

Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição

Technical feasibility of the use of concrete with recycled construction and demolition residues as aggregates

Geilma Lima Vieira
Denise Carpena Coutinho Dal Molin

Resumo

Em que pese o aprimoramento das técnicas construtivas e as inovações tecnológicas, a construção civil ainda enfrenta muitos problemas. Um dos principais questionamentos atuais é o que será da construção civil quando os recursos naturais se tornarem escassos. De fato, a sua exploração indiscriminada tem causado graves problemas ambientais, além da geração de montantes de entulhos nas regiões urbanas. Uma alternativa para reduzir o acúmulo desses resíduos é a sua reciclagem. O presente artigo apresenta resultados de uma pesquisa cujo objetivo principal foi avaliar a viabilidade de utilização, técnica e econômica, dos resíduos de construção e demolição, mediante sua aplicação na produção de agregados reciclados em concretos. Foi realizada uma comparação entre concretos produzidos com agregados convencionais e reciclados. Os resultados indicam que agregados reciclados podem melhorar algumas propriedades do concreto, como resistência à compressão e durabilidade, medida através da estimativa da sua vida útil. A viabilidade econômica foi também considerada, embora de forma superficial, por meio da comparação de preços entre agregados naturais e reciclados.

Palavras-chave: agregados reciclados, concreto, viabilidade

Abstract

Despite the improvement of construction techniques and technological innovation, construction still faces many problems. One current major issue is what will become of construction as the natural resources are getting scarce. In fact, the indiscriminate exploitation of such resources has caused serious environmental problems, as well as the generation of much construction waste in urban areas. One of the alternatives to reduce the accumulation of such waste is recycling. This paper presents results of a research study that aimed to assess the technical feasibility of using construction and demolition waste for producing concrete recycled aggregates. A comparative study of concrete using natural and recycled aggregates was made. The results indicate that recycled aggregates can improve some concrete properties, such as compressive strength and durability, measured by the concrete service life prediction. The economical feasibility was also considered, although superficially, through the price comparison between natural and recycled aggregates.

Keywords: recycled aggregates, concretes, viability

Geilma Lima Vieira
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil,
Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul
Núcleo Orientado para a Inovação da
Edificação
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º Andar
CEP: 90035-190
Porto Alegre, RS - Brasil
E-mail: geilma@cpgec.ufrgs.br

Denise Carpena Coutinho Dal Molin
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil,
Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul
Núcleo Orientado para a Inovação da
Edificação
E-mail: dmolin@ufrgs.br

Recebido em 31/03/04

Aceito em 22/11/04

Introdução

Tradicionalmente, a visão de progresso confundia-se 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.

Os vários impactos causados pela ineficácia do controle ambiental, como a destruição da camada de ozônio, o efeito estufa e outras catástrofes decorrentes de ações humanas, indicam que a preservação do meio ambiente exige uma reformulação mais ampla dos processos produtivos e de consumo, desde a exploração da matéria-prima, passando pelos processos industriais, o transporte e o destino dos resíduos gerados, e também o do produto após sua utilização (JOHN, 2001; POON, 1997).

Existe, portanto, a necessidade de se buscarem alternativas para reduzir o acúmulo desses resíduos. Pode-se começar pela melhoria da qualidade dos processos da construção civil, resultando numa diminuição de perdas de materiais. Também se deve aumentar o grau de 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, sobremaneira, faça valer os direitos e deveres de cada pessoa envolvida nesse processo.

Outra alternativa é fazer uso da reciclagem desses resíduos. A reciclagem, potencialmente, pode resultar na redução de custos e do volume de extração da matéria-prima, preservando os recursos naturais limitados, e também na minimização dos problemas com gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos nos 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. Contudo, a utilização mais necessária e relevante deu-se após o fim da Segunda Guerra Mundial, quando milhares de resíduos ficaram espalhados pelas cidades da Alemanha. Diante da 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). Desde então, países europeus têm pesquisado o assunto de maneira mais aprofundada, com o objetivo de estabelecer procedimentos para a obtenção de agregados

reciclados com bom padrão de qualidade (VAZQUEZ, 2001; LEVY 2002).

No Brasil, a discussão sobre resíduos ainda permeia no ambiente técnico-científico. A reciclagem de resíduos como material de construção ocorre ainda de uma forma incipiente, exceto pela intensa reciclagem das indústrias do cimento e do aço (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001). O aprofundamento das discussões a respeito do que fazer com o grande volume de entulho gerado pelo setor da construção, depositado inadequadamente nos locais não propícios para esse fim, vem, aos poucos, ocupando espaço nas discussões políticas, dadas a importância do tema e a conscientização ambiental por parte da sociedade.

Dessa forma, este trabalho tem o objetivo de discutir a viabilidade técnica de utilização de resíduos de construção e demolição na produção de agregados para concreto. Para tanto, foi realizado um estudo comparativo entre concretos convencionais e concretos obtidos com agregados reciclados, focado na durabilidade deles quando submetidos a um ataque de agentes agressivos. Foi realizada, em ambiente de laboratório, uma simulação de ataque de íons cloreto nesses concretos. Os íons cloreto são considerados uns dos piores agentes de deterioração de uma estrutura de concreto, pois eles penetram na estrutura porosa do concreto e atingem a armadura, podendo provocar corrosão e, conseqüentemente, levar a estrutura ao colapso.

Definição, classificação, geração e composição dos resíduos de construção e demolição

Definição e classificação

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

De acordo com NBR 10004 (ABNT, 1987), os resíduos de construção e demolição podem ser classificados na classe III, como resíduos inertes, ou seja, que não reagem quimicamente mesmo contendo elementos minerais.

