



III-130 - ESTUDO DE MISTURAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE BASE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Ezequiel Rosa Dias⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Civil - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Jisela Aparecida Santanna-Greco

Professora Doutora do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Judy Norka Rodo de Mantilla

Professora Doutora do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Maria das Graças Gardoni Almeida

Professora Doutora do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Endereço⁽¹⁾: Av. do Contorno, 842, 6º andar – Centro - Belo Horizonte - MG - CEP: 30110-060 - Brasil - Tel: (31) 3409-1790 - e-mail: ezequiel.rosadias@gmail.com

RESUMO

Este trabalho aborda o estudo da viabilidade técnica da utilização dos resíduos sólidos da construção civil (RSCC) em camadas de base de pavimentos flexíveis. O agregado reciclado foi fornecido usina de reciclagem da rodovia BR-040, vinculada à Superintendência de Limpeza Urbana do Município de Belo Horizonte. A avaliação foi realizada através de ensaios laboratoriais, que incluíram ensaios iniciais para caracterização do material reciclado, ensaio de abrasão “Los Angeles”, ensaio de compactação na energia intermediária, ensaio para determinação do índice de suporte do material e ensaio para avaliação da expansão. Os resultados obtidos foram comparados com as restrições impostas pela especificação DNER-ES 303/97 para bases estabilizadas granulometricamente. Foi constatado que composições do agregado reciclado, correspondentes à curva média e ao limite inferior da faixa C da referida especificação cumpriram as exigências referentes à capacidade de suporte, expansão e desgaste por abrasão “Los Angeles”, impostas para materiais empregados em camadas de base de vias para tráfego pesado. O comportamento apresentado pelo agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil indica que o mesmo pode ser aplicado com segurança em camadas de base de pavimentos flexíveis, sem restrições quanto ao tráfego.

PALAVRAS-CHAVE: Agregados Reciclados, Resíduos Sólidos da Construção Civil, Pavimentos Econômicos, Camada de Base.

INTRODUÇÃO

Países em desenvolvimento, como o Brasil, possuem como uma de suas características a elevada geração de resíduos sólidos. Dentre esses resíduos destacam-se os resíduos sólidos da construção civil (RSCC), sendo que as dificuldades para a destinação final correta desses resíduos consistem em um dos grandes desafios ambientais da sociedade moderna (RESPLANDES, 2007).

Os RSCC normalmente são descartados em aterros sanitários gerando sérios problemas, pois, por não serem degradáveis, seu acúmulo diminui a vida útil dos aterros. Além disso, quando descartados em locais inapropriados causam problemas sócio-ambientais, normalmente ligados à ocupação urbana junto às margens dos cursos d'água, provocando consequências graves ao meio ambiente e à saúde humana, gerando também custos para as prefeituras, que devem providenciar o remanejamento desses resíduos.

A reciclagem surge como uma alternativa de preservação dos recursos naturais renováveis e não renováveis, permitindo um crescimento sem consumo desenfreado de energia, além de contribuir para que os aterros sanitários tenham uma vida útil mais extensa, uma vez que o material reciclado não será mais disposto em aterros.



Agregados reciclados obtidos a partir de RSCC podem ser empregados em vários setores da Engenharia, destacando-se entre as aplicações o seu uso em pavimentação. De acordo do Ribeiro (2006), a utilização em pavimentação é a forma mais simples de reciclagem do entulho, seja na forma de brita corrida ou ainda em misturas do resíduo com solo.

Entretanto, para que se faça a correta aplicação do agregado reciclado de resíduos da construção civil em camadas de pavimentos, em substituição aos materiais naturais não renováveis, faz-se necessário o total conhecimento do comportamento desse material, através de estudos laboratoriais específicos, por meio de técnicas, equipamentos de ensaio e novas metodologias, apropriadas para a avaliação do material reciclado.

MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo sólido da construção civil estudado foi fornecido pela Usina de Reciclagem do Aterro Sanitário da Prefeitura de Belo Horizonte, situado no quilômetro 531 da BR-040, no bairro Jardim Filadélfia, região Noroeste de Belo Horizonte (figura 1). Essa usina possui um sistema de separação do material em peneiras, e fornece três tipos de agregados reciclados, classificados como brita 1 (material com diâmetro entre 9,52 mm e 19,1 mm), brita 0 (material com diâmetro entre 4,76 mm e 9,52 mm) e pó de brita (material com diâmetro inferior a 4,76 mm).



Figura 1: Usina de reciclagem da BR-040.

Na usina, após a britagem do entulho de construção civil o mesmo é direcionado para o conjunto de peneiras e, após a separação, é estocado em pilhas. Para a retirada de amostras das pilhas de estocagem foram seguidas as orientações da norma DNER-PRO 120/97 (DNER, 1997a), que prescreve o procedimento para a coleta de amostras de agregados finos e graúdos, sob diferentes condições de estocagem.

Durante a coleta o material foi retirado de vários pontos das pilhas, alternadamente de um lado e de outro e em diferentes alturas das mesmas. Foram obtidas amostras representativas de brita 1, brita 0 e pó de brita. As amostras foram posteriormente reduzidas em laboratório, por quarteamento, para obtenção das quantidades necessárias à realização dos ensaios laboratoriais de caracterização e avaliação do comportamento mecânico do material.

A redução das amostras por quarteamento seguiu as orientações da norma DNER-PRO 199/96 (DNER, 1996). A amostra de campo foi colocada sobre uma superfície rígida, plana e limpa, evitando perdas de material, principalmente o mais fino, evitando-se também a contaminação do mesmo; em seguida procedeu-se a homogeneização do material, revolvendo-o no mínimo três vezes; após todo o material ser distribuído ao piso em uma camada com uma espessura mais fina e o mais homogênea possível, toda a massa foi dividida em quatro partes, e posteriormente cada parte subdividida em outras quatro partes, tomando-se o cuidado de homogeneizar novamente o material e o de varrer bem a superfície com espaços vazios, evitando-se perdas.

A forma de redução do resíduo pode ser visualizada nas fotos da figura 2.



Figura 2: Redução do resíduo sólido da construção civil por quarteamento.

Para a avaliação da aplicação do agregado reciclado em camadas de base de pavimentos flexíveis, foi seguida a especificação DNER-ES 303/97 (DNER, 1997b). De acordo com essa especificação, para que uma camada seja considerada estabilizada granulometricamente, o material ou mistura de materiais que a compõe deve possuir composição granulométrica satisfazendo a uma das faixas estabelecidas pela referida norma.

Para a determinação das curvas granulométricas testadas, foi inicialmente realizada a caracterização dos três tipos de agregados reciclados fornecidos pela usina da BR-040. Nessa etapa foi realizada a análise granulométrica conjunta do pó de brita, e a análise granulométrica por peneiramento dos agregados graúdos, brita 1 e brita 0.

Foi também realizado o ensaio de massa específica real do pó de brita. Esse ensaio foi realizado segundo as orientações da norma rodoviária DNER-ME 084/95 (DNER, 1995). Para obtenção da quantidade de material necessária para a realização do ensaio, separou-se, por quarteamento, como porção representativa do agregado miúdo, 2000 gramas. Desse material retiraram-se 1000 gramas para o ensaio, quantidade essa que foi passada pelas peneiras de aberturas 4,8 mm e 0,075 mm, separando-se 500 gramas do material retido entre essas peneiras. A seguir, homogeneizou-se o material novamente e retiraram-se 60 gramas para cada amostra, para a realização do ensaio de massa específica real do pó de brita.

A partir das características granulométricas dos agregados reciclados disponíveis, foi realizado o projeto de mistura dos materiais, através do método dos mínimos quadrados (SANTANNA-GRECO & GRECO, 2007). Dessa forma, foram determinadas as proporções empregadas de cada fração do agregado reciclado, de forma que as misturas resultantes se enquadrassem nas faixas B e C da especificação DNER-ES 303/97 (DNER, 1997b).

