

USO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA REFORÇO DE SUBLEITO EM REGIÕES DE SOLO COM ELEVADO TEOR DE UMIDADE

Carlos Mateus Gonçalves Gonzaga
Felipe Silveira Cavalcanti Bezerra
Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará
Departamento de Engenharia de Transportes

RESUMO

A demanda crescente por materiais nas construções viárias tem preocupado a sociedade devido à escassez ou impossibilidade de exploração de novas jazidas por questões ambientais. Com isso, o uso de agregados reciclados da construção civil avançou principalmente nos últimos 20 anos. No presente trabalho, o tipo de resíduo estudado é o de concreto de cimento, denominado por rachão, a ser aplicado em terrenos de fundação instáveis devido à alta umidade, como nos casos de obras próximas a cursos d'água. A análise considerou a influência da umidade pós-compactação do subleito para solos finos e, a mesma análise ao se utilizar o rachão como camada de reforço do subleito, visando atenuar o efeito da variação da umidade no solo. Os resultados mostraram que a substituição do solo com alto teor de finos pelo rachão, além de reciclar o material, inibiu os danos causados pela água que ascende do lençol às camadas superiores.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, conforme ABRELPE (2018), foram coletadas pelos municípios, em 2018, cerca de 44,53 milhões de toneladas de resíduos abandonados em vias e logradouros públicos, ou, em volume, 53,44 milhões de m³. Somente em Fortaleza (CE), a produção foi de 702 toneladas/dia, resultando em 256.230 toneladas anuais. (CABRAL, 2011).

Para a construção de um pavimento rodoviário, diversos materiais são utilizados, os quais podem ser novos, extraídos de jazidas, ou reciclados, oriundos de rejeitos industriais. Nestes últimos, em especial, destaca-se o Resíduo de Construção e Demolição (RCD), da indústria da construção civil. A ABNT (2004) disserta sobre a classificação dos resíduos sólidos, sendo o de interesse para o presente trabalho, o resíduo Classe II -B, não perigoso e inerte.

Para avaliar a aplicação do RCD em pavimentação, o presente trabalho realizou um estudo de caso, em uma obra viária de Fortaleza, que utilizou pedra rachão de material reciclado britado para reforço do subleito devido ao solo predominantemente argiloso e de alta umidade. As vias estudadas são de tráfego leve, pertencentes a uma zona urbana residencial, e o revestimento foi em bloco intertravado de concreto.

Diante do exposto, o objetivo desta comunicação técnica é justificar a utilização do RCD, dada a impossibilidade de uso do próprio solo natural, por questões de inviabilidades técnicas e econômicas.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Dois dos parâmetros que possuem correlação com a variação do teor de umidade do solo são o Módulo de Resiliência (MR) e, conseqüentemente, o Índice de Suporte Califórnia (ISC ou *California Bearing Ratio* - CBR), sendo este parâmetro o mais utilizado para avaliar o comportamento do solo, tanto como fundação como em camadas de pavimentos rodoviários e urbanos. Ele é definido como a relação percentual entre a pressão necessária para penetrar um pistão numa amostra de solo convenientemente preparada e a pressão para penetrar o mesmo pistão em uma amostra padrão, com material de brita de alta qualidade. (IPR, 2016).

O outro parâmetro, MR, tem seu ensaio normatizado em IPR (2010). Ele pode ter utilidade para projeto e para estudos de retroanálise de pavimentos. Contudo, quando não for possível a obtenção desse valor por meio de ensaio, pode-se recorrer às correlações existentes. De acordo com AASHTO (2008), o MR pode ser correlacionado com o valor de suporte do solo, por meio da Equação (1).

$$MR = 17,6161 \times CBR^{0,64} \quad (1)$$

em que:

MR: Módulo de Resiliência [MPa];

CBR: Valor do suporte [%].

