

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO E ANÁLISE DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

G. L. VIEIRA ¹, D. C. C. DAL MOLIN ²

(1) geilma@cpgec.ufrgs.br

Doutoranda NORIE
M.Sc. UFRGS

(2) dmolin@ufrgs.br

Professor/Pesquisador
Dra. UFRGS

*Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME
Av. Osvaldo Aranha, 99 – Térreo
Porto Alegre / Brasil*

Resumo

A construção civil vem aprimorando suas técnicas construtivas e caminhando paralelamente com o avanço tecnológico. Essa mesma indústria que cresce e se aprimora está as voltas com grandes problemas. Um dos questionamentos que se faz é o que será da construção civil sem os recursos naturais, uma vez que sua exploração indiscriminada tem causado graves problemas ambientais, além da geração de montantes de entulhos espalhados pelas cidades. Uma alternativa para reduzir o acúmulo desses resíduos é fazer uso da reciclagem, que encontra-se num estágio de relativa necessidade de intercâmbio entre universidades e empresas, cuja intenção é buscar formas de utilização desses materiais. O trabalho teve como objetivo apresentar a viabilidade de utilização, técnica e econômica, dos resíduos de construção e demolição, através da aplicação de agregados reciclados em concretos. Foi feito um comparativo entre concretos convencionais e reciclados e sua possibilidade de aplicação, baseados em resultados de pesquisas desenvolvidas por Leite (2001) e Vieira (2003), no NORIE/LEME. Os resultados mostraram que agregados reciclados podem melhorar algumas propriedades do concreto, como resistência à compressão e durabilidade, medida através da estimativa de vida útil dos concretos. A viabilidade econômica foi comprovada através da comparação de preços entre agregados naturais e reciclados, cujo preço obtido para agregados reciclados foi significativamente menor que agregados naturais.

1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A CONSTRUÇÃO CIVIL

Atualmente, a sistemática visão de progresso está se confundindo com um crescente domínio e transformação da natureza. Nessa ótica, os recursos naturais são vistos como ilimitados. A preservação da natureza foi tida, durante muito tempo, como um entrave para o progresso e o desenvolvimento. A saída para calar as vozes dos seus defensores foi o desenvolvimento de modelos que priorizam a criação de parques com áreas especiais destinadas a preservação de amostras da natureza para gerações futuras.

A teoria sobre desenvolvimento sustentável surge como consequência da incapacidade desse modelo de desenvolvimento e preservação ambiental se fundamentar e até mesmo garantir a sobrevivência humana. Todos os impactos causados pela ineficácia do controle ambiental, como a destruição da camada de ozônio, aumentando o efeito estufa e outras catástrofes decorrentes de ações humanas, demonstram que o ambiente vai exigir uma reformulação mais ampla dos processos produtivos e de consumo, para sua preservação, desde a exploração da matéria-prima, passando pelos processos industriais, o transporte e o destino do resíduo gerado a partir dessa atividade e também o do produto após sua utilização (JOHN, 2001; POON, 1997).

Nenhum questionamento estaria em foco se não estivesse havendo uma consciência mundial de preservação da natureza em todos os seus aspectos, desde a conservação da matéria-prima até uma percepção de preservação do ambiente, de modo que se possa garantir a sobrevivência do homem. Esta é a visão de desenvolvimento sustentável. Isso se justifica porque preservação ambiental é, acima de tudo, conservar área de matas verdes, rios e espécies em extinção e não apenas a criação de parques e delimitação de indicadores de poluentes.

Porém, o desenvolvimento sustentável em consonância com a sociedade à qual faz parte, não poderá se concretizar sem que a construção civil, que lhe serve como suporte, passe por sérias transformações. A cadeia produtiva da construção civil, segundo John (2001), é responsável por grandes impactos ambientais em todas as etapas do seu processo, que vai desde a extração, produção de materiais, construção, uso até a demolição.

Tem-se, portanto, que ir em busca de alternativas para reduzir o acúmulo desses resíduos. A solução pode estar inserida em vários pontos. Pode-se começar na melhoria da qualidade dos serviços dentro da construção civil, resultando numa diminuição de perdas de materiais e que mais tarde vão diminuir a fatia no percentual de resíduos gerados. Também pode haver uma grande conscientização ambiental no sentido de minimizar os impactos causados pela urbanização indiscriminada e mal planejada das cidades e cobrar dos responsáveis uma legislação que atenda a todos e que, de sobremaneira, faça valer os direitos e deveres de cada pessoa envolvida nesse processo.

Uma outra alternativa é fazer uso da reciclagem desses resíduos. A reciclagem significa redução de custos, redução do volume de extração da matéria-prima, preservando os recursos naturais limitados, e também a minimização dos problemas com gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos dos municípios (LEITE, 2001).

A reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) não é uma atividade recente. Na Alemanha, em torno de 1860, foram produzidos artefatos de concreto de cimento Portland com agregados reciclados. Mas só a partir de 1928 começaram a realizar pesquisas organizadas no sentido de avaliar o efeito do consumo de cimento e água usando agregados de alvenaria britada. Contudo, a utilização mais necessária e relevante se deu após o fim da Segunda Guerra Mundial (1945), quando milhares de resíduos ficaram espalhados pelas cidades da Alemanha. Face à necessidade de reconstruir as cidades, que tiveram seus edifícios demolidos, e a carência de materiais de construção, a saída foi o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem dos resíduos de construção e demolição (LEITE, 2001; LEVY 2002). A partir de então, países da Comunidade Européia têm pesquisado o assunto de maneira mais aprofundada, com o objetivo de estabelecer procedimentos para a obtenção de um padrão de qualidade para os agregados reciclados (VAZQUEZ, 2001; LEVY 2002).

No Brasil, a discussão sobre resíduos ainda permeia no ambiente técnico-científico. A reciclagem de resíduos como material de construção se dá de uma forma bastante incipiente, exceto pela intensa reciclagem das indústrias do cimento e do aço (ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2001). O aprofundamento das discussões a respeito do que fazer com os milhares de metros cúbicos depositados inadequadamente nos locais não propícios para esse fim, vem, aos poucos, ocupando espaço nas discussões políticas, dada a importância do tema e a conscientização ambiental por parte da sociedade.