Essa 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.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) aprovou, em 2002, a Resolução 307 (BRASIL, 2002), que faz orientações a respeito da destinação que é dada ao resíduo de construção civil. Essa resolução estabelece diretrizes e critérios para a gestão dos resíduos provenientes de obras civis. O artigo 3º desta resolução apresenta uma classificação dos resíduos de construção e demolição quanto à sua origem. O foco do presente trabalho está nos resíduos *Classe A*, que são passíveis de ser reciclados ou reutilizados como agregados.

Geração de resíduos

Diversos estudos têm indicado elevados percentuais de perdas de materiais de construção e, em consequência, uma grande quantidade de resíduos gerados (FORMOSO et al., 1998; ISATTO et al., 2000; ANDRADE et al., 2001). Tais perdas, segundo Formoso et al. (1998), podem atingir valores da ordem de 8% em termos de custo.

Os resíduos de construção são gerados em diferentes fases do empreendimento: fase de construção, fase de manutenção ou reformas e fase de demolição. A geração de resíduo durante a fase de construção é decorrência das perdas nos processos construtivos. Parte dessa perda permanece incorporada nas construções, sob a forma de componentes que acabam ficando superdimensionados (FORMOSO et al., 1998).

A geração de resíduos na fase de manutenção está associada a vários fatores, entre eles reparos na estrutura em função da necessidade de correção de patologias, reformas nos edifícios, que normalmente causam demolições, ou o final de vida útil dos componentes que precisam ser substituídos. Nesta fase, a redução da geração de resíduos depende principalmente da melhoria da qualidade da construção, de tal forma que a manutenção seja reduzida (JOHN; AGOPYAN, 2000).

Na etapa de demolição, a redução dos resíduos depende do prolongamento da vida útil de seus componentes, que, por sua vez, dependem das tecnologias e materiais utilizados, da existência de incentivos para que os proprietários realizem modernizações e não demolições, e da existência de procedimentos eficazes para a reutilização de componentes (JOHN, 2000).

Supõe-se que são gerados de 2 a 3 bilhões de toneladas de entulho por ano em todo o mundo. Em países europeus, tais como Alemanha e países da Europa Oriental, aproximadamente dois terços dos resíduos de construção gerados são provenientes de obras de manutenção e demolição, sendo o restante resultante de atividades de construção (OZKAN, 2001; VAZQUEZ, 2001; LEITE, 2001; POON, 1997; JOHN, 2000).

No Brasil não há números precisos que apontem uma estimativa nacional da geração de resíduos. Algumas estimativas pontuais levam a uma geração anual entre 220 a 670 quilos por habitante. Para um edifício, cuja massa de materiais equivale a 1.000 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.

Observa-se na Tabela 1 que o percentual de resíduos de construção e demolição gerados, em alguns casos, chega a envolver mais da metade de todo o resíduo sólido urbano. Em Belo Horizonte, 51% dos resíduos coletados na cidade são de construção e demolição.

Pinto e Agopyan (1994), citados por Cavalcanti (2002), propõem algumas diretrizes para a reciclagem dos resíduos de construção civil em zonas urbanas:

- (a) mais de 90% dos resíduos da construção civil podem ser reutilizados na própria indústria da Construção Civil, na produção de novos componentes de construção;
- (b) 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; e
- (c) 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.

Cidade	População (milhões de hab.)	Geração de entulho (ton/dia)	% de entulho em relação ao resíduo sólido urbano
São Paulo ⁽¹⁾	15,0	5.000	-
Salvador ⁽¹⁾	2,20	1.700	37
Belo Horizonte ⁽¹⁾	2,01	1.200	51
Porto Alegre ⁽¹⁾	1,20	350	-
Campinas ⁽²⁾	0,85	1.258	-
Maceió ⁽³⁾	0,70	1.100	45
Florianópolis ⁽²⁾	0,28	636	-
Santo André/SP ⁽¹⁾	0,63	1.013	58
São J. dos Campos ⁽¹⁾	0,50	733	65
Ribeirão Preto ⁽¹⁾	0,46	1.043	67

Fontes: ⁽¹⁾ a partir de Leite (2001); ⁽²⁾ Andrade et al. (2001); ⁽³⁾ Superintendência de Limpeza Urbana de Maceió – SLUM (1997)

Tabela 1 - Geração de resíduos em algumas cidades brasileiras

Composição dos RCD

Uma grande variedade de componentes contribui para a formação dos resíduos. A proporção desses materiais em diferentes amostras é de grande variabilidade e heterogeneidade. Esse é um dos motivos pelos quais a utilização de agregados reciclados ainda é tão tímida; a natureza variável deste material dificulta o seu aproveitamento pela indústria.

Segundo 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, RS, apresentada na Figura 1.

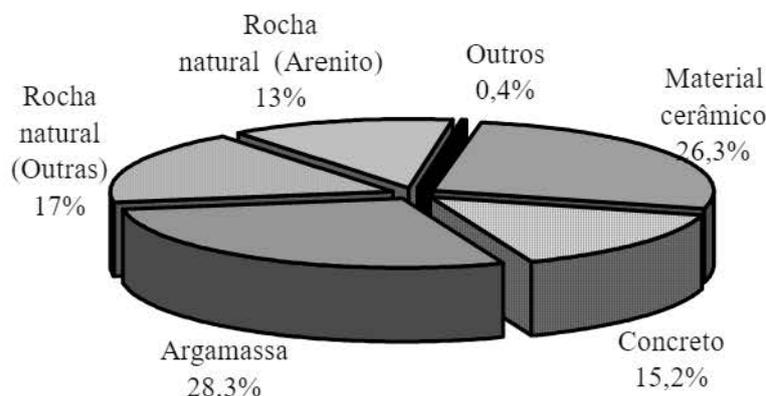
Na Figura 1 observa-se que foram encontrados diversos materiais, entre eles materiais cerâmicos, concretos e argamassa. Também foram encontrados elementos como gesso, vidros, materiais betuminosos, matéria orgânica, metais, plásticos, papéis, entre outros, mas são considerados como impurezas na reciclagem dos resíduos de construção e demolição. A presença do gesso na composição do resíduo provoca reações de expansão e pode fissurar o concreto, não podendo este material ser utilizado na reciclagem para a produção de agregados. 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; AGOPYAN, 2000).

