

APLICAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO SÓLIDO DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM CAMADAS DE PAVIMENTOS

Rosângela dos Santos Motta

Liedi Légi Bariani Bernucci

Edson de Moura

Departamento de Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo sobre a viabilidade técnica do uso de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de pavimentos para vias de baixo volume de tráfego. O material estudado foi submetido a ensaios de laboratório que objetivaram caracterizá-lo fisicamente e verificar seu comportamento mecânico em ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia e de módulo de resiliência. Os valores obtidos demonstram que o agregado reciclado é passível de uso em construção de pavimentos.

ABSTRACT

The paper presents a study about the technical feasibility of using construction and demolition waste as a pavement material for low-volume roads. The recycled material was submitted to laboratory tests aimed at characterizing it physically and verifying its mechanical behaviour in tests like compaction, California Bearing Ratio and resilient modulus. The values obtained show that the recycled aggregate can be considered for use as a paving material.

1. INTRODUÇÃO

A grande geração de resíduo de construção civil em cidades de grande e médio portes tem sido um problema crônico que envolve questões de ordem ambiental, social e financeira, principalmente porque grande parte deste material gerado normalmente é disposta de forma irregular em locais como vias, rios, córregos, terrenos baldios e áreas de mananciais. Desta forma, descartado ilegalmente, o resíduo de construção pode trazer riscos à população em função de dois aspectos relevantes: atração de transmissores de doenças e entupimento de bueiros e assoreamento dos recursos hídricos, que implicam em um aumento das enchentes nas estações chuvosas.

Além disso, uma outra questão relacionada é o custo envolvido em todo o sistema de coleta, transporte e destinação final dos resíduos de construção civil. Na cidade de São Paulo, por exemplo, os gastos com todo o processo são elevadíssimos, atingindo soma da ordem de R\$ $45,0 \times 10^6$ /ano (Angulo *et al.*, 2003a), dada a grande quantidade de material gerado que, de acordo com o Departamento de Limpeza Urbana (LIMPURB), já ultrapassa 17.000 ton/dia. Ainda segundo Angulo *et al.* (2003b), a geração média de resíduos de construção civil *per capita* em algumas cidades brasileiras gira em torno de 500kg/ano. Este tipo de problema não é restrito aos países em desenvolvimento que possuem grandes metrópoles. Na Itália, por exemplo, a média de geração de resíduos sólidos da construção civil é de 600kg/ano/pessoa; na Holanda, tem-se os maiores índices europeus, com cerca de 1000kg/ano/pessoa (Costa e Ursella, 2003). A diferença é na ação tomada pelos países desenvolvidos com relação à disposição destes resíduos; há leis fortes para incentivar o uso de reciclados e mesmo, em certas condições, para proibir a geração de resíduos sem uma programada destinação.

Por outro lado, deve-se atentar para a questão dos aterros sanitários, uma vez que o resíduo sólido de construção civil corresponde a mais de 50% dos resíduos sólidos urbanos (Angulo *et al.*, 2003a) que são coletados e a eles destinados. Isto significa que este tipo de resíduo é o grande responsável atualmente pelo esgotamento dos aterros sanitários, fazendo surgir a

necessidade de criação de novos locais para destinação dos mesmos pelos órgãos responsáveis pela limpeza urbana (Bodi *et al.*, 1995). Como consequência, há um agravamento financeiro dos recursos públicos em decorrência da desapropriação de novas áreas, aliado às distâncias cada vez maiores a serem percorridas pelos veículos de carga para despejo dos resíduos; sem falar na dificuldade, muitas vezes, de encontrar locais adequados para a constituição de aterro sanitário por estas áreas serem ambientalmente protegidas.

O resíduo de construção, após passar por um processo de reciclagem, pode ser empregado nas mais diferentes formas como, por exemplo, na confecção de elementos pré-moldados e na execução de camadas em estruturas de pavimentos (Triches e Kryckyj, 1999). Na Holanda, por exemplo, 85% dos resíduos de construção são submetidos a um processo de beneficiamento para serem utilizados nestas duas finalidades principalmente (Hendriks e Janssen, 2001).

O sistema de reciclagem de resíduo de construção é feito nas chamadas usinas recicladoras. Basicamente, são primeiramente feitas a retirada de componentes como ferro, madeira, plástico e papel (que são reciclados para outros fins), e ainda são separados materiais que eventualmente demandem mais cautela na reciclagem, como o gesso. Após esta primeira separação, os resíduos são submetidos à britagem. No Brasil, a primeira usina recicladora foi implementada no ano de 1991, na cidade de São Paulo, com capacidade para produzir 100 ton/hora. De acordo com Bennert *et al.* (2000), a reciclagem de resíduos de construção tem crescido em grandes proporções, mas poucas pesquisas sobre a durabilidade a longo prazo destes materiais têm sido feitas.

Sendo uma alternativa aos materiais convencionalmente utilizados em pavimentação, o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil torna-se interessante por ser disponível em grande quantidade e por apresentar custo inferior em comparação aos materiais comumente empregados, principalmente por estes últimos só serem encontrados em distâncias cada vez maiores, em função da densa ocupação das cidades, o que implica num aumento do custo de transporte. Em São Paulo, os agregados reciclados apresentam preço cerca de 20 a 30% inferior ao das britas graduadas simples, tornando este material uma boa opção para pavimentação de vias ainda em terra ou cascalhadas nas periferias e em bairros mais pobres, principalmente nas cidades de médio e grande portes. Na cidade de São Paulo, por exemplo, segundo dados da própria Prefeitura, são mais de 3.000 km de vias sem pavimentação, ou mais de 18% do total existente.

Este estudo visa analisar as características físicas e mecânicas do agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, através de ensaios realizados em laboratório, visando sua aplicação como insumo em construção de camadas de pavimentos.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O material estudado em laboratório foi coletado na usina recicladora da Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP). A Figura 1 traz uma vista geral da usina recicladora e a Figura 2 uma foto do material após britagem.



Figura 1: Vista geral da usina recicladora de resíduo sólido de construção civil da PMSP



Figura 2: Aspecto do resíduo sólido de construção civil reciclado

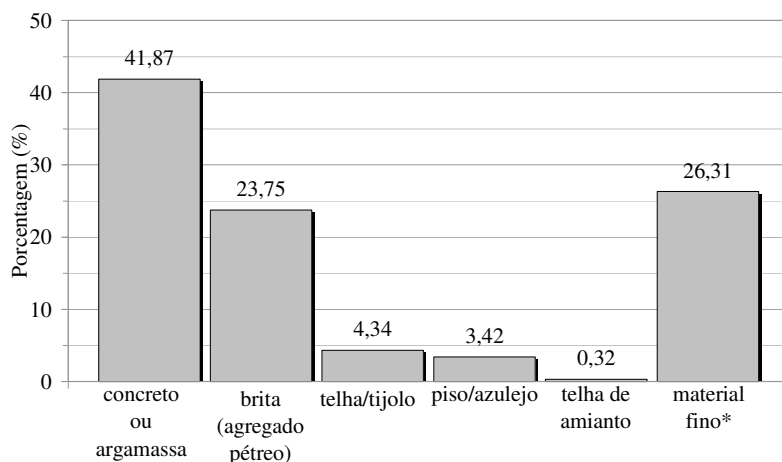
Para caracterizar fisicamente o material, foram feitos quatro ensaios: (a) separação dos componentes em função de sua natureza; (b) verificação da distribuição granulométrica; (c) abrasão *Los Angeles*; e (d) absorção. Já o estudo do comportamento mecânico do agregado reciclado incluiu os seguintes ensaios: (a) compactação utilizando o equipamento MCV adaptado; (b) Índice de Suporte Califórnia (I.S.C.); e (c) módulo de resiliência (M.R.).

