

Durabilidade de Compósitos de Concreto de Cimento Portland Produzidos com Agregados Reciclados da Construção Civil

D. F. Oliveira^{1*}, V. S. Santos², H. L. Lira², A. B. Melo³, G. A. Neves²

¹Departamento de Química – Universidade Estadual da Paraíba, Rua Juvêncio Arruda, s/n, Bodocongó,
CEP 58.109-790, Campina Grande – PB

²Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, CEP
58109-970, Campina Grande – PB

³Departamento de Arquitetura - Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária
CEP 58059900 – João Pessoa, PB - Brasil - Caixa-Postal: 350

(Recebido em 11/09/2006; revisado em 19/09/2006; aceito em 24/10/2006)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

O processo de urbanização nas grandes cidades gera um expressivo aumento de resíduos de construção e demolição acarretando vários problemas para a sociedade e o meio ambiente. Eliminar a nociva deposição nos rios e nas vias públicas tem sido o grande desafio nas pesquisas sobre sua reciclagem, seguindo o princípio do desenvolvimento sustentável. Investir na reciclagem do entulho da construção civil, voltada para a pré-fabricação é um passo importante na direção da construção limpa. Este trabalho avalia o envelhecimento acelerado de amostras de concreto confeccionados com a adição de entulho, com base em ensaio de molhagem e secagem, tendo a variação da resistência à compressão como indicador de degradação. Apresentam-se alguns resultados que discutem limites aos teores incorporados e as características dos entulhos avaliados. O compósito alternativo com 60% de entulho destaca-se pela menor degradação e pelo que melhor evidencia o efeito pozzolânico, devido à presença de material cerâmico.

Palavras-chave: Reciclagem; entulho; concreto; durabilidade; envelhecimento acelerado

Abstract:

The urbanization process in the big cities produce an expressive increase of residue from civil construction and demolition that can generate several problems to the society and environment. To eliminate these unsafe depositions in the river and in the public roads has been a great challenge in researches about recycling, following the principle of sustainable development. Investments in the recycling of residue from civil construction, intended for the pre-fabrication is an important step in the direction of clean construction. This work evaluate the accelerated weathering of concrete samples make with residue addition, based on the wetting and dry test. The variation of compression strength is used as indicator of desegregation. Some results indicate the limits of incorporated content and the characteristics of the studied residues. The alternative composite with 60% of residue showed the smallest degradation and the best pozzolanic effect, due to the presence of ceramic material.

Keywords: Recycling; waste; concrete; accelerated weathering

* E-mail do autor: djaneufcg@yahoo.com.br (D. F. Oliveira)

1. Introdução

Um dos grandes problemas enfrentados atualmente pela indústria da construção civil é o desperdício de materiais, gerando volume de entulho que é quase o dobro do volume de resíduos sólidos urbanos. Este entulho quando reciclado pode gerar agregados com propriedades adequadas e custos inferiores aos preços médios de mercado. Vários estudos realizados têm comprovado a viabilidade no aproveitamento destes resíduos na própria construção civil, desde que se estabeleça uma metodologia adequada [1-3].

A reciclagem de resíduos é uma importante alternativa para a preservação ambiental e a construção civil é um dos setores com maior potencial para absorver esses resíduos. Vários tipos deles podem ser reaproveitados na atividade de engenharia, podendo originar materiais alternativos. Para isso, é condição fundamental a avaliação do comportamento dos materiais alternativos, com resíduos incorporados, dentro dos princípios de durabilidade exigidos pelas necessidades dos usuários. Este preceito é o objetivo de uma ampla pesquisa que está sendo desenvolvida no Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande, a qual avalia o aproveitamento de entulho da construção civil na confecção de blocos de concreto. O presente trabalho apresenta uma parte das análises iniciais dessa pesquisa, que pretende ser uma contribuição para o estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com entulho da construção civil.

Tem-se em vista que quando se pretende trabalhar com materiais alternativos, como por exemplo, o caso dos resíduos sólidos (entulho), é muito importante a etapa de avaliação da durabilidade para verificar as possíveis incompatibilidades entre os materiais e as suas reações frente às situações normalmente encontradas na prática, ao longo da vida útil.