Analisando a composição do resíduo de construção e demolição proveniente das cidades, percebe-se que, apesar de serem resíduos vindos das mais diversas regiões, a sua composição em geral tem elevados percentuais de concreto, material cerâmico e argamassa, independentemente da região, estado ou até mesmo país. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as composições dos resíduos para diferentes regiões do Brasil e do mundo.

Utilização de agregados reciclados na construção

O emprego de agregados na produção de componentes como blocos de pavimentação, blocos de alvenaria, concretos, entre outros, vem sendo intensificado no Brasil somente nos últimos cinco ou seis anos. Embora as pesquisas realizadas até agora indiquem um bom potencial para utilizar agregados reciclados em concretos das mais variadas classes de resistências, o emprego de agregados reciclados ainda é relativamente pequeno.

Uma das maiores dificuldades para a aplicação de agregados reciclados é a sua grande variabilidade. A tecnologia de controle de qualidade sistemática ainda é pouco conhecida no Brasil, ocorrendo o emprego de agregados reciclados principalmente em pavimentação.



Fonte: Leite (2001)

Figura 1 - Composição do entulho de Porto Alegre - RS

Local	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; Agopyan (2000)

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

Entretanto, as pesquisas nacionais que tratam da utilização de agregados reciclados têm chegado a conclusões similares: concretos com esse tipo de agregado têm alcançado bons desempenhos em relação à avaliação mecânica e à durabilidade. Zordan (1997), Leite (2001), Chen et al. (2003), entre outros, avaliaram a viabilidade técnica da utilização desses materiais em relação a suas propriedades mecânicas e concluíram que agregados reciclados podem ser utilizados em concretos. Gómez-Soberon (2002) salienta que, apesar da grande porosidade dos agregados reciclados, a sua utilização em concretos é possível. Olorunsogo e Padayachee (2002) concluíram que os concretos obtidos com agregados reciclados, ao serem avaliados quanto à durabilidade, apresentavam algumas propriedades melhoradas, como, por exemplo, diminuição da condutividade de íons cloreto em determinados níveis de substituição.

Influência dos agregados reciclados no concreto

Propriedades mecânicas

As pesquisas sobre propriedades mecânicas em concretos reciclados tratam, na sua grande maioria, da propriedade 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. Entretanto, para que o bom resultado seja concretizado, existe a necessidade de dar um tratamento 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. Para os concretos de agregados reciclados não lavados, os valores não passaram de 75%.

Um outro procedimento, utilizado por Leite (2001), foi a pré-molhagem dos agregados minutos antes da concretagem, em função da 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. Limbachiya¹ (2000), citado por Levy (2001), afirma que o decréscimo da resistência nos concretos com agregados reciclados se dá, principalmente, devido à alteração da relação entre água e cimento (*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 convencionais. Baseados nessa premissa, 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 se altera, acarretando na impossibilidade de comparação direta entre concretos convencionais e reciclados.

A tendência de comportamento da resistência à compressão do concreto, sob a influência da substituição do agregado natural pelo reciclado, pode ser visualizada na Figura 2. Observa-se que o aumento do teor de substituição de agregado graúdo reciclado (AGR) tende a diminuir a resistência, enquanto o aumento do teor de agregado miúdo reciclado (AMR) faz aumentar a resistência à compressão.

A maior porosidade e a 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 o fechamento dos vazios, contribuindo para melhorar a resistência à compressão dos concretos com esses agregados (LEITE, 2001). 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*.

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 AMR e 0% de AGR, os concretos apresentam 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 se obtêm concretos com maiores resistências, tomando-se cuidado apenas com a trabalhabilidade deles (LEITE, 2001).

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, pois uma durabilidade inadequada pode trazer sérias complicações, comprometendo a utilidade delas.

De forma geral, a durabilidade de concretos incide diretamente na facilidade ou dificuldade do transporte de fluidos dentro do concreto, sendo classificado como um concreto pouco ou muito permeável. O principal agente de transporte de fluido no concreto é a água, que pode estar pura ou conter agentes agressivos, tais como o dióxido de carbono e o oxigênio. O deslocamento desses elementos no concreto vai depender da estrutura da pasta de cimento hidratado (NEVILLE, 1997). A durabilidade do concreto de agregados reciclados também depende da facilidade, ou não, do transporte desses fluidos.

Olorunsogo e Padayachee (2002) estudaram propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto como a condutividade de íons cloreto, permeabilidade ao oxigênio e sortividade 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.

¹ LIMBACHIYA, M. C. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures**, Novembro, 2000.