2.1. Ensaios de caracterização física

2.1.1. Separação dos componentes em função de sua natureza

Por meio de separação manual e posterior identificação visual, os componentes do agregado reciclado foram sub-divididos em grupos distintos, conforme a natureza dos materiais encontrados na amostra. No entanto, este procedimento somente foi adotado para os grãos com diâmetro superior a 4,76mm, dada a dificuldade de identificação daqueles com diâmetros inferiores.

Os grupos de materiais encontrados na amostra estudada foram classificados como sendo: concreto ou argamassa, brita (agregado pétreo), telha/tijolo, piso/azulejo, telha de amianto e material fino (correspondente, este último, à fração passada na peneira de abertura 4,76mm). A partir daí, foram determinadas as porcentagens de cada um dos tipos de material dentro da amostra, como é apresentado na Figura 3.



(*): material passante na peneira de abertura 4,76mm

Figura 3: Composição do agregado reciclado estudado

2.1.2. Distribuição granulométrica

A verificação da granulometria do material foi feita por peneiramento seco, de acordo com a NBR 7181. Além disso, foi respeitada a dimensão característica máxima exigida na NBR 15115, que é de 63,5mm. A Figura 4 ilustra a curva granulométrica obtida nesta pesquisa.

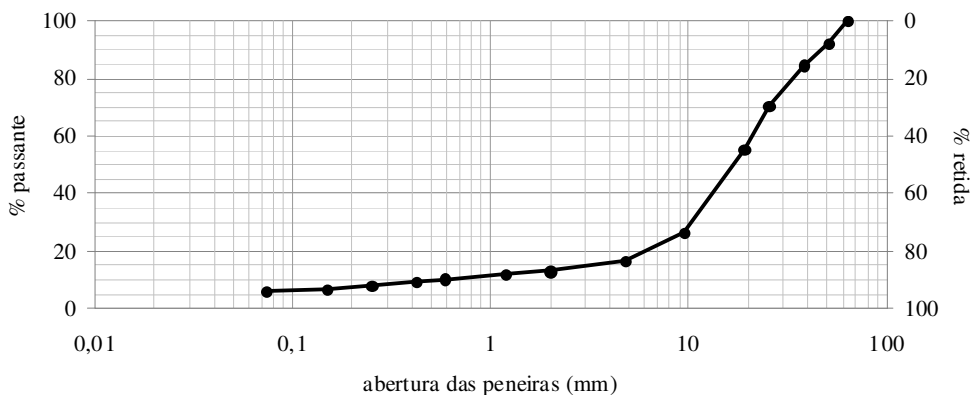


Figura 4: Curva granulométrica agregado reciclado estudado

2.1.3. Abrasão Los Angeles

A determinação da *Abrasão Los Angeles* do agregado reciclado foi feita de acordo com a norma DNER-ME 035/98. A graduação escolhida para a realização do ensaio foi a B, ou seja, aquela que utiliza o material retido entre as peneiras 19 e 12,5mm e 12,5 e 9,5mm.

A massa total de agregado reciclado ensaiado foi 5.000,8g. Após o ensaio no equipamento Los Angeles, verificou-se que a massa de material retida na peneira 1,7 mm foi de 2.510,9g. Com isto, o valor de *Abrasão Los Angeles* deste material é de 50 %.

2.1.4. Absorção

A determinação da absorção do agregado reciclado foi feita de acordo com a norma DNER-ME 081/98. Os dados obtidos no ensaio podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados do ensaio

Massa do material seco (M_s)	13.619,3g
Tempo de imersão	25h
Temperatura ambiente	20°C
Massa do material na condição saturada superfície seca (M_h)	14.463,2g

O cálculo da absorção resulta em valor de 7,8%. Em britas tem-se verificado valores inferiores a 1 ou 2%.

