

# APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM SOLO – CIMENTO CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE USE IN SOIL – CEMENT

Silveira, P.E.M. <sup>1</sup>; Nóbrega, C.A <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mestre em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Campus de Rio Claro - SP.

[martinsdasilveira@yahoo.com.br](mailto:martinsdasilveira@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Professor Doutor, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Campus de Rio Claro - SP. [cnobrega@rc.unesp.br](mailto:cnobrega@rc.unesp.br)

---

## RESUMO

A geração de resíduos de construção e demolição constitui um grande problema ambiental. Em Piracicaba, SP, são geradas aproximadamente 620 toneladas/dia deste resíduo. O problema acarreta diversos prejuízos ambientais, tais como: disposição irregular dos resíduos agregando lixo e atraindo animais transmissores de doenças; entulhos em vias públicas e córregos afetando a drenagem e a estabilidade de encostas; degradação visual urbana; redução da vida útil de aterros e de recursos minerais não renováveis. Os municípios buscam atender às exigências da Resolução 307 (CONAMA, 2002) empreendendo ações para o reaproveitamento desses resíduos como agregado para pavimentação, fechamento de valas e confecção de artefatos de concreto. Há, entretanto, necessidade de sua utilização em maior escala, possibilitando que estes materiais passem a constituir alternativas economicamente viáveis. Assim, propõe-se sua utilização como agregado no compósito solo-cimento. Foram testadas propriedades físicas, tecnológicas e químicas de misturas contendo resíduo de construção civil reciclado e solo em diferentes proporções resíduo/solo. Verificou-se que as misturas nas proporções de 50%, 75% e 100% atendem às especificações tecnológicas para emprego como solo-cimento. Quanto aos aspectos químicos, a utilização do resíduo como agregado no solo-cimento se mostrou exequível e eficiente no encapsulamento de contaminantes.

**Palavras-chave:** resíduos de construção reciclados, entulhos, solo-cimento

---

## ABSTRACT

The generation of Construction and Demolition Wastes (CDW) is a huge environmental problem. In Piracicaba-SP, approximately 620 tons of these wastes are

|   |  |
|---|--|
| Recebido em: 25/05/2005                 | <i>HOLOS Environment</i> , v.5 n.2, 2005 - P.153 |
| Liberado para Publicação em: 21/03/2006 | ISSN: 1519-8634                                  |

generated every day. This problem results in several environmental damages such as: irregular placing of wastes accumulating trash that attract animals capable to transmit illness; rubble on public roads and on streams that affect draining and stability on hills; degradation of urban visual; reduction of shelf-life of the levellings and non-renewable mineral sources. Municipalities try to attend CONAMA, (2002) Resolution 307 requirements, undertaking actions to re-use CDW as aggregate for paving, closing of ditches and producing concrete blocks. There is, however, the necessity to use it in bigger scale, enabling these materials to become feasible economical alternatives. Therefore, it is proposed to use it as an aggregate on soil-cement composite. Physical, technological and chemical properties, of mixtures containing recycled CDW and soil in different proportions, were tested. It was noticed that those mixtures with 50%, 75% and 100% of CDW attend technological specifications for the use as soil-cement. As far as the chemical aspects are concerned, the use of recycled CDW as aggregate in the soil-cement showed to be feasible and efficient in the encapsulating process of the contaminants.

**Key words:** recycled construction, demolition wastes, soil-cement.

## 1. Introdução

Estudos realizados pela Prefeitura Municipal de Piracicaba (PIRACICABA, 2001) mostraram a geração de aproximadamente 620 t/dia de resíduo de construção e demolição naquela cidade. Este tipo de resíduo acaba por trazer muitos problemas de ordem ambiental, tais como: enchentes ocasionadas pelo assoreamento de córregos; obstrução de logradouros públicos; proliferação de doenças e uma degradação visual intensa. Há que se considerar também os prejuízos financeiros oriundos dos custos de remoção dos entulhos quando dispostos irregularmente.

A exemplo de algumas cidades brasileiras e mais recentemente devido às exigências da Resolução 307 do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, Piracicaba vem desenvolvendo um programa de gestão sustentável destes resíduos. Uma área específica para os resíduos de construção e demolição foi criada. Esta é administrada por um grupo de empresários responsáveis pela coleta do entulho na cidade e conta com apoio de uma equipe de populares que realizam a triagem do entulho, ou seja, a separação de materiais para reaproveitamento, tais como: papel, papelão, vidro, plástico, madeira, componentes de construção pouco avariados e principalmente metálicos.

Cerca de 50% do entulho, o que equivale a 310 t/dia, reúne condições de reciclagem. No entanto, o município conta com equipamento reciclador que permite uma produção máxima de 170 t/dia, mas que dificilmente ultrapassa a média 130 t/dia em função de problemas de manutenção. Há dois tipos principais de resíduos: um rico em cimento de coloração cinza, geralmente oriundo das concreteiras e um tipo misto de coloração avermelhada, mais rico em materiais cerâmicos e solo. O primeiro vem sendo utilizado na fabricação de blocos e pisos intertravados em uma

|  |   |
|--|---|
| <i>Recebido em: 25/05/2005</i>                 | <i>HOLOS Environment, v.5 n.2, 2005 - P.154</i> |
| <i>Liberado para Publicação em: 21/03/2006</i> | <i>ISSN: 1519-8634</i>                          |

unidade de produção de artefatos de concreto localizada anexa à usina recicladora. O do tipo misto vem sendo utilizado como material para sub-base ou base de pavimentação ou ainda como reforço de sub-leito de logradouros públicos, pequenos aterros e principalmente nos serviços de recuperação de pavimentações quando da abertura de valas para instalação e reformas de dutos pelo serviço municipal de água e esgoto. O equipamento é constituído basicamente por um sistema de britagem com britador de mandíbula, sistema de moagem através de moinho de martelos, e de um sistema de saídas para os agregados reciclados com granulometria diversificada. O equipamento permite a obtenção de agregados reciclados: graúdos (brita), médios (pedrisco), miúdos (material arenoso) e um agregado de granulometria variada (brita corrida).