Metodologia experimental

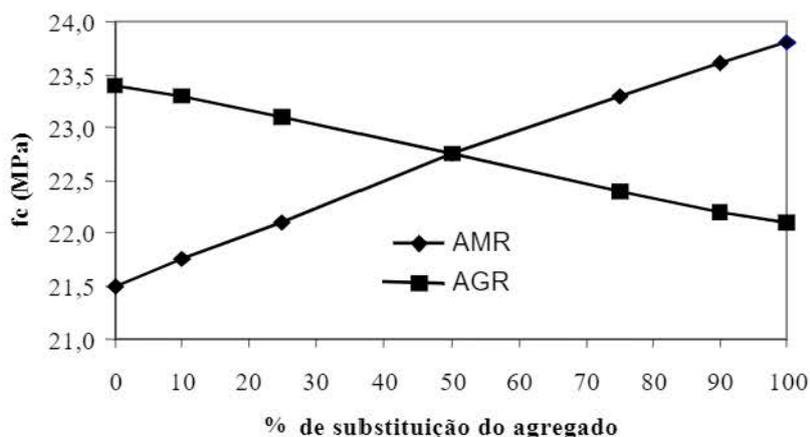
O procedimento experimental deste trabalho foi constituído das etapas de obtenção do agregado reciclado, do beneficiamento dele, planejamento dos ensaios, dosagem experimental dos concretos e análise, mecânica e de durabilidade, dos resultados obtidos. Foi realizada uma avaliação da propriedade mecânica de resistência à compressão aos 28 dias, apenas como parâmetro de controle de produção dos concretos e para que pudesse ser feito um comparativo entre os ensaios de durabilidade e a sua resistência mecânica.

Os agregados reciclados utilizados neste trabalho foram provenientes de uma obra de demolição na cidade de Maceió. Os resíduos foram coletados e então foram realizadas as etapas de seleção e retirada das impurezas. A composição do resíduo está apresentada na Figura 4, na qual se observa um elevado percentual de material cerâmico (cerâmica vermelha) em sua composição, seguido de resíduos de concreto e argamassa, além de outros materiais em menores percentuais.

Inicialmente, os resíduos foram triturados e selecionados em duas granulometrias, uma para obter o agregado miúdo reciclado (AMR) e outra para se obter o agregado graúdo reciclado (AGR), a serem utilizados nas misturas de concreto. Além

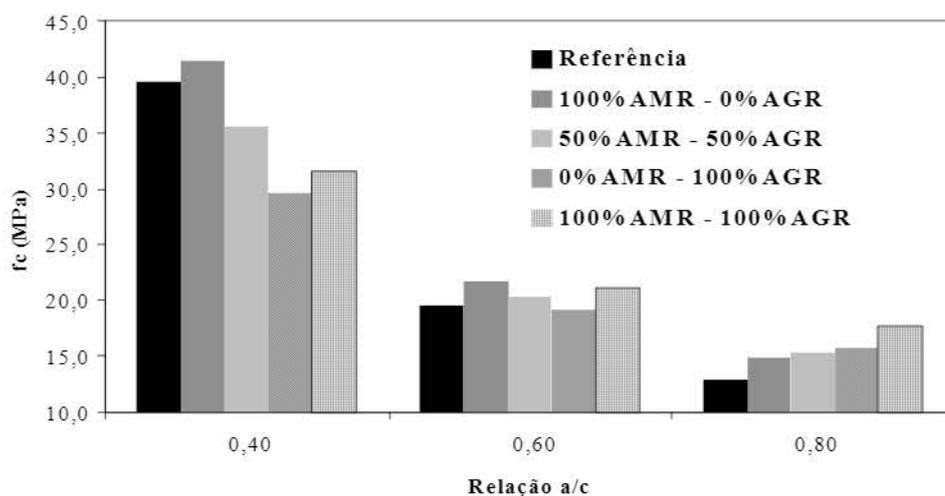
da composição granulométrica, foram realizados ensaios de massa específica e absorção de água. A caracterização física dos agregados, naturais e reciclados, está descrita na Tabela 3.

De acordo com a Tabela 3, os agregados reciclados, diferentemente dos naturais, têm uma alta taxa de absorção de água. Determinar essa taxa é imprescindível, pois ela determina o percentual de água que deverá ser suprido ao agregado reciclado, minutos antes das concretagens, para não haver problemas como redução na relação entre água e cimento, no abatimento e moldabilidade das misturas devido à falta de água. Ficou estabelecido que as taxas de absorção seriam compensadas para evitar que os agregados absorvessem toda a água do traço e as misturas se tornassem pouco trabalháveis e excessivamente secas, devido à falta de água. Entretanto, esse procedimento foi feito cuidadosamente para que não houvesse um excesso de água na mistura, saturando os agregados e ocasionando um aumento da relação entre água e cimento e, conseqüentemente, uma diminuição nas resistências mecânicas dos concretos produzidos, o que inviabilizaria a comparação entre os concretos convencionais e os reciclados. Dessa forma, a compensação de água foi de 50% da taxa de absorção dos agregados.



Fonte: Leite (2001)

Figura 2 - Resistência à compressão em função do efeito do teor de substituição do agregado reciclado



Fonte: Leite (2001)

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

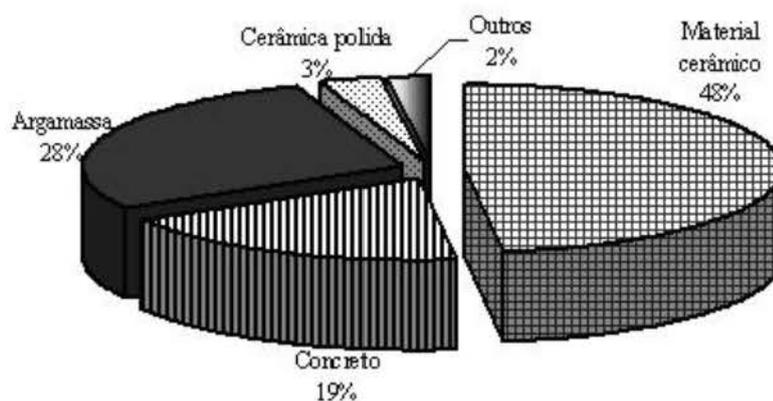


Figura 4 - Composição do resíduo utilizado proveniente da cidade de Maceió, AL

Agregado	Tipo de material	Absorção (%)	Massa específica (kg/dm ³)
Graúdo	Natural	2,50	2,70
	Reciclado	6,04	2,52
Miúdo	Natural	-	2,62
	Reciclado	14,65	2,51