Desse modo, faz-se necessário entender como o solo reage quando tem sua umidade variada pós-obra. Sobre a influência da variação da umidade pós-compactação, Takeda (2006) resume cerca de 16 trabalhos que estudaram o assunto. Jones e Witczack (1977) trabalharam com solos de subleito oriundos de argilas siltosas e observaram que, ao se aumentar o teor de umidade de 11%, que era a umidade ótima, para 20%, o MR sofreu redução de 275 MPa para algo próximo de 52 MPa, uma redução de 81%. Esse fenômeno é bastante explorado nos estudos a seguir sobre pavimentação, dado os recorrentes afundamentos dos pavimentos encontrados em regiões com umidade alta no solo.

Thadkamalla e George (1995) *apud* Takeda (2006) desenvolveram um estudo para investigar o efeito do grau de saturação sobre o MR do subleito. Nesse estudo, os autores concluíram que, em solos com graduação aberta, o MR é menos afetado, tendo redução de, aproximadamente, 20%. Contudo, para solos finos, sofre alterações bastante significativas, da ordem de 50% a 75%, sendo que, para saturação por capilaridade, esse aumento é linear e, para saturação por contrapressão, exponencial.

Li e Selig (1994) *apud* Takeda (2006) propuseram um estudo para prever o valor de MR em casos de incremento de umidade acima da ótima de compactação. Os autores destacaram que o estado físico dos solos é fator determinante no valor do MR. A variação do MR para qualquer solo analisado individualmente é normalizada por $R_m = MR / MR_{(ótimo)}$. O R_m é um coeficiente que representa a razão entre o MR resultante da variação de umidade e o MR obtido no ensaio com a umidade ótima de compactação. Duas foram as situações analisadas, a e b detalhadas a seguir pelas equações (2) e (3), com coeficientes de determinação (R^2) de 0,76 e 0,82, respectivamente.

- a) Amostras que apresentam mudanças no teor de umidade, mas com massa específica seca constante:

$$R_{m1} = 0,98 - 0,28 \times (w - w_o) + 0,029 \times (w - w_o)^2 \quad (2)$$

em que:

R_{m1} : $MR / MR_{(ótimo)}$ para o caso de massa específica seca constante;

w_o e w : umidade ótima e umidade do solo [%];

MR: MR na umidade (w) e mesma massa específica do $MR_{(ótimo)}$ [kgf/cm²];

$MR_{(ótimo)}$: MR determinado na umidade ótima (w_o) e massa específica seca máxima para uma energia de compactação qualquer [kgf/cm²].

- b) Amostras que apresentam mudanças no teor de umidade, mas que conservam energia de compactação única, ou seja, com variação na massa específica seca:

$$R_m2 = 0,96 - 0,18 \times (w - w_o) + 0,0067 \times (w - w_o)^2 \quad (3)$$

em que:

R_{m2}: MR / MR_(ótimo) para o caso de energia de compactação constante;

w e w_o: umidade ótima e umidade do solo [%];

MR: MR na umidade (w) e mesma massa específica do MR_(ótimo) [kgf/cm²];

MR_(ótimo): MR determinado na umidade ótima (w_o) e massa específica seca máxima para uma energia de compactação qualquer [kgf/cm²].

Li e Selig (1994) *apud* Takeda (2006) concluíram que um aumento de umidade, para as duas condições, leva a uma redução significativa da rigidez do solo. Contudo, a diferença entre os dois casos torna-se menor para teores de umidade acima da ótima, que é o caso de interesse do presente trabalho.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Inicialmente, foi necessário avaliar a condição do solo natural e definir a necessidade de reforço do subleito. Amostras foram recolhidas para ensaio em laboratório. Os documentos utilizados foram: ABNT (2016a), sobre amostragem de solos e DNER (1994), sobre teor de umidade. Além desses, o ensaio de CBR foi realizado conforme IPR (2016). O MR foi obtido com a relação da Equação (1) para os 04 trechos em análise, contemplando cerca de 300m. Para posterior comparação da umidade natural com a umidade ótima, realizou-se, também, o ensaio de compactação Proctor normal, ABNT (2016b).

3.1. Local da obra

O local da obra em estudo possui lençol freático, até mesmo fora do período chuvoso, bastante raso, variando de 50 cm a 150 cm, a partir do greide do projeto de pavimentação, dos pontos mais baixos aos mais altos, respectivamente. Logo, esse fator interfere nas camadas de pavimentação e, se fosse utilizado o solo natural do subleito, haveria problemas de estabilização e capacidade de suporte. Isso porque a energia de compactação não consegue expulsar os vazios do solo demasiado úmido, conforme comparação dos resultados de umidade natural com a ótima. Um dos motivos para o elevado lençol é a sua proximidade com um rio que dista de 80 m a 500 m, a depender do trecho analisado.

