

Resistência e Durabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição

Geilma L. Vieira^{1,†}, Denise C. C. Dal Molin²

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE), Av. Osvaldo Aranha, 99 – 3º Andar – 90035-190 – Porto Alegre – RS – Brasil.

Flávio B. de Lima³

Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Núcleo de Pesquisas Tecnológicas, Campus A. C. Simões, s/n, BR 104 – Maceió – AL – Brasil.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de realizar um estudo experimental de concretos produzidos com agregados reciclados avaliando a propriedade mecânica de resistência à compressão axial e estudar aspectos de durabilidade desses concretos, quando submetidos a ciclos alternados de imersão e secagem de uma solução agressiva de cloreto de sódio. Foram utilizados agregados reciclados na sua fração miúda e graúda, em percentuais fixados em 0, 50% e 100% de substituição. As relações água/cimento utilizadas foram de 0,40, 0,60 e 0,80, para envolver todas as classes de resistência do concreto. Foi analisada velocidade de corrosão das armaduras nas barras de aço dos concretos reciclados. Para isso foram realizados ensaios de potencial de corrosão e resistência de polarização para medir o grau de propagação da intensidade de corrosão e monitorar o processo de despassivação da armadura.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil vem, ao longo dos anos, aprimorando suas técnicas construtivas e caminhando paralelamente com o avanço tecnológico que hoje está espalhado pelo mundo. Essa mesma indústria que cresce e se aprimora, está as voltas com problemas tão grandes quanto seu crescimento. Um dos questionamentos que se faz é o que será da construção civil sem os recursos naturais, antes tidos como inesgotáveis e renováveis, uma vez que sua exploração, excessiva e indiscriminada, tem causado graves problemas ambientais.

¹ Doutoranda em Engenharia

[†] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (geilma@cpgec.ufrgs.br)

² Professora doutora

³ Professor doutor

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 na Europa Oriental, aproximadamente dois terços dos resíduos de construção gerados são provenientes de obras de construção, manutenção e demolição. Em países onde o desenvolvimento é acelerado, o percentual de geração de resíduos tende a aumentar, dada a sua necessidade de aumentar o ambiente construído (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. A geração de resíduos em algumas cidades brasileiras chega a 500 kg/hab.ano. Na cidade de São Paulo, só a indústria da construção civil gera 90.000 metros cúbicos de entulho por mês e esse montante corresponde apenas ao material que chega em aterros oficiais. 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).

Resta, portanto, ir em busca de alternativas para reduzir o acúmulo desses resíduos. Pode-se começar na melhoria da qualidade dos bens e 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, provocando sérias transformações socioeconômicas e culturais no sentido de minimizar os impactos causados pela urbanização, indiscriminada e mal planejada, das cidades.

Os resíduos provenientes de obras da construção civil e de demolição apresentam características que dependem do tipo de obra, das técnicas construtivas, da fase em que se encontra a construção, das características sócio-econômicas da região considerada, entre outros fatores. Para Pinto (1986), essa mistura é composta, basicamente, de 60% de argamassa, 30% de componentes de vedação – tijolos, blocos, cacos cerâmicos, 9% de outros materiais (concreto, pedra, areia, metálicos e plásticos) e 1% de orgânicos.

Observando esta composição subentende-se que a reciclagem desses resíduos, já consolidada em outros países, mas ainda com pouca atividade no Brasil, pode ser uma boa alternativa, unindo dois fatores positivos: eliminar a nociva deposição de entulho às margens de vias públicas, rios, terrenos baldios e, ao mesmo tempo, obter materiais de construção mais baratos e de boa qualidade.

Vários autores seguiram e estão seguindo essa linha de pesquisa em busca do desenvolvimento e aprimoramento de novas técnicas de utilização destes materiais, que podem ser inseridos na sociedade como um novo produto e que cultiva um grande valor social. Pouco se têm estudado sobre aspectos de durabilidade desses concretos. A grande maioria dos trabalhos avalia propriedades mecânicas e viabilidade técnica da utilização desses materiais incorporados ao concreto ou em argamassas.

Dessa forma, foi objeto de pesquisa deste trabalho desenvolver um estudo relacionado à durabilidade de concretos produzidos a partir de agregados reciclados, analisando o comportamento desses concretos quando submetidos a um ataque de agentes agressivos. No caso da pesquisa em questão, foi realizada, em ambiente de laboratório, uma simulação de ataque de íons cloreto nestes concretos. Os íons cloreto são considerados um dos piores agentes de deterioração de uma estrutura de concreto, pois eles penetram na estrutura porosa do concreto, atingem a armadura e podem provocar corrosão e, conseqüentemente, levam a estrutura ao colapso, por esgotar a sua capacidade de resistir aos esforços aos quais é submetido o concreto armado.