O solo-cimento é um produto bastante utilizado e consagrado. São diversos os usos recomendados, entre os quais podem ser citados: base ou sub-base de pavimentos em estradas, vias urbanas, pátios industriais, estacionamentos e aeroportos; tijolos, blocos e paredes monolíticas para construção de edifícios; revestimento de barragens, canais, diques e reservatórios; revestimento e impermeabilização de túneis; estabilização de encostas, etc.

## **2. OBJETIVOS**

Face às considerações anteriores, a pesquisa teve como objetivo central, estudar a viabilidade da aplicação do resíduo de construção e demolição (RCD) reciclado como agregado no compósito solo-cimento, visando agregar valor econômico a este resíduo, uma vez que as restrições legais ligadas à exploração de bens minerais na construção civil, quanto aos aspectos ambientais, são cada vez mais severas. A avaliação da aplicação de qualquer material como agregado deve ser precedido de estudos tecnológicos e requer uma análise de possíveis riscos ambientais que essa aplicação possa oferecer, tais como a contaminação de edificações, do solo ou ainda do lençol freático.

Constatou-se durante a realização da pesquisa, a total ausência de estudos anteriores enfocando resíduos de construção e demolição na região, no que concerne à sua aplicação como agregado no compósito solo-cimento. O atual crescimento populacional e a conseqüente expansão urbana de Piracicaba reduzem drasticamente as áreas de empréstimo disponíveis próximas à cidade. Deste modo, a obtenção de solos adequados para solo-cimento ou mesmo para outros fins (sub-base, tratamento primário de logradouros viários, tapas buracos, etc.) constituiu uma justificativa adicional para a realização da pesquisa.

|   |  |
|---|--|
| Recebido em: 25/05/2005                 | <i>HOLOS Environment</i> , v.5 n.2, 2005 - P.155 |
| Liberado para Publicação em: 21/03/2006 | ISSN: 1519-8634                                  |

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Solo Utilizado**

O solo escolhido apresenta textura média adequada para solo-cimento. Ocorre com relativa abundância em áreas próximas ao perímetro urbano de Piracicaba. Provém de coberturas cenozóicas correlatas à Formação Rio Claro, classificado como Latossolo Vermelho Amarelo de acordo com a carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo na escala 1:100.000 folha de Piracicaba SF-23-Y-A-IV (IAC,1989).

A amostragem do solo se deu entre as profundidades de 1 e 2 metros em uma área de empréstimo localizada no Anel Viário de Piracicaba, próximo ao CEASA.

#### **3.2 RCD Reciclado**

O agregado reciclado foi o do tipo misto avermelhado e miúdo ( $\phi < 3,6\text{mm}$ ) produzido na Usina Recicladora de Entulho de Piracicaba, pois entre aqueles produzidos nesta unidade, é o que mais se aproxima das características de um solo convencional para a produção do compósito solo-cimento.

A amostragem do RCD, ocorreu em um período de 15 dias. Para cada lote reciclado foram coletados aproximadamente 100 kg do material de acordo com a norma técnica NBR 7216 “Amostragem de Agregados” (ABNT,1982). Ao término desta quinzena, as amostras foram reunidas, exaustivamente homogeneizadas e divididas em oito partes exatamente iguais produzindo aproximadamente 700 kg deste resíduo, quantidade suficiente para atender à todas as etapas da pesquisa, tanto para caracterização química como para caracterização física e também para as análises tecnológicas subsequentes.

#### **3.3 Cimento Utilizado**

O cimento utilizado foi o CP II-E-32 (cimento portland composto com escória). Trata-se de um cimento convencional e comercializado na região de Piracicaba.

#### **3.4 Caracterização Química do RCD Reciclado**

A caracterização química do RCD reciclado foi realizada com base em resultados de análises químicas de alguns parâmetros dos extratos: lixiviado, solubilizado e digerido, deste resíduo.

O ensaio de lixiviação foi realizado de acordo com a norma técnica NBR 10005 “Ensaio de Lixiviação” (ABNT,1987) e o de solubilização, de acordo com a norma técnica NBR 10006 “Ensaio de Solubilização” (ABNT, 1987).

A extração do digerido para análise da massa bruta do RCD reciclado foi realizada de acordo com o “Method 3050 - B - Acid Digestion of Sediments Sludges and Soils” (EPA, 1996). Este tipo de digestão não garante a dissolução completa do material, pois a matéria é oxidada por ácidos em alta temperatura, liberando os metais ligados à fração de óxidos e a outras frações minerais, com exceção dos silicatos. No

|   |  |
|---|--|
| Recebido em: 25/05/2005                 | <i>HOLOS Environment</i> , v.5 n.2, 2005 - P.156 |
| Liberado para Publicação em: 21/03/2006 | ISSN: 1519-8634                                  |

entanto, os metais que não foram liberados dos silicatos através dos ácidos em alta temperatura, provavelmente nunca serão desprendidos para o meio ambiente.