2.2. Ensaio de verificação do comportamento mecânico

Preliminarmente ao estudo do comportamento mecânico do agregado reciclado, procedeu-se à determinação do teor ótimo de umidade de compactação dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios.

Para tanto, a compactação foi realizada em um cilindro tripartido de 15 x 30 cm (Figura 5), ou seja, diferindo apenas em altura do cilindro Proctor, concebido exclusivamente para o fim deste estudo, em função da grande dimensão característica máxima do agregado reciclado (63,5mm). O soquete utilizado e os procedimentos de ensaio seguidos foram os mesmos preconizados pela NBR 7182.

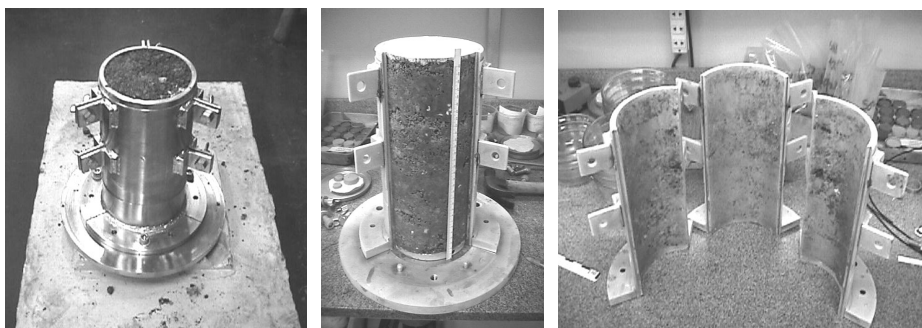


Figura 5: Corpo-de-prova compactado em cilindro tripartido de 15 x 30 cm

Foram ensaiados quatro teores de umidade diferentes: 8,0, 10,0, 12,0 e 14,0%. Os teores foram selecionados levando-se em conta o valor de absorção verificado no item 2.1.4. Para cada um dos teores de umidade foram compactados dois corpos-de-prova, sendo um deles

preparado em 13 camadas com 25 golpes/camada e outro em 6 camadas com 54 golpes/camada. Ambas energias aplicadas são numericamente iguais e correspondem aproximadamente à energia Proctor Intermediária.

A Figura 6 mostra as curvas de compactação obtidas pelos dois processos citados: com 13 camadas com 25 golpes/camada e com 6 camadas com 54 golpes/camada.

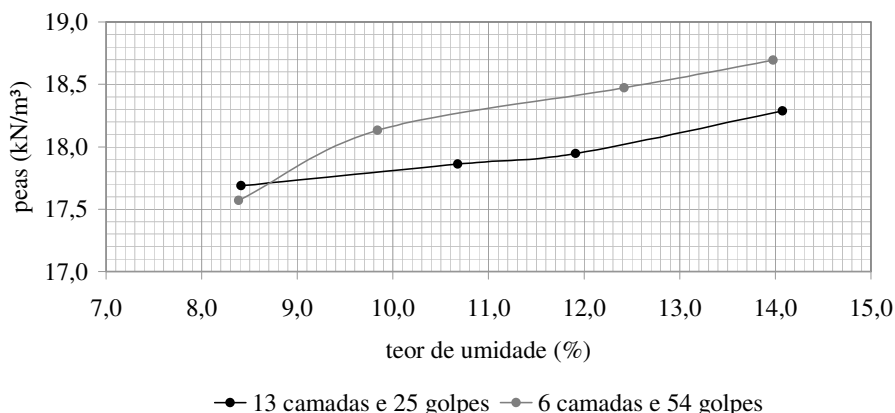


Figura 6: Variação do peso específico aparente seco em função da umidade

Observe-se que a energia de compactação é a mesma nos dois casos, porém a possibilidade de manutenção dos maiores grãos sem significativas quebras é observada no caso de processo envolvendo menor número de camadas, ou seja, maior espessura por camada (50 mm).

