; by world commission on environment and development**. Oxford University Press, 1987. 384p.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos. São Carlos 2003. 199p.

BUYLE-BODIN, F. HADJIEVA-ZAHARIEVA, R. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. **Materials and Structures**. v. 35, p 504-509, 2002.

CARNEIRO, A. P. et al. Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado. In. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 7. Salvador, 2000. **Anais**. Salvador, ANTAC, 2000.

CHEN, H.; YEN, TSONG; CHEN K. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and concrete research**. V. 33, pp. 125-132, 2003.

CIB – Agenda 21 para a construção sustentável. Publicação 237. ed. de G. Weinstock, D. M. Weinstock. São Paulo, 2000.

CIOCCHI, L. Reciclagem de concreto. Disponível em: http://www.piniweb.com/revistas/techne/index.asp?mate6_cod=15906 Acesso em: 2003, Setembro 27.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (2002). Resolução CONAMA 307 de 05 de Julho de 2002. <http://www.conama.org.br> (dez/2002).

COSTA PEREIRA, L. F. L da **Determinação de cloretos em concretos de cimentos Portland: influência do tipo de cimento.** Dissertação (Mestrado). 69pp. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

CURWELL, S. ; COOPER, I. The implications of urban sustainability. **Building Research and Information.** V.26, n°1, 1998.

DEWAR, M. et al. Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete. **ACI Materials Journal.** V. 4, n° 3, 1997, pp. 251-256.

DHIR, R. K.; LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. **Journal of Institution of Civil Engineering, Structures and Buildings**, v. 134, n. 08, p. 257-274, 1999)

DORSTHOST, B.J.H.; HENDRIKS, Ch.F. Re-use of construction and demolition waste in the EU. **CIB Symposium on construction & environment: theory into practice.** Global Seven Editora Ltda.São Paulo, 2000.

DUMET, T. B.; PINHEIRO, L. M. A evolução do concreto: uma viagem no tempo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 42, 2000, Fortaleza. **Anais** [CD-ROM]. São Paulo: IBRACON, 2000. Artigo: III-D-001, 16p.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. Na experimental study. **Cement and concrete research.** V.32, 2002, pp.1301-1311.

GONÇALVES, A.; ESTEVES, A.; VIEIRA, M. Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability. **International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures.** Espanha, 2004. p. 554-562.

GRIGOLI, A.S. Management in the production and utilization of the waste material in the construction site. **CIB Symposium on construction & environment: theory into practice.** Global Seven Editora Ltda.São Paulo, 2000.

HANSEN, T. C. Recycling of demolished concrete and masonry. **RILEM Report 6.** Ed Chapman & Hall, London, 1992. 316p.

HAW-JI CHEN; TSON YEN; KUAN-HUNG CHEN. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research.** V. 33, pp. 125-132, 2003.

HELENE, P. R. **La Agressividad del medio y la durabilidad del hormigón**, Hormigón, AATH, n. 10, p. 25-35, ago. 1983.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência) Escola Politécnica da USP.

HENDRIKS, C. H.; PIETERSEN, H. S. Concrete: durable, but also sustainable? In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.) **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate.** London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 1-18.

HENDRIKS, C.; XING, W. Quality improvements of granular wastes by separation techniques. **International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures.** Espanha, 2004. p. 142-149.

HENDRIKS, C.F. **The building cycle.** Ed. Aeneas. Holanda. 2000. 231 p.

HOLT, E.; RAIVIO, P. Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete. **Cement and Concrete Research.** 2004. Article in Press.

HONG KONG POLYTECHNIC (Department of Building and Real Estate); THE HONG KONG CONSTRUCTION ASSOCIATION LTD. **Reduction of Construction Waste, Final Report**. Hong Kong, march 1993. 93p.

I&T – INFORMAÇÕES E TÉCNICAS EM CONSTRUÇÃO CIVIL LTDA. **Manual de uso dos resíduos de construção reciclados**. São Paulo, I&T, 1995.

INDUSTRY AND ENVIRONMENT. **Construction and the environment: fact and figures**. Paris: UNEPIE, v. 29, n.2. April-June 1996. P. 2-8.

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

JOHN, V. M. A construção e o meio ambiente. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm#topo. Acesso em: 2003, Setembro 23.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CFETESB.pdf>. Acesso em: 2003, Setembro 23.