Os elementos químicos, com exceção do Cádmio, do extrato solubilizado, do Potássio e Sódio (extratos lixiviado e solubilizado), foram analisados através de Espectrometria de Plasma Induzido em Argônio (Sistema ICP-AES). Os elementos determinados por este sistema foram: Alumínio, Boro, Cálcio, Cádmio (dos extratos lixiviado e digerido), Chumbo, Cromo, Ferro, Manganês, Níquel, Fósforo, Zinco, Vanádio, Enxofre, Molibdênio e Cobre. Os elementos Potássio e Sódio (extratos lixiviado e solubilizado) foram analisados através de fotômetro de chamas Micronal. O Cádmio do extrato solubilizado foi analisado através de Espectrometria de Emissão Óptica com Fonte de Plasma Acoplado Indutivamente (Sistema ICP - OES). O Fluoreto (extratos lixiviado e solubilizado), Nitrato (extrato solubilizado), Cloreto (extrato solubilizado) e Sulfato (extrato solubilizado) foram analisados através de procedimentos preconizados no “Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water” 20<sup>th</sup> Edition (CLESCERI et al,1998).

A dureza total ( $\text{CaCO}_3$ ) do extrato solubilizado foi analisada seguindo os procedimentos descritos por Macêdo (2003). A determinação do conteúdo orgânico e de sólidos voláteis foi realizada pelo processo de queima em mufla à 600 ° C, apresentado por Silva (1997).

### **3.5 Caracterização Física do RCD Reciclado**

A caracterização física do RCD reciclado se deu pela determinação da massa específica dos grãos, através da norma técnica NBR 6508 - “Solo: determinação da massa específica” (ABNT, 1984); pela determinação da massa unitária do agregado em estado solto, através da norma técnica NBR 7251 - “Agregado em estado solto: determinação da massa unitária” (ABNT, 1982); análise granulométrica de agregados, através da norma técnica NBR 7217 - “Agregados: determinação da composição granulométrica” (ABNT,1987); determinação do teor de materiais pulverulentos, através da norma técnica NBR 7219 - “Agregados: determinação de materiais pulverulentos” (ABNT, 1982) e absorção de água de agregado miúdo de acordo com norma técnica NBR 9777 - “Absorção de água em agregados miúdos” (ABNT,1987).

### **3.6 Caracterização das Misturas Resíduo/Solo**

A viabilidade técnica e econômica da aplicação do resíduo como constituinte de compósito solo-cimento está condicionada à capacidade de se utilizar um volume expressivo de resíduo. O estudo foi realizado com base na diluição do resíduo no solo escolhido nas seguintes proporções resíduo/solo: 0, 25, 50, 75 e 100 % denominadas de M-0%, M-25%, M-50%, M-75% e M-100%, respectivamente.

A caracterização das misturas acima citadas se deu pela determinação da massa específica dos grãos, de acordo com a norma técnica NBR 6508 “Solo: determinação da massa específica” (ABNT,1984); pela análise granulométrica combinada, de

|   |  |
|---|--|
| Recebido em: 25/05/2005                 | <i>HOLOS Environment</i> , v.5 n.2, 2005 - P.157 |
| Liberado para Publicação em: 21/03/2006 | ISSN: 1519-8634                                  |

acordo com norma técnica NBR 7181 “Solo: análise granulométrica” (ABNT,1984); pela determinação dos limites de consistência de acordo com as normas técnicas NBR 6459 “Solo: determinação do limite de liquidez” (ABNT,1984) e NBR 7180 “Solo: determinação do limite de plasticidade” (ABNT,1984); pelo estudo de compactação, realizado de acordo com a norma técnica NBR 7182 “Solo: Ensaio de Compactação” (ABNT, 1986) e finalmente pela classificação da mistura de acordo com a norma D 3282 “ Standard Practice for Classification of Soils and Soil - Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes” (ASTM, 2004).

### **3.7 Estudo de Compactação e Dosagem dos Compósitos Solo-Cimento**

Foram selecionadas duas das cinco misturas resíduo/solo citadas em 3.6. (M-75% e M-100%) e para cada uma, foi realizado o estudo de compactação e dosagem de cimento, seguindo os critérios adotados pela norma técnica NBR 12253 “Solo-Cimento: Dosagem para o emprego como camada de pavimento (ABNT, 1992).

### **3.8 Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos**

Para a escolha dos teores de cimento descritos em 3.7 foram moldados um total de trinta corpos-de-prova, correspondentes aos compósitos confeccionados à partir das misturas M-75% e M-100%, que passaram a ser denominados CM-75% e CM-100%, respectivamente. Para cada compósito foram avaliados três teores de cimento. O teor de cimento escolhido para cada mistura foi o que proporcionou uma resistência à compressão mínima de 2,1 MPa determinada aos 7 dias de cura, conforme sugere a norma NBR 12253 “ Solo-Cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento” (ABNT, 1992).

Com o teor de cimento definido, foram moldados e curados por um período de 28 dias em câmara úmida, 26 corpos-de-prova para cada mistura, de acordo com a norma técnica NBR 12024 “Solo-Cimento: moldagem e cura dos corpos-de-prova cilíndricos” (ABNT, 1992). Estes corpos-de-prova foram utilizados nos ensaios tecnológicos de Solo-Cimento e na análise química do compósito.

### **3.9 Ensaios Tecnológicos com Corpos-de-Prova Cilíndricos**

Para a avaliação tecnológica do emprego de RCD reciclado no compósito solo-cimento, foram realizados, para as duas misturas selecionadas, os seguintes ensaios: determinação de absorção de água, de acordo com a norma técnica NBR 13555 - “Solo-cimento: determinação da absorção de água” (ABNT, 1996) e ilustrado na figura 1; determinação da resistência à compressão simples aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura, de acordo com a norma técnica NBR 12025-“Solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos” (ABNT, 1990) e ilustrado na figura 2; determinação da perda de massa e variação volumétrica, de acordo com a norma técnica NBR 13554 - “Solo-cimento: ensaio de durabilidade por molhagem e secagem “(ABNT, 1996 ) e ilustrado na figura 3.