Tabela 3 - Caracterização física dos agregados

Potencial de corrosão em relação ao eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre - CU/CUSO ₄ (mV)	Probabilidade de corrosão (%)
Mais positivo que -200	5
Mais negativo que -350	95
Entre -200 e -350	Incerta

Tabela 4 - Critérios de avaliação das medidas dos potenciais de corrosão de acordo com a ASTM C876

Com relação à massa específica dos agregados reciclados, os valores obtidos foram menores que os agregados convencionais. Em função disso, na dosagem dos concretos as massas desses materiais tiveram que passar por uma compensação, para que não houvesse diferença nos volumes de material quando fossem utilizados agregados naturais e reciclados nas misturas.

Na produção dos concretos foram definidas três relações entre água e cimento (0,40, 0,60 e 0,80) e três percentuais de substituições dos agregados naturais pelo reciclados, tanto do agregado miúdo reciclado (AMR), quanto do agregado graúdo reciclado (AGR). Estes percentuais foram definidos em 0%, 50% e 100% de substituição.

Assim, não houve substituição por agregado reciclado em alguns concretos. Esse procedimento foi necessário para que houvesse misturas com agregados naturais para servir como um concreto de referência na análise dos resultados, com a finalidade de fazer um comparativo entre concretos convencionais e reciclados.

Ensaios de durabilidade

Nos ensaios de durabilidade foram realizadas medidas de potencial de corrosão e resistência de polarização. Os corpos-de-prova foram submetidos a ciclos alternados de imersão e secagem numa solução agressiva de 3,5% de NaCl (cloreto de sódio), simulando um ambiente marinho que contém teores suficientes de sais que possam despassivar a armadura do concreto, acelerando o processo de corrosão nas barras de aço.

Potencial de Corrosão

A American Society for Testing and Materials C876 (ASTM C876/91) prescreve o método de ensaio para a obtenção dos potenciais de corrosão em concreto e estabelece a avaliação da probabilidade de corrosão em armaduras de concreto. Apesar de qualitativo na análise de avaliação de corrosão das armaduras, o levantamento de potenciais de corrosão em estruturas constitui-se, ainda, na técnica mais utilizada para monitorar estruturas de concreto armado com vistas à corrosão das armaduras e constitui-se num instrumento que, se rigorosa e

cuidadosamente utilizado, permite identificar de forma não destrutiva as áreas com corrosão. A Tabela 4 apresenta os critérios de avaliação das medidas dos potenciais de corrosão.

Taxa de Corrosão

A taxa ou velocidade de corrosão foi calculada utilizando-se do valor registrado da resistência de polarização no ensaio eletroquímico, na qual é calculada a corrente de corrosão instantânea (I_{corr}), fazendo-se uso da equação de Stern-Geary, na qual se utilizam constantes que dependem de contribuições das reações anódicas e catódicas do processo de corrosão (B) (CASCUDO, 1997; ANDRADE et al., 2001). As Equações 1 e 2 apresentam, respectivamente, a corrente de corrosão instantânea e a taxa de corrosão.

$$I_{corr} = \frac{B}{Rp} \quad (1)$$

Dividindo-se o valor de I_{corr} pela área da barra polarizada (A) tem-se a taxa ou velocidade de corrosão (i_{corr}), caracterizada pela densidade de corrente de corrosão. Esse valor é o parâmetro mais importante para avaliação do estado de corrosão nas barras de aço, pois ele determina o estado em que se encontra a armadura e constitui uma ferramenta importante para a previsão de vida útil nas estruturas que possuem esse tipo de manifestação patológica.

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \quad (2)$$

Resultados

Resistência à compressão

Foram analisados os ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para diferentes relações entre água e cimento (a/c) e para diferentes percentuais de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. Para a análise dos resultados foi realizada uma modelagem matemática através de análise de regressão múltipla com o objetivo de explicar a variabilidade dos resultados. O coeficiente de determinação (R^2) da regressão múltipla foi de 99,87%. O efeito dos

percentuais de substituição dos agregados naturais pelos reciclados, em função da relação a/c , está descrito na Figura 5.

De acordo com o gráfico da Figura 4, é possível notar que, em alguns casos, houve redução da resistência e em outros houve aumento dessa mesma propriedade. Para relações a/c menores (0,4 e 0,6), houve uma redução apenas nos concretos feitos com 100% de substituição dos agregados miúdo e graúdo utilizados conjuntamente num mesmo traço. Essa redução foi de 16% para os concretos com relação $a/c = 0,4$ e de 11% para os concretos de relação $a/c = 0,6$. Nos traços com esse mesmo percentual e relação $a/c = 0,8$ os valores situaram-se no mesmo patamar que os de referência.

O melhor desempenho da atuação conjunta dos agregados miúdo e graúdo reciclados se deu nos concretos com 50% de substituição de AGR e 100% de AMR, e com 50% de ambos, porque não houve perda de resistência. O ganho foi observado para todas as classes de resistências, tendo seu maior valor obtido para o traço 100% de AMR e 50% de AGR e relação $a/c = 0,80$, em que o aumento da resistência foi de 56% em relação ao concreto de referência.