Verificou-se a existência de água livre, facilmente observada, quando da preparação da amostra para a compactação com teores acima de 12%, ou seja, com excesso da quantidade de água adicionada (Figura 7).

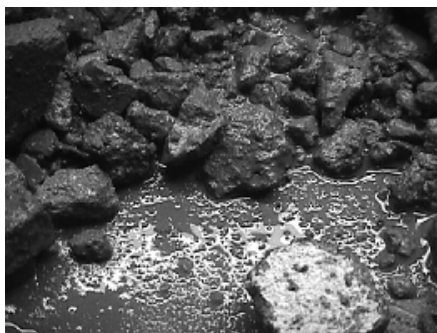


Figura 7: Água livre em excesso na preparação da amostra com teor de umidade de 14%

Na Figura 6, nota-se a dificuldade de construção de uma curva de compactação; a ausência do ramo úmido na curva não foi causada pela falta de um corpo-de-prova com teor de umidade maior que 14%. Com isto, aliado à existência de água livre em amostras com altos teores de umidade, optou-se por moldar os corpos-de-prova em umidade de 11%.

2.2.1. Variação do Peso Específico Aparente Seco com a Energia de Compactação

Para a realização de ensaio que pudesse contemplar a variação do peso específico aparente seco em função do incremento da energia de compactação utilizou-se o equipamento MCV, criado por Parsons (1976), com uma adaptação no que se refere ao soquete: foi empregado um soquete de 4500g ao invés dos 7000g proposto pelo pesquisador. Rezende (1998) estudou detalhadamente o uso do equipamento MCV e de sua adaptação para a pesquisa de solos concrecionados, uma vez que a presença de material retido na peneira de 2 mm é importante, inviabilizando o uso do equipamento mini-MCV criado por Nogami e Villibor (1981).

Este ensaio demonstra a densificação frente ao aumento de energia de compactação, mostrando a quantidade necessária desta última para que o valor do peso específico aparente seco do material se torne constante.

No processo foi utilizado apenas o material passado na peneira $\frac{3}{4}$ ", como especifica a norma de compactação em cilindro *Proctor* NBR 7182, em função da grande dimensão característica máxima do agregado reciclado em comparação com as medidas do cilindro.

A compactação foi feita na umidade ótima estipulada no ensaio de compactação, ou seja, 11%.

A Figura 8 apresenta a curva obtida de *peso específico aparente seco x número de golpes*.

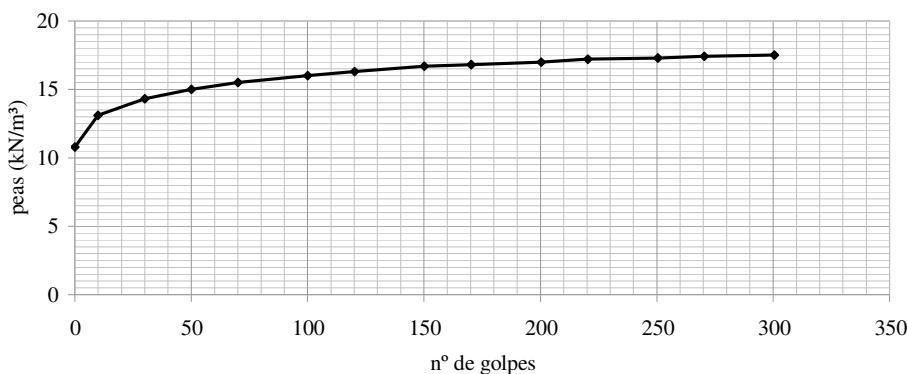


Figura 8: Peso específico aparente seco × curva nº de golpes

Vale ressaltar que não se efetuou a compactação até a completa estabilização do material, pois o número de golpes a ser aplicado para atingi-la seria extremamente elevado. Assim, a compactação foi feita até atingir a marca de 300 golpes, podendo-se notar que a variação de peso específico nesta região já é bem pequena.