2. METODOLOGIA

O procedimento experimental desse trabalho foi constituído das etapas de obtenção do agregado reciclado, do beneficiamento do mesmo, 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 um 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, uma das capitais do Brasil. Os resíduos foram coletados e realizadas as etapas de seleção e retirada das impurezas, como materiais metálicos, gesso, madeira, resíduos orgânicos, entre outros. A composição do resíduo pode ser visualizada na figura 1. Nesta figura, é possível observar grande percentual de material cerâmico (cerâmica vermelha) em sua composição, seguido de resíduos de concreto e argamassa, além de outros materiais e menores percentuais.

Logo após, 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), nos quais seriam 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 1.

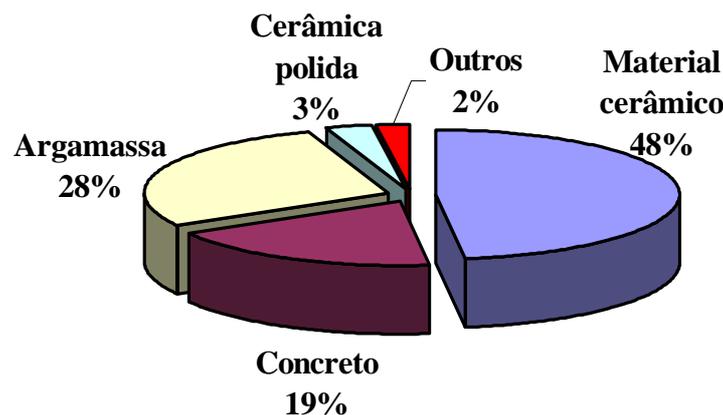


Figura 1: Composição do resíduo utilizado proveniente da cidade de Maceió-AL

Tabela 1: Caracterização física dos agregados

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

De acordo com a tabela 1 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 o agregado reciclado, minutos antes das concretagens, para que não ocorram problemas como redução na relação água/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 água/cimento e, conseqüentemente, uma diminuição nas resistências mecânicas dos concretos produzidos, inviabilizando a comparação entre os concretos convencionais e os reciclados. Dessa forma, a compensação de água foi de 50% da taxa de absorção dos agregados. A composição granulométrica dos agregados está disposta na tabela 2.

Tabela 2: granulometria dos agregados naturais e reciclados

Agregado Miúdo Natural		Agregado Miúdo Reciclado	
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	Dimensão máxima característica (mm)	4,8
Módulo de finura	2,46	Módulo de finura	2,73
Agregado Graúdo Natural		Agregado Graúdo Reciclado	
Dimensão máxima característica (mm)	19	Dimensão máxima característica (mm)	19
Módulo de finura	7,00	Módulo de finura	6,62

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 água/cimento (0,40 0,60 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. Alguns concretos não receberam substituição de agregado reciclado. Isto se deu, 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. A trabalhabilidade dos concretos produzidos foi avaliada de acordo com as prescrições da NBR 7223 (ABNT, 1982) – *Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. A trabalhabilidade foi considerada como um parâmetro de caráter qualitativo nos ensaios, cujo objetivo era de apenas controlar a produção dos concretos. Foi fixado um abatimento de 70 ± 10 mm.

Foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão axial e ensaios de durabilidade de potencial de corrosão e resistência de polarização em concretos obtidos a partir de agregados reciclados. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados aos 28 dias de idade. Para os ensaios de durabilidade, 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. Os concretos permaneceram nos ciclos de imersão e secagem por um período de 150 dias. Neste tempo, foram realizadas as leituras de potencial de corrosão e resistência de polarização, com a finalidade de monitorar a iniciação e propagação do processo de corrosão das armaduras iniciada por íons cloreto.

3. RESULTADOS

3.1 Resistência à compressão

Foram analisados os ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias para as diferentes relações água/cimento e para os diferentes percentuais de substituição dos agregado natural pelo reciclado. 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 da análise de regressão foi de 99,87%. A figura 2 apresenta o efeito do percentual de substituição do AMR nos concretos produzidos, em função das relações água/cimento utilizadas.