Ensaio de durabilidade

Os corpos-de-prova submetidos aos ensaios de durabilidade permaneceram em ciclos de imersão e secagem por um período de 150 dias numa solução agressiva de cloreto de sódio. Dentro desse tempo foram registradas as leituras eletroquímicas de potencial de corrosão (E_{corr}) e resistência de polarização (RP) das barras de aço contidas nos corpos-de-prova.

Potencial de corrosão

O processo de despassivação da armadura foi medido de acordo com as recomendações da ASTM C-876/91 no ensaio de potencial de corrosão. Na Figura 6 são mostrados os valores dos potenciais de corrosão para 0%, 50% e 100% de substituição de agregados reciclados em função das relações a/c utilizadas.

De acordo com o gráfico da Figura 6, observa-se melhor desempenho para o concreto com 100% de AMR e 0% de AGR, para todas as relações a/c estudadas. Esse mesmo traço possibilitou uma diminuição, em valores absolutos, no valor do

potencial de corrosão para relação $a/c = 0,80$ em relação ao concreto de referência, assim como em todos os concretos onde havia substituição total ou parcial do AMR. Por outro lado, os concretos com 100% de substituição de ambos os agregados tiveram o pior desempenho com relação aos outros concretos, obtendo valores de potencial de corrosão acima de todos os outros.

Taxa de corrosão

A taxa de corrosão, calculada a partir da Equação 2, expressa a velocidade com que está se dando o processo de corrosão. Embora não haja ainda critérios definidos para relacionar a taxa de corrosão com a importância do ataque e o grau de deterioração da armadura, Andrade e Alonso (2001) propõem critérios de avaliação da corrosão a partir de dados obtidos em experiências de campo e em laboratório pela técnica de resistência de polarização. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 5.

De acordo com a Figura 7, pode-se observar o comportamento dos concretos com relação aos traços com 100% de AMR e 100% de AGR, cujo desempenho foi considerado insatisfatório. Para todas as relações a/c , os níveis de taxa de corrosão ficaram acima dos valores com nenhuma ou com substituição parcial de agregados reciclados e os mesmos corroíam as barras mais rapidamente que os demais. Por outro lado, os concretos com 100% de AMR e 0% de AGR tiveram os valores das velocidades de corrosão abaixo do concreto de referência. Na Figura 5 foi verificado que este traço apresentou valores de resistência à compressão maiores que os de referência, em função, talvez, do grande percentual de finos na mistura, o que possibilita um maior preenchimento dos vazios no concreto. Isso pode explicar o bom desempenho do traço 100% de AMR e 0% de AGR ante a corrosão.

Na Figura 7 é apresentado um gráfico que relaciona o efeito da taxa de corrosão das armaduras, em função das relações a/c estudadas, para diferentes percentuais de substituição dos agregados reciclados.

A Figura 8 apresenta os diferentes valores da taxa de corrosão em função da idade e dos diferentes percentuais de substituição, avaliando-se o efeito isolado do percentual de agregado graúdo e miúdo, bem como o efeito da combinação de ambos, total e parcial, sobre a velocidade de corrosão.

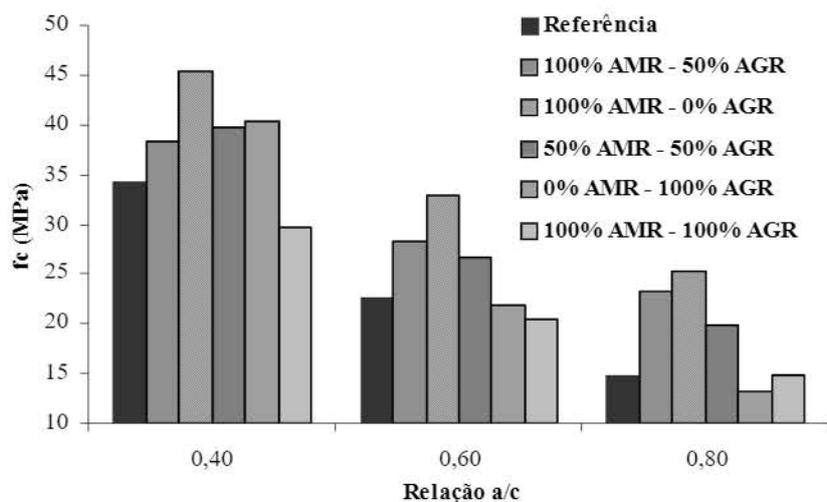


Figura 5 - Resistência à compressão em função da relação a/c para os diferentes percentuais de substituição do AMR e do AGR aos 28 dias

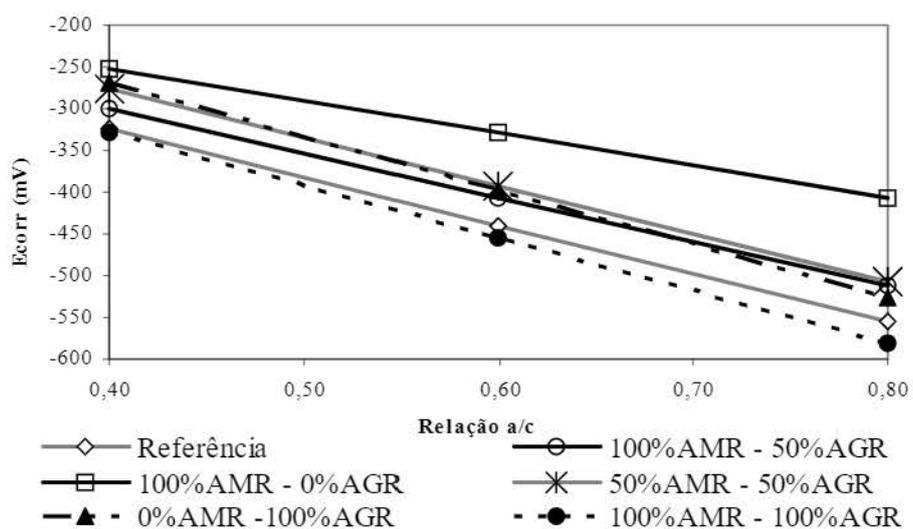


Figura 6 - Potencial de corrosão para diferentes percentuais de substituição dos agregados reciclados