Dessa forma, este trabalho tem o objetivo de apresentar e expor a viabilidade de utilização da reciclagem de resíduos de construção e demolição, através da aplicação de agregados reciclados, em concretos obtidos com estes materiais. Para tanto foi feito um comparativo entre concretos convencionais e concretos obtidos com agregados reciclados e sua possibilidade de aplicação.

2 DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E GERAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Qualquer material proveniente de atividades de demolição de obras civis, restos de obras, autoconstrução ou reformas, pode ser considerado como resíduo de construção e demolição.

Sob o ponto de vista ambiental, os resíduos se inserem num determinado nível de classificação. De acordo com NBR 10004 (ABNT, 1987), os resíduos de construção e demolição podem ser classificados na classe III, como resíduos inertes, ou seja, estes resíduos não reagem quimicamente mesmo contendo elementos minerais.

Esta classificação está sendo muito contestada no meio técnico. Oliveira, Mattos e Assis (2001) sugerem que seja feita uma revisão da norma NBR 10004, passando os resíduos de construção e demolição da classe III – inertes, para a classe II – não inertes. Segundo os autores, o estudo constatou, através de análise química, que o resíduo proveniente de concreto não apresentou propriedades inertes.

A resolução 307 de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) apresenta classificação quanto à origem do resíduo e caracteriza os resíduos de construção e demolição como sendo *Classe A*, passíveis de serem reciclados.

2.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS

A indústria da construção civil tem tido anualmente significativas perdas de materiais de construção e, por consequência, têm aumentado o número de resíduos de construção gerados. Formoso et al. (1998) encontraram índices de aumento do custo da edificação da ordem de 7,9%, em função da grande quantidade de perdas de materiais dentro da própria obra.

Os resíduos de construção são gerados a partir de diferentes fases: fase de construção, fase de manutenção ou reformas e a fase de demolição.

A geração de resíduo durante a fase de construção é decorrência das perdas dos processos construtivos. Parte dessa perda permanece incorporada nas construções, sob a forma de componentes que acabam ficando superdimensionados.

Isatto et al. (2000) apontaram que a falta de algumas medidas relativamente simples, como gerenciamento do armazenamento de materiais no canteiro de obras, está intimamente ligada à questão das perdas de materiais, e que medidas de prevenção são necessárias para reduzir estas perdas, sem que, necessariamente, se façam grandes investimentos em novas tecnologias. Segundo os autores, os grandes índices de perdas originam-se fora dos canteiros de obras, ainda na fase de planejamento, em virtude de projetos inadequados e falta de planejamento.

A geração de resíduos na fase de manutenção está associada a vários fatores, entre eles: reparos na estrutura (sob a forma de correção de patologia), reformas do edifício, que obriga a ter demolições, ou final de vida útil dos componentes que precisam ser substituídos. Nesta fase, a redução da geração do resíduo vai depender da melhoria da qualidade da construção, de tal forma

que a manutenção seja reduzida. Isto só será conseguido com estudos preliminares, envolvendo projetos que garantam o aumento da vida útil da estrutura. (JOHN E AGOPYAN, 2000; FORMOSO et al. 1998).

Na etapa de demolição, a redução dos resíduos depende do prolongamento da vida útil de seus componentes, que, por sua vez, dependem tanto da tecnologia quanto dos materiais, dependem da existência de incentivos para que os proprietários realizem modernizações e não demolições, e da existência de uma metodologia que permita reutilizar os componentes (JOHN, 2000).

Supõe-se que são gerados de 2 a 3 bilhões de toneladas de entulho por ano em todo mundo. Em países europeus, como Alemanha e Europa Oriental, aproximadamente dois terços dos resíduos de construção gerados são provenientes de obras de manutenção e demolição, sendo o restante vindo de atividades de construção. Na Europa, estima-se que a geração de entulho varia de 600 a 918 kg/hab.ano, que é muito maior do que a estimativa de 390 kg/hab.ano de resíduo sólido municipal desse continente (OZKAN, 2001; VAZQUEZ, 2001; LEITE, 2001; POON, 1997; JOHN, 2000).

No Brasil não há números precisos que apontam uma estimativa nacional da geração de resíduos. As estimativas pontuais levam a uma geração anual entre 220 a 670 quilos por habitante. Para um edifício, cuja massa de materiais equivale a 1000 kg/m², o entulho gerado corresponde a aproximadamente 5% da massa total do edifício (ANDRADE et al., 2001; JOHN, 2000; PINTO, 1999). Na tabela 1 é possível visualizar a geração dos resíduos de construção em diferentes cidades do país.

Tabela 1 - Geração de resíduos em algumas cidades brasileiras

Cidade	População (milhões de hab.)	Geração de entulho (ton/dia)	% de entulho em relação ao resíduo sólido urbano
São Paulo ⁽¹⁾	15,0	5000	-
Salvador ⁽¹⁾	2,20	1700	37
Belo Horizonte ⁽¹⁾	2,01	1200	51
Porto Alegre ⁽¹⁾	1,20	350	-
Campinas ⁽²⁾	0,85	1258	-
Maceió ⁽³⁾	0,70	1100	45
Florianópolis ⁽²⁾	0,28	636	-
Santo André/SP ⁽¹⁾	0,63	1013	58
São J. dos Campos ⁽¹⁾	0,50	733	65
Ribeirão Preto ⁽¹⁾	0,46	1043	67

(fonte: (1) a partir de LEITE, 2001; (2) ANDRADE et al. 2001; (3) Superintendência de Limpeza Urbana de Maceió- SLUM, 1997)

É possível verificar através da tabela 1, que o percentual de resíduo gerado em alguns casos chega a envolver mais da metade de todo resíduo sólido urbano.

Em Belo Horizonte, 51% dos resíduos coletados na cidade são de construção e demolição. Numa cidade como Porto Alegre, por exemplo, a geração de resíduos fica em torno de 350 toneladas de entulho por dia. Isso resulta numa geração média de 292 g de entulho por habitante por dia, ou 92 kg por habitante por ano em Porto Alegre.