O processo de desenvolvimento de um novo produto deve resultar em uma tecnologia pronta para ser utilizada, pois a abordagem eminentemente tecnológica é insuficiente no seu desenvolvimento, especialmente no caso do aproveitamento de resíduos. A eventual presença de compostos agressivos misturados aos resíduos sólidos pode não afetar o comportamento tecnológico do material, mas pode expor os futuros usuários a riscos de saúde ou a prejuízos devido à baixa qualidade do produto alternativo proposto. Neste sentido, é condição fundamental a estimativa do comportamento do novo

produto dentro dos princípios de avaliação de desempenho.

Considerando a complexidade dos mecanismos de degradação, a prolongada vida útil dos produtos da construção civil e o elevado custo das obras civis, a avaliação da durabilidade é certamente o aspecto mais importante do desenvolvimento de um novo material [4].

Na avaliação de desempenho propõe-se que o novo material, bloco de concreto alternativo com presença de entulho, com e sem revestimento (com e sem proteção), deve ser durável, quando exposto às condições externas típicas dos efeitos da chuva e do sol. A simulação dessa situação pode ser feita através de ensaios acelerados de molhagem e secagem.

Para avaliação da durabilidade é possível recorrer a três metodologias: ensaios de envelhecimento acelerado, ensaios de envelhecimento natural e estudos de deterioração em uso; sendo apresentado neste trabalho apenas alguns resultados obtidos com o ensaio de envelhecimento acelerado.

Os ensaios de envelhecimento acelerado envolvem a exposição do material a elevadas concentrações do fator de degradação ou a temperaturas mais elevadas que favorecem a taxa de reação química. Como na maioria das vezes a correlação destes resultados com os de envelhecimento natural é difícil, sua maior utilidade é comparativa. Não é possível projetar um método de envelhecimento acelerado sem o conhecimento prévio e preciso dos fatores de degradação relevantes[4].

Os indicadores de degradação são as propriedades mensuráveis utilizadas para medir o avanço da queda de desempenho do produto em uso. A seleção desse indicador é etapa importante do estudo, pois deve ser de fácil mensuração e preferencialmente correlacionado com o desempenho. Após cada período de degradação deveriam ser repetidos todos os ensaios e avaliações de desempenho relativo às demais necessidades dos usuários, mas este procedimento é dispendioso e desnecessário, porque na maioria das vezes a degradação afeta apenas o desempenho relativo a algumas necessidades [4].

O estudo da durabilidade apresentado neste trabalho considera a presença de entulho na elaboração de concretos que sempre são comparados com o concreto convencional (sem entulho), utilizando o método de envelhecimento acelerado a partir do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem de solo-cimento da Norma da ABNT – NBR 13554/96. O procedimento de fazer a comparação entre resultados de amostras protegidas e não

protegidas do fator de degradação (molhagem/secagem) foi adotado como forma de minimizar o problema de subestimar os efeitos do processo de degradação no curto prazo [4].

2. Metodologia

Para realização da pesquisa utilizaram-se os seguintes materiais, além da água potável fornecida pela concessionária local:

Cimento Portland: adotou-se o tipo CP II Z 32 da marca Zebu, facilmente encontrado no comércio local (Campina Grande/PB). A massa específica é $2,94\text{g/cm}^3$ e o Blaine é $3.845\text{cm}^2/\text{g}$.

Agregados naturais: como agregado miúdo procurou-se usar uma areia natural (Rio Paraíba) que tivesse granulometria média e um teor de material fino adequado à fabricação de pré-moldados. Para isso, buscou-se obter um teor não inferior a 50% de material retido nas peneiras de malha 100 (abertura 0,15mm) e 50 (abertura 0,30mm). A partir do ensaio de granulometria obteve-se $D_{\text{máx}}=2,4\text{mm}$ e módulo de finura (MF) igual a 2,24. Como agregado graúdo utilizou-se o pedrisco ($D_{\text{máx}}=9,5\text{mm}$ MF=5,03) que foi escolhido a partir de algumas amostras obtidas nas pedreiras locais, sendo importante que o mesmo não tivesse muito pó depositado nas partículas.