**Figura 1** - Ensaio de absorção de água



**Figura 2** - Ensaio de resistência à compressão



**Figura 3** - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

### 3.10 Análise Química dos Compósitos

Realizou-se a análise química dos dois compósitos solo-cimento das duas misturas selecionadas, com o objetivo de verificar a eficiência do encapsulamento de eventuais contaminantes presentes neste resíduo. O parâmetro químico escolhido para esta análise foi o nitrato, por ser altamente solúvel na presença de água e de difícil encapsulamento.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização Química do RCD Reciclado

Os resultados analíticos dos extratos lixiviado, solubilizado e digerido do RCD reciclado são apresentados na tabela 1.

Entre os parâmetros químicos analisados do RCD utilizado no estudo do compósito solo-cimento, não foram detectadas concentrações superiores às permitidas pela NBR 10004 “Resíduos Sólidos: Classificação” (ABNT, 1987).

Com a entrada em vigor da coletânea de normas revisadas da ABNT sobre resíduos sólidos no final de 2004, ocorreram modificações na NBR 10004. De acordo com a norma anteriormente vigente, as concentrações obtidas para os parâmetros químicos analisados, permitiriam classificar este resíduo como Classe III (inertes). Pela norma revisada, o mesmo passa a ser considerado como Classe II-A (não perigoso e não inerte), uma vez que as concentrações de chumbo e sulfato são superiores aos valores máximos permitidos para o extrato solubilizado, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004). A presença de sulfato provavelmente está relacionada à presença de gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ ) na constituição do entulho. Já o chumbo presente deve estar relacionado à composição de tintas, vernizes e outros componentes para acabamentos. Além disto, observou-se uma concentração de nitrato no extrato solubilizado de 12 mg/L, correspondente a 2,71 mg/NL, abaixo portanto de 10 mg

N/L, valor máximo permitido pelo Anexo G desta norma. A presença de nitrato provavelmente se deve a ação de bactérias nitrificantes sobre o íon amônio, que se desenvolvem com maior ou menor facilidade de acordo com o ambiente de exposição. Há também a possibilidade do RCD reciclado já conter nitrato oriundo de materiais sanitários.

**Tabela 1.** Caracterização química do RCD reciclado.

| Resultados analíticos do RCD reciclado |   |                        |                     |                              |              |               |
|--|---|------------------------|---------------------|------------------------------|--------------|---------------|
| Parâmetro                              | lixiviado<br>(mg/L)   | solubilidade<br>(mg/L) | digerido<br>(mg/Kg) | Valor Máximo Permitido x VMP |              |               |
|  |   |                        |                     | lixiviado                    | solubilizado | digerido      |
| Bário                                  | ** BC   | ** BC                  | 186,9               | 100 (70)                     | 1,00 (0,70)  | -             |
| Cádmio                                 | 0,030   | <0,004                 | 7,5                 | 0,50                         | 0,005        | -             |
| Chumbo                                 | 0,037   | 0,035                  | 94,9                | 5,00<br>(1,00)               | 0,05 (0,01)  | 1.000,00      |
| Cromo                                  | 0,004   | 0,020                  | 7,5                 | 5,00                         | 0,05         | 100,0<br>(VI) |
| Fluoreto                               | 0,79  | 0,80                   | -                   | 150,00                       | 1,50         | -             |
| Nitrato (N)                            | -   | 2,71                   | -                   | -                            | 10,00        | -             |
| Alumínio                               | 2,568   | 0,022                  | 13627,0             | -                            | 0,20         | -             |
| Cloreto                                | -   | 15,60                  | -                   | -                            | 250,00       | -             |
| Cobre                                  | 0,007   | 0,004                  | 17,7                | -                            | 1,00 (2,00)  | -             |
| Ferro                                  | 0,019   | 0,005                  | 9547,0              | -                            | 0,30         | -             |
| Manganês                               | 203,11  | 0,016                  | 210,0               | -                            | 0,10         | -             |
| Cálcio                                 | 1091,50   | 49,03                  | 25.090,0            | -                            | -            | -             |
| Sódio                                  | 12,68   | 30,55                  | -                   | -                            | 200,00       | -             |
| Potássio                               | 24,48   | 52,20                  | -                   | -                            | -            | -             |
| Magnésio                               | 29,85   | 15,68                  | 5.796,0             | -                            | -            | -             |
| Molibdênio                             | 0,035   | 0,035                  | -                   | -                            | -            | -             |
| Níquel                                 | 0,009   | 0,014                  | 5,1                 | -                            | -            | -             |
| Enxofre                                | 29,84   | 72,82                  | 279,2               | -                            | -            | -             |
| Zinco                                  | 0,347   | 0,005                  | 7,7                 | -                            | 5,00         | -             |
| Sulfato(SO <sub>4</sub> )              | -   | 254                    | -                   | -                            | 400 (250)    | -             |
| Dureza total                           | -   | 452                    | -                   | -                            | 500 (--)     | -             |
| Fósforo                                | -   | -                      | 228,2               | -                            | -            | -             |
| Vanádio                                | -   | -                      | 43,2                | -                            | -            | 1.000,00      |
| M.O.+ SV                               | -   | -                      | 51.700              | -                            | -            | -             |
| V. M. P. =                             | Valores máximos permitidos pela NBR 10004 “ Resíduos Sólidos: Classificação “ ( ABNT, 1987 ) baseado nas listagens.nº 7 ( lixiviado ) ; nº 8 ( solubilizado ) e nº 9 ( massa bruta ). |                        |                     |                              |              |               |
| ** BC =                                | Baixa concentração não permitindo a leitura   |                        |                     |                              |              |               |
| ***M.O. + S.V. =                       | Material orgânico +sólidos voláteis.  |                        |                     |                              |              |               |
| (●) =                                  | Valores apresentados na nova norma NBR 10004 ( ABNT, 2004 )   |                        |                     |                              |              |               |