Velocidade de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Grau de corrosão
< 0,1	Desprezível
Entre 0,1 e 0,5	Iniciação com nível baixo de corrosão
Entre 0,5 e 1,0	Nível moderado, mas não severo
> 1,0	Nível alto de corrosão
> 10	Ataque muito severo

Tabela 5 - Critérios de avaliação da velocidade de corrosão

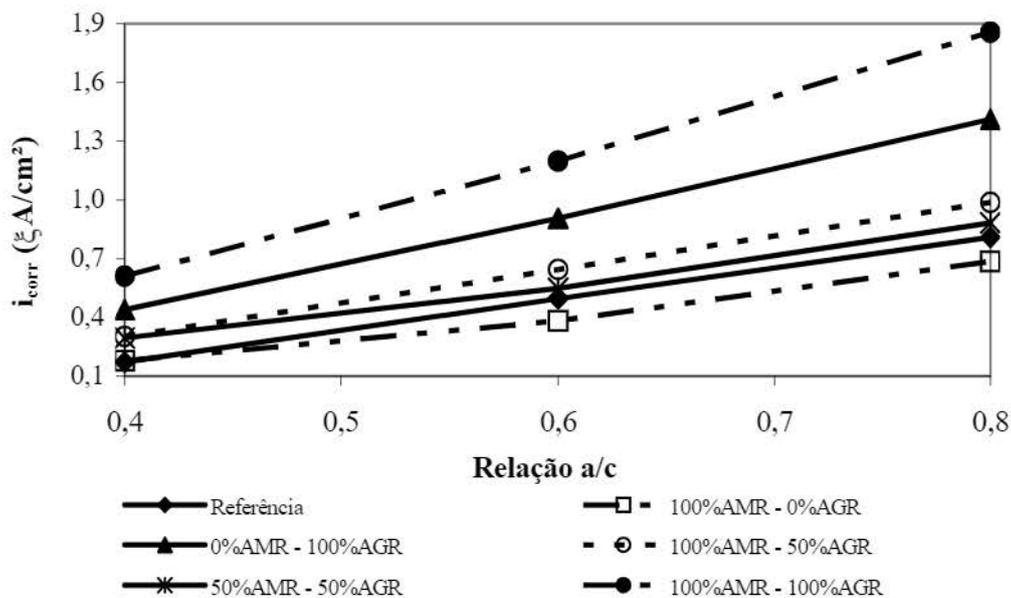
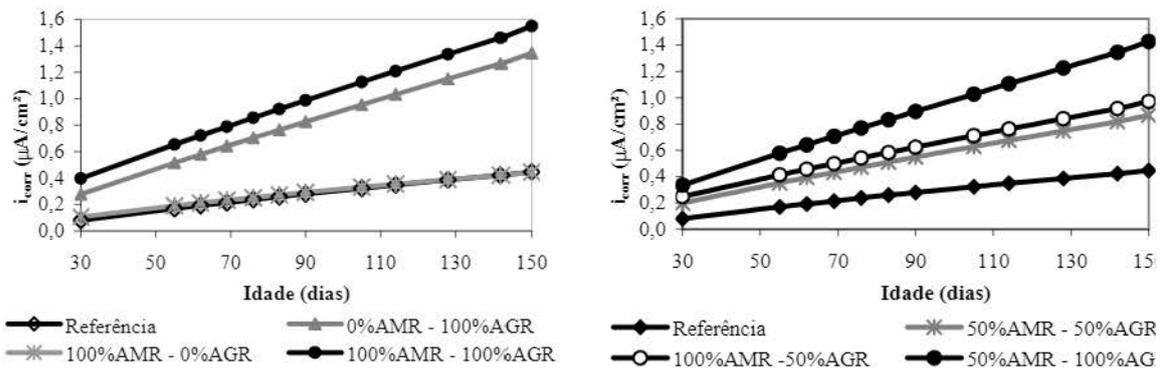


Figura 7 - Taxa de corrosão das armaduras em função relação a/c para diferentes teores de substituição do agregado reciclado



(a) efeito isolado da % de AMR e 100% de ambos

(b) efeito da combinação da de AMR e da AGR

Figura 8 - Taxa de corrosão em função da idade, para os diferentes teores de substituição

De acordo com os gráficos, observa-se que para os traços nos quais não houve substituição do AMR e em que houve substituição total de agregados reciclados, as taxas de corrosão obtidas foram bem maiores que os valores de referência, e os traços com apenas a substituição de AMR situaram-se praticamente na mesma faixa que os concretos com agregados naturais (Figura 8a).

Na Figura 8b também são mostrados os concretos com substituição de ambos os agregados. Nota-se que com os traços em que houve um percentual maior de substituição do AGR a corrosão ocorreu bem mais rápida que nos outros concretos. Pode-se concluir, nesse caso, que o agregado graúdo reciclado não contribui para a melhoria da

durabilidade de concretos reciclados em face da corrosão das armaduras iniciada por íons cloreto, exceto quando misturado ao agregado miúdo reciclado em proporções parciais de ambos, ou totais, quando a substituição se dá apenas por parte do agregado miúdo reciclado.