JOHN, V. M.; ANGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. Em: ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Proto Alegre: ANTAC, 2003. – (Coleção Habitar, v. 4). p. 9-71.

JOHN, VANDERLEY. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000 Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 102p.

JUAN, M. S. de; GUTIÉRREZ, P. A. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures**. Espanha, 2004a. p. 536-544.

JUAN, M. S. de; GUTIÉRREZ, P. A. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. **International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures**. Espanha, 2004b. p. 545-553.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and concrete research**. V.33, 2003, pp. 703-711.

LARRARD, F. de. Concrete mixture proportioning. A scientific approach. 1999. 420p.

LEAL, UBIRATAN Sobras que valem um obra. **Téchne**. n. 55 p. 58-62 outubro. PINI. São Paulo.

LEITE, M. BATISTA. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado). UFRGS, 2001.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. 194p. tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC/USP.

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

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

LIMBACHIYA, M.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures**. V. 33, Nº 233, 2000, pp. 574-580

LUZ, A. B. et al. **Tratamento de minérios**. 2ª edição. CETEM/CNPq/MCT. Rio de Janeiro. 1998. 676p.

MACHADO, E.F.; LATTERZA, L.M.; MENDES, C.L. Influência do agregado graúdo, proveniente da reciclagem de rejeitos de construção e demolição (entulho), na perda do abatimento do concreto

fresco e nas propriedades mecânicas do concreto endurecido. In: 40º Congresso Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro, 1998. **Ibracon** (em CD-ROM).

MANSUR, M. A.; WEE, T. H.; CHERAN, L. S. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 04, p. 478-484, 1999.

MARTINS, D. N. **Concretos de agregados leves. Absorção de água pelos agregados de argila expandida**. Tese (Doutorado). São Paulo, 1985.

MEHTA, P. Concrete technology for sustainable development. **Concrete International**. V. 21, Nº 11, 1999, pp 47-53.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MENDES, T. M.; MORALES, G.; CARBONARI, G. Study on ARC's aggregate utilization recycled of concrete. **International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures**. Espanha, 2004. p. 629-635.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 172p.

MULLER, A. WIENKE, L. Measurements and models for the gravity concentration of C&D waste through jigging. **International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures**. Espanha, 2004. p. 115-122.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 1982. 738pp.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2 Ed. Ver. Atual. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA M. J. E. de, ASSIS C. S. de, Estudo da deterioração de concreto proveniente de demolição de obras de construção civil e seu comportamento em relação ao meio ambiente. In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador, 1999. **Ibracon** (em CD-ROM).

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

OLIVEIRA, M. J. E. **Materiais descartados pelas obras de construção e civil: Estudo dos resíduos de concreto para reciclagem**. Tese (Doutorado). IGCE/UNESP Rio Claro, 2002. 191p.

OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S. de; MATTOS, J. T. Recycled aggregate standardization in Brazil. **International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures**. Espanha, 2004. p. 156-165.

PALIARI, J.C.; SOUZA, U. E. L. DE; AGOPYAN, V. Methodology for collection and analysis of information on materials waste in building construction sites. **CIB Symposium on construction & environment: theory into practice**. Global Seven Editora Ltda. São Paulo, 2000.

PALOWITCH, E. R.; DEURBROUCK, A. W. Dense medium separation. **Coal preparation – wet concentration of coarse coal**. p. 3-23.

PEDROZO P. H.; LEITE M. B.; DAL MOLIN D.C.C. Technical viability study of the use of construction and demolition waste to concrete production. **CIB Symposium on construction & environment: theory into practice**. Global Seven Editora Ltda. São Paulo, 2000.

PERA, J.; COUTAZ, L.; AMBROISE J.; CHABABBET M. Use of incinerator bottom ash in concrete. **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, No. 1, pp. 1-5, 1997.

PINTO, T. P. Recycling in construction sites: environmental responsibility and cost reduction. **CIB Symposium on construction & environment: theory into practice**. Global Seven Editora Ltda. São Paulo, 2000.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189p.

POWERS, T. C. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. **Journal of the American Ceramic Society**. v. 41, n. 1, p. 1-6. 1958.

POWERS, T.C. Physical properties of cement paste. **Chemestry of Cement. Proceedings of the Fourth International Symposium**. v.II, p. 577-613. 1960.