A aplicação do rachão consiste em escavar o terreno até a cota desejada, lançar o material e compactar. Em praticamente todos os trechos escavados, foi encontrada água do lençol, como mostrado na Figura 1a. Contudo, vale ressaltar que, nos pontos mais críticos, nos quais o lençol poderia atingir a camada de base do pavimento, há trincheiras drenantes para reduzir a cota do nível d'água.

O material foi adquirido em uma usina de reciclagem em Fortaleza, estado do Ceará. Como esse tipo de material, apresentado na Figura 1b, varia bastante com a origem do resíduo, foi necessário realizar os ensaios de CBR e granulometria, de modo a atender aos requisitos normativos exigidos em contrato.



Figura 1: (a) Terreno escavado e (b) Pedra rachão de RCD lançada na via

3.2. Dimensionamento das seções

É válido destacar que a obra em estudo se localiza em área ocupada por residências. Assim, adota-se a premissa de que o nível do greide da via acabada deve coincidir, com margem máxima de cerca de 10 cm de diferença em alguns locais, com o nível do terreno atual. Essa prática é designada por greide colado. Essa é uma decisão que objetiva não gerar degraus exagerados, ao se reduzir o nível da via, e tampouco afogar as casas ao se elevar.

Não houve contagem de tráfego para determinação do Número N. Contudo, pode-se estimar pela PMSP (2004), o valor de 10^5 para o número N, dadas as características locais. Assim, por se tratar de tráfego leve, as seções são reduzidas. No dimensionamento das camadas constituintes do pavimento em intertravado, pelo método de Cook (1996), o qual fundamenta-se no valor de CBR e o tipo de material das camadas, obtém-se a configuração do pavimento apresentado na Figura 2.

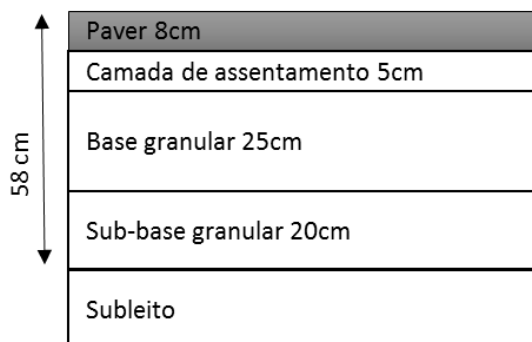


Figura 2: Seção sem reforço de subleito

Como descrito anteriormente, o subleito possui elevada umidade e, devido a isso, torna-se dificultoso o seu serviço de compactação, o que pode gerar problemas futuros com a diminuição da capacidade de suporte do solo pelo aumento da umidade pós-compactação. Diante disso, a opção foi de utilizar o rachão fazendo um rebaixamento ainda maior do solo natural, como apresentado na Figura 3.

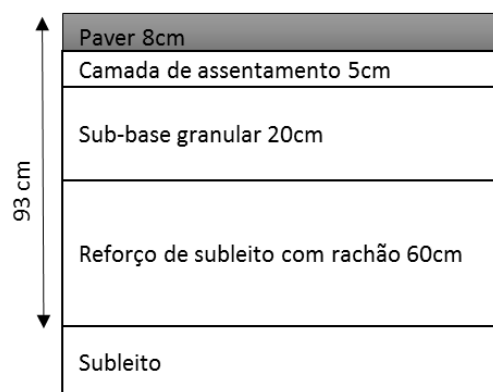


Figura 3: Seção com o reforço de subleito

Com a nova seção, a espessura de solo removido aumenta de 58 cm para 93 cm, pois é a soma das camadas a partir da superfície do terreno natural até a camada final de escavação, sendo o rachão lançado e compactado em camadas de 20 cm logo após essa escavação. Foi observado, em campo, que na primeira camada, a compactação rebaixa significativamente o nível do material, por agulhamento (cravar, por compactação, o material granular diretamente no subleito). A partir disso, a estabilização foi obtida, compactando novas camadas de rachão até a cota estabelecida. Finalizada a camada de reforço do subleito, inicia-se a execução da camada de sub-base com material granular (Figura 4a) e, finalmente, a camada de assentamento com o pó de pedra e o revestimento em intertravado (Figura 4b).