Após a definição das misturas, foram realizados ensaios laboratoriais para a determinação da capacidade de suporte e da expansão das mesmas, a fim de se verificar o cumprimento dos critérios mínimos que possibilitam a aplicação de um material em camadas de base de pavimentos flexíveis. O Índice de Suporte Califórnia compara a resistência à penetração apresentada pelo material que está sendo testado com a resistência à penetração apresentada por uma amostra padrão de brita estabilizada granulometricamente.

Os ensaios para determinação do Índice de Suporte Califórnia e expansão foram realizados de acordo com o método de ensaio DNER-ME 049/94 (DNER, 1994a). Tais ensaios foram realizados para o teor ótimo de umidade, determinado através de ensaios de compactação. Os ensaios de compactação foram realizados para o centro e para o limite inferior da faixa C do DNER, especificação 303/97 (DNER, 1997b). A energia de compactação utilizada no ensaio de compactação foi a Proctor Intermediária. O ensaio foi realizado sob orientações da norma rodoviária DNER-ME 162/94 (DNER, 1994b).

Os agregados reciclados correspondentes a brita 1 e brita 0 foram submetidos ao ensaio de Abrasão “Los Angeles”, realizado segundo os procedimentos da norma rodoviária DNER-ME 035/98 (DNER, 1998a). Foram empregadas as graduações B e C da referida norma, para os agregados brita 1 e brita 0, respectivamente. Fixadas as graduações adotadas, prepararam-se amostras dos agregados. Para a brita 1, separaram-se 2.500 gramas passantes na peneira 19mm e retidos na 12,5mm e 2.500 gramas entre as peneiras 12,5mm e 9,5mm. Já para a brita 0 separaram-se 2.500 gramas entre as peneiras 9,5mm e 6,3mm e 2.500



passantes na peneira 6,3mm e retidos na peneira 4,8mm. As amostras foram colocadas no tambor padronizado pelo ensaio “Los Angeles”, juntamente com a respectiva carga abrasiva, definida por norma.

Após a realização do ensaio, correspondente a 15 minutos de rotação do tambor, retirou-se o material, que foi passado pela peneira 1,7 mm, rejeitando-se o passante. Determinou-se a massa do material retido na peneira 1,7 mm, obtendo-se a massa de agregado após o ensaio (m'_n). O valor de abrasão “Los Angeles” dos agregados foi calculado por meio da equação 1.

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

A_n = abrasão “Los Angeles” da graduação n;

n = graduação escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra antes do ensaio;

m'_n = massa da amostra retida na peneira 1,7 mm (depois do ensaio).

RESULTADOS OBTIDOS

A análise granulométrica conjunta do material fino (pó de brita) foi feita segundo orientações das normas DNER-ME 051/94 (DNER, 1994c) e DNER-ME 083/98 (DNER, 1998b). A análise granulométrica do material graúdo (brita 0 e brita 1) foi realizada segundo orientações da norma rodoviária DNER-ME 083/98 (DNER, 1998b). Os resultados dessas análises encontram-se apresentados na figura 3.