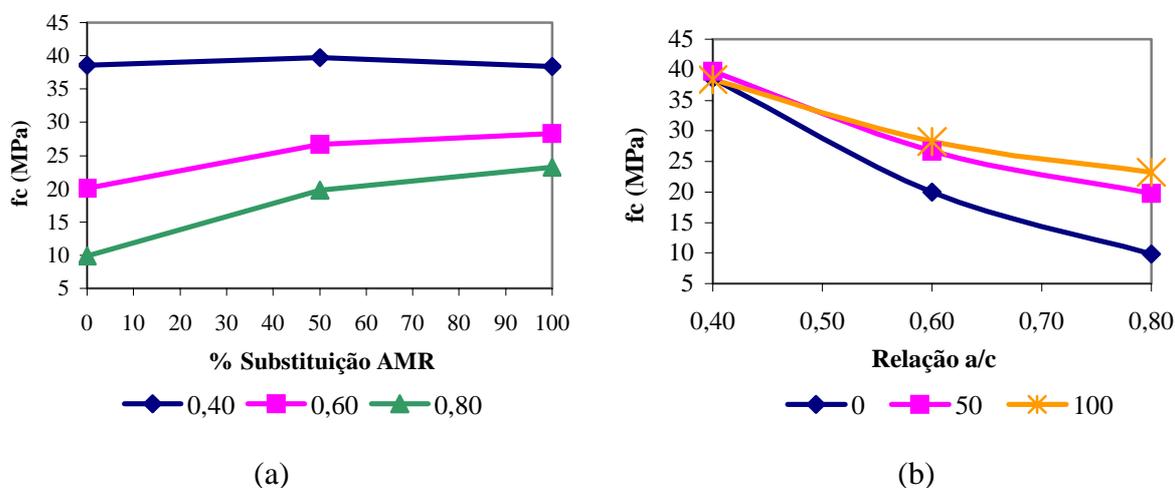


Figura 2: efeito do percentual de substituição do AMR. (a) f_c em função do AMR para as três relações a/c. (b) f_c em função da relação a/c para os diferentes teores de AMR.

O crescimento da resistência aumenta, à proporção que também aumenta a relação água/cimento. Para as três relações água/cimento utilizadas, quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo reciclado, maior a resistência à compressão. Foi observada uma elevação mais acentuada da resistência, para $a/c = 0,80$, quando os percentuais variaram de 0 para 100% de substituição. Nesse caso, o efeito dos materiais finos é mais acentuado para compensar o baixo consumo de cimento. Com relações água/cimento menores também houveram ganhos, de menores proporções, mas o suficiente para se tornarem diferenças significativas em relação ao concreto de referência. Para $a/c = 0,60$ os ganhos foram de 41,3% quando os percentuais também variaram de 0 para 100% de substituição do agregado miúdo reciclado. Para relação $a/c = 0,40$ os resultados permaneceram em mesma ordem de equivalência dos concretos de referência.

As características desses agregados, como textura e granulometria, influenciam positivamente o aumento da resistência. Os agregados reciclados apresentam um grande percentual de finos que ajudam a mistura a ter um efeito de empacotamento, de compactação e proporcionam um maior fechamento dos vazios. Além disso, por possuir maior absorção, o agregado reciclado permite uma maior aderência entre a pasta e o agregado, através da absorção da pasta e da precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado. Nos concretos com substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, todos estes aspectos são significativos para o aumento da resistência (LEITE, 2001; NEVILLE, 1997). No entanto, deve-se ressaltar que a utilização de agregados reciclados pode conduzir a uma probabilidade

de ocorrência da reação álcali-sílica em função presença de alguns minerais de sílica, potencialmente reativos e eventualmente presentes em alguns agregados utilizados em concretos.

Os gráficos da figura 3 apresentam os resultados do efeito do teor de substituição do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto, para as diferentes relações água/cimento.

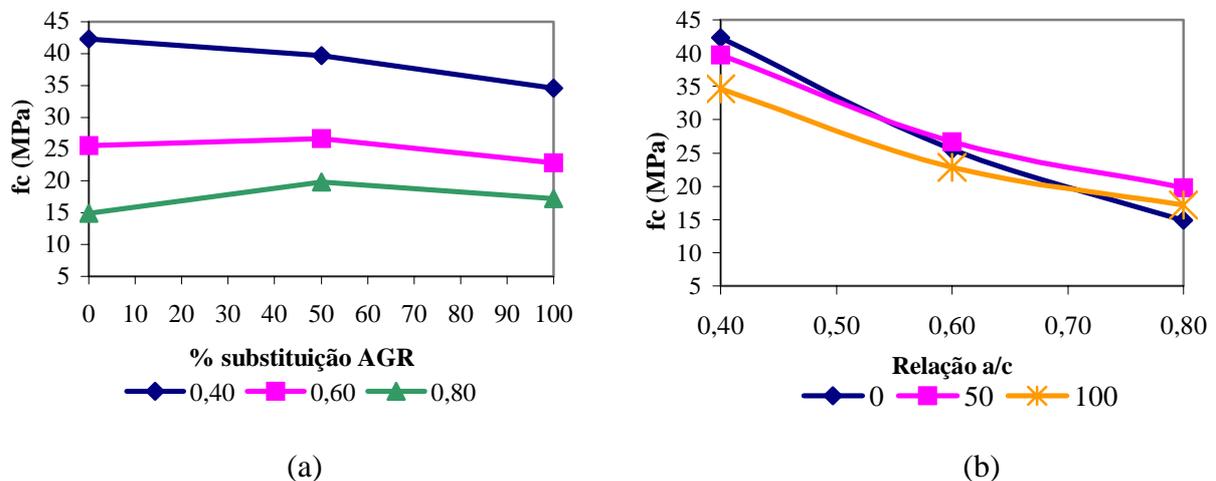


Figura 3: Resistência à compressão em função relação água/cimento e do %AGR. (a) f_c em função do % AGR. (b) f_c em função da relação a/c para diferentes %AGR.

