

AUMENTO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA E DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA COM O TEMPO DE CURA DE AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO SÓLIDO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

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 o aumento do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e do Módulo de Resiliência com o tempo de cura em ensaios realizados com o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil proveniente da recicladora da Prefeitura do Município de São Paulo. Os experimentos de Módulo de Resiliência foram realizados tanto com o material *in natura* como também misturado a 4% de cimento Portland. Os resultados dos ensaios de ISC e de Módulo de Resiliência apontaram que houve aumento com o tempo de cura, mesmo no caso do material *in natura*.

ABSTRACT

This paper presents the increase of California Bearing Ratio (CBR) and Resilient Modulus with curing time of tests made with recycled construction and demolition waste provided by the Sao Paulo recycling plant owned by the Municipal Government. The Resilient Modulus tests experiments were conducted with both *in natura* material and its mixture with 4% of Portland cement. The results of CBR and Resilient Modulus tests pointed out that there was an increase with curing time, even in the case of the *in natura* material.

1. INTRODUÇÃO

A grande produção de resíduos de construção civil em cidades de grande e médio portes tem sido motivo de preocupação em diversos países, incluindo-se o Brasil. Tem-se como exemplo a cidade de São Paulo, cuja geração diária de resíduos de construção no ano de 2003 foi estimada em 16.000 toneladas (SCHNEIDER, 2003). Em relação aos outros países, no Brasil existe um agravante que é a prática constante de disposição irregular dos resíduos em diversos locais como vias, rios, terrenos baldios, etc.

A grande produção de resíduos de construção e sua deposição ilegal implicam em problemas ambientais, financeiros e sociais, uma vez que estes materiais são os grandes responsáveis pelo esgotamento dos aterros, podendo chegar a 70% da massa de resíduos sólidos (PINTO, 1999) e, sendo dispostos irregularmente, podem se tornar foco de seres transmissores de doenças, obstruir os sistemas de drenagem, além de agravar as contas públicas por conta de gastos no sistema de coleta, transporte e destinação final – no município de São Paulo estes custos alcançaram mais de R\$ 263 milhões em 2002 (SCHNEIDER, 2003).

Em numerosos países, a destinação dos resíduos de construção para aterros tem sido cada vez menos tolerada e a reciclagem tem sido incentivada. No Brasil, publicou-se no ano de 2002 a Resolução CONAMA, que determina diretrizes para uma efetiva redução dos impactos ambientais provocados pelos resíduos de construção civil. Foi estabelecido neste documento, que os geradores são os responsáveis pelo resíduo produzido e que o objetivo prioritário deve ser a não geração e, caso isto não seja possível, deve-se considerar a redução, reutilização, reciclagem e disposição final (nesta ordem).

Pesquisas realizadas e a experiência prática mostram que os resíduos de construção civil, transformados em agregados reciclados, podem ser empregados, dentre outras coisas, em

construção de pavimentos. Além disso, já se faz presente algumas normas referentes ao assunto, como a NBR 15115 cujo título é “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos”, que foi lançada pela ABNT em 2004. Nesta última, tem-se como critério de avaliação do comportamento mecânico do agregado reciclado o ensaio de ISC (Índice de Suporte Califórnia).

O ensaio de ISC é um experimento estático e, geralmente, apresenta magnitudes de deslocamentos, frente ao carregamento, muito maiores que aquelas verificadas no experimento de Módulo de Resiliência, que por sua vez é um ensaio cíclico; os pequenos deslocamentos são mais realistas e aproximam-se da magnitude daqueles que ocorrem frente às solicitações de tráfego, sendo válida nestas condições a Teoria da Elasticidade. Bennert *et al.* (2000) citam que os engenheiros rodoviários têm reconhecido ultimamente que ensaios triaxiais de carga cíclica são mecanismos fundamentais para avaliar materiais a serem utilizados nas camadas de um pavimento.

Reid (2000) e Arm (2001) realizaram experimentos de ISC e Módulo de Resiliência com agregados reciclados de concreto e notaram que houve aumento nestes quesitos com o tempo. Nesta pesquisa, procurou-se analisar este ganho em laboratório, utilizando agregado reciclado proveniente da usina recicladora da Prefeitura do Município de São Paulo. Este fato é importante de ser considerado à medida que o aumento do ISC e do Módulo de Resiliência são benéficos e traduzem-se em prolongamento da vida útil do pavimento.