Entulho: o entulho da construção civil utilizado neste estudo foi proveniente de obras de edificações da cidade de Campina Grande/PB. Considerando a variabilidade do agregado de entulho em função de sua origem (demolição, reforma ou construção), decidiu-se trabalhar apenas com entulho de construção. Para isso, foram coletadas amostras de entulho de edifício residencial, com 12 pavimentos, padrão "A", que tinha estrutura executada em concreto armado e a vedação dos vãos com tijolos cerâmicos de 8 furos, seguido de revestimento argamassado internamente (as áreas molhadas com revestimento cerâmico) e revestimento cerâmico nas fachadas. O entulho coletado representa o resíduo

gerado na fase intermediária entre elevação de alvenaria nos pavimentos e aplicação de acabamento externo. Na Tabela 1 ver-se a composição do entulho avaliado neste trabalho.

O beneficiamento do resíduo consistiu em triturar algumas porções para produzir agregado alternativo de modo a obter uma granulometria com $D_{\text{máx}}=9,5\text{mm}$. Nessa etapa, foi estudada a alternativa mais otimizada de aproveitamento do entulho sem retirar a parte miúda, como forma de reduzir os custos de beneficiamento do resíduo. Assim, foram feitas substituições do total de agregados nas dosagens pelo entulho triturado, com apenas a limitação de que o diâmetro máximo ($D_{\text{máx}}$) do agregado de entulho deveria ser igual ao $D_{\text{máx}}$ do agregado graúdo natural (pedrisco). Dessa forma, as substituições foram estabelecidas como sendo 30%, 60% e 100% em relação à massa total dos agregados naturais (areia e pedrisco). A proporção entre os dois agregados naturais (areia e pedrisco) sempre permaneceu na relação de 50%, determinada experimentalmente como a mistura mais compacta entre os agregados secos.

Tabela 1 – Composição do entulho

Componente Reciclado	%
Cerâmica	49,21
Argamassa	39,41
Concreto	6,17
Pedras	4,73
Cerâmica Polida	0,17
Outros	0,31

Foi estabelecido o traço 1:4 para moldar amostras com concreto convencional (sem entulho) e com concreto alternativo (com entulho 30%, 60% e 100%), como apresenta a Tabela 2. Optou-se por trabalhar com consistência seca dos compósitos que é aquela mais adequada para fabricação de certos tipos de pré-moldados.

Tabela 2 – Identificação das amostras ensaiadas em função dos traços (em massa)

		1 : m	
		1 : 4	
		1 : a : p :	a/c
E0		1 : 2 : 2	0,37
Teor de entulho nas misturas		1 : a : p : e	
E30	30 %	1 : 1,4 : 1,4 : 1,2	0,47
E60	60 %	1 : 0,8 : 0,8 : 2,4	0,60
E100	100 %	1 : 0,0 : 0,0 : 4,0	0,72

m = total de agregados; a = areia; p = pedrisco; e = agregado de entulho triturado

Os corpos-de-prova foram confeccionados em moldes cilíndricos com dimensões 5cm x 10cm, segundo a Norma da ABNT – NBR 5738/94[5]. Logo após a moldagem, eles foram colocados juntamente com os moldes dentro da câmara úmida com temperatura em torno de 23°C e umidade relativa maior que 95%. No dia seguinte, após a moldagem, os corpos de provas foram colocados imersos em tanques com água e cal para continuar o regime de cura até a idade de controle.

A metodologia adotada no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem foi uma adaptação da Norma da ABNT- NBR 13554/96[6], que se refere à avaliação para solo-cimento. Nesta norma é indicada a necessidade de medir propriedades, tais como, a variação do volume, a variação de umidade e a perda de massa das amostras como fatores de envelhecimento. Em se tratando de compósitos de concreto decidiu-se acrescentar a essa metodologia a determinação da resistência à compressão simples e absorção de água, havendo sempre comparações entre amostras protegidas e não protegidas dos fatores de envelhecimento.