Para os concretos ensaiados, quanto menor a relação água/cimento e um maior percentual de substituição do agregado graúdo reciclado, menores foram os valores das resistências. Esse resultado pode ser atribuído a alguns fatores, como a baixa resistência e densidade do grão do agregado. Em concretos com relação a/c menores, a resistência tende a ser alta. Por conta disso, o agregado graúdo reciclado torna-se um fator limitante na resistência de misturas com baixa relação a/c, em função da sua baixa resistência. Os concretos com relação a/c mais baixas possuem uma menor demanda de água, e quando se realiza misturas com agregados reciclados, que absorve grande parte da água do traço, dificulta a trabalhabilidade do concreto. Hansen (1992) afirma que o efeito negativo do percentual de agregados graúdos reciclados no concreto, pode ser minimizado se for utilizado em relações a/c maiores, pois, apesar de possuir alta taxa de absorção, a resistência à compressão não fica limitada à resistência do agregado, mas sim, pela resistência da pasta de cimento endurecida.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) analisaram concretos com agregados reciclados misturando-se apenas o agregado graúdo reciclado e relação a/c de 0,4 e 0,55. Os resultados comprovaram que o efeito do agregado graúdo reciclado foi prejudicial para os concretos de relação a/c= 0,4, obtendo valores de resistência à compressão em torno de 70% dos concretos de referência. Para os concretos de relação a/c= 0,55, em que o valor da resistência do agregado não é muito solicitado, os concretos com substituição de agregados graúdos ficaram em torno de 85% em relação aos de referência. Segundo os autores, a baixa resistência à compressão dos concretos reciclados deveu-se ao fato da correção na relação a/c, em virtude da grande taxa de absorção dos agregados reciclados.

A figura 4 apresenta o efeito das substituições conjuntas, totais e parciais, dos agregados naturais pelos reciclados, em função da relação água/cimento.

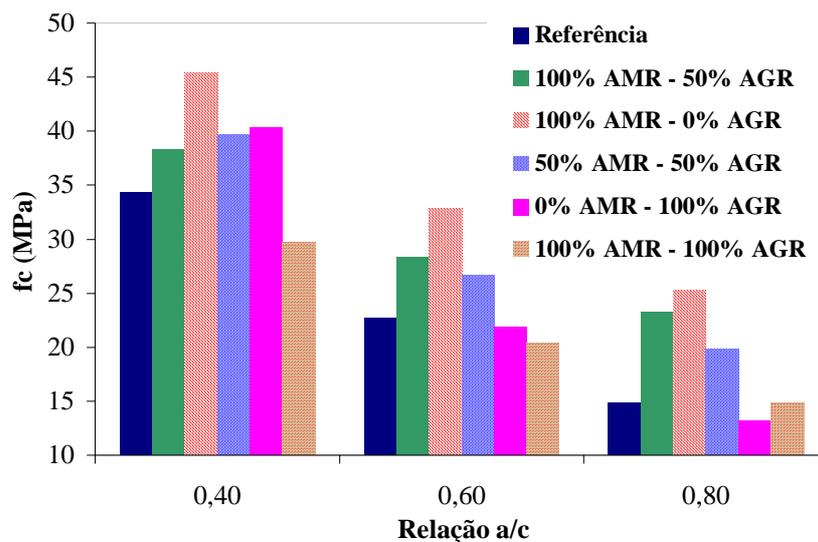


Figura 4: Resistência à compressão em função da relação a/c para os diferentes percentuais de substituição do AMR e do AGR aos 28 dias.

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 água/cimento 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 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.

Hansen (1992) avaliou resistência mecânica em suas pesquisas e encontrou uma diminuição em torno de 20% em concretos com 100% de AMR e 100% AGR, trabalhando com relação a/c baixa (0,45). A perda da resistência quando se trabalha com 100% de substituição dos agregados naturais pelos reciclados também foi constatado nesta pesquisa, embora a sua taxa máxima de redução tenha ficado em torno de 16%.

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.

Pode ser observado, também, um aumento da resistência para o traço com 100% AMR e 0% AGR, para as três relações a/c estudadas. Uma explicação para o bom desempenho desse traço pode estar associado a um fator de ordem química, devido a um possível efeito pozolânico do material cerâmico finamente moído. Leite (2001) estudou a pozolanidade de resíduos contendo material cerâmico e constatou que as amostras apresentaram índices de atividade pozolânica e que isso pode ter contribuído para o aumento das resistências nos concretos que continham altos percentuais de agregado miúdo reciclado. A autora ressalta ainda, que o aumento da resistência pode não ter sido apenas devido ao efeito pozolânico, devendo, portanto, ser estudado em outras propriedades.