Os ensaios de ISC foram conduzidos utilizando corpos-de-prova com o material obtido após reciclagem, denominado nesta pesquisa como agregado reciclado *in natura*. Já para os ensaios de Módulo de Resiliência, foram compactados corpos-de-prova com o material *in natura* e também com a adição de 4%, em massa, de cimento Portland.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O agregado reciclado estudado é do tipo misto, constituído por material cimentício, cerâmico, pedra britada, entre outros componentes, e foi coletado na usina recicladora da Prefeitura do Município de São Paulo. A porcentagem de materiais indesejados é de cerca de 0,4% e atende a NBR 15115 (2004) que exige no máximo até 3%, em massa (para grupos distintos).

O diâmetro máximo do material é 63,5mm, ainda de acordo com a NBR 15115 (2004). Sua curva granulométrica é apresentada na Figura 1.

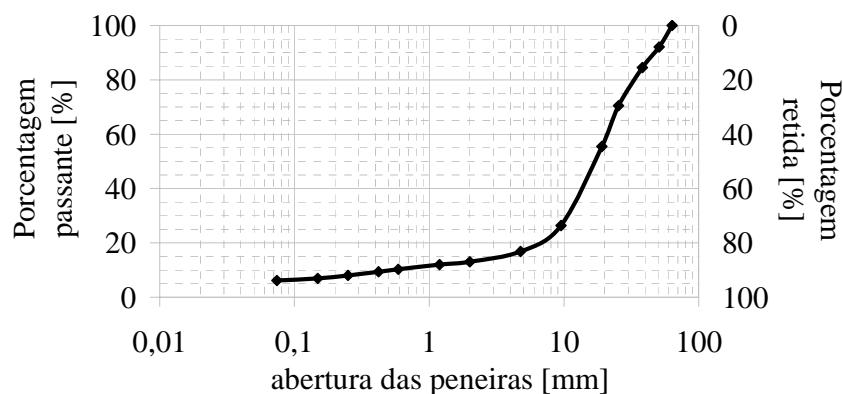


Figura 1: Distribuição granulométrica do agregado reciclado estudado

A partir da graduação, pode-se calcular o Coeficiente de Uniformidade (Cu), que neste caso resultou em 42. A NBR 15115 (2004) determina que o agregado reciclado deve apresentar Cu mínimo de 10. Portanto, este material se encontra dentro da especificação no aspecto granulométrico.

2.1 Preparação dos corpos-de-prova

A compactação dos corpos-de-prova foi feita na energia Proctor Intermediária, no teor de umidade de 11%, obtido em Motta *et al.* (2004) para este mesmo material.

Os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de ISC foram moldados em cilindro de 152mm de diâmetro por 178mm de altura, como preconiza a DNER-ME 049/94 (1994a). Já para o Módulo de Resiliência, os mesmos foram moldados em cilindro de 150mm de diâmetro por 300mm de altura, conforme adotado por Bennert *et al.* (2000) e Arm (2001), não havendo necessidade de se proceder à substituição de material. Embora as dimensões máximas dos agregados fossem diferentes nos dois tipos de corpos-de-prova, o teor de umidade foi mantido, pois observou-se que a variação do peso específico aparente seco era muito pequena frente às variações de umidade. A umidade empregada foi suficiente para a absorção dos agregados e para a molhagem e “lubrificação” no contato entre as partículas que facilitam a compactação.

Para que fosse verificado o uso de energia Proctor Intermediária, a compactação foi realizada, no caso de cilindro de 150mm por 178mm, em 6 camadas com 26 golpes por camada do soquete Proctor de 4.536g; já no caso daquele de 150mm por 300mm a mesma foi efetuada em 6 camadas com 57 golpes por camada.

Para o ensaio de ISC foram empregados corpos-de-prova *in natura* e para os experimentos de Módulo de Resiliência preparou-se um conjunto de corpos-de-prova *in natura* e outro com a adição de 4%, em massa, de cimento Portland tipo CPII E 32. A inclusão de cimento Portland foi feita imediatamente antes do processo de compactação. O agregado reciclado foi previamente submetido à umidade de compactação, e posteriormente o cimento Portland foi pulverizado sobre o agregado para, em seguida, todo o conjunto ser revolvido a fim de promover a homogeneização do mesmo. Logo após este procedimento, a compactação seguiu o mesmo método empregado para o material *in natura*.