## 4.2 Caracterização Física do RCD Reciclado

O RCD reciclado pode ser caracterizado como um material predominantemente arenoso. Deve conter em sua composição significativa quantidade de produtos cerâmicos, pois a absorção de água verificada foi maior que a de agregados miúdos tradicionais. A massa específica dos grãos é ligeiramente maior do que a de uma areia quartzosa, enquanto sua massa unitária no estado solto é pouco inferior à mesma. Os resultados obtidos para a caracterização física do RCD reciclado são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2.** Análises físicas para caracterização do RCD reciclado.

| Análises Físicas do RCD Reciclado                     |       |
|---|-------|
| Massa específica dos grãos ( g/cm <sup>3</sup> )      | 2,706 |
| Massa unitária no estado solto ( Kg/dm <sup>3</sup> ) | 1,202 |
| Absorção de água ( % )                                | 6,37  |
| Teor de materiais pulverulentos ( % )                 | 18,84 |
| Frações granulométricas (%) - NBR 6502<br>(ABNT,1995) |       |
| Pedregulho ( $\phi > 4,8$ mm )                        | 0,08  |
| Areia Grossa ( $4,8\text{mm} > \phi > 2,0\text{mm}$ ) | 3,51  |
| Areia média ( $20\text{mm} > \phi > 0,42\text{mm}$ )  | 26,11 |
| Areia fina ( $0,42 > \phi > 0,06\text{mm}$ )          | 46,30 |
| Silte ( $0,06 > \phi > 0,002$ )                       | 13,75 |
| Argila ( $\phi < 0,002\text{mm}$ )                    | 10,25 |

## 4.3 Caracterização Física Das Misturas Resíduo/Solo

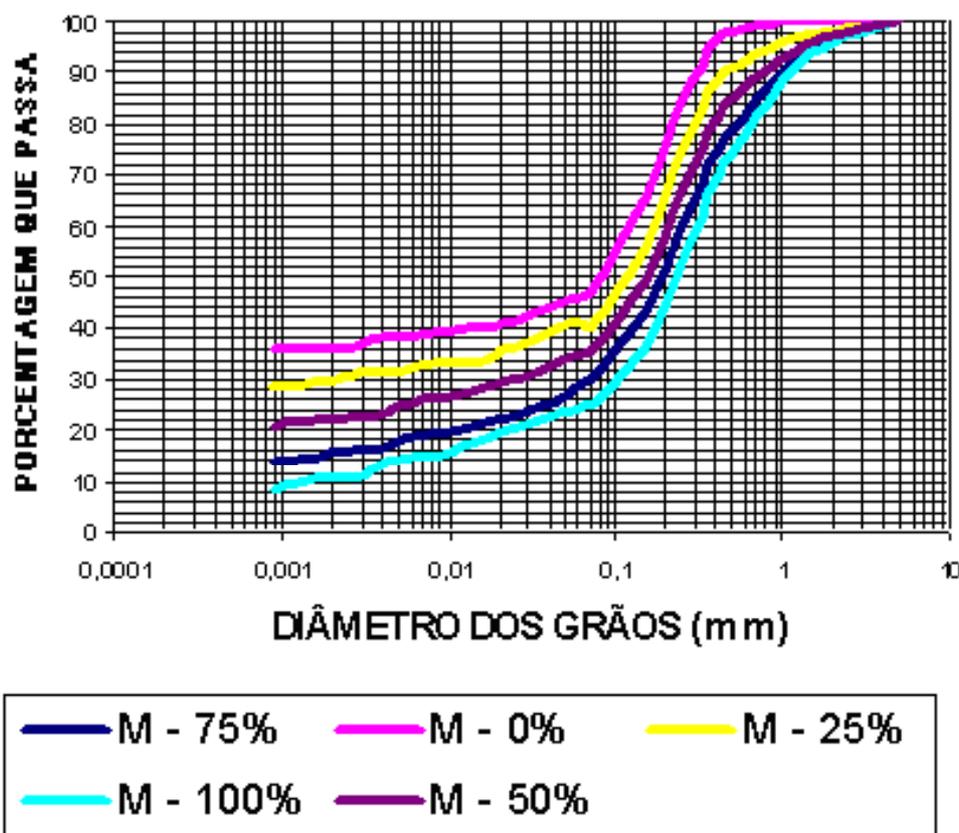
Os resultados para a caracterização física de cinco misturas resíduo/solo nas diluições de 0, 25, 50, 75 e 100% são apresentados na tabela 3 e figura 4.

**Tabela 3.** Caracterização física de cinco misturas resíduo/solo.

| Mistura  | $\delta$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_0$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | H <sub>ot</sub><br>(%) | $\phi < 0,075$<br>mm<br>(%) | $\phi < 0,002$<br>mm (%) | LL<br>(%) | LP<br>(%) | IP<br>(%) | Classificação |
|----------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| M - 0%   | 2,687                            | 1,896                              | 13,78                  | 48,03                       | 36,00                    | 31        | 19        | 12        | A-6           |
| M - 25%  | 2,698                            | 1,899                              | 13,55                  | 41,03                       | 30,00                    | 27        | 16        | 11        | A-6           |
| M - 50%  | 2,692                            | 1,898                              | 13,75                  | 35,51                       | 21,50                    | 23        | 16        | 07        | A-4           |
| M - 75%  | 2,704                            | 1,842                              | 15,33                  | 30,72                       | 16,00                    | 22        | 15        | 07        | A-2-4         |
| M - 100% | 2,706                            | 1,788                              | 16,83                  | 25,01                       | 10,25                    | 21        | NP        | NP        | A-2-4         |

Mistura - Relação Resíduo/Solo (%).  
 $\delta$  (g/cm<sup>3</sup>) - Massa Específica dos Grãos  
 $\gamma_0$  (g/cm<sup>3</sup>) - Massa Específica Aparente Máxima Seca (Compactação/Energia Normal)  
H<sub>ot</sub> (%) - Umidade Ótima (Compactação/Energia Normal)  
 $\phi < 0,075$  mm (%) - Fração Granulométrica que passa na peneira n.º 200.  
 $\phi < 0,002$  mm (%) - Fração Argilosa.  
LL (%) - Limite de Liquidez.  
LP (%) - Limite de Plasticidade.  
IP (%) - Índice de Plasticidade.  
Classificação - D-3282 (ASTM, 2004).

A caracterização das cinco misturas com proporções variando de 0 a 100%, permitiram suas classificações de acordo com a norma D-3282 “Standad Practice for Classification of Soils and soil-aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes” (ASTM, 2004). Esta classificação facilita a escolha das misturas que atendem as normas pertinentes ao emprego em solo-cimento e facilita o estudo de dosagem do teor de cimento a ser empregado no compósito.



**Figura 4** - Curvas granulométricas das misturas (M-0%), (M-25%), (M-50%), (M-75%), (M-100%).

#### **Seleção das Misturas Resíduo/Solo**

Com base nos resultados da caracterização física das cinco misturas resíduo/solo e em suas classificações, verificou-se que as proporções de 50, 75, e 100%, conforme demonstrado na tabela 4, atenderam às especificações tecnológicas para emprego em solo-cimento. Visando a utilização do resíduo em maior escala, foram selecionadas as misturas M-75% e M-100% para o prosseguimento dos ensaios.

**Tabela 4.** Classificação das misturas Resíduo/Solo e as especificações exigidas para os compósitos Solo-Cimento.

| Mistura<br>(1) | Classificação<br>ASTM D3282 (2) | NORMAS DE ESPECIFICAÇÕES |                     |                     |                     |                    |
|----------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
|                |                                 | NBR<br>13553<br>(3)      | NBR<br>11798<br>(4) | NBR<br>10833<br>(5) | NBR<br>10834<br>(6) | NBR<br>8491<br>(7) |
| M - 0%         | A-6                             | S                        | N                   | S                   | S                   | S                  |
| M - 25%        | A-6                             | S                        | N                   | S                   | S                   | S                  |
| M - 50%        | A-4                             | S                        | S                   | S                   | S                   | S                  |
| M - 75%        | A-2-4                           | S                        | S                   | S                   | S                   | S                  |
| M - 100%       | A-2-4                           | S                        | S                   | S                   | S                   | S                  |

S - Mistura se enquadra nas especificações.  
N - Mistura não se enquadra nas especificações.  
(1) - Relação Resíduo/Solo (%).  
(2) - De acordo com a Norma D3282 (ASTM, 2004).  
(3) - Materiais de emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural (ABNT, 1996).  
(4) - Materiais para sub-base ou base de solo-cimento (ABNT, 1990).  
(5) - Fabricação de Tijolo Maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica (ABNT, 1989).  
(6) - Bloco utilizado de solo-cimento sem função estrutural (ABNT, 1994).  
(7) - Tijolo Maciço de solo-cimento (ABNT, 1984).

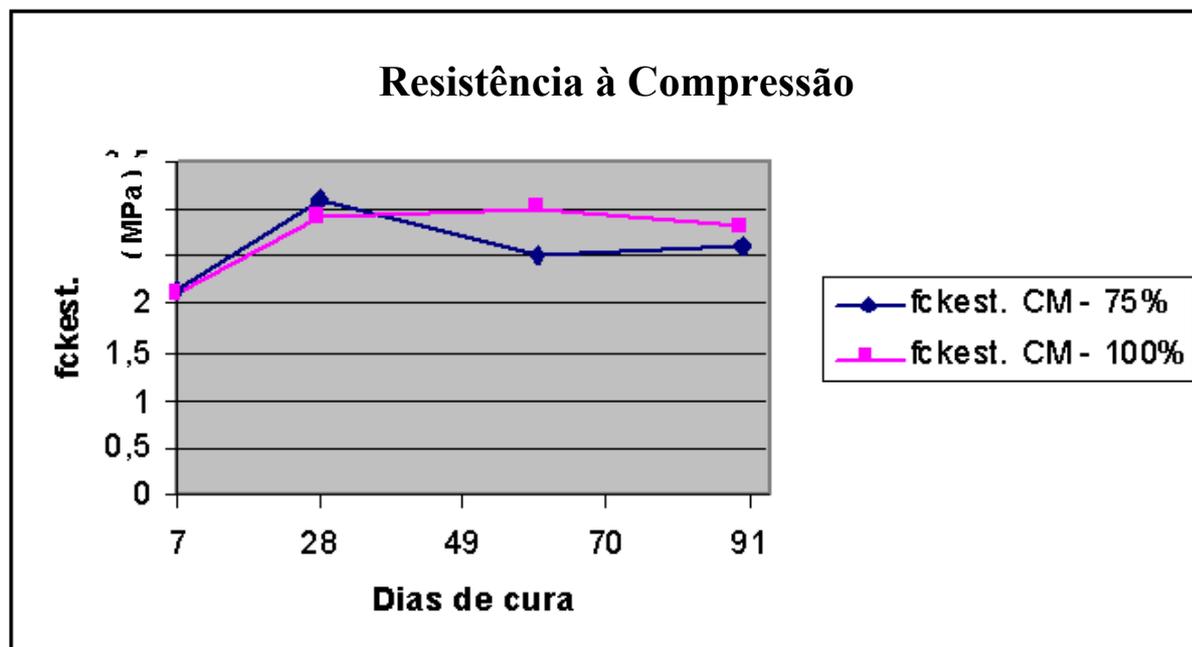
#### 4.4 Estudo de Dosagem dos Compósitos

A pesquisa teve seqüência com o estudo de dosagem de cimento para as misturas M-75% e M-100% , citadas em 4.4. O teor de cimento definitivo para cada mistura foi o menor possível, entre três avaliados, de forma a permitir uma resistência à compressão simples mínima de 2,1 MPa aos 7 dias de cura, conforme sugere a norma NBR 12253 (ABNT, 1992).

Para o compósito CM-75%, o teor de cimento escolhido foi de 8 % em massa e para o CM-100% foi de 7 %. Em função desta pequena diferença de apenas 1%, optou-se por utilizar para ambos os compósitos um teor de cimento de 8 %. Este pequeno incremento de 1% de cimento no compósito CM-100%, tem a vantagem adicional de auxiliar no processo de encapsulamento de eventuais contaminantes presentes no RCD reciclado.

#### 4.5 Resistência à Compressão Simples

Foram determinadas as resistências à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos dos compósitos CM -75% e CM - 100% em ensaios realizados aos 7, 28, 60 e 90 dias de cura, cujos resultados encontram-se representados na figura 5.



**Figura 5.** Gráfico da resistência estatística e dias de cura.

Verificou-se nestes ensaios que a resistência estatística à compressão ( $f_{ckest.}$ ) de ambos os compósitos aumentou consideravelmente de 7 para 28 dias. No entanto o mesmo não ocorreu de 28 para 60 dias, neste caso, o compósito CM -75% teve redução considerável enquanto o CM - 100% apresentou ligeira elevação. A resistência à compressão aos 90 dias do compósito CM - 75% apresentou um pequeno acréscimo em relação aos 60 dias e a do compósito CM - 100% um pequeno declínio. Deve-se ressaltar que a cura dos corpos-de-prova até os 28 dias ocorreu em câmara úmida e após este período a cura ocorreu apenas sob sombra e sem umidade. De qualquer forma, em nenhuma das idades a resistência foi menor que 2,1 MPa.

#### 4.6 Determinação da Absorção de Água, Perda de Massa e Variação de Volume

Produzidos por Ciclos de Molhagem e Secagem de Corpos-de-Prova Cilíndricos

Os valores determinados para a absorção de água, perda de massa e variação volumétrica aos 7 dias de cura, demonstraram que os compósitos CM-75% e CM-100% atenderam às especificações técnicas para o emprego em solo-cimento, conforme se pode verificar na tabela 5.

**Tabela 5.** Resultados dos ensaios de absorção de água, perda de massa e variação volumétrica máxima de corpos-de-prova cilíndricos.

| ENSAIO  | COMPÓSITOS |         | ESPECIFICAÇÕES* |
|---|------------|---------|-----------------|
|   | CM-75%     | CM-100% |                 |
| ABSORÇÃO DE ÁGUA(%)   | 15,19      | 15,86   | ≤ 20,00%        |
| PERDA DE MASSA(%)   | 1,67       | 3,67    | ≤ 14,00%        |
| VARIAÇÃO MÁXIMA VOLUMÉTRICA(%)  | 0,97       | 1,00    | ≤ 1,00%         |
| * Norma técnica NBR 13553 “materiais para o emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural” (ABNT, 1996). |            |         |                 |

#### 4.7 Análise Química dos Compósitos

Com o objetivo de verificar a eficiência do processo de encapsulamento de contaminantes presentes no RCD reciclado através de sua utilização como agregado no compósito solo-cimento, efetuou-se análise química do nitrato, ainda que apresentando concentração inferior à máxima permitida, por tratar de substância altamente solúvel em água e de difícil encapsulamento. Deste modo foram analisados os extratos solubilizados de ambos os compósitos, aos 7 dias de cura. Verificou-se uma redução significativa nas concentrações de nitrato em relação aos valores obtidos originalmente no RCD reciclado, ou seja, de 2,71 mg N/L para 0,20 mg N/L no compósito CM-75% e 0,66 mg N/L no compósito CM-100%.

## 5. CONCLUSÕES

A análise da caracterização física do RCD reciclado revelou que o material, uma areia fina à média siltosa pouco argilosa, constitui um agregado alternativo miúdo que apresenta elevada absorção de água em relação aos agregados quartzosos convencionais, massa específica dos grãos ligeiramente maior que a dos agregados arenosos naturais e massa unitária pouco menor que a de areias quartzosas. A massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação é menor que a de um solo convencional. Por sua vez, o teor de umidade ótimo é maior que o esperado para um solo com características arenosas, revelando a presença de materiais cerâmicos na composição do RCD reciclado.

A caracterização química do RCD reciclado mostrou que, entre os parâmetros químicos analisados, não foram detectadas concentrações superiores às permitidas pela NBR 10004 (ABNT, 1987). Entretanto, com a revisão recente desta norma, NBR

|   |  |
|---|--|
| Recebido em: 25/05/2005                 | <i>HOLOS Environment</i> , v.5 n.2, 2005 - P.166 |
| Liberado para Publicação em: 21/03/2006 | ISSN: 1519-8634                                  |

10004 (ABNT, 2004), o Chumbo e o Sulfato passaram a apresentar concentrações superiores aos valores máximos permitidos para o extrato solubilizado. A presença de sulfato merece ser melhor estudada, face à possibilidade da reação deste composto com o aluminato-tricálcico do cimento hidratado, provocando expansão volumétrica e desagregação. Da mesma forma, a presença de matéria orgânica no RCD reciclado, potencialmente responsável pelo retardamento do endurecimento do cimento, também requer investigação mais detalhada.