3.2 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. O processo de despassivação da armadura foi medido de acordo com as recomendações da ASTM C-876/91 no ensaio de potencial de corrosão. Apesar desse ensaio (potencial de corrosão) ser um dado meramente qualitativo na avaliação da corrosão das armaduras, ou seja, com seus valores não é possível extrair informações sobre a taxa de corrosão real da armadura, suas medidas evidenciam mais claramente uma possível iniciação de atividade de corrosão nas barras.

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 utiliza-se de constantes que dependem de contribuições das reações anódicas e catódicas do processo de corrosão (B) (Casudo, 1997; Andrade et al.). 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. Este 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.

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

3.2.1 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 (Casudo, 1997). A tabela 3 apresenta os critérios de avaliação das medidas dos potenciais de corrosão.

Tabela 3: critérios de avaliação das medidas dos potenciais de corrosão de acordo com a ASTM C876.

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

(fonte: ASTM C-876/91)

O gráfico da figura 5 mostra o efeito do potencial de corrosão em função da idade e das diferentes relações água/cimento estudadas.

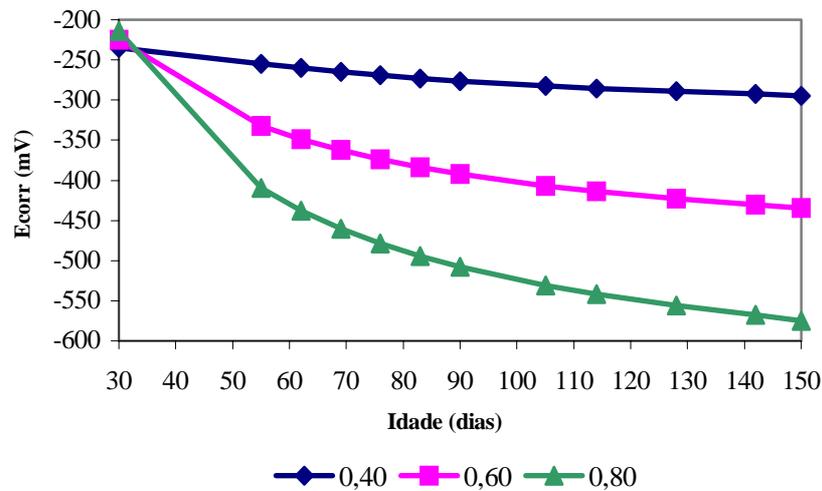


Figura 5: Potencial de corrosão em função da idade para as três relações a/c

De acordo com a figura 5, à medida que aumenta a idade, o aumento do potencial de corrosão, em valores absolutos, torna-se mais acentuado para relações a/c maiores (0,60 e 0,80). Para relação a/c = 0,80 esse aumento ficou em torno de -350 mV ao longo do período de 150 dias. Com relação a/c = 0,60 esse comportamento também foi percebido, porém com menor magnitude, na qual a variação do potencial ficou em torno de -200 mV. O aumento do potencial, para relações a/c maiores, implica diretamente na porosidade do concreto, uma vez que concretos com grande número de vazios favorecem a propagação da corrosão, pela facilidade com a qual os íons cloreto atingem a armadura e são capazes de despassivá-la.

Na figura 6 são mostrados os potenciais de corrosão para 0, 50% e 100% de agregados reciclados em função das diferentes relações água/cimento utilizadas.

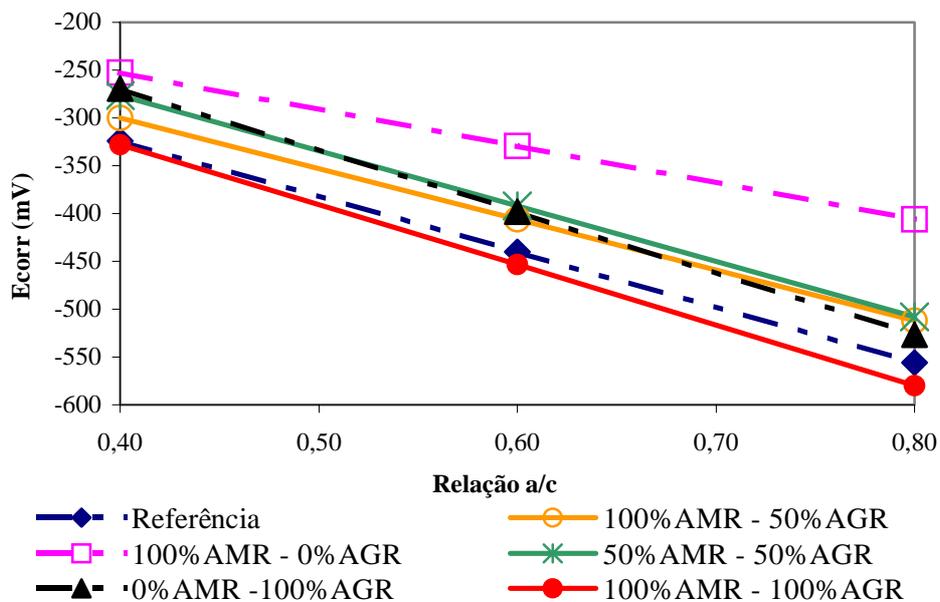


Figura 6: Potencial de corrosão para diferentes percentuais de substituição dos agregados reciclados