Em julho de 2002 o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) aprovou a resolução 307, com orientações a respeito da destinação que é dada ao entulho. Esta resolução dispõe sobre a gestão dos resíduos na construção civil, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos na gestão dos resíduos da construção civil. Fica estabelecido que o objetivo principal é a não geração de resíduos, com ênfase na redução e reutilização, antes mesmo da destinação final. Nesta resolução, o CONAMA recomenda que seja feita reciclagem do material e cria uma co-responsabilidade entre a construtora e a empresa removedora do entulho, além da previsão de multas.

As principais questões que definem a política de reciclagem dos resíduos de construção civil foram apontadas por Pinto e Agopyan (1994), citado por Cavalcanti (2002):

- mais de 90% dos resíduos da construção civil podem ser reutilizados na própria indústria da construção civil, na produção de novos componentes de construção;
- é de fundamental importância conhecer a composição química e as qualidades físicas do resíduo, para que seja definido o uso para o qual será destinado;
- os principais adversários à reciclagem de resíduos da construção são decorrentes da falta de políticas sistemáticas e da dificuldade de mudar os hábitos das pessoas envolvidas na construção civil.

Dessa forma, é possível atingir os setores responsáveis e possibilitar o uso de ferramentas legais para uma gestão adequada desses materiais.

3 COMPOSIÇÃO DOS RCD

Uma grande variedade de componentes constitui a formação dos resíduos. Dentre eles estão componentes orgânicos como madeira, papéis, materiais betuminosos, plásticos, entre outros, e materiais inorgânicos como concretos, cerâmicas, argamassas, materiais metálicos e outros produtos gerados pela construção civil.

O proporcionamento destes materiais em diferentes amostras é de grande variabilidade e heterogeneidade. Esse é um dos motivos pelos quais a utilização de agregados reciclados ainda seja tão tímida, pois as indústrias não vão querer apostar em um material de natureza variável.

De acordo com Leite (2001), a composição do resíduo de construção e demolição tem influência direta na análise do comportamento do agregado no concreto. A autora analisou a composição do resíduo proveniente da cidade de Porto Alegre. A composição do resíduo da cidade de Porto Alegre está apresentada na figura 1.

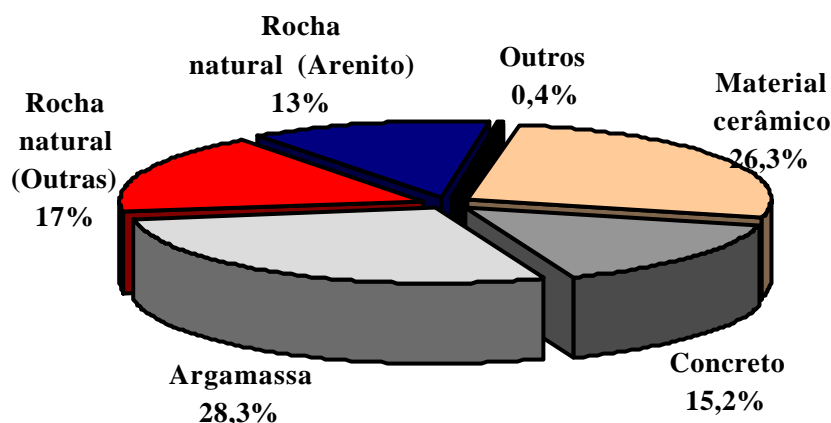


Figura 1- composição do entulho de porto alegre – Rio Grande do Sul
(fonte: leite, 2001)

Observa-se pela figura 1 que foram encontrados diversos materiais, entre eles materiais cerâmicos, concretos e argamassa. Também foram encontrados elementos como gesso, vidros, materiais betuminosos, matéria orgânica, metais, plásticos, papéis, entre outros, mas são considerados como impurezas na reciclagem dos resíduos de construção e demolição. A presença do gesso na composição do resíduo provoca reações de expansão e pode fissurar o concreto, devendo não ser utilizado na reciclagem. O vidro também é outro elemento limitante na composição dos resíduos, pois uma vez inserido no concreto como agregado reciclado, pode reagir com os álcalis do cimento, provocando a reação álcali-sílica, que provoca a deterioração do concreto. Materiais metálicos também podem causar danos ao concreto se inseridos na mistura, pois a presença de elementos como zinco e alumínio podem favorecer o desprendimento do hidrogênio no concreto fresco ou podem provocar reações de expansão, causando fissuras no concreto (HANSEN, 1992; LEITE, 2001; JOHN e AGOPYAN, 2000).

Observando a composição do resíduo de construção e demolição proveniente da cidade de Porto Alegre e comparando-a com composições de resíduos de outras regiões do país e do mundo percebe-se que, apesar de serem resíduos vindos das mais diversas regiões, a composição se mantém sempre num mesmo nível de constituição, ou seja, sempre há grandes percentuais de concreto, material cerâmico e argamassa em suas composições, independente da região, estado ou até mesmo país. A tabela 2 apresenta um comparativo entre as composições dos resíduos para as diferentes regiões do Brasil e do mundo.

Tabela 2 – Comparativo da composição dos resíduos de construção e demolição

Lugar	Material (%)			
	Concreto	Argamassa	Material Cerâmico	Outros
Porto Alegre ⁽¹⁾	15	28	26	31
Campinas ⁽²⁾	21	37	21	21
Salvador ⁽³⁾	20	33	14	33
Maceió ⁽⁴⁾	19	28	48	5
Itatiba (SP) ⁽⁵⁾	13	35	47	5
Holanda ⁽⁴⁾	42	6	32	20
Taiwan ⁽⁴⁾	43	12	35	10

Fontes: (1) LEITE (2001); (2) ZORDAN (1997); (3) CARNEIRO et al. (2001); (4) a partir de VIEIRA (2003); (5) JOHN E AGOPYAN (2000)

4 UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS NA CONSTRUÇÃO

O grau de conhecimento da tecnologia de emprego de agregados na produção de componentes como blocos de pavimentação, blocos de alvenaria, concretos, entre outros, só de alguns (cinco ou seis anos) anos pra cá vem sendo conhecido por algumas pesquisas acadêmicas. Embora as pesquisas realizadas até agora revelem que é possível utilizar agregados reciclados em concretos das mais variadas classes de resistências, o emprego de agregados reciclados ainda não é totalmente conhecido.