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 ocorrer 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 para casas residenciais de médio padrão e portos marítimos, e até em concretos de alta resistência.

No Brasil, o problema maior incide em transpor as barreiras (legais, regulamentares, de educação, tecnológicas, econômicas) com a inserção de um novo produto no mercado contendo resíduo. Essa não é tarefa das mais fáceis, especialmente para um setor considerado como conservador como o da Construção Civil. A saída para essa situação é o desenvolvimento de novas aplicações, contendo agregados reciclados, que apresente vantagens competitivas sobre os produtos convencionais.

Viabilidade técnica e econômica com a reciclagem

Do ponto de vista financeiro, o uso da reciclagem pode trazer benefícios 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, por conta dos índices de inflação, esse valor está sendo atualizado para, aproximadamente, R\$ 7,00 atualmente. Transformando o peso dos agregados, de tonelada para metro cúbico comercializado, tem-se uma idéia mais ampla da economia feita na utilização desses materiais.

A Tabela 6 apresenta um comparativo dos custos com agregados naturais e reciclados necessários para utilização em concretos.

A Tabela 6 permite observar um diferencial expressivo entre os valores anunciados para os agregados naturais e o custo com agregados reciclados, dando indicações de que existe viabilidade econômica para a consideração da reciclagem de resíduos de construção e demolição.

Entretanto, os valores dispostos na Tabela 6 apresentam apenas um indicador de que pode haver uma redução no valor do produto final, que é o concreto. A análise econômica foi feita apenas em cima dos valores de obtenção dos agregados, não levando em conta os custos externos, como, por exemplo, custos com transporte.

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, utilizaram-se valores conhecidos da massa unitária dos materiais reciclados utilizados.

Já foi constatado, pela Tabela 6, que pode haver economia na aquisição dos materiais para produção de artefatos de cimento Portland, podendo chegar até a 74% no valor de aquisição de um produto. A economia obtida no custo dos agregados pode se refletir em ganhos para empresas ou instituições que trabalham com habitações de interesse social, 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, é recomendável, também, avaliar a durabilidade de um concreto com agregados reciclados e compará-la com a de um concreto convencional. Um dos parâmetros para avaliar a durabilidade é por meio da estimativa da vida útil. 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.

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 se faz uma estimativa da vida útil de uma estrutura exposta a um ambiente contendo íons cloreto, levando 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. Esse modelo é representado pela Equação 3.

$$t = \frac{\varphi_i - \varphi_f}{0,023 \cdot i_{corr}} \quad (3)$$

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 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$); e

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 desenvolvidos neste trabalho.

Para a comparação da vida útil de concretos convencionais e reciclados, é preciso considerar a 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 de ambos os concretos.

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre esses materiais. De acordo com a Tabela 7, a economia obtida com a utilização de agregados reciclados no concreto, no que diz respeito à durabilidade, é expressa pela 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-se 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.

Quando há mistura de agregados naturais e reciclados, 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.

No entanto, é importante salientar que estes resultados expressam apenas uma estimativa. É necessário que se dê importância primária ao tratamento dos resíduos de construção e demolição desde o beneficiamento, passando pela caracterização dos materiais, até a fase de utilização dos agregados no concreto. Dessa forma, o material utilizado fica com suas propriedades conhecidas, e a sua utilização não fica limitada.

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

Tabela 6 - Comparativo de custos entre agregados naturais 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

Tabela 7 - Estimativa de vida útil entre concretos convencionais e reciclados

Considerações finais

O presente trabalho indicou que o uso do agregado reciclado no concreto, em proporções convenientemente dosadas, não afeta a resistência à compressão, tampouco a durabilidade do concreto ante a corrosão das armaduras. Em alguns casos essas propriedades são até melhoradas, como pode ser visto com os traços em que houve a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo 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 viável até um determinado percentual, pois misturas com 100% de substituição de ambos os agregados ou com apenas substituição total do agregado graúdo reciclado podem prejudicar o desempenho do concreto em função da diminuição da resistência aos ataques de agentes agressivos.

É possível afirmar, também, que há indícios de economia na produção de concretos e de outros artefatos de cimento Portland, em função da economia obtida com os custos dos agregados reciclados em comparação aos agregados naturais. Isso pode tornar economicamente viável o uso de concretos com materiais reciclados.

Muitos estudos, porém, ainda precisam ser feitos para sedimentar a utilização desses materiais nos mais variados tipos de construção. Num momento em que se discute preservação do ambiente e seus recursos naturais, a reciclagem de resíduos de construção e demolição constitui-se numa importante alternativa para a minimização dos impactos ambientais. Desde que sejam tomadas medidas rigorosas na especificação, normalização e utilização desses materiais, o seu uso não ficará restrito a utilizações de pouca importância.

Referências bibliográficas

ANDRADE, C.; ALONSO, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. **Construction and Building Materials**, v. 15, p. 141-145, 2001.

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). Porto Alegre, 2003. 40 p. (Notas de aulas)

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, 2001. p. 65-74.

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, 2001. p. 43-56.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002: Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. CONAMA, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 8 jun. 2003.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1997. 237 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.

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.

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: Soluções para o terceiro milênio., 1998, São Paulo. **Anais...** 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. Porto Alegre: SEBRAE, 2000. 177 p. (SEBRAE construção civil, 5)
- 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.
- JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113 f. Tese (Livre Docência) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- 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**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 199 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- LEVY, S. M. **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 de 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.
- PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- 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.** 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

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

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