

Influência do Grau de Compactação na Permeabilidade de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) Produzidos em Paudalho-PE

SILVA, Elisson P.

Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil,
elisson.pereira@live.com

SANTOS, Eder C. G.

Escola de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil,
edersantos@ufg.br

RESUMO: Nas grandes cidades brasileiras, os resíduos de construção e demolição (RCD) chegam a representar mais de 50% da massa total dos resíduos sólidos urbanos. Neste cenário, diversos estudos já comprovaram que os RCD possuem alto potencial de reciclagem. No entanto, as aplicações mais consolidadas atualmente mostram-se insuficientes para esgotar sozinhas todo o RCD gerado. Com a proposta de verificar a aplicação desses resíduos em obras geotécnicas, este estudo caracterizou os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) produzidos em uma usina de beneficiamento e investigou a sua permeabilidade mediante a variação do grau de compactação. Também foram realizadas análises de composição gravimétrica para determinação dos constituintes dos RCD recebidos na mesma usina de beneficiamento. Os resultados revelaram que os RCD-R analisados apresentaram propriedades geotécnicas e valores de coeficientes de permeabilidade muito próximos aos dos materiais naturais, o que justificaria sua aplicação em diversos tipos de obras geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos de Construção e Demolição, Reciclagem, Permeabilidade, Índice de Vazios.

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos é um fator inerente à atividade humana. Desde os tempos antigos, os resíduos vêm sendo gerados como produto das transformações do meio pelo homem. Entretanto, essa geração sempre se deu em pequena escala. Após a Revolução Industrial, houve a intensificação dos processos produtivos, que, somado ao crescimento populacional e a má utilização dos recursos naturais, tem feito com que a produção de resíduos alcance volumes preocupantes (SANTOS, 2007).

Atualmente, os centros urbanos podem ser vistos como verdadeiros pólos de geração de resíduos. Segundo Pinto (1999), os resíduos de

construção e demolição (RCD) representam cerca de 40 a 70% da massa total dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em algumas cidades brasileiras.

Diversas universidades e centros de pesquisa têm realizado estudos mostrando que os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) podem ser aplicados como agregados para argamassas e concretos sem função estrutural, em camadas de pavimentação e em aterros (SANTOS, 2011). Contudo, essas aplicações por si só se mostram incapazes de consumir todo o RCD gerado.

Diante disso, é preciso que novas perspectivas para a utilização dos RCD-R sejam avaliadas. Esta prática reduziria a exploração de jazidas minerais, atividade esta que provoca o

desmatamento de extensas áreas, contamina rios, causa a exposição de aquíferos e poluição atmosférica, entre outros (SANTOS, 2007).

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

2.1 Histórico e Geração de RCD

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são os resíduos resultantes da preparação (limpeza) e escavação de terrenos, obras de terraplenagem, construção, manutenção, reforma, demolição e quaisquer etapas que possam envolver a atividade construtiva.

Existem registros da utilização de alvenaria britada pelos romanos para produzir concreto. Já os fenícios, por sua vez, utilizavam-se de agregados reciclados em camadas de pavimentos por volta de 700 anos a.C. (SCHULZ & HENDRICKS, 1992 *apud* LEITE, 2001).

Contudo, só após a Segunda Guerra Mundial a reciclagem de RCD assumiu escalas industriais. Vários países na Europa encontravam-se com uma elevada quantidade de resíduos no cenário pós-guerra. Esse fator, somado à escassez de recursos, obrigou-os a investir em reciclagem, o que culminou no aprimoramento das técnicas até então conhecidas (AFFONSO, 2005). Estima-se que, na ocasião, a Alemanha apresentava entre 400 e 600 milhões de metros cúbicos de entulho (LEITE, 2001).

Outros fatores também contribuíram para a realização de pesquisas e o desenvolvimento da reciclagem dos RCD. A depender da região, dificuldades como escassez de matérias-primas, o distanciamento entre as jazidas minerais e as construções e a falta de espaço no perímetro urbano para a disposição final dos resíduos foram decisivas para o desenvolvimento de técnicas de reciclagem de RCD.

2.2 Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R)

Chamam-se resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) os RCD que foram

submetidos a um processo de beneficiamento e que podem ser aplicados como material de construção.

Segundo a Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 'beneficiamento' é '[...] o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-lo de condições que permitam que seja utilizado como matéria-prima ou produto'.