Os corpos-de-prova compactados para o ensaio de Módulo de Resiliência foram envolvidos previamente por um tubo de PVC para que os mesmos não sofressem desagregação de sua estrutura durante o armazenamento (Figura 2). Já os corpos-de-prova que foram moldados para o ensaio de ISC foram mantidos em seus moldes metálicos. Todos os corpos-de-prova foram armazenados em uma caixa preenchida com serragem úmida, de forma que não houvesse perda de umidade neste processo (Figura 3), até cumprirem os tempos de cura estabelecidos.



Figura 2: Sustentação do corpo-de-prova por tubo de PVC antes de ser submetido ao período de cura

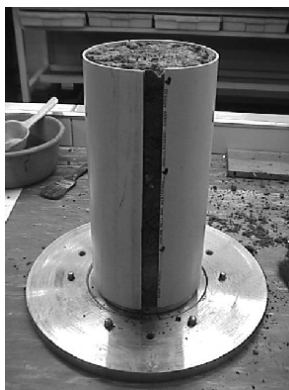


Figura 3: Armazenamento dos corpos-de-prova em caixa com serragem umedecida

A Tabela 1 apresenta um quadro-resumo referente à moldagem com o tempo de cura para cada conjunto de corpos-de-prova.

Tabela 1: Quadro-resumo referente à moldagem

Tipo de ensaio	Tipo de corpo-de-prova	Quantidade de corpos-de-prova	Tempo de cura [dias]
ISC	<i>in natura</i>	2	0
		2	28
		2	90
		2	180
Módulo de Resiliência	<i>in natura</i>	2	0
		3	28
		3	90
		3	180
	com 4% de cimento Portland	3	28
		2	90
		3	180

O tempo zero significa compactação seguida imediatamente de 4 dias de imersão em água destilada. O tempo “28” significa 24 dias de cura úmida (na caixa) seguida de 4 dias de imersão em água destilada. Idem para “90” e “180” dias de cura.

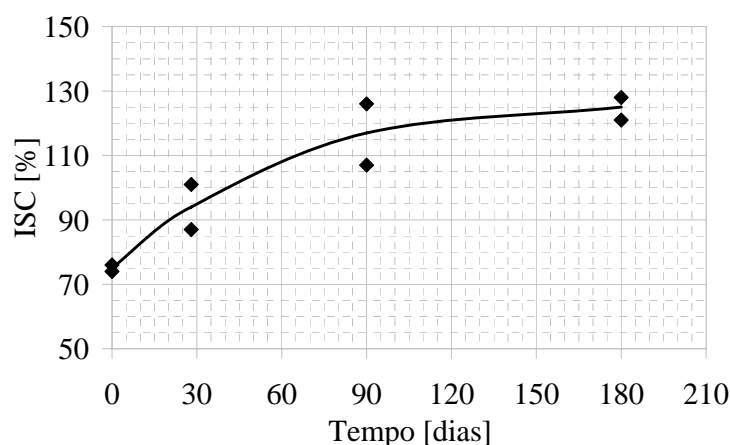
2.2 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio de ISC foi realizado de acordo com a norma do DNER-ME 049/94 (1994a). Cabe ressaltar que houve necessidade de substituição de material.

A Tabela 2 e a Figura 4 apontam os resultados do experimento. Na Figura 4, os pontos representam os valores obtidos e a curva demonstra a progressão do ISC, em números médios.

Tabela 2: Resultado dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia

Tempo de cura [dias]	Índice de Suporte Califórnia [%]	Valor médio do Índice de Suporte Califórnia [%]
0	76	75
0	74	
28	87	94
28	101	
90	126	117
90	107	
180	121	125
180	128	

**Figura 4:** Resultado dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia

Com base nos dados apresentados na Tabela 2 (ou na Figura 4), nota-se que houve aumento significativo da capacidade de suporte do material com o tempo de cura; tomando-se como base a média dos pontos e a comparação com o valor aos zero dias de cura, tem-se que o ISC após 28 dias cresceu cerca de 25%, aumentou mais 24% entre 28 e 90 dias, e ainda cresceu 7% entre 90 e 180 dias. Assim, o aumento acumulado no período chegou a 56%.