Quanto às propriedades tecnológicas, verificou-se que as misturas nas proporções de 50%, 75% e 100% atendem às especificações para emprego como solo-cimento, no entanto, as proporções de 75% e 100% são as mais adequadas porque permitem o emprego do resíduo em maior escala. Os ensaios de dosagem mostraram que a quantidade de cimento a ser adicionada variaram entre 7 e 8% em massa, permitindo desta forma ao solo-cimento atingir resistência à compressão mínima de 2,1 MPa, aos 7 dias de cura. Ensaios de resistência à compressão; absorção de água; determinação da perda de massa; e variação de volume produzidas por ciclos de molhagem e secagem de corpos-de-prova cilíndricos evidenciaram a exequibilidade da aplicação do RCD reciclado como agregado em compósito solo-cimento, atendendo às especificações.

O emprego do RCD reciclado em solo-cimento apresenta-se como uma eficiente alternativa de encapsulamento do nitrato presente no extrato solubilizado deste resíduo.

São necessários ainda estudos de viabilidade econômica, que deverão incluir necessariamente projetos piloto de industrialização de componentes de solo-cimento, pavimentações experimentais; monitoramento de construções com o objetivo de verificar a ocorrência de defeitos técnicos não previstos, entre outros.

A utilização do solo-cimento com o emprego do RCD reciclado, além de contribuir para a solução de problemas com a geração de resíduos de construção, pode amenizar a falta de moradias populares e viabilizar a pavimentação de baixo custo em bairros periféricos.

## 6.REFERÊNCIAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9777: Absorção de água em agregados miúdos - Rio de Janeiro, 1987.

— NBR 6459. Solo: Determinação do limite de liquidez - Rio de Janeiro, 1984.

— NBR 6502. Rochas e solos : Termologia - Rio de Janeiro, 1995.

— NBR 6508. Solo: Determinação da massa específica - Rio de Janeiro, 1984.

— NBR 7180. Solo: Determinação do limite de plasticidade - Rio de Janeiro, 1984.

|   |   |
|---|---|
| Recebido em: 25/05/2005                 | <i>HOLOS Environment, v.5 n.2, 2005 - P.167</i> |
| Liberado para Publicação em: 21/03/2006 | ISSN: 1519-8634                                 |

- NBR 7181. Solo: Análise granulométrica - Rio de Janeiro, 1984.
- NBR 7182. Solo: Ensaio de compactação - Rio de Janeiro, 1986.
- NBR 7216. Agregados: amostragem - Rio de Janeiro, 1982.
- NBR 7217. Agregados: determinação da composição granulométrica - Rio de Janeiro, 1987.
- NBR 7219. Agregados: determinação do teor de materiais pulverulentos - Rio de Janeiro, 1982.
- NBR 7251. Agregado em estado solto: determinação da massa unitária - Rio de Janeiro, 1982.
- NBR 8491. Tijolo maciço de solo-cimento - Rio de Janeiro, 1984.
- NBR 10004. Resíduos Sólidos: classificação - Rio de Janeiro, 1987.
- NBR 10004. Resíduos Sólidos: classificação - Rio de Janeiro, 2004.
- NBR 10005. Ensaio de Lixiviação - Rio de Janeiro, 1987.
- NBR 10006. Ensaio de Solubilização - Rio de Janeiro, 1987.
- NBR 10833. Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica - Rio de Janeiro, 1989.
- NBR 10834. Bloco utilizado de solo-cimento sem função estrutural- Rio de Janeiro, 1994.
- NBR 11798. Materiais para sub-base ou base solo-cimento - Rio de Janeiro, 1990.
- NBR 12024. Solo-Cimento: Moldagem e cura dos corpos-de-prova cilíndricos - Rio de Janeiro, 1992.
- NBR 12025. Solo-Cimento: Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos - Rio de Janeiro, 1990.
- NBR 12253. Solo-Cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento - Rio de Janeiro, 1992.

|   |  |
|---|--|
| Recebido em: 25/05/2005                 | <i>HOLOS Environment</i> , v.5 n.2, 2005 - P.168 |
| Liberado para Publicação em: 21/03/2006 | ISSN: 1519-8634                                  |

— NBR 12254. Execução de sub-base ou base de solo-cimento - Rio de Janeiro, 1990.

—NBR 13553. Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural - Rio de Janeiro, 1996.

— NBR 13554. Solo-Cimento: Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem - Rio de Janeiro, 1996.

— NBR 13555. Solo-Cimento: Determinação da absorção de água - Rio de Janeiro, 1996.

ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. West Conshohockem: ASTM International,2004.Designation: D3282 - 93 (Reapproved 2004).

CONAMA- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução do CONAMA nº 307, 5. ed. Brasília: IBAMA, 2002.

CLESCERI, L, S.; GREENBEK, A. E.; EATON, A., D.; Standard methods for the examination of water and waste water. 20.ed. Washington: American Public Health Association, 1998.

IAC- INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. Carta pedológica semi detalhada do Estado de São Paulo. Campinas, 1989.1mapa Escala 1:100000. Folha de Piracicaba (SF-234-Y-A-IV).

MACÊDO, J. A. B. Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas 2. ed. Belo Horizonte :CRQ, 2003.

PIRACICABA. Prefeitura Municipal. Resíduos de construção em Piracicaba: diagnóstico geral. Piracicaba, 2001.

SILVA, M. O. S. A. Análises físico-químicos para controle de Estações de Tratamento de Esgotos. São Paulo: CETESB, 1997.

EPA- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Acid digestion of sediments, sludges, and soils - Washington, 1996. Method 3050B.