Uma das maiores dificuldades para a aplicação de agregados reciclados é a sua grande variabilidade. Como garantir que um agregado reciclado de amanhã possua a mesma composição de uma amostra obtida hoje? A tecnologia de controle de qualidade sistemática ainda não chegou ao Brasil, uma vez que o emprego de agregados reciclados se dá, basicamente, em pavimentação.

Apesar de diversos fatores estarem influenciando negativamente (normalização, heterogeneidade), parece que os agregados reciclados respondem bem aos testes nos quais são submetidos. Na utilização desses materiais em concretos, as pesquisas que tratam do assunto quase sempre têm as mesmas conclusões ou muito similar: a de que concretos com agregados reciclados respondem bem quando submetidos aos critérios de avaliações mecânicas e de durabilidade.

Zordan (1997), Leite (2001), Chen et al. (2003), entre outros, avaliaram a viabilidade técnica da utilização desses materiais em propriedades mecânicas

e concluíram que agregados reciclados são perfeitamente passíveis de serem utilizados em concretos. Gómez-Soberon (2002) salienta que, apesar da grande porosidade dos agregados reciclados, a sua utilização em concretos é perfeitamente aplicável. Olorunsogo e Padayachee (2002) concluíram que, quando os concretos, obtidos com agregados reciclados, eram avaliados por índices de durabilidade, algumas propriedades eram melhoradas, como, por exemplo, diminuição da condutividade de íons cloreto em determinados níveis de substituição.

Estudos recentes revelaram ser possível aumentar a vida útil de concretos estruturais, sob o ponto de vista da corrosão das armaduras iniciadas por cloretos. Neste trabalho foram avaliados diferentes concretos produzidos com agregados reciclados e os resultados obtidos foram de relativas melhoras na durabilidade dos mesmos, especialmente nos concretos que recebiam percentuais de agregado miúdo reciclado. A presença de finos ocasionou um melhor fechamento dos poros no concreto e dificultou a entrada de agentes agressivos, possibilitando uma maior proteção para as armaduras.

4.1 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS RECICLADOS NO CONCRETO

Podem ser citados dois pólos de avaliações das propriedades do concreto. São elas as propriedades *mecânicas* e de *durabilidade*. Para que os concretos desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, é de se esperar que ele mantenha a sua resistência e que seja útil por um período de vida especificado e previsto.

As propriedades mecânicas dizem respeito ao potencial do concreto de resistir aos esforços que a ele for solicitado. Dentre as propriedades analisadas, a resistência à compressão é mais utilizada em todas as frentes de estudos, dada a relativa facilidade de realização dos ensaios. Porém, propriedades como módulo de elasticidade e resistência à flexão devem ser igualmente estudadas.

Para as propriedades de durabilidade, o grau de dificuldade começa a aumentar em função da diversidade de elementos que pode favorecer uma durabilidade inadequada. Efeitos físicos, químicos e mecânicos interferem na durabilidade dos concretos, devendo ser estudados em todos os seus aspectos.

4.1.1 Propriedades mecânicas

As pesquisas sobre propriedades mecânicas em concretos reciclados tratam, na sua grande maioria, de propriedades mecânicas de resistência à compressão e, quase sempre, o resultado é o mesmo: a viabilidade técnica dos

concretos com agregados reciclados devido ao seu bom desempenho diante dessa propriedade. Apenas algumas recomendações precisam ser feitas para que essa afirmação se confirme, que é o tratamento dado ao agregado reciclado antes da concretagem.

Chen et al. (2003) desenvolveram um estudo de concretos com agregados reciclados de tijolos e concretos, utilizando os agregados reciclados em lotes separados de agregados graúdos reciclados, lavados e não lavados. Os resultados mostraram que os concretos reciclados, obtidos a partir dos agregados graúdos lavados, obtiveram valores em torno de 90% da resistência à compressão e flexão dos concretos de referência. Enquanto que para os concretos de agregados reciclados não lavados, os valores não passaram de 75%.

Um outro procedimento utilizado por Leite (2001) e Vieira (2003), foi a pré-molhagem dos agregados minutos antes da concretagem, em função taxa de absorção dos agregados. Este procedimento possibilitou uma melhora na trabalhabilidade dos concretos produzidos, pois com a pré-molhagem os agregados não absorviam a água do traço, melhorando o valor do abatimento.

A diminuição da resistência dos concretos reciclados está sendo alvo de muitas discussões. É perfeitamente comum encontrar resultados cujas misturas, obtenham valores abaixo dos de referência. Limbachiya (2000), citado por Levy (2001) afirma que o decréscimo da resistência nos concretos com agregados reciclados se dá, principalmente, devido à alteração da relação a/c. Zaharieva et al. (2002) enfatizam que a alteração da relação a/c provoca diminuição das resistências, mas o acréscimo de água na mistura, em função da alta taxa de absorção dos agregados reciclados, é necessário para atingir a trabalhabilidade adequada.

A alta taxa de absorção de água dos agregados é um ponto a ser discutido. Por ser um agregado mais poroso, obviamente irá precisar de mais água para ter a mesma trabalhabilidade que concretos com agregados convencionais. Baseados nessa teoria, muitos autores realizam misturas de concretos variando a quantidade de água para que o abatimento e a trabalhabilidade sejam satisfeitos. Dessa forma, a relação a/c é alterada e a classe de resistência desses concretos também acaba se alterando, acarretando numa impossibilidade de comparação direta entre concretos convencionais e reciclados.

Dos trabalhos realizados, fixando-se a relação a/c, os resultados foram bastante satisfatórios e em muitos casos os valores das resistências em concretos reciclados foram significativamente superiores em relação aos valores do concreto de referência.

Leite (2001) avaliou propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados a partir de resíduos de construção e demolição e a possibilidade de utilização desses resíduos como substituto, total ou parcial, do

agregado natural para produção de concretos. Os resultados foram conclusivos a respeito da viabilidade técnica de utilização dos agregados reciclados.

A tendência de comportamento da resistência à compressão do concreto, sob a influência da substituição do agregado natural pelo reciclado, pode ser visualizado na figura 2.