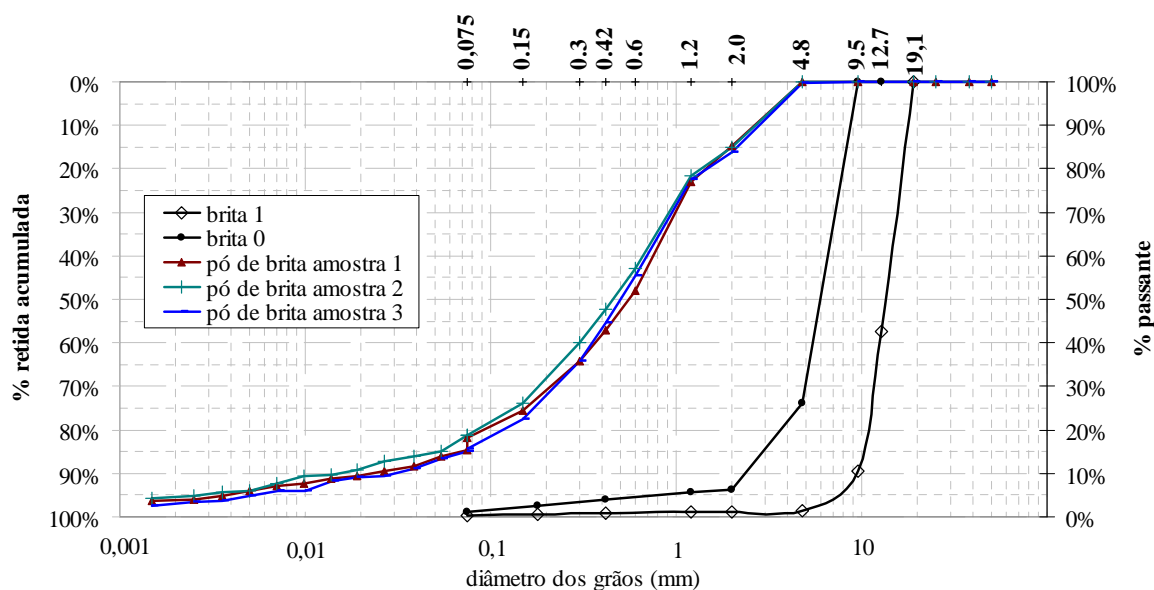


Figura 3: Curvas de distribuição granulométrica do pó de brita, brita 0 e brita 1.

Os resultados da análise granulométrica conjunta realizada para o material fino (pó de brita) e os resultados da análise granulométrica do material graúdo (brita 1 e brita 0) serviram como ponto de partida para o projeto de mistura de materiais, que indicou duas curvas granulométricas a serem testadas, correspondentes à curva média e ao limite inferior da faixa C da especificação DNER-ES 303/97 (DNER, 1997b), apresentadas na figura 4.

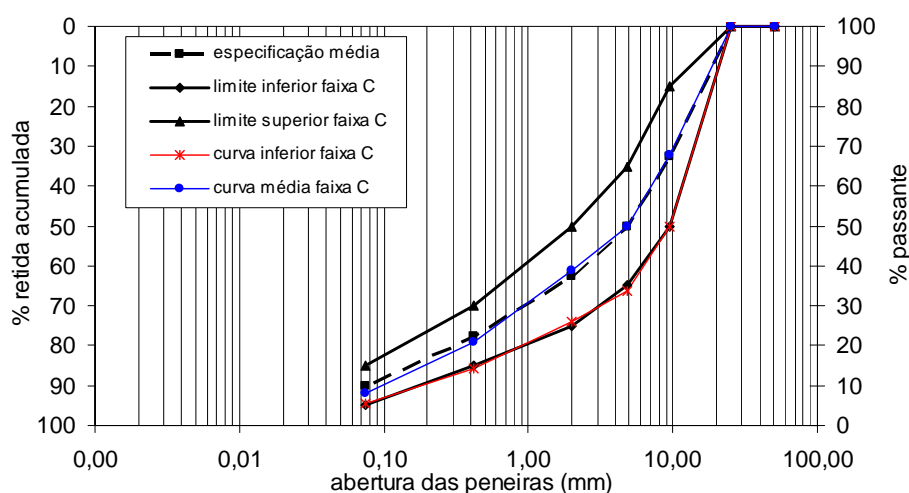


Figura 4: Curvas granulométricas obtidas através da mistura dos materiais disponíveis.

Através do método de mistura de materiais empregado, método dos mínimos quadrados, foram definidas as porcentagens a serem empregadas de cada material, a fim de que o produto resultante apresentasse a curva de distribuição granulométrica almejada. Para obtenção da curva média da faixa C foram utilizados 36% de brita 1, 20% de brita 0 e 44% de pó de brita. Para obtenção da curva granulométrica correspondente ao limite inferior da faixa C foram empregados 56% de brita 1, 15% de brita 0 e 29% de pó de brita.

Para definição do teor ótimo de umidade foram realizados ensaios de compactação. As curvas de compactação obtidas encontram-se apresentadas nos gráficos das figuras 5 e 6. Para o centro da faixa C do DNIT, Especificação 303/1997, o valor do teor de umidade ótimo foi de 16,2% e o valor da massa específica aparente seca máxima foi de 1,780 g/cm³ (figura 5). Já para o limite inferior da mesma faixa e mesma especificação, os valores da umidade ótima e massa específica aparente seca máxima foram de 15,9% e 1,770 g/cm³, respectivamente (figura 6).

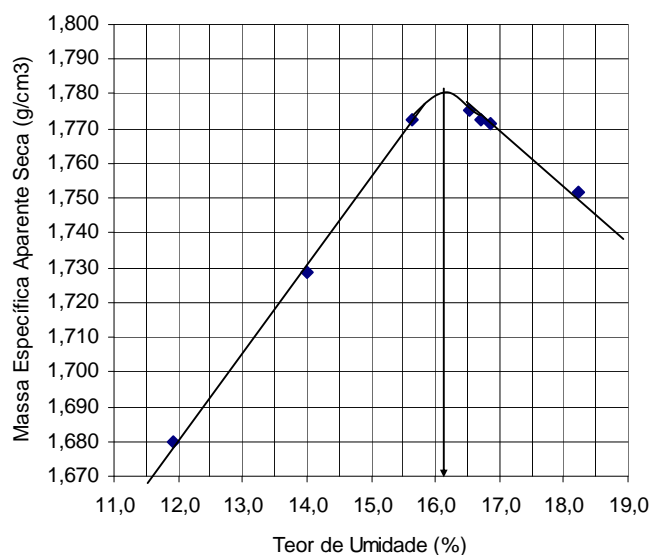


Figura 5: Resultados do ensaio de compactação para o centro da faixa C do DNER - ES 313/97.

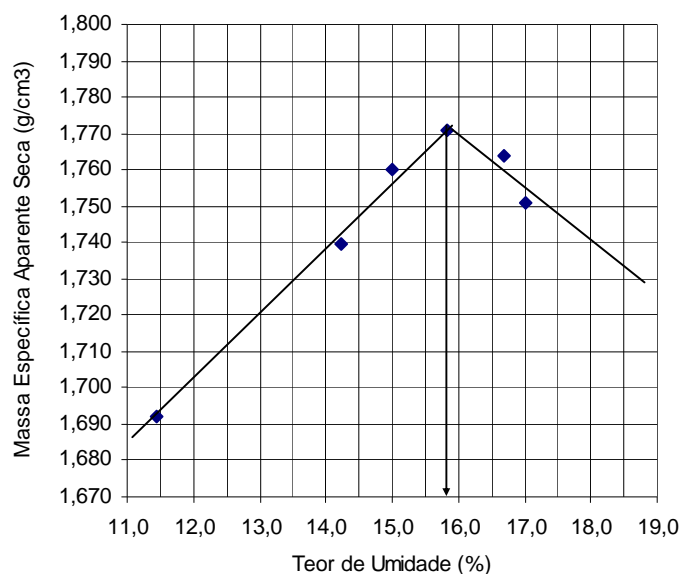


Figura 6: Resultados do ensaio de compactação para o limite inferior da Faixa C do DNER - ES 313/97.

Como parte dos ensaios para caracterização dos materiais, foi determinada a massa específica dos grãos, obtendo-se o valor de $2,689 \text{ g/cm}^3$.

Ensaio de laboratório mostraram que o valor da abrasão “Los Angeles” do agregado brita 1 foi de 45,2% e 43,8% para a brita 0. Esses valores são bastante satisfatórios, pois se encontram abaixo do valor máximo de 55% especificado pela norma DNER-ES 303/97 (DNER, 1997b) para bases estabilizadas granulometricamente.

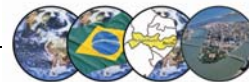
Através da realização dos ensaios para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão, realizados de acordo com o método de ensaio DNER-ME 049/94 (DNER, 1994a), foram obtidos os resultados apresentados na tabela 1. Pode-se observar que o RSCC apresentou ISC de 147% para o centro da faixa C da especificação DNER-ES 303/97 (DNER, 1997b) e 217% para o limite inferior da mesma faixa e mesma especificação. Esses valores mostram ser tecnicamente viável o emprego dos resíduos sólidos da construção civil em bases de pavimentos, camada essa que requer valores de ISC acima de 80% quando $N > 5 \times 10^6$, de acordo com a norma-rodoviária DNER-ES 303/97 (DNER, 1997b). O material ainda apresentou expansão praticamente nula, propriedade muito importante no que se refere ao seu uso em base de pavimentos.