O processo de beneficiamento de RCD consiste, basicamente, nas seguintes etapas:

- Pesagem;
- Inspeção;
- Triagem;
- Trituração;
- Peneiramento; e
- Estocagem.

É importante destacar que a presença de solo (fração que passa na peneira de 4,8 mm) no RCD-R pode ser bastante expressiva, o que pode justificar o seu emprego em obras geotécnicas. No entanto, em alguns casos, é imprescindível que esse material apresente coeficientes de permeabilidade adequados. Por essa razão, além dos ensaios de caracterização, também foram realizados ensaios de permeabilidade com diferentes graus de compactação (GC) das amostras de RCD-R.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista que a proposta desta pesquisa é a aplicação do RCD-R em obras geotécnicas, as amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização de solos, conforme os procedimentos recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com o uso das seguintes normas:

- NBR 6457/1986 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise granulométrica;
- NBR 6508/1984 – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica;

- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do limite de liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do limite de plasticidade;
- NBR 7182/1986 – Solo – Ensaio de compactação.

Os ensaios de compactação foram realizados com o emprego da energia de Proctor Intermediário e sem reuso do material ensaiado.

Os RCD-R analisados neste estudo foram coletados em uma usina de reciclagem localizada na cidade de Paudalho – PE, num total de 03 (três) amostras, conforme mostra a Tabela 1. Para tanto, consultou-se os procedimentos de coleta sugeridos pela ABNT, por meio das normas NBR 10007/2004 - que trata dos procedimentos para amostragem de resíduos sólidos - e NBR NM 26 - que trata dos procedimentos para a amostragem de agregados.

Tabela 1. Cronograma de coleta das amostras de RCD-R.

Amostra	Data de coleta	Quantidade (kg)
RCD-R 01	08/03/2013	114,87
RCD-D 02	05/06/2013	167,41
RCD-D 03	04/07/2013	96,24

Tendo em vista que a composição gravimétrica está entre os fatores que podem influenciar as propriedades do RCD e seus produtos, foram coletadas 03 (três) amostras para análise dos materiais constituintes do RCD ao chegar à usina de reciclagem (FIGURA 1).



Figura 1. Amostras de RCD coletadas para determinação da composição gravimétrica.

A Tabela 2 apresenta os dados das amostras de RCD coletadas para análise de composição gravimétrica.

Tabela 2. Dados das amostras de RCD coletadas para a caracterização gravimétrica.

Amostra	Data de coleta	Quantidade (kg)
RCD 01	08/03/2013	75,47
RCD 02	08/03/2013	77,79
RCD 03	08/03/2013	73,95

3.1 Ensaio de Permeabilidade

Visto que o RCD-R analisado apresentou características de um material predominantemente arenoso, utilizou-se o permeâmetro de carga constante para os ensaios de permeabilidade, em conformidade com a NBR 13292/1995.

Para avaliar o comportamento hidráulico dos RCD-R mediante a variação do grau de compactação (GC), optou-se por realizar três ensaios de permeabilidade com valores de GC distintos para cada amostra de RCD-R.

Os GC adotados como referência foram 75%, 85% e 95%, sendo o mesmo definido pela Equação 1.

$$GC = \frac{\rho_d}{\rho_{d\text{ máx}}} \times 100 \quad (1)$$

Os valores de GC próximos a 75% foram obtidos por simples deposição do material no permeâmetro, sem altura de queda, evitando-se que a amostra sofresse qualquer processo de compactação.

Para a obtenção das amostras com GC próximos a 85%, dividiu-se o corpo de prova em 5 (cinco) camadas de 39 mm cada, totalizando uma altura de 195 mm. Em cada camada foram aplicados 40 (quarenta) golpes de soquete (FIGURA 2) com peso aproximado de 4,3 kg, com uma altura de queda de 30 mm.

Na preparação das amostras com GC próximos a 95%, dividiu-se o corpo de prova em 10 (dez) camadas de 19,5 mm cada, conferindo ao corpo de prova uma altura total de 195 mm. Em cada camada, foram aplicados 60 (sessenta) golpes utilizando-se do mesmo soquete, com uma altura de queda de 30 mm.



Figura 2. Soquete utilizado na compactação dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade.

Todos os RCD-R foram secos em estufa antes de serem compactados, uma vez que esta condição favorecia o controle da compactação. A Figura 3 apresenta o permeâmetro contendo a amostra de RCD-R para a determinação do coeficiente de permeabilidade à carga constante.