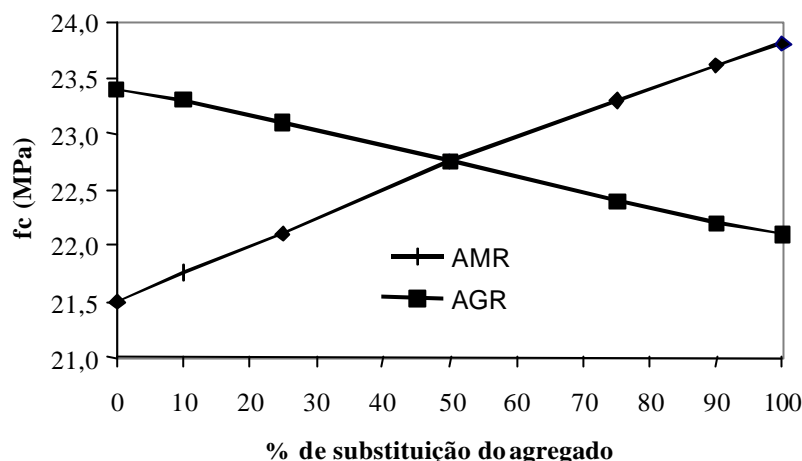


Figura 2 – Resistência à compressão em função do efeito do teor de substituição do agregado reciclado (fonte: LEITE, 2001)

De acordo com a figura 2, o aumento do teor de substituição de AGR tende a diminuir a resistência, enquanto que o aumento do teor de AMR faz aumentar a resistência à compressão.

A maior porosidade e menor resistência dos agregados graúdos reciclados, são fatores que podem influenciar na redução da resistência à compressão. Para o agregado miúdo reciclado, propriedades como maior rugosidade, que melhora a aderência, granulometria mais contínua e maior quantidade de finos, que diminuem a segregação, ajudam no efeito de empacotamento e contribuem para a o fechamento dos vazios, fatos estes que podem influenciar na melhoria da resistência à compressão dos concretos com estes agregados (LEITE, 2001; VIEIRA, 2003). Na figura 3 é possível visualizar o efeito da substituição do agregado natural pelo reciclado sobre a resistência à compressão para diferentes relações a/c.

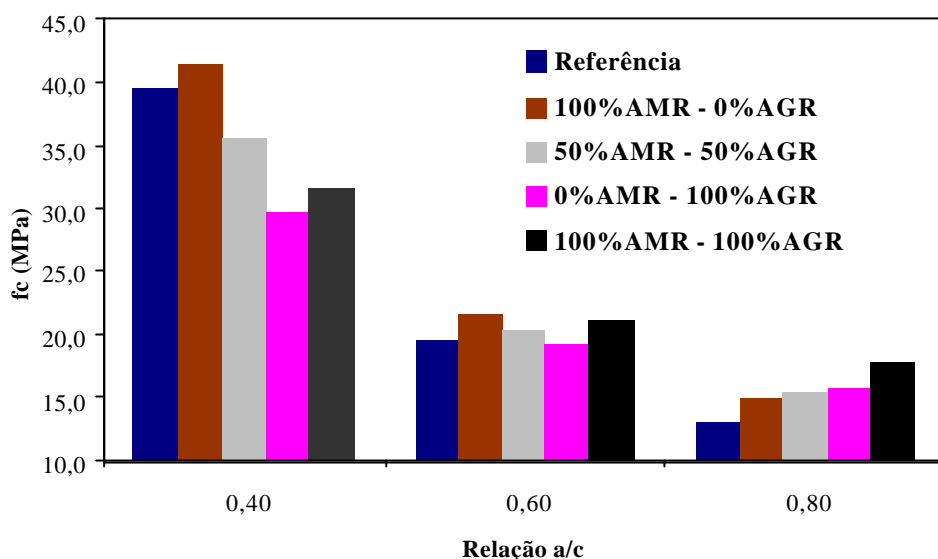


Figura 3 – Resistência à compressão em função da relação a/c para os diferentes percentuais de substituição do AMR e do AGR aos 28 dias

A viabilidade da utilização em substituição total, porém, foi válida apenas para o agregado miúdo reciclado, principalmente para relações a/c mais baixas (0,40 e 0,45). Quando é usado 100% de agregado miúdo reciclado (AMR) e 0% de agregado graúdo reciclado (AGR), os concretos apresentaram maiores valores de resistência à compressão, para qualquer relação a/c. Para o uso de agregados graúdos e miúdos, combinados numa mesma mistura, só é possível para relações a/c altas ($a/c > 0,60$), pois fornece concretos com maiores resistências, tomando-se cuidado apenas com a trabalhabilidade dos mesmos (LEITE, 2001).

4.1.2 Durabilidade de concretos com agregados reciclados

A vulnerabilidade do concreto diante de condições de agressividade do meio é um fator bastante preocupante na avaliação da vida útil das estruturas dessa origem, pois uma durabilidade inadequada pode manifestar sérias complicações, comprometendo a utilidade das mesmas.

De uma forma geral, a durabilidade de concretos, sejam eles naturais ou reciclados, incide diretamente na facilidade ou dificuldade do transporte de fluidos dentro do concreto, sendo classificado como um concreto pouco ou muito permeável. Os principais agentes de transporte de fluido no concreto são a água, que pode estar pura ou pode conter agentes agressivos, o dióxido de carbono e o oxigênio. O deslocamento desses elementos no concreto vai depender da estrutura da pasta de cimento hidratado (NEVILLE, 1997). O concreto de agregados reciclados também deverá responder a essa facilidade, ou não, do transporte desses fluidos, para que sua durabilidade seja avaliada.

Olorunsogo e Padayachee (2002) estudaram propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto como condutividade de íons cloreto, permeabilidade ao oxigênio e sorvidade à água, contendo percentuais de 0%, 50% e 100% de substituição de agregados naturais por reciclados. Os resultados mostraram que a durabilidade diminui à proporção que aumenta o percentual de substituição para todas as propriedades avaliadas. Entretanto, essas propriedades melhoram com o aumento da idade e com percentuais de 50% de agregados reciclados na mistura.

Neste trabalho foi estudado, também, o processo de corrosão acelerada nas armaduras, sob ação de íons cloreto, em concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Os resultados puderam comprovar que nos concretos com substituição total do agregado natural pelo reciclado, os valores da taxa de corrosão foram maiores que no concreto de referência. Quando a substituição, total ou parcial, se deu apenas por parte do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado, os valores das taxas de corrosão situaram-se praticamente na mesma faixa, e para relações água/cimento maiores ($a/c > 0,6$) os valores da taxa de corrosão foram menores que os concretos com agregados naturais (referência). Concretos com substituição de 50% de ambos os agregados (miúdo e graúdo) reciclados também tiveram resultados de corrosão das armaduras bastante satisfatórios. Na figura 4 é possível visualizar o comportamento desses concretos frente à corrosão das armaduras iniciada por cloretos.