De acordo com o gráfico da figura 6, observa-se um melhor desempenho para o concreto com 100% AMR e 0% AGR, para todas as relações a/c estudadas. Esse mesmo traço possibilitou uma diminuição, em valores absolutos, mais significativa 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. Em percentuais médios, ou seja, com 50% de substituição dos agregados, gráudo e miúdo, os valores da resistência à compressão também foram bastante satisfatórios, situando-se acima dos valores de referência.

Para os concretos com relação a/c mais baixa (0,40) a diferença do potencial de corrosão torna-se quase irrelevante, situando-se todos os concretos produzidos praticamente numa mesma faixa de potencial (entre -250 mV e -350 mV). Essa constatação também foi comprovada pelo sistema de normalização e padronização de materiais com relação aos agregados reciclados, o B.C.S.J., citado por Hansen (1992), que afirma que o risco aliado à corrosão das armaduras de concretos produzidos com agregados reciclados diminui quando se trabalha com relações a/c menores.

3.2.2 Taxa de corrosão

A taxa de corrosão, calculada a partir da equação 2, expressa com qual velocidade está se dando o processo de corrosão. Embora não hajam 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 através da técnica de resistência de polarização. Estes valores estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3: critérios de avaliação da velocidade de corrosão

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

(fonte: Andrade e Alonso, 2001)

Na figura 7 pode ser visto o efeito da taxa de corrosão em função da idade, para as diferentes faixas de potenciais de corrosão. Nesse gráfico, os valores da taxa de corrosão variam de acordo com a idade do corpo-de-prova, independente da faixa de potencial medido. Pode ser observado também, que para uma mesma faixa de potencial de corrosão medido ao longo do tempo, as taxas de corrosão apresentaram diferentes valores. Pode acontecer de um determinado concreto apresentar valores de potenciais que acusam uma atividade de corrosão na barra, e no entanto, a mesma desenvolve processo de corrosão com velocidade diferente daquela deduzida a partir do potencial. De acordo com Andrade e Gonzalez (1978), citado por Cascudo (1997), diferentes valores de taxa de corrosão foram encontrados para um mesmo potencial medido. Os resultados obtidos nesse trabalho conferem com os resultados

das autoras citadas e reitera o fato de o potencial de corrosão ser um dado meramente qualitativo na avaliação da corrosão.

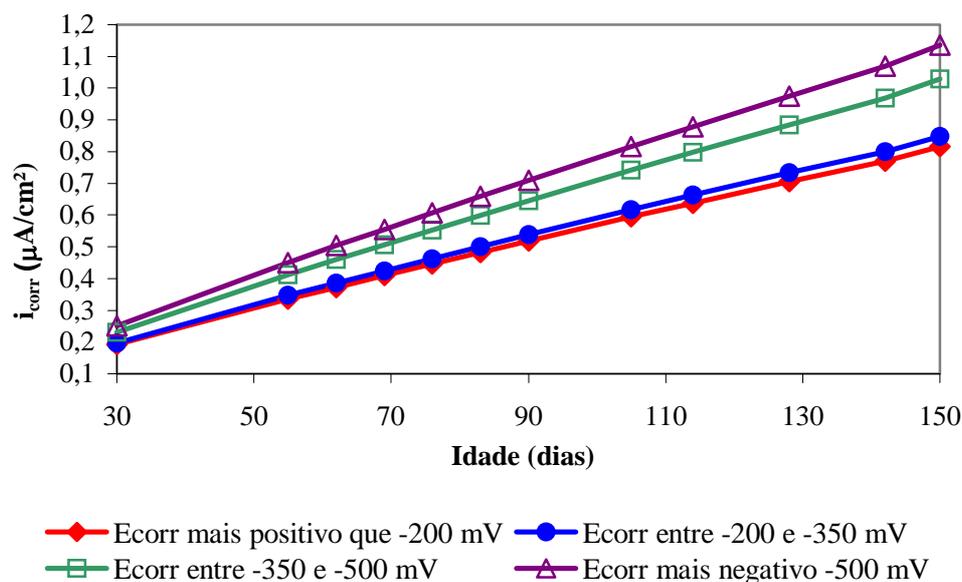


Figura 7: Taxa de corrosão em função da idade para diferentes faixas de potencial de corrosão.