Como a análise trata de agregado reciclado sem a adição de material aglomerante (no caso cimento Portland), então há indícios de que houve reação pozolânica por parte de partículas que ainda possuíam potencial reativo, que culminou com o crescimento da capacidade de suporte após a cura.

Os dados apresentados na Tabela 2 (ou na Figura 4) se mostram com uma certa dispersão, provavelmente devido à heterogeneidade do agregado reciclado ou à possibilidade de erro inerente ao ensaio. Pode-se considerar como outra probabilidade, a difícil repetibilidade e reprodutibilidade do experimento de ISC, como mostra um estudo realizado com diferentes tipos de solos brasileiros por Pinto em 1964, e que contempla ainda um trabalho francês de Peltier, cujos ensaios foram realizados em vários laboratórios. A pesquisa envolveu cálculos de ISC médio, desvio padrão e coeficiente de variação e, em praticamente todos os casos, foram observadas variações significativas em torno dos valores de ISC alcançados nos ensaios. O desvio padrão de todos os solos estudados varia entre 0,72% e 26,6% e o coeficiente de variação, por sua vez, entre 5,2% e 53,9%.

Desta forma, embora tenha sido notável um crescimento da capacidade de suporte com o tempo de cura do agregado reciclado analisado (Tabela 2 ou Figura 4), os valores de ISC apresentados pelo material podem conter variações intrínsecas a este ensaio.

2.3 Módulo de Resiliência

O experimento de Módulo de Resiliência foi realizado de maneira semelhante ao especificado na norma DNER-ME 131/94 (1994b) para solos.

Os resultados obtidos com os diferentes corpos-de-prova e tempos de cura são apresentados nas Figuras 5 e 6. A Figura 5 ilustra os valores de Módulo de Resiliência alcançados com os corpos-de-prova compactados com o agregado reciclado *in natura*. Já a Figura 6 apresenta os resultados dos corpos-de-prova compactados em que houve a incorporação de 4% de cimento Portland, sendo acrescentado ao gráfico, para efeito comparativo, o valor obtido com o agregado *in natura* testado imediatamente após a compactação. Os valores de Módulo de Resiliência se referem à tensão desvio – σ_d – de 0,200MPa, que ocorre na camada de base granular de pavimentos com revestimentos asfálticos delgados.

Pelos resultados da Figura 5, verifica-se que os corpos-de-prova do tipo *in natura* sofreram aumento significativo do Módulo de Resiliência com o tempo, embora haja uma certa dispersão dos resultados. Tomando-se como base as linhas de tendência do gráfico, e fazendo a comparação com o material aos zero dias de cura, tem-se que, no ponto de σ_3 igual a 0,150MPa por exemplo, o Módulo de Resiliência cresceu 12% após 28 dias de cura, aumentou mais 33% entre 28 e 90 dias, e ainda cresceu mais 6% entre 90 e 180 dias. No total de zero a 180 dias de cura, o aumento foi de cerca de 51%, sendo bastante similar ao obtido no ensaio ISC (56%), embora as magnitudes das tensões e dos deslocamentos sejam muito diferentes nos dois ensaios de comportamento mecânico.