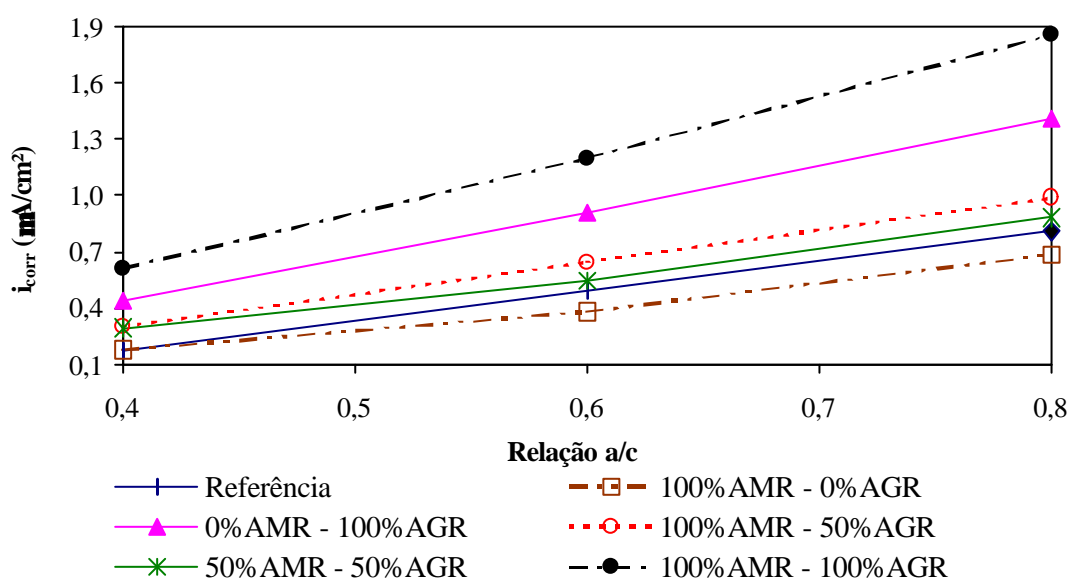


Figura 4 – Taxa de corrosão das armaduras em função relação a/c para diferentes teores de substituição do agregado reciclado

Sob o ponto de vista da durabilidade, é possível afirmar que é viável a utilização de agregados reciclados em concretos. Os resultados mostram que a substituição é válida até um certo percentual, pois misturas com 100% de substituição pode prejudicar o desempenho do concreto em função da diminuição da resistência aos ataques de agentes agressivos.

5 DESENVOLVIMENTO DE MERCADO PARA OS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Em alguns países onde a reciclagem de resíduos de construção já está consolidada, a utilização de agregados reciclados há muito deixou de ser apenas em obras de construção de rodovias. Nos países europeus, precursores da reciclagem de resíduos de construção e demolição, o concreto reciclado já está sendo utilizado em concreto armado, casas residenciais de médio padrão, portos marítimos e até em concretos de alta resistência.

Em países como a Holanda, Alemanha, Bélgica, e em outros da Comunidade Européia, quase a totalidade dos resíduos gerados de atividades civis é reciclada. A escassez de recursos naturais, aliada à tecnologia de reciclagem bem desenvolvida faz com que esses países saiam na frente no que diz respeito à utilização de agregados reciclados nas mais diversas aplicações de obras civis (LEVY, 2001).

Até onde se sabe, a aplicação de resíduos de construção e demolição sob a forma de agregados reciclados ainda não é uma prática usual no Brasil. A abundância de recursos naturais e o desconhecimento da utilização de materiais alternativos fazem com que o emprego dos RCD reciclados seja bastante pequeno no país. No entanto, a abundância de recursos naturais não é uma situação perene. Por enquanto, a justificativa para utilizar materiais reciclados é a grande quantidade de resíduo gerado nos centros urbanos.

Transpor as barreiras (legais, regulamentares, educação, tecnológicas, econômicas) com a inserção de um novo produto no mercado contendo resíduo também não é tarefa das mais fáceis. Especialmente para um setor considerado extremamente conservador como o da construção civil. A saída para essa estatização é o desenvolvimento de novas aplicações, contendo agregados reciclados, que apresente vantagens competitivas sobre os produtos convencionais.

Outra alternativa é a melhora com a gestão do resíduo a partir do momento de sua geração que, em geral, é no canteiro de obras. Mesmo que essa obra seja de reforma, reparo ou de construção. Se bem classificados e caracterizados, poderão ser utilizados dentro da própria obra que o gerou, diminuindo etapas de beneficiamento do material, que é a fase de coleta e transporte do material até uma usina de reciclagem. Assim, é reduzida uma atividade que não agrega valor ao produto final, que é a etapa de transporte, além da diminuição dos custos, como pode ser visto a seguir.

5.1 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA COM A RECICLAGEM

Do ponto de vista financeiro, o uso da reciclagem pode trazer benefícios ainda melhores para as empresas construtoras e também para as cidades, em

função dos ganhos ambientais associados. O que falta, talvez, seja a comprovação de que fazer uso de agregados reciclados na construção civil pode, de fato, trazer economias para o construtor e a certeza de que o produto seja de qualidade.

Considerando que o poder público ou autarquias estejam envolvidos nesse assunto e na montagem de uma usina de reciclagem, a determinação do custo operacional de cada uma delas é um processo bastante complexo. Entretanto, segundo Pinto (2001), a consideração criteriosa dos componentes necessários – custos com a manutenção e reposição, serviços de água e luz, custos com mão-de-obra, juros, amortizações, equipamentos para movimentação interna – tem apontado para valores na ordem de R\$ 5,00 por tonelada processada de agregado reciclado. Considerando que houve reajustes nesses valores, por conta dos índices de inflação, estes valores estão sendo atualizados para, aproximadamente, R\$ 7,00 hoje em dia. Transformando o peso dos agregados, de tonelada para metro cúbico comercializado, tem-se uma idéia mais ampla da economia feita na utilização destes materiais.