Tabela 1: Valores de Índice de Suporte Califórnia e expansão.

	Curva média da faixa C (especificação DNER-ES 303/97)		Limite inferior da faixa C (especificação DNER-ES 303/97)	
	ISC (%)	expansão (%)	ISC (%)	expansão (%)
Corpo de prova 1	149	0,016	211	0,011
Corpo de prova 2	146	0,026	229	0,017
Corpo de prova 3	146	0,017	211	0,017
Valores médios	147	0,020	217	0,015

CONCLUSÕES

De acordo com a especificação DNER-ES 303/97 (DNER, 1997b) para bases estabilizadas granulometricamente, o índice de suporte mínimo para que um material possa ser utilizado em camadas de base é de 80%, com expansão máxima permitida de 0,5%. Através dos resultados obtidos verificou-se que as misturas de agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil testadas cumpriram as exigências mínimas. A mistura com distribuição granulométrica correspondente ao centro da faixa C da referida especificação apresentou ISC médio de 147% e expansão de 0,02%. A mistura com distribuição granulométrica correspondente ao limite inferior da faixa C apresentou ISC médio de 217%, e expansão de 0,015%. Ou seja, ambas apresentaram valores de Índice de Suporte Califórnia bem acima do mínimo exigido



de 80% e expansão praticamente nula. Além disso o valor de abrasão “Los Angeles” apresentado pelo agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil foi de 45,2% para a brita 1 e de 43,8%, para a brita 0, ambos bem abaixo do limite máximo de 55% especificado para bases estabilizadas granulometricamente. Os resultados indicam que as misturas propostas podem ser empregadas na construção de camadas de base de pavimentos flexíveis para vias de alto volume de tráfego, sendo que a mistura correspondente ao limite inferior da faixa C, mistura com granulometria mais grossa, apresentou comportamento superior ao apresentado pela mistura correspondente ao centro da referida faixa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e à PRPq (Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais), pelo apoio concedido. Agradecem também à Usina de Reciclagem do aterro sanitário da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, pelo fornecimento do agregado para a pesquisa e pela ajuda na coleta do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: *DNER-ME 049/94. Norma Rodoviária: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro: DNER, 1994a. 14 p.
2. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: *DNER-ME 162/94. Norma Rodoviária: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas*. Rio de Janeiro: DNER, 1994b. 7 p.
3. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: *DNER-ME 051/94. Norma Rodoviária: Solos – análise granulométrica*. Rio de Janeiro: DNER, 1994c. 12 p.
4. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: *DNER-ME 084/95. Norma Rodoviária: Agregado miúdo – determinação da densidade real*. Rio de Janeiro: DNER, 1995. 3p.
5. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: *DNER-PRO 199/96. Norma Rodoviária: redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório*. Rio de Janeiro: DNER, 1996. 5p.
6. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: *DNER-PRO 120/97. Norma Rodoviária: coleta de amostras de agregados*. Rio de Janeiro: DNER, 1997a. 5p.
7. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: *DNER-ES 303/97. Norma Rodoviária: base estabilizada granulometricamente*. Rio de Janeiro: DNER, 1997b. 7p.
8. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: *DNER-ME 035/98. Norma Rodoviária: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”*. Rio de Janeiro: DNER, 1998a. 6p.
9. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: *DNER-ME 083/98. Norma Rodoviária: Agregados – análise granulométrica*. Rio de Janeiro: DNER, 1998b. 5p.
10. RESPLANDES, H. M. S. *Estudo ambiental e técnico da aplicação do agregado reciclado na estrutura de pavimentos*. 2007. 206p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.
11. RIBEIRO, F. *Estudo da aplicação do agregado reciclado na base de um pavimento flexível*. 2006. 171p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.
12. SANTANNA-GRECO, J.A.; GRECO, M. (2007). Aplicação do método dos mínimos quadrados ao projeto de mistura de materiais. *XXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Porto, Portugal, 2007.