Apesar de outros materiais granulares como as Britas Graduadas Simples também apresentarem aumento do peso específico aparente seco com o número de golpes de compactação, a estabilização se dá muito anteriormente, pois os agregados são mais resistentes e se quebram menos freqüentemente.

Deve-se ressaltar que após 110 golpes de compactação neste ensaio, a energia de compactação corresponde à utilizada nos ensaios Proctor com cilindros com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Além disso, o peso específico aparente seco atingido, após esta mesma quantidade de golpes, é de aproximadamente $16,0 \text{ kN/m}^3$, contra os $18,4 \text{ kN/m}^3$ obtido pelo método de compactação Proctor com 6 camadas no cilindro de $15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$. Ainda é interessante realçar que mesmo após 300 golpes, o que corresponde à energia um pouco superior à modificada, o corpo-de-prova não atingiu o mesmo peso específico aparente seco do ensaio Proctor na intermediária, tendo sido obtido somente $17,5 \text{ kN/m}^3$.

Posteriormente, foi verificada a variação da granulometria, ocasionada pelo processo de compactação, através de peneiramento seco do material; a Figura 9 mostra a diferença entre a graduação do resíduo sólido reciclado antes e após a compactação. O material original enquadrava-se na faixa A de Materiais Estabilizados Granulometricamente do DER-SP (1991) e após compactação passou a estar na faixa B do (DER-SP, 1991).

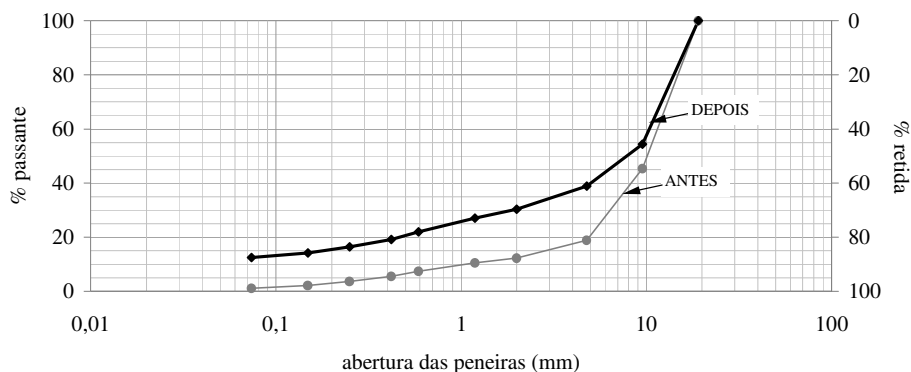


Figura 9: Variação granulométrica após compactação severa no equipamento MCV adaptado

Verifica-se que as maiores diferenças ocorreram no trecho entre as peneiras 1,19mm e 4,76 mm.

2.2.2. Índice de Suporte Califórnia (I.S.C.)

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) foi realizado de acordo com a norma do DNER-ME 50-64; foi utilizado apenas o material passado na peneira $\frac{3}{4}$ ", como especifica a mesma norma.

Foram moldados dois corpos-de-prova, compactados na energia intermediária. Ambos não apresentaram expansão após a imersão em água por quatro dias. Foram calculados os pesos

específicos aparentes secos do agregado reciclado neste ensaio, tendo sido obtido 17,3 kN/m³ em média. O teor de umidade verificado foi de 12%.

O valor de I.S.C. encontrado para os materiais compactados na energia intermediária foi de 75%.

2.2.3. Módulo de resiliência (M.R.)

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado de acordo com a norma do DNER-ME 131-94. Os carregamentos aplicados de tensão de confinamento σ_3 foram 0,02; 0,05; 0,07 e 0,10 MPa e de tensões-desvio σ_d de 0,07; 0,10 e 0,16 MPa.