No entanto, não se pode negligenciar os valores dos potenciais de corrosão medidos nos concretos ao longo do tempo. Principalmente sob a condição de que o concreto utilizado foi produzido à base de agregados reciclados, que requer um estudo mais ampliado sobre esses aspectos. É sabido que o concreto, seja ele reciclado ou não, nas primeiras idades (de 30 a 50 dias) entra num período de estabilização, possivelmente devido à formação do filme óxido que protege a armadura de agentes agressivos. Nesse período os valores dos potenciais tornam-se mais negativos que usualmente são. Isso pode ser constatado na figura 7 na qual, nas primeiras idades, os valores das taxas de corrosão estão muito próximos, apesar de terem valores de potenciais bastante diferentes. Para os concretos com idades acima de 50 dias os valores começam a entrar numa normalidade e a possibilidade de fazer uma avaliação a partir do potencial de corrosão passa a ser válida

A respeito do comportamento da utilização conjunta dos agregados reciclados numa mesma mistura de concreto, o gráfico da figura 8 apresenta o efeito da taxa de corrosão em função das três relações água/cimento utilizadas para diferentes composições de substituição dos agregados reciclados.

De acordo com a figura 8, pode-se fazer uma análise dos concretos com substituição total e parcial de agregados reciclados. Uma das considerações feitas se insere no comportamento dos traços com 100% AMR e 100% 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.

A dificuldade de moldabilidade de concretos com 100% de substituição dos agregados naturais pelo reciclado, em função da alta taxa de absorção, pode ter influenciado os resultados de durabilidade dos concretos. Pois, a porosidade do concreto, causada pela obtenção de misturas excessivamente secas na moldagem, possibilitou uma maior vulnerabilidade das armaduras que estavam sujeitas a inclusões constantes de soluções de cloreto de sódio. O resultado, foi a obtenção de altas velocidades de corrosão nas armaduras

para estes concretos, e acima dos níveis recomendados para um baixo grau de corrosão, como pode ser visualizado na tabela 3.

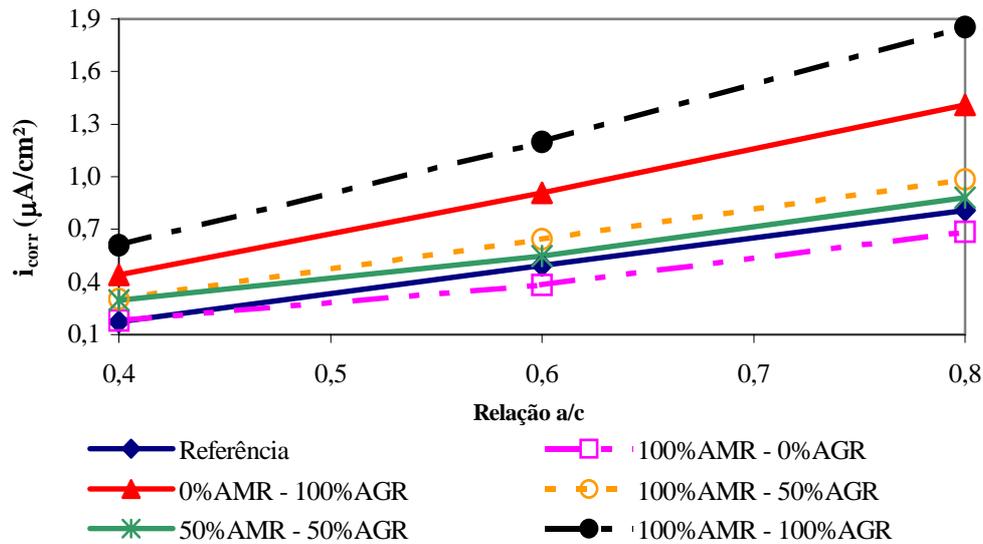


Figura 8: Taxa de corrosão em função relação a/c para os diferentes percentuais de substituição de agregados reciclados

Em contrapartida, os concretos com substituições parciais ou totais de agregado miúdo reciclado possibilitou um desempenho aceitável nas taxas de corrosão, situando-se muito próximos aos valores do concreto de referência. Para o traço com 100% AMR e 0% AGR os valores das velocidades de corrosão situaram-se abaixo dos concretos sem nenhuma substituição. Na figura 4 foi verificado que este traço apresentou valores de resistência à compressão maiores que os de referência, em função de ter grande percentual de finos e possibilitar um maior preenchimento dos vazios. Isso pode explicar o bom desempenho desses concretos frente à corrosão.

A figura 9 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, analisando-se também o efeito da combinação de ambos, total e parcial sobre a velocidade de corrosão.