O ensaio consistiu em moldar 14 corpos-de-prova para cada composição, representando no total 56 corpos-de-prova ensaiados.

Dos 14 corpos-de-prova ensaiados para cada composição, 6 serviram para representar o desempenho das amostras protegidas do fator de degradação, enquanto 8 amostras foram submetidas ao ensaio de envelhecimento por molhagem e secagem, nas quais 4 foram utilizados para obter as variações de volume e umidade, sendo posteriormente utilizados para avaliação da resistência a compressão simples e absorção, os 4 restantes foram utilizados para a obtenção da perda de massa.

Para calcular as variações de volume ocorridas nos corpos-de-prova entre o final da moldagem e os volumes obtidos após cada etapa e expressá-las em porcentagem do volume inicial utilizou-se a equação (1).

$$\delta_{V,n} = \frac{V_i - V_n}{V_i} \times 100 \quad (1)$$

onde:

$\delta_{V,n}$ = variação de volume do corpo-de-prova em cada etapa, em %;

V_i = volume inicial do corpo-de-prova determinado na desmoldagem, em cm³;

V_n = volume do corpo-de-prova em cada etapa, em cm³.

A variação de volume da composição para cada etapa (ciclo) foi obtida pela média dos 4 corpos-de-prova.

Para calcular as umidades ocorridas nos corpos-de-prova entre os ciclos de molhagem e secagem obtidos após cada etapa utilizou-se a equação (2).

$$\delta_{h,n} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

onde:

$\delta_{h,n}$ = umidade do corpo-de-prova em cada etapa, em %;

M_u = massa úmida do corpo-de-prova em cada ciclo, em gramas;

M_s = massa seca do corpo-de-prova em cada ciclo, em gramas.

A umidade da composição para cada etapa (ciclo) foi obtida pela média dos 4 corpos-de-prova.

OBS: O 7º ciclo corresponde à absorção do compósito.

Para calcular a perda de massa dos corpos-de-prova no fim dos ciclos de molhagem e secagem foi necessário obter a quantidade relativa de água nos corpos-de-prova destinados a avaliação da variação do volume e utilizou-se a equação (3).

$$A_n = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

onde:

A_n = água retida no corpo-de-prova;

M_f = massa seca final do corpo-de-prova após atingir massa constante, em gramas;

M_i = massa seca inicial do corpo-de-prova calculada na moldagem, em gramas.

A água retida A_n foi obtida pela média das 4 medidas.

Para corrigir as massas secas dos corpos-de-prova selecionados para a obtenção da perda de massa teve-se que descontar a água que reagiu com o cimento durante o ensaio e que ficou retida no corpo-de-prova, conforme a equação (4).

$$M_{fc} = \frac{M_f}{A_n + 1,00} \times 100 \quad (4)$$

onde:

M_{fc} = massa seca final corrigida dos corpos-de-prova, em gramas;

M_f = massa seca final do corpo-de-prova após atingir massa constante, em gramas;

A_n = água retida no corpo-de-prova;

Para o cálculo da perda de massa dos corpos-de-prova como porcentagem da massa seca inicial utilizou-se equação (5).

$$P_n = \frac{M_i - M_{fc}}{M_i} \times 100 \quad (5)$$

onde:

M_i = massa seca inicial calculada na moldagem do corpo-de-prova, em gramas;

M_{fc} = massa seca final corrigida dos corpos-de-prova, em gramas;

P_n = perda de massa do corpo-de-prova em %.

A perda de massa de cada composição foi obtida pela média dos 4 corpos-de-prova utilizados.