Figura 3. Permeâmetro contendo a amostra de RCD-R para o ensaio de permeabilidade à carga constante.

De forma a garantir que as amostras estivessem o mais próximo da condição de saturação possível para a realização dos ensaios, as mesmas foram submersas previamente em água por um tempo mínimo de 24 horas. O processo de saturação se deu por fluxo ascendente, de modo a eliminar o máximo de ar dos vazios existentes nos corpos de prova.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Análise de Composição Gravimétrica

Observou-se que a participação de concreto teve

um valor médio de 53,33%, com coeficiente de variação de 7,58%. Este pode ser um indicativo de que os resíduos ensaiados foram provenientes de atividades de demolição. O percentual de solo (fração passante na peneira de 4,8 mm) também foi bastante significativo, apresentando um valor médio de 31,67%, com coeficiente de variação de 4,82%. Os resultados das análises de composição gravimétrica são apresentados nas Figuras 4 a 6.

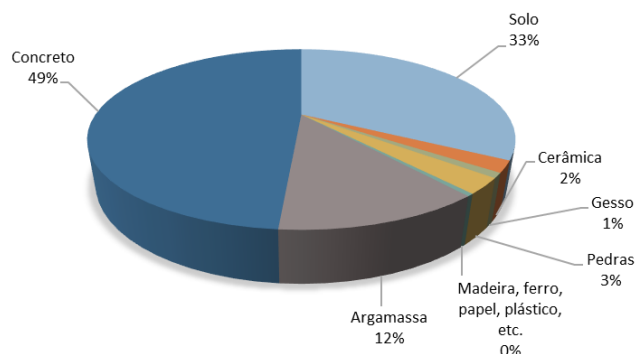


Figura 4. Composição gravimétrica do RCD 01.

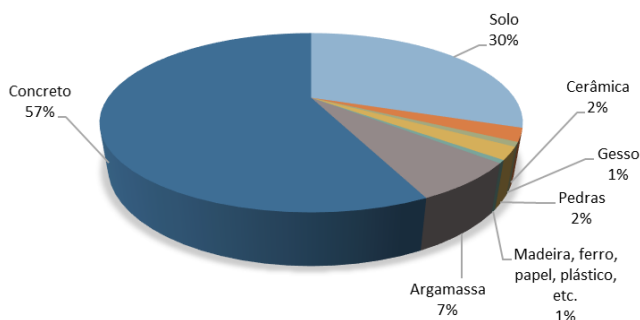


Figura 5. Composição gravimétrica do RCD 02.

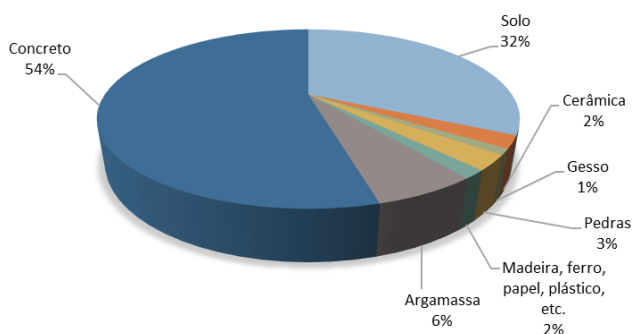


Figura 6. Composição gravimétrica do RCD 03.

Verificou-se que o percentual médio de materiais indesejáveis, como metais, madeira,

plásticos, papel, etc. não excedeu os 2%.

4.2 Análise Granulométrica

A análise granulométrica das amostras de RCD-R revelou curvas bastante semelhantes. Santos (2007) afirma que este fato pode ser explicado pela padronização do processo de beneficiamento dos RCD. De acordo com a ABNT, os RCD-R ensaiados podem ser classificados como uma areia com pedregulhos. Os resultados dos ensaios de análise granulométrica estão apresentados na Figura 7.

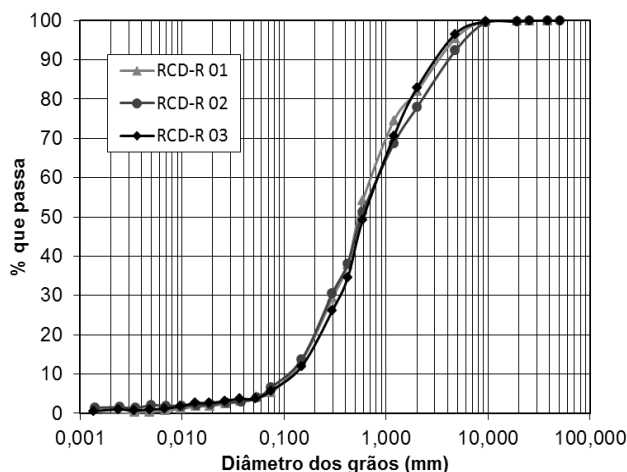


Figura 7. Curvas de distribuição granulométrica dos RCD-R.