Diferentemente dos ensaios descritos nos itens 2.2.1 e 2.2.2, no ensaio de módulo de resiliência foi utilizada uma amostra integral do material, e não somente os componentes passados pela peneira 3/4". A compactação foi feita em cilindro tripartido, utilizando energia intermediária e teor de umidade de 11%.

A Figura 10 mostra o gráfico com os valores obtidos no ensaio.

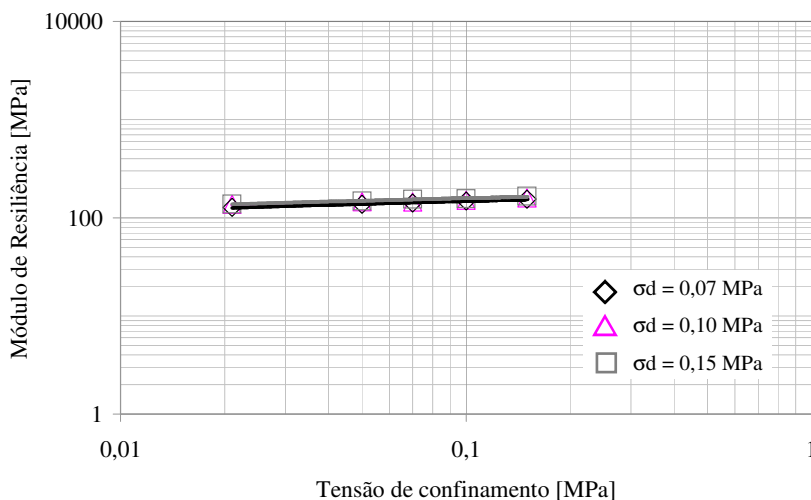


Figura 10: Módulo de resiliência

Verifica-se que os valores de módulo de resiliência obtidos não diferiram muito em função das diferenças de tensões σ_d aplicadas, mostrando ser um material pouco dependente da tensão desvio.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em relação aos tipos de materiais componentes do agregado reciclado estudado, nota-se, conforme gráfico da Figura 3, que a maior parte é composta por concreto ou argamassa, correspondendo a mais de 40% do total. Já a parcela de telha de amianto participa com uma fração muito pequena, ou menos de 0,5%.

Verifica-se que o material é bem graduado (Figura 4), já que o mesmo apresenta um C_u (Coeficiente de Uniformidade) igual a 42, valor este bem acima do valor mínimo estipulado pela NBR 15115, que é 10.

O DER-SP (1991) especifica que, no caso de sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente, o valor de *Abrasão Los Angeles* deve ser de até 50% e nos casos de macadame hidráulico e de brita graduada o valor máximo deve ser de 40%. Este último é o limite estipulado também pela NBR 11806 para a brita graduada simples. Portanto, o valor obtido no ensaio está de acordo para materiais estabilizados granulometricamente, mas fora das especificações de materiais granulares nobres da pavimentação.

O ensaio de variação do peso específico aparente seco com a energia de compactação mostra a dificuldade de estabilização do material, exigindo grande demanda de energia de compactação para tentar alcançá-la, o que provavelmente ocorre devido à existência de agregados com forma alongada e com cantos pouco resistentes. Isto implica em necessidade de ampliar o estudo para limitação de deformação permanente da camada, que pode vir a ser ocasionada pelo tráfego.

A variação de granulometria, que culminou com a redução de porcentagem de agregados graúdos e aumento de agregados miúdos e de finos, não deve, no entanto, ser considerada maléfica. Esta quebra pode aumentar o embricamento e resistência ao cisalhamento do material.

4. CONCLUSÕES

O agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil é de uso promissor em obras de pavimentação por apresentar expansão nula e Índice de Suporte Califórnia de valor aceitável – 75% – para vias com volume de tráfego $N \leq 10^6$ de repetições do eixo-padrão de 80 kN. De acordo com a NBR 15115, os valores mínimos de C.B.R. para reforço do subleito, sub-base e base são, respectivamente, 12, 20 e 60%.