A tabela 3 apresenta um comparativo dos custos com agregados naturais e reciclados necessários para utilização em concretos.

Tabela 3 – Comparativo de custos entre agregados naturais e reciclados

Tipo de agregado	Preço médio para agregados (R\$/m ³)		Economia no custo do produto (%)
	Natural ⁽¹⁾	Reciclado ⁽²⁾	
Areia	16,00	8,47	47,06
Brita	31,00	7,84	74,71

Fonte: ⁽¹⁾ Média de vendas para Porto Alegre, em 2004; ⁽²⁾ PINTO (2001), considerando os valores corrigidos pelos índices de inflação no período de 2001 a 2003.

A tabela 3 permite observar um diferencial expressivo entre os valores anunciados para os agregados naturais e o custo com agregados reciclados, possibilitando a compreensão de que existe viabilidade econômica para a consideração da reciclagem de resíduos de construção e demolição.

Os valores dos agregados foram utilizados em função da unidade de comercialização dos produtos, que, em geral, é vendida por metro cúbico de produto. Para a transformação de tonelada para metro cúbico de material, utilizou-se valores conhecidos da massa unitária dos materiais reciclados utilizados por Leite (2001) e Vieira (2003).

Já foi constatado, através da tabela 3, que pode haver economia na aquisição dos materiais para produção de artefatos de cimento Portland. Uma economia de até 74% no valor de aquisição de um produto, que já teve sua qualidade assegurada, não pode deixar de ser ignorada. A economia obtida no custo dos

agregados podem se refletir em ganhos para empresas ou instituições que trabalham com habitações populares, pois os menores custos com os agregados reciclados possibilitarão uma redução no valor do produto final. Seja esse produto final uma habitação popular, artefatos de concreto ou até mesmo a produção de agregados reciclados para venda direta ao consumidor.

No entanto, faz-se necessário analisar também aspectos econômicos da utilização de agregados reciclados na avaliação de um produto final com estes materiais. Critérios de desempenho são também de igual importância para avaliação de um produto contendo estes materiais alternativos.

Um exemplo disso é avaliar a durabilidade de um concreto com agregados reciclados e comparar com um concreto produzido com agregados naturais. Um dos parâmetros para avaliar a durabilidade é através da estimativa da vida útil desses concretos. Entende-se como vida útil, o período durante o qual as suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos especificados no projeto, cujo elemento desempenha sua função para o qual foi designado.

O parâmetro que avalia o desempenho desses concretos ao longo de um determinado período, é através da estima do tempo necessário para que a armadura contida nesses concretos inicie um processo de deterioração. O tempo decorrido para o início dessas atividades é chamado de *tempo de despassivação*, pois a camada protetora da armadura começa a ser destruída e inicia-se, a partir daí, um processo de corrosão.

Diversos modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado são conhecidos no meio técnico. Um desses modelos é o de Andrade et al. (1989), citado por Andrade (2003), no qual faz uma estimativa da vida útil de uma estrutura de concreto exposta a um ambiente contendo íons cloreto (íons responsáveis pela iniciação da corrosão das armaduras em concretos) e leva em consideração a expansão que ocorre devido aos produtos de corrosão formados, o diâmetro da armadura no tempo inicial e o diâmetro da armadura após algum período de exposição do concreto a esses íons. O tempo de despassivação é função da variação dos diâmetros causada pela corrosão, e da taxa de corrosão medida nas armaduras. O equacionamento desse modelo pode ser visualizado na equação 1.

$$t = \frac{j_i - j_f}{0,023 \cdot i_{corr}} \quad (\text{equação 1})$$

onde:

ϕ_i – diâmetro inicial da armadura (mm)

ϕ_f – diâmetro médio da armadura após um período de exposição a cloretos (mm)

i_{corr} – intensidade de corrosão na armadura ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

t – tempo para despassivação da armadura (anos)

Para a obtenção dessa estimativa, foram utilizados os resultados dos ensaios de taxa de corrosão das armaduras em concretos com agregados provenientes da reciclagem de resíduos de construção e demolição. É possível verificar, através da figura 4, que foram estudados concretos com agregados reciclados e também com agregados naturais com o objetivo de comparar o desempenho entre um concreto convencional e um concreto reciclado.

Para a comparação da vida útil de concretos convencionais e reciclados, é preciso considerar uma padronização das condições de execução, adensamento e cura do concreto, além da mesma classe de resistência dos concretos. Sendo assim, considerou-se um concreto com 20 MPa de resistência (concreto com relação a/c em torno de 0,60), diâmetro médio da armadura de 5 mm, mesmo tipo de cimento para ambos os concretos, mesmas condições de execução, adensamento e cura. Substituindo os valores da intensidade de corrosão apresentados (figura 4) tem-se a estimativa de vida útil entre os concretos. A tabela 4 apresenta uma comparação entre estes materiais e a economia com manutenção conseguida com o uso de materiais reciclados.

Tabela 4 – Estimativa de vida útil entre concretos convencionais e reciclados

Condição	Estimativa de vida útil (anos)	
	Concreto convencional	Concreto reciclado
Concreto com 20 MPa relação a/c de 0,60	35,1	45,8 ⁽¹⁾
		34,8 ⁽²⁾

(1) concreto com 100% de agregado miúdo reciclado e brita natural;

(2) concreto com 50% de agregado miúdo natural e 50% de agregado graúdo reciclado

Como pode ser visto pela tabela 4, a estimativa para a vida útil de concretos reciclados é praticamente igual ou superior a de concretos convencionais. É importante salientar que estes resultados expressam apenas uma estimativa. Os dados utilizados para esse levantamento são dados obtidos através de ensaios acelerados de laboratórios e realizados no NORIE/LEME da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no qual os concretos submetidos aos ensaios de corrosão foram expostos a um ambiente contendo cloretos por um período de aproximadamente de seis meses.