Figura 4: (a) Execução de sub-base e (b) aplicação de camada de assentamento e intertravado

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados compreende duas etapas. A primeira etapa resume os resultados obtidos nos ensaios e a segunda disserta sobre as variações da qualidade do solo com as variações de umidade pós-compactação.

4.1. Primeira etapa

Para a primeira, foi feita uma associação entre as equações (1) e (2), para correlacionar o CBR com as variações de umidade. Dessa análise, obteve-se a equação (4):

$$CBR = CBR_{lab} \times Rm1^{\frac{1}{0,64}} \quad (4)$$

em que:

CBR_{lab} : valor do CBR no ensaio [%];

$Rm1$: coeficiente obtido em (2);

CBR: valor do CBR no teor de umidade (w) [%].

Em três dos quatro trechos avaliados, percebeu-se a necessidade de substituição do solo natural devido aos altos valores de umidade encontrados, variando de 14,4 % a 20,0 %, sendo as umidades ótimas de compactação bem inferiores a esses valores. A Tabela 1 resume os principais parâmetros obtidos dos ensaios, com destaque para o CBR e a umidade natural.

Tabela 1: Resumo dos principais resultados

Trecho avaliado		A	B	C	D
FAIXA AASHTO		A-6	A-2-4	A-6	A-2-6
L.L. (%)		38,3	NL	26,0	33,2
I.P. (%)		23,4	NP	11,7	16,0
Class. HRB		A-6	A-2-4	A-6	A-2-6
LABORATÓRIO	Umidade ótima de compactação (wo)	15,5	8,5	11,2	11,1
	C.B.R (%)	3,5	24,7	8,0	9,1
CAMPO	Úmidade natural (%)	20,0	14,4	16,0	14,5
MR ótimo pela expressão (1)		39,3	137,2	66,7	72,4
Rm1 (Equação 2)		0,31	0,34	0,30	0,36
CBR calculado (Equação 4) (%)		0,55	4,52	1,25	1,87
Redução do CBR (%)		84,18	81,68	84,43	79,45

A Tabela 1 indica a faixa AASHTO do solo nos trechos. Pode-se observar que os trechos A e C são silto argilosos, com Índice de Plasticidade (IP) maior que 10. O solo do trecho D, apesar de granular, por possuir percentual passante na peneira 200 menor que 35,0%, possui IP maior que 10. O solo B difere do solo D no IP, que é não líquido. Dentre os quatro trechos, apenas o solo B é classificado como excelente a bom para subleito no sistema de classificação AASHTO. Os outros três são classificados como regular a mau. Desse modo, o solo do trecho B não precisou de reforço. Assim, na rua do trecho B, após a compactação do subleito, foi executada a camada de sub-base.

4.2. Segunda etapa

Observando os valores originais de CBR do material natural, é possível notar que eles variam de 3,5% até 24,7% (Tabela 1). Porém, os resultados indicaram redução do CBR pós-compactação para abaixo de 2% em três trechos (A, C e D), o que contraria indicação mínima do IPR (2006). Sendo assim, o solo precisou ser substituído, para que essa redução não atingisse os patamares mínimos de qualidade exigidos.

A solução alternativa, para os trechos A, C e D, foi utilizar um material com granulometria aberta e graúda, que gerasse menor impacto ambiental e que tivesse menor custo direto de aquisição e transporte se comparado a explorar jazidas, a jazida mais próxima ficava a 25km da obra e o custo de aquisição com transporte superava o da pedra rachão de RCD. A Figura 5 ilustra a granulometria do material. Desse modo, a camada não foi afetada pelo aumento de umidade como no caso do solo natural, com maior teor de finos.

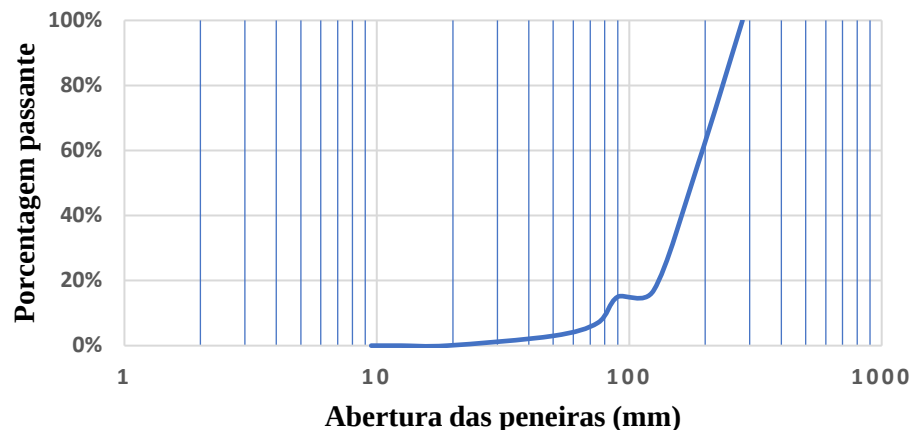


Figura 5: Granulometria da pedra Rachão de RCD

5. CONCLUSÃO

Verifica-se que a solução de substituição de solo em construção de vias em locais próximos a cursos d'água, que tornam o lençol freático elevado, é uma solução técnica viável para obras de pavimentação urbana, sobretudo em regiões com presença de solo com elevado teor de umidade natural.

Conforme esperado pela literatura, a camada de reforço com granulometria graúda e aberta, com uso de Resíduo de Construção e Demolição (RCD), reagiu de forma diferente e não apresentou afundamentos, contando 6 meses do final da construção até a submissão desta comunicação. Outra vantagem do uso do rachão foi reduzir o impacto ambiental de se extrair material novo de jazidas, além de encontrar um novo uso para o RCD que se tornaria um passivo ambiental.

A principal limitação foi a consideração de o tráfego ser leve, com número N não superior a 10^5 . Em condições de tráfego mais severas, o indicado para o dimensionamento seria analisar a possibilidade de recalque da camada de rachão devido ao não uso do material de preenchimento. Além disso, deve-se considerar outras composições e granulometrias possíveis a partir da britagem do reciclado nas usinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2004) *NBR 10004 – Informação e documentação – Resíduos sólidos – Classificação*. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016a) *NBR 6457 – Informação e documentação – Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016b) *NBR 7182 – Informação e documentação – Solo - Ensaio de compactação: Versão Corrigida:2020*. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Empresas Pública E Resíduos Especiais – ABRELPE (2018) *Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil – 2018/2019*. São Paulo.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO (2008) *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide-A Manual of Practice*, Estados Unidos da América.
- Cabral, A. E. B. (2011) Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. *Revista Engenharia Sanitária*, v. 16, ed. 3, p. 2219-224.
- Cook, I.D; Knapton, J. (1996) A Design Method For Lightly Trafficked And Pedestrian Pavements. *Fifth International Concrete Block Paving Conference*, Tel-Aviv-Israel, p. 339-348.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER (1994) *DNER-ME 213/94: Solos – Determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro-RJ.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2006) *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro-RJ.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2016) *DNIT -ME 172/2016: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro-RJ.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2018) *DNIT -ME 134/2010: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro-RJ.
- Jones, M. P.; Witczak, M. W. (1977) Subgrade Modulus On The San Diego Test Road. *Transportation Research Board*, California, p. 1-6.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – PMSP (2004) *Instrução de Projeto - IP 02. Classificação das Vias*, São Paulo.
- Takeda, M. de. C. (2006) *A Influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

Carlos Mateus Gonçalves Gonzaga (carlosmateusgg@gmail.com)

Felipe Silveira Cavalcanti Bezerra (felipesilveiracb@hotmail.com)

Francisco Heber Lacerda de Oliveira (heber@det.ufc.br)

Departamento de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Bloco 703, Av. Humberto Monte, Campus do Pici – Fortaleza, CE, Brasil.