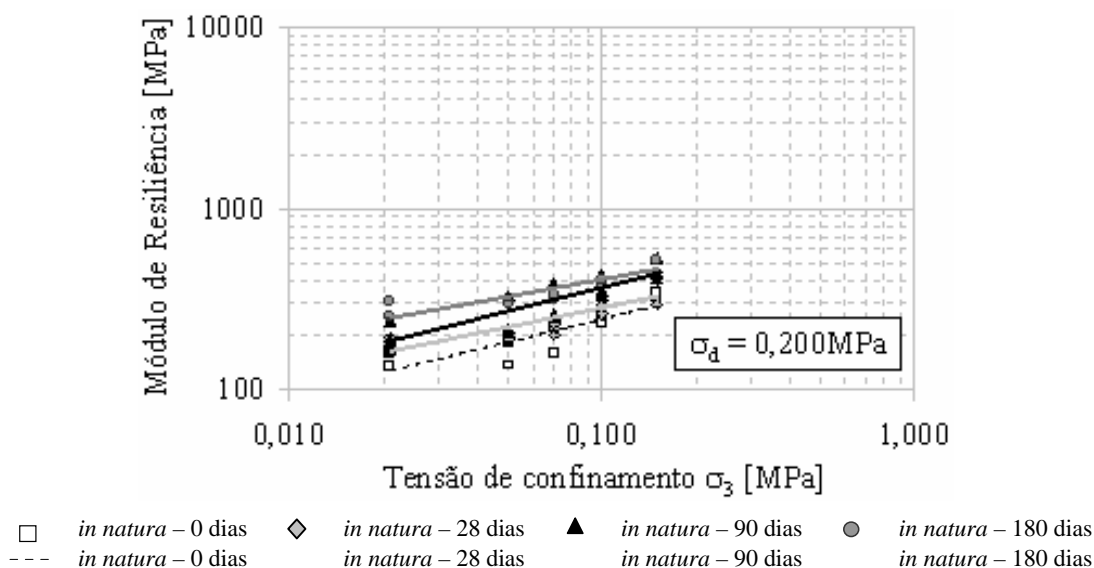


Figura 5: Evolução do Módulo de Resiliência com o tempo de cura em corpos-de-prova *in natura*, para σ_d de 0,200MPa

Já na Figura 6, tem-se que o Módulo de Resiliência do material com 4% de cimento Portland praticamente não se alterou quando há a comparação entre as linhas de tendência de todos os tempos de cura testados. É interessante notar que a incorporação de 4% de cimento Portland

ao agregado reciclado tornou o Módulo de Resiliência deste último significativamente maior. Dependendo da tensão de confinamento – σ_3 – considerada, o aumento registrado com a adição de 4% de cimento Portland foi de cerca de 8 a 9 vezes na comparação com o material *in natura* aos zero dias de cura, e de aproximadamente 5 vezes no caso do material *in natura* aos 180 dias de cura.

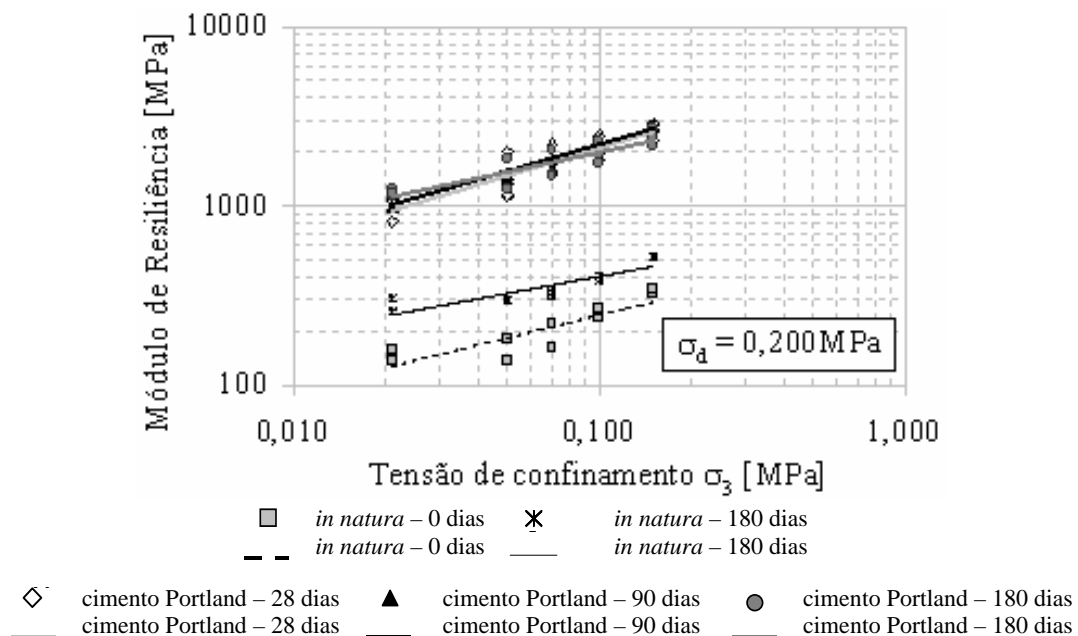


Figura 6: Evolução do Módulo de Resiliência com o tempo de cura em corpos-de-prova com 4% de cimento Portland, para σ_d de 0,200 MPa

De maneira geral, pode-se observar nas Figuras 5 e 6 que o agregado reciclado, em todos os tempos de cura analisados, tanto para o material *in natura* quanto para aquele com 4% de cimento Portland, é afetado pela tensão de confinamento aplicada.

3. CONCLUSÕES

O Índice de Suporte Califórnia do agregado reciclado aumentou significativamente com o tempo de cura, mesmo sem adição de cimento Portland; da mesma forma como observado no experimento de Módulo de Resiliência com material *in natura*. Isto possivelmente ocorreu devido a reações pozolânicas de partículas não inertes contidas no agregado reciclado *in natura*.

Como este ganho de ISC verificado foi de 25% após 28 dias de cura, mais 24% entre 28 e 90 dias e ainda mais 7% entre 90 e 180 dias, e o crescimento acumulado chegou a 56%, o mesmo pode ser considerado expressivo.

No que se refere ao Módulo de Resiliência, observou-se que houve crescimento significativo em todos os tempos de cura testados no caso do material *in natura*. Tem-se como exemplo o ponto em que atua o par de tensões σ_3 e σ_d de 0,150 MPa e 0,200 MPa, respectivamente, cujo aumento acumulado de zero a 180 dias foi de cerca de 51%.

Já os valores de Módulo de Resiliência apresentados pelo material com 4% de cimento Portland praticamente não se alteraram nos diferentes tempos de cura testados. Isto demonstra que o aumento do Módulo de Resiliência que foi imposto pela incorporação do cimento Portland, como quando é feita em outros materiais, se dá nas primeiras vidas e estabiliza-se após 28 dias.

Verificou-se ainda que a adição de 4% de cimento Portland ao agregado reciclado tornou seu Módulo de Resiliência muito elevado, da ordem de 8 a 9 vezes na comparação com o material *in natura* aos zero dias de cura, e de aproximadamente 5 vezes no caso do material *in natura* aos 180 dias de cura. Neste último caso, observa-se que mesmo com o aumento do valor de Módulo de Resiliência sofrido pelo material *in natura* após 180 dias de cura, o mesmo ainda é bem inferior àquele obtido com a incorporação de 4% de cimento Portland.

Embora haja a possibilidade de variação em torno dos resultados do ensaio de ISC, como apresentado na pesquisa de Pinto (1964), o experimento de Módulo de Resiliência pode confirmar a hipótese de que o agregado reciclado analisado sofreu ganho neste quesito com o tempo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a bolsa de mestrado do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico da primeira autora e à Prefeitura do Município de São Paulo pelo fornecimento de material e apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arm, M. (2001) Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. *Waste Management and Research*, v.21, p. 235-239.
- ABNT (2004) *NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Bennert, T.; Papp Jr., W. J.; Maher, A.; Gucunski, N. (2000) Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications. *Transportation Research Record – Journal of the Transportation Research Board – Recycled and Secondary Materials, Soil Remediation and In Situ Testing*, v.1714, n.00-1350, p.33-39.
- Conama (2002) *Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002*. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 17 de fev. 2005.
- DNER (1994a) *DNER-ME 049/94 – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- _____. (1994b) *DNER-ME 131/94 – Determinação do módulo de resiliência*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- Motta, R. S.; Bernucci, L. L. B.; Moura, E (2004) Aplicação de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil em Pavimentação. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Florianópolis, v.1, p.259-269.
- Pinto, C. S (1964) *Estudo da dispersão do ensaio C.B.R.* Boletim Técnico da Associação Brasileira de Pavimentação, n.6. Rio de Janeiro.
- Pinto, T. P. (1999) *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. 189p. Tese de Doutorado apresentada na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Reid, J. M. (2000) UNBARS Conference. *The use of alternative materials in road construction*. Disponível em: <<http://www.trl.co.uk/altmat/ALT-MAT%20final%20rev1.dot>>. Acesso em: 18 de out. 2003.
- Schneider, D. M. (2003) *Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo*. 130p. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. São Paulo.

Rosângela dos Santos Motta, Liedi Légi Bariani Bernucci e Edson de Moura
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 / liedi@usp.br / edmoura@usp.br