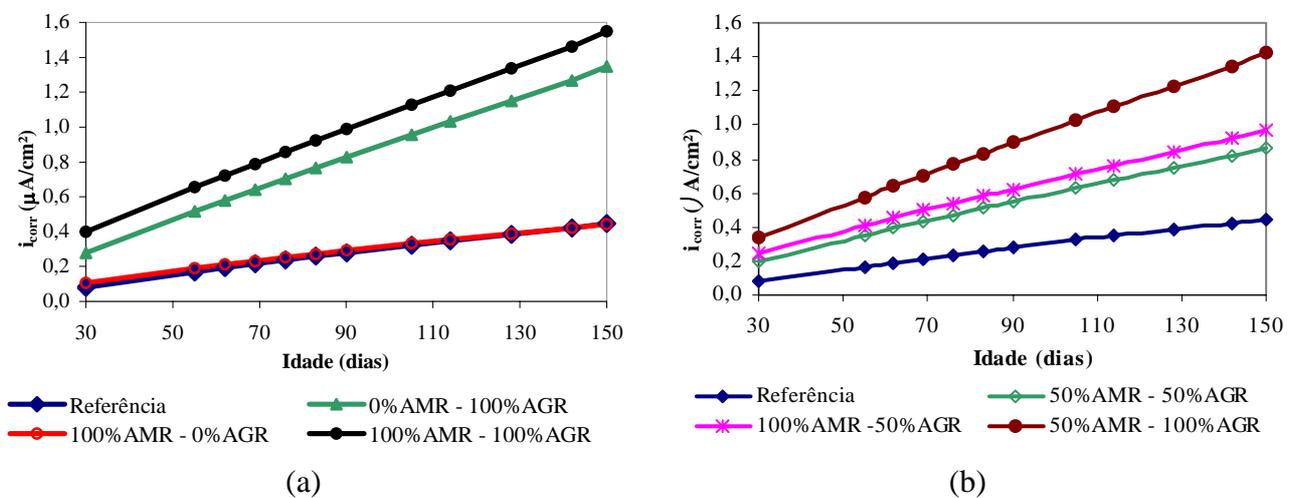


Figura 9: Taxa de corrosão em função da idade, para os diferentes teores de substituição. (a) efeito isolado do % AMR e 100% de ambos. (b) efeito da combinação do % AMR e % AGR.

De acordo com os gráficos, pode-se observar que para os traços nos quais não houve substituição do AMR e quando 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 9a). Na figura 9b também são mostrados os concretos com substituição de ambos os agregados. Nota-se que com os traços onde houve um percentual maior de substituição do AGR a corrosão ocorreu bem mais rápido que nos outros concretos, podendo concluir que o agregado graúdo reciclado não contribui para a melhoria da durabilidade de concretos reciclados frente à 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.

Deve ser enfatizado também, que a durabilidade dos concretos, reciclados ou convencionais, está sujeita a uma diminuição caso sejam utilizados concretos com relação água/cimento de 0,6 e 0,8. Pois, relações a/c altas resultam em um concreto com porosidade e permeabilidade altas, prejudicando o desempenho do concreto frente aos agentes agressivos. Dessa forma, a utilização de concreto armado com relação a/c de 0,6 e 0,8, por exemplo, só poderá ser realizada quando a finalidade estrutural não for muito exigida, em função da sua baixa durabilidade.

4. CONCLUSÕES

De acordo com as considerações feitas neste trabalho, é possível concluir que o uso do agregado reciclado no concreto, em proporções convenientemente dosadas, não afeta a resistência à compressão, tão pouco a durabilidade do concreto frente à corrosão das armaduras. Entretanto, é imprescindível que se dê importância primária para o tratamento dos resíduos, desde o beneficiamento, passando pela caracterização, até a fase de utilização dos agregados no concreto. Assim, o material utilizado fica com suas propriedades conhecidas e a sua utilização não fica limitada.

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 se constitui numa saída para minimização desses impactos. Desde que sejam tomadas medidas rigorosas na especificação, normalização e utilização desses materiais, o seu uso não ficará restrito a utilizações de pouca importância.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agência de fomento do governo brasileiro, pela bolsa concedida ao primeiro autor, cujo projeto desenvolvido resultou neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

Ajdukiewicz, A. e Kliszczewicz, A. The Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cemente & Concrete Composites*. v. 24, p. 269-279, (2002).

American Society for Testing and Materials. *Annual book of ASTM Standards*. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM C 876-91. Philadelphia, 6 p. (1991).

Andrade, C. e Alonso, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*. v.15, p. 141-145, (2001).

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).

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. NBR 7223. Rio de Janeiro, (1982).

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

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

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; CEF, 311 p. (2001).

John, V.M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. São Paulo, 113 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, (2000).

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

Metha, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 573 p. (1994).

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

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

Pinto, T. P. *Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas*. São Carlos, 140p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos – Universidade de São Paulo, (1986).

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

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

Vazquez, E. Aplicación de nuevos materiales reciclados en la construcción civil. In: *Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, 4., São Paulo. Anais... São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 11-21, (2001).