A resistência à compressão simples foi determinada segundo as recomendações da Norma da ABNT-NBR 5739/94[7]. Para a depuração dos resultados de resistência à compressão simples (f_c) obtido para cada mistura foi aplicado o critério de "Chauvenet". A aplicação desse critério significa que, em uma série de medidas, a probabilidade de ocorrência de um desvio de valor "x" é menor que $1/2n$, conforme a fórmula $P_x < 1/2n$. Para avaliar a evolução da resistência mecânica das dosagens, utilizaram-se 4 corpos-de-prova, ou seja, "n" = 4 e, portanto, $P_x = 0,125$ (desvio máximo de 12,5%). Dessa forma, foram rejeitados aqueles valores que tiveram desvio máximo de $\pm 12,5\%$.

3. Resultados e Discussão

Os dados obtidos com a variação do volume não foram significativos de modo a permitir conclusões consistentes, tendo em vista a impossibilidade de estabelecer um padrão de comportamento para as amostras. Portanto, para efeito deste trabalho, não será feita análise sobre a variação de volume das amostras em função dos ciclos de envelhecimento a que foram submetidas.

Os valores da umidade para todas as amostras de cada composição podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Umidade (%) dos corpos-de-prova para cada composição.

	E0	E30	E60	E100
Ciclo 0	9,61	9,48	10,95	13,98
Ciclo 1	6,95	7,19	7,99	11,56
Ciclo 2	6,85	7,44	8,53	11,69
Ciclo 3	6,84	7,48	8,85	11,68
Ciclo 4	6,51	6,86	7,88	10,94
Ciclo 5	6,57	6,94	8,15	11,38
Ciclo 6	6,68	7,23	8,65	11,87

A Tabela 4 apresenta os resultados da absorção tanto das amostras protegidas do fator de degradação como das amostras que sofreram ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 4 – Resultados de absorção (%) dos corpos-de-prova para cada composição, conforme os ciclos de envelhecimento por molhagem e secagem.

	E0	E30	E60	E100
Envelhecimento	7,09	7,80	9,29	12,32
Normal	8,91	9,85	11,24	12,35

Observando os valores da absorção da Tabela 4 percebe-se um crescimento à medida que é aumentada a quantidade de entulho nas amostras, fato este esperando devido a grande absorção dos materiais constituintes do entulho (argamassa, tijolos, etc.). Percebe-se um valor menor da absorção das amostras que sofreram o processo de degradação em relação às amostras que foram protegidas do fator de degradação. Pode-se dizer que até certo ponto as condições do ensaio de molhagem e secagem aceleram as reações do cimento, melhorando assim as qualidades do compósito. Em seguida prevalece o processo de degradação do compósito, fato este observado na Tabela 3 na qual há um decréscimo do valor da umidade até o 4º ciclo, evidenciando uma melhoria nas qualidades do compósito passando em seguida a apresentar valores maiores a este evidenciando assim o processo de degradação.

Os valores da perda de massa para cada composição podem ser observados na Figura 1.

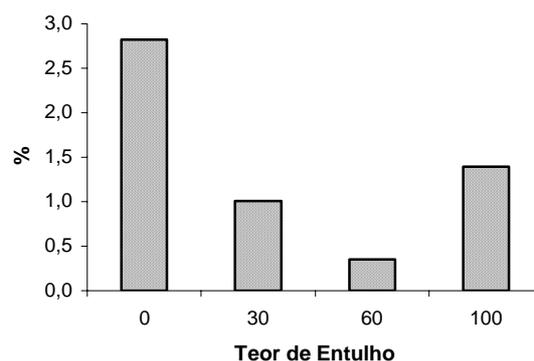


Figura 1. Perdas de massa das amostras.

Observa-se à medida que é incorporado entulho nas composições a perda de massa tende a diminuir. Isso se deve ao provável efeito pozolânico presentes no material cerâmico do entulho triturado na qual tende a melhorar a qualidade do compósito. Esse efeito parece

ser diferente para a composição com 100% de entulho. Nota-se que os valores das perdas de massas dos compósitos com concreto alternativo são sempre inferiores ao compósito com concreto convencional (sem entulho).

Os valores da resistência à compressão simples (f_c) ocorrida para cada composição, tanto das amostras que sofreram degradação como para as que não sofreram, podem ser observados na Figura 2.