A economia obtida com a utilização de agregados reciclados no concreto, no que diz respeito à durabilidade, é expressa através da quantidade de anos que a estrutura levaria para que a armadura fosse despassivada e se iniciasse um processo de corrosão. Para um concreto com 20 MPa de resistência e substituindo a areia natural por uma areia reciclada, por exemplo, o tempo para despassivação seria de 45,8 anos, contra 35,1 anos com um concreto

convencional de agregados naturais. Uma diferença de quase 11 anos. Para os projetistas de concreto armado, uma diferença dessa amplitude provoca melhorias significativas numa estrutura. Quando há a interação entre agregados naturais e reciclados numa mesma mistura, como foi o caso da substituição de 50% de ambos os agregados, praticamente não há diferença entre os concretos. Entretanto, considerando que a diferença entre um concreto e outro foi quase insignificante, o fato de que os agregados reciclados são mais baratos pode favorecer o uso de concretos com materiais reciclados.

Os resultados apresentados representam mais que uma disponibilidade da utilização de agregados reciclados. Representam a viabilidade técnica e econômica de materiais de construção mais baratos, com qualidade e desempenho assegurados. A maior dificuldade para aplicação desses materiais é vencer os entraves de substituir um material natural, de uso e desempenho consolidados, por um material novo e com características pouco conhecidas na construção civil.

6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Num momento em que a tecnologia permite transformar volumes de resíduos gerados em materiais que podem gerar um produto de qualidade, a utilização de agregados reciclados ainda permeia somente em obras pavimentação. Isso obriga a reciclagem a possuir um único cliente, que são as municipalidades, e desobriga a construção civil de utilizá-las em outras obras. A situação parece que está muito próxima de se transformar, com a resolução 307 do CONAMA.

As pesquisas, além de desenvolvidas e difundidas, precisam ser rigorosamente testadas para a certificação da qualidade do produto. Isso inclui um estudo sobre controle de qualidade dos materiais e do produto final em si. Muitos problemas com a utilização dos agregados reciclados residem no fato de ser um material sem qualquer padronização ou normalização.

A aplicação de resíduos de construção e demolição sob a forma de agregados reciclados requer, acima de tudo, um grande desafio para aqueles que acreditam na sua utilização. A disseminação da sua prática é uma atitude que deve ser utilizada imediatamente, pois a viabilidade do produto já foi comprovada.

Entretanto, para que o uso da reciclagem se dê em uma escala na qual os benefícios sociais, econômicos e ambientais sejam percebidos, o poder público deve implantar um programa fazendo uso do levantamento dos resíduos gerados na cidade e estimar os custos diretos e indiretos da disposição do entulho em aterros e, a partir daí, determinar a tecnologia que será empregada na reciclagem, os investimentos necessários e as possíveis aplicações dos resíduos reciclados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. J. O. Modelos de degradação das estruturas de concreto armado: corrosão das armaduras. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE). **Notas de aulas**. Porto Alegre. 40 p. 2003.

ANDRADE, A.; SOUZA, U.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V. Estimativa da quantidade de entulho produzido em obras de construção de edifícios. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 65-74, 2001.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 43-56, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos: NBR 10004**. Rio de Janeiro, 1987. 63 p.

CARNEIRO, A.P. et. al. Características do entulho e do agregado reciclado. In: CASSA, J.C.S.; CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 311 p.

CAVALCANTI, D.K. C. **Políticas para a reciclagem de resíduos da construção civil**. Disponível em: <<http://www.federativo.bndes.gov.br>> Acesso em: 12 mar. 2002. 9 p.

CHEN, H.J.; YEN, T.; CHEN, K.H. Use of buildings rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**. v. 33, p. 125-132, 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução 307 de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>> Acesso em: 08 jun de 2003 DOLLIMORE, D.; GUPTA, J.D.; LERDJANCHANAPORN, S.; NIPPANI, S. A thermal analysis study of recycled Portland cement concrete (RPCC) aggregates. **Thermochimica acta**. i. 357-358, p. 31-40, 2000.

FORMOSO, C.T.; JOBIM, M.S.S.; COSTA, A.L.; ROSA, F.P. Perdas de materiais na construção civil: um estudo em canteiros de obras no Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS, 1998, São Paulo. **Soluções para o terceiro milênio**. São Paulo: POLI-USP. v. 1, p. 299-307.

GÓMEZ-SOBERON, J.M.V. Porosity of concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. **Cement and concrete research**. v. 32, 2002, p. 1301-1311.

HANSEN, T.C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 316 p.

HENDRIKS, C.F.; JANSSEN, G.M.T. Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road construction. **Heron**. v. 46. n. 2 p. 109-117, 2001.

ISATTO, E.L.; FORMOSO, C.T.; CESARE, C.M.; HIROTA, E.H.; ALVES, T.C.L. Lean Construction: diretrizes e ferramentas para o controle de perdas na construção civil. Porto Alegre, 2000. **Série SEBRAE construção civil**. Porto Alegre: SEBRAE, 2000. v. 5, 177 p.

JOHN, V.M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: CASSA, J.C.S; CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 311 p.

_____. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 113 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 1., 2000. São Paulo. **Anais...** São Paulo: CETESB, 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 28 ago. 2002. 12 p.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2001. 270 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

_____. **Pesquisas e normalizações existentes no país e no exterior**. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 28 ago. 2002. 3 p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

OLIVEIRA, M. J. E.; MATTOS, J. T.; ASSIS, C. S. Resíduos de concreto: classe III versus classe II. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 87-95.

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

OZKAN, S.T.E. Recycling rubble into aggregates: a model for local governments. **Habitat International**. v. 25, p. 493-502, 2001.

PINTO, T.P. Gestão dos resíduos de construção e demolição em áreas urbanas – da ineficácia a um modelo de gestão sustentável . In: CASSA, J.C.S; CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 311 p.

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

POON, C.S. Management and recycling of demolition waste in Hong Kong. **Waste Management & Research**. v. 15, p. 561-572, 1997.

SAGOE-CRENTSIL, K.K.; BROWN, T. TAYLOR, A.H. Performance of concrete made with commercially produced recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**. v. 31, p. 707-712, 2001.

TOUAHAMIA, M; SIVAKUMAR, V; McKELVEY, D. Shear Strength of reinforced recycled material. **Construction and Building Materials**. V. 16, p. 331-339, 2002

VAZQUEZ, E. Aplicación de nuevos materiales reciclados en la construcción civil. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 11-21.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2003. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F. WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement e & Concrete Composites**. 2002. 10 p.

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