4.3 Limites de Consistência

Os RCD-R analisados apresentaram comportamento não plástico. Santos (2007) considera esse aspecto positivo para o uso de RCD-R em estruturas de solo reforçado, uma vez que as normas BS 8006 (1995) e FHWA (2001) sugerem o uso de materiais não possuam parcela de resistência coesiva em tais obras.

4.4 Massa Específica dos Grãos

Os resultados das determinações de massa específica dos grãos (passantes na peneira de 4,8 mm de abertura) revelaram um valor médio de $2,576 \text{ g/cm}^3$, com coeficiente de variação de apenas 0,27% (TABELA 3).

Tabela 3. Massa específica dos grãos passantes na peneira 4,8 mm.

Amostra	Massa específica (g/cm^3)
RCD-R 01	2,568
RCD-R 02	2,581
RCD-R 03	2,579
Média	2,576
Coef. Variação	0,27%

4.5 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação forneceram um valor médio de peso específico seco máximo ($\rho_{d\text{máx}}$) igual a $1,766 \text{ g/cm}^3$, com coeficiente de variação de 2,15%. Observou-se um valor médio de umidade ótima (w_{ot}) igual a 13,6%, com coeficiente de variação de 9,73%. As curvas de compactação e os resultados obtidos encontram-se na Figura 8 e na Tabela 4, respectivamente.

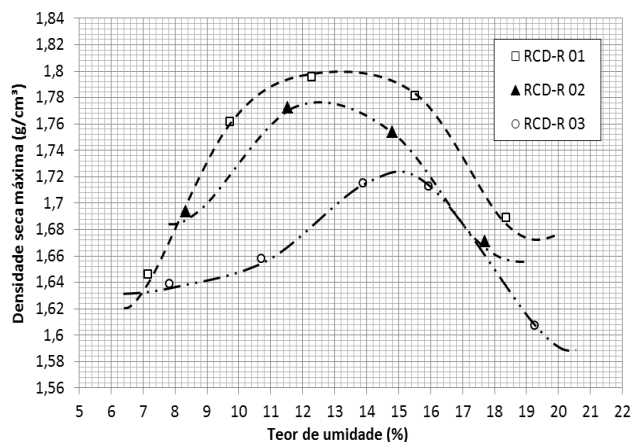


Figura 8. Curvas de compactação dos RCD-R.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de compactação.

Amostra	w_{ot} (%)	$\rho_{d\text{máx}}$ (g/cm^3)
RCD-R 01	13,3	1,798
RCD-R 02	12,4	1,766
RCD-R 03	15,0	1,724
Média	13,6	1,766
Coef. Variação	9,73%	2,15%

4.6 Ensaio de Permeabilidade à Carga Constante

Os ensaios de permeabilidade à carga constante revelaram que os RCD-R ensaiados possuem comportamento hidráulico semelhante ao de solos granulares, com valores de

permeabilidade (k) variando entre 10^{-2} e 10^{-4} cm/s. Como esperado, o aumento do grau de compactação repercutiu na redução dos valores de k .

Os resultados dos ensaios de permeabilidade com graus de compactação dos corpos de prova próximos a 75%, 85% e 95% são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7, respectivamente.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de permeabilidade com GC próximos a 75%.

Amostra	e	GC (%)	$k_{20^{\circ}\text{C}}$ (10^{-2} cm/s)
RCD-R 01	0,83	78,1	1,41
RCD-R 02	0,90	76,3	1,89
RCD-R 03	0,89	79,3	2,35

Tabela 6. Resultados dos ensaios de permeabilidade com GC próximos a 85%.

Amostra	e	GC (%)	$k_{20^{\circ}\text{C}}$ (10^{-3} cm/s)
RCD-R 01	0,66	86,3	3,83
RCD-R 02	0,62	89,9	1,53
RCD-R 03	0,84	81,3	9,44

Tabela 7. Resultados dos ensaios de permeabilidade com GC próximos a 95%.