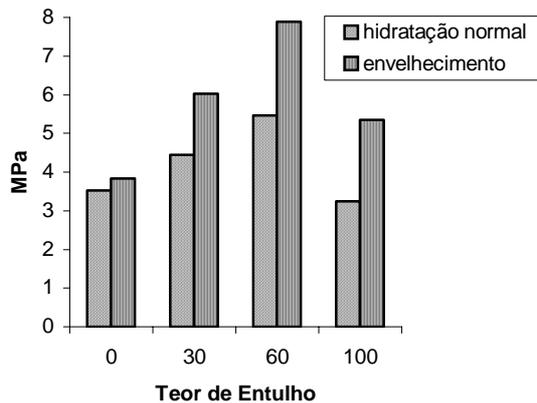


Figura 2. Resistência à compressão simples das amostras.

Analogamente aquilo que ocorreu com o resultado da absorção, o valor da resistência a compressão simples (f_c) das amostras que sofreram degradação são maiores daquelas que permaneceram no processo de cura.

Assim as condições de ensaio aceleram (devido ao aumento de temperatura até 71°C) as reações de hidratação do cimento anidro ainda presente nas amostras, resultando em um ganho rápido de resistência à compressão. A partir de certo ponto, o início do processo de envelhecimento (degradação) passa a governar o comportamento das amostras, reduzindo as resistências a valores sempre inferiores quando comparados às amostras protegidas do fator de degradação (hidratação normal);

Outra constatação interessante é que à medida que aumenta a quantidade de entulho o valor da resistência aumenta, evidenciando assim uma melhoria da qualidade do compósito, fato análogo constado na avaliação da perda de massa.

4. Conclusões

Considerando os resultados da resistência a compressão simples, a perda de massa e a absorção das amostras ensaiadas podem-se concluir que:

Os valores da perda de massa das amostras tendem a diminuir na medida que é aumentada a quantidade de entulho nas amostras. Todas as amostras com concreto

alternativo apresentaram valores da perda de massa inferiores às amostras com concreto convencional.

Os valores da resistência a compressão simples (f_c) tendem a crescer na medida em que é adicionado entulho nas composições (fato não observado no compósito com 100% de entulho). O motivo dos valores das amostras que sofreram degradação serem maiores do que as amostras que permaneceram no processo é devido às condições do ensaio que aceleram a taxa de reação do cimento anidro. Sendo assim é necessário um número maior de ciclos para que assim possamos evidenciar a degradação do compósito. Vale-se constatar que quase todas as amostras com concreto alternativo apresentaram valores de resistência a compressão simples (f_c) superiores as amostras com concreto convencional.

A absorção tende a aumentar na medida em que é incorporado entulho nas amostras. Isso era esperado devido à presença de matérias de alta absorção no entulho (argamassa moída, material cerâmico, etc.).

À medida que é incorporado entulho nas composições percebe-se uma nítida melhoria na qualidade do compósito. Isto devido ao provável efeito pozolânico presente no material cerâmico no entulho triturado. Esse efeito parece ser diferente em função da quantidade de entulho presente nas composições.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Rede de Catalise Norte/Nordeste – RECAT e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] Carmago, A. Reciclagem nas Minas de Entulho, *Techne* n° 15 mar/abril, 1995 p15 a p18. Editora PINI. São Paulo. SP;
- [2] Levy, S. M. Reciclagem do Entulho na Construção Civil, para Utilização como Agregado de Argamassa e Concreto. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. 1997. 146p;
- [3] Zordan, S. E. A Utilização do Entulho como Agregado na Confecção do Concreto. Campinas: Departamento de Saneamento e Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Dissertação de Mestrado, 1997;
- [4] John, v. M., Agopyan, v. & Prado, T. A. Durabilidade de Compósitos de Cimentos e Fibras Vegetais. III Seminário Internacional Durabilidade de Materiais, Componentes e Estruturas. PCC-

USP São Paulo, Julho/1997;

- [5] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto , NBR 5738, (1994).
- [6] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Solo-cimento – Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem – Método de Ensaio, NBR 13554, (1996);
- [7] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos, NBR 5739, (1994).