Em relação ao módulo de resiliência, tomando como referência os valores mínimos empregados pela PMSP, o material também apresenta valor satisfatório – em torno de 120 MPa – tanto para bases como para sub-bases. As bases granulares devem apresentar M.R. entre 100 e 500 MPa e as sub-bases, levando-se em conta um C.B.R. do subleito de valor baixo e igual a 2%, devem ser acima de 120MPa, aproximadamente.

O uso do agregado reciclado deve ser incentivado, tanto por apresentar custo inferior aos materiais comumente empregados, como para reduzir problemas ambientais causados pelo grande volume gerado.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984a) *NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1984b) *NBR 7182 – Solo – Ensaio de Compactação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

- ABNT (1991) *NBR 11806 – Materiais para sub-base ou base de brita graduada*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) *NBR 15115 – Agregados Recicladados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de Camadas de Pavimentação – Procedimentos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Angulo, S. C.; Kahn, H.; John, V. M. e Ulsen, C (2003a) Metodologia de Caracterização de Resíduos de Construção e Demolição. *Anais do VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, IBRACON, São Paulo, 1 CD-ROM.
- Angulo, S. C.; John, V. M. e Ulsen, C (2003b) Characterisation and Recyclability of Construction and Demolition Waste in Brazil. *Anais do V International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials*, WASCON, San Sebastián, Espanha, 1 CD-ROM.
- Bennert T.; Papp, W. J.; Jr. Maher, A.; e Gucunski, N. (2000) Utilization of Construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications. *Transportation Research Record*, n.1714, p. 33-39. National Academy Press, Washington, USA.
- Bodi, J.; Brito Filho, J. A.; Almeida, S. de (1995) Utilização de Entulho de Construção Civil Reciclado na Pavimentação Urbana. *Anais da XXIX Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Cuiabá, p.409-436.
- Costa, U. e Ursella, P. (2003) Construction and Demolition Waste Recycling in Italy. *Anais do V International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials*, WASCON, San Sebastián, Espanha. p. 231-239.
- DER-SP (1991) *Manual de Normas Pavimentação*. Departamento de Estradas de Rodagem, São Paulo.
- DNER (1964) *DNER-ME 50/64 – Índice de Suporte Califórnia*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (2002a) *DNER-ME 035/98 – Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (2002b) *DNER-ME 195/97 – Agregados – Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (2002c) *DNER-ME 131/94 – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- GEIPOT (2000) *Anuário Estatístico dos Transportes – 2000*. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Ministério dos Transportes, Brasília, DF.
- Hendriks, F. e Janssen, G. M. T. (2001) Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road constructions. *Heron*, v. 46, n. 2, p. 109-117.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. (1981) Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. *Anais do Simpósio de Solos Tropicais em Engenharia*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, p.30-40.
- Parsons, A. W. (1976) The Rapid Measurement of the Moisture Condition of Earthwork Material. LR 750. Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, UK.
- Rezende, A.A. (1998) O Enasio MCV-ITA como Suporte à Extensão da Metodologia MCT aos Solos Lateríticos Concrecionados. Dissertação de Mestrado. ITA. São José dos Campos, SP.
- Triches, G. e Kryckij, P. R (1999) Aproveitamento de Entulho da Construção Civil na Pavimentação Urbana. *Anais do IV Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*, REGEO'99, São José dos Campos, p.259-265.

Rosângela dos Santos Motta e Liedi Légi Bariani Bernucci
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação – PTR – Escola Politécnica da USP
Av. Prof. Almeida Prado, travessa 2, nº 83
Cidade Universitária – São Paulo – SP – CEP 05508-900
e-mail:rosangela.motta@poli.usp.br / liedl@usp.br