Amostra	e	GC (%)	$k_{20^{\circ}\text{C}}$ (10^{-4} cm/s)
RCD-R 01	0,49	95,8	3,06
RCD-R 02	0,54	94,2	3,59
RCD-R 03	0,57	95,1	3,67

As curvas de variação do coeficiente de permeabilidade (k) em função do índice de vazios (e) das amostras ensaiadas são apresentadas na Figura 9.

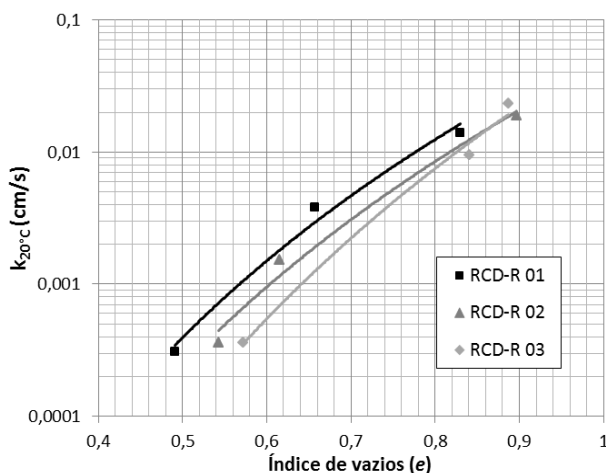


Figura 9. Coeficientes de permeabilidade (k) em função do índice de vazios (e) das amostras de RCD-R.

5 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de análise gravimétrica, é possível concluir que o RCD investigado é composto predominantemente por concreto e solo (material passante na peneira de 4,8 mm), com esses materiais correspondendo juntos, em média, a cerca de 85% da sua massa total. O percentual médio de materiais indesejáveis (metais, madeira, plásticos, papel, etc.) apresentou-se baixo, sem maiores repercussões nas propriedades geotécnicas.

A análise granulométrica revelou que as amostras de RCD-R possuem baixa variabilidade na sua granulometria, fato que pode ser um indicativo da padronização do processo de beneficiamento adotado na usina de reciclagem. Segundo os critérios da ABNT, o RCD-R pode ser classificado como uma areia com pedregulhos.

Os ensaios de limite de consistência permitiram concluir que o RCD-R possui um comportamento não plástico, o que se apresenta como um ponto positivo para a sua aplicação em diversas obras geotécnicas.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade à carga constante revelaram que o RCD-R possui comportamento hidráulico semelhante ao dos solos granulares. O valor de coeficiente de permeabilidade diminuiu de forma significativa à medida que se aumentou o grau de compactação.

Os resultados dos ensaios de caracterização evidenciaram que o RCD-R possui características de um solo granular, apresentando propriedades geotécnicas e coeficientes de permeabilidade que justificariam a sua aplicação em obras geotécnicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todo o apoio dado por seus familiares, amigos e demais pesquisadores do Laboratório de Solos da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (UPE-POLI). Os autores fazem questão de destacar as importantes contribuições feitas pelo Sr. José Heleno e pelo Técnico Fábio Ferreira para a realização das coletas e condução dos ensaios

de laboratório, respectivamente.

Agradecimentos também são dedicados à Pernambuco Bio Solos, pelo fornecimento das amostras de RCD e RCD-R, e ao Programa de Fortalecimento Acadêmico da Universidade de Pernambuco (PFA-UPE), pela bolsa de PIBIC concedida para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Affonso, F. J. A. (2005) *Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos*, Dissertação de Mestrado, COPPE – UFRJ, 161 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986) *NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986) *NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) *NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001) *NBR NM 26: Amostragem de agregados*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) *NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos*, Rio de Janeiro, Brasil.
- British Standard (1995) *BS 8006: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. (2002) *Resolução N° 307*, Brasília, Brasil.
- Elias, V., Christopher, B.R., Berg, R.R. (2001) *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-NHI-00-043, 394p.
- Leite, M. B. (2001) *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 270 p.
- Pinto, T. P. (1999) *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 189 p.
- Santos, E. C. G. (2007) *Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 173 p.
- Santos, E. C. G. (2011) *Avaliação experimental de muros reforçados executados com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e solo fino*, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 214 p.
- Schulz, R.R. e Hendricks, Ch. F. (1992) *Recycling of masonry rubble*. In: Hansen, T.C. *Recycling of demolished concrete and masonry*, Chapman & Hall, London, UK, Part two, p. 161-255.