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

RILEM RECOMENDATION (1994) Specifications for Concrete with Recycled Aggregates. **Materials and Structures**, v. 27, 557-559.

RIXOM R.; MAILVAGANAM N. Chemical admixtures for concrete. Third edition, 1999.

SAMAH, H. R., HOVER, K. C., Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete. **ACI Materials Journal**, Michigan, v. 89, n.4, p.416-424, 1992.

SCHNEIDER, D. M. Transporte de resíduos de construção e demolição na cidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003

SIVA V. G. da, Avaliação do desempenho ambiental de edifícios. **Qualidade na Construção**. n. 25 p.14-22. Ano III, 2000. SindusCon SP.

SJOSTROM, CH. Durability and sustainable use of building materials. In.: **Sustainable use of materials**. J.W Llewellyn & H. Davies Ed. London, BRE/RILEM, 1992.

SUGIYAMA, T. et al., Effect of stress on gas permeability in concrete. **ACI Materials Journal**, Michigan, v.93, n.5, p.443-450, 1996.

TANGO, C. E. S.; NETO, C. S. Comparação de desempenhos de agregados para concreto: Metodologia e exemplos práticos. **Colóquio sobre “agregados para concreto”**. IBRACON.

TAVAKOLI, M.; SOROUSHAN, P.; Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. **ACI Materials Journal**. V. 9, Nº 2, 1996, pp. 182-190.

TOPÇU, I. B.; GUNÇAN, N. F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**, v.25, n. 7, p. 1388-1390, 1995.

VASILIU, D. The characteristic water of aggregate testing and applications. **Matériaux et Constructions**. v. 15, n. 87, p. 185-194, 1982.

VÁZQUEZ E.; GÓMEZ, J. M.; AGULLÓ V. L. **Hormigón com áridos reciclados. Una guía de diseno para el material**. Monografía CIMNE nº 60. Barcelona, Espanha. Maio, 2001.

VÁZQUEZ, E.; BARRA, M. Recycling of aggregates in the construction industry. **CIB Symposium on Construction & Environment: theory into practice**. Global Seven Editora Ltda. São Paulo, 2000.

WEIMANN, K.; GIESE, L.; MELLMANN, G.; SIMON, F. Building materials from waste. **Materials Transactions**. v. 44, n. 7, p. 1255-1258, 2003.

WHITAKER, W. **Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil**. São Paulo. 2001. 153 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

YAMAN, O.; HEARN, N.; AKTAN, H. M. Active and non-active porosity in concrete Part I: Experimental evidence. **Materials and Structures**. V.35, Nº 246, 2002, pp. 102-109.

ZHANG, B. Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue. **Cement and concrete research**. V.2, 1998, pp. 699-711.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K.; BENTUR, A. Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage. **Materials and Structures**. V.32, Nº 246, 2002, pp. 97-101.

ZORDAN, S. E Entulho da Indústria da Construção Civil. São Paulo. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm. Acesso em: 2003 Setembro,17.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas, 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP.

Vita

VITA

PRISCILA MEIRELES CARRIJO, natural de São José dos Campos (14/05/1977), São Paulo, é engenheira civil (2000) pela Universidade Federal de Uberlândia.

Realizou estágio na TECSTEEL, empresa localizada na cidade de Uberlândia, no período de Janeiro de 1999 à Agosto de 2000, quando foi admitida como engenheira na mesma empresa, na área de acompanhamento de obras, orçamento, cálculos e execução de projetos em estruturas metálicas.

Sua dissertação de mestrado, sob orientação do Prof. Dr. Antônio Domingues de Figueiredo, foi realizada na Escola Politécnica da USP, e contou com o apoio financeiro do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), assim como da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), através do Fundo Verde e Amarelo. Seu trabalho esteve inserido no grupo de pesquisa do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica, orientado pelos professores Antônio Domingues de Figueiredo e Vanderley Moacir John. Durante seu programa de mestrado, realizou estudos sobre a utilização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em concretos, e seus resultados serviram de referência para outras pesquisas realizadas pelo grupo e que ainda se encontram em andamento.

Pretende continuar com pesquisas na área de materiais de construção civil e realizar o doutoramento ainda no tema de reutilização de resíduos de construção e demolição em argamassas e concretos.