

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO E DO TEOR DE AREIA NA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS

Francisco das Chagas Isael Teixeira Cavalcante⁽¹⁾

Suely Helena de Araújo Barroso⁽²⁾

Universidade Federal do Ceará

Departamento de Engenharia de Transportes

RESUMO

Estudos comprovam que a microrregião do agropólo Baixo Jaguaribe, no Estado do Ceará, é carente em materiais a serem empregados em camadas mais nobres de um pavimento e que nesta região há ocorrência de areias provenientes dos rios Banabuiú, Jaguaribe e Quixeré. Diante da necessidade de se obter melhora nas propriedades dos solos da região, caracterizados pela ausência da fração areia, realizou-se um estudo sobre a estabilização de um solo local com a adição da fração que lhe falta. Foram produzidas misturas com a adição de teores crescentes de areia de rio ao solo natural. Essas misturas foram submetidas aos ensaios de caracterização, compactação, suporte CBR e ensaio triaxial cíclico com o uso das energias de compactação intermediária e intermodificada. Com os resultados obtidos, recomenda-se a utilização da mistura com 60% de areia de rio em camadas do pavimento.

ABSTRACT

Studies indicate that the Baixo Jaguaribe's Agricultural Pole, in the State of Ceará, is lacking in materials that can be employed in most noble layers of pavements, and that this region has sand from rivers Banabuiú, Jaguaribe and Quixeré. Due to the need to obtain a continuous granulometry in the Baixo Jaguaribe's soil, characterized by the absence of the sand fraction, has developed a study on the stabilization of soil with the addition of the fraction that lacks. Thus, mixtures were produced with the addition of increasing levels of river sand to a natural soil. These mixtures were tested by characterization, Proctor compaction tests, California Bearing Ratio and Resilient Modulus that were made with the use of intermediate and intermodified compaction energies. Analyzing the results, it is recommended the use of the mixture with 60% of sand from river in layers of pavement.

1. INTRODUÇÃO

No Ceará, grande parte da malha viária é composta por rodovias em leito natural ou com tratamento superficial, ambas são denominadas Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVT). As RBVT's são construídas de maneira simples e destinadas ao tráfego leve de veículos. Essas vias são muito importantes para o desenvolvimento econômico e social de uma região, pois são responsáveis pela ligação entre localidades distantes e os centros urbanos mais próximos, por exemplo.

No entanto, a concepção ou melhoramento das vias já existentes é muito dificultado, pois devido ao baixo volume de veículos que circulam por estas, torna-se difícil justificar a destinação de verbas junto ao governo para as obras necessárias. Tal fato gera a necessidade de alternativas mais baratas e que visem à racionalização dos materiais empregados na construção das rodovias.

Buscando uma justificativa para a alocação de recursos voltados para obras de pavimentação das RBVT's no estado do Ceará, foram realizados alguns estudos visando o conhecimento prévio dos materiais de diferentes regiões, suas potencialidades e limitações, dentre eles pode-se destacar: Barroso (2002), Souza Júnior (2005), Rabêlo (2006) e Gondim (2008).

As pesquisas têm mostrado que em algumas regiões do Ceará há grande dificuldade de se encontrar materiais com propriedades adequadas para o emprego em camadas de base e

sub-base. Isso decorre da crescente escassez de materiais granulares que possam ser usados na pavimentação. Essa realidade acaba por encarecer os custos de implantação de uma rodovia. Uma das alternativas para viabilizar a construção e melhoria de rodovias é tentar melhorar o comportamento dos solos locais através de estabilização mecânica, granulométrica e/ou química.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1. Estabilização de um solo

Estabilizar um solo, para fins rodoviários, consiste em tentar melhorar as propriedades naturais deste com a adição de outro material. Normalmente se utiliza tal processo para que, assim, o material venha a atender às especificações de uso para seu emprego em camadas mais nobres do pavimento. Alguns processos de estabilização podem ser citados, tais como a técnica de solo cal, aplicação de emulsão asfáltica e o emprego da estabilização granulométrica a partir de resíduos ou misturas de solos naturais, esta última enfocada no presente trabalho.

Vargas (1977) define estabilização de solos como o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência às cargas ou à erosão, por meio da compactação, da correção granulométrica e da sua plasticidade ou da adição de substâncias que lhe confirmem coesão proveniente da cimentação ou aglutinação de partículas. Assim, torna-se necessária a avaliação criteriosa das propriedades do material a ser empregado nas camadas do pavimento, pois a funcionalidade deste depende das características apresentadas pelo solo, o qual deverá suportar todos os esforços para os quais foi projetado.

2.2. Estabilização Granulométrica

A estabilização granulométrica consiste na melhoria das propriedades de um solo, tendo como princípio a correção de sua curva granulométrica, fazendo com que se tenha uma maior variedade de dimensões das partículas constituintes deste, diminuindo, assim, o volume de vazios. Esse processo consiste na mistura e compactação dos materiais naturais, nas proporções corretas, de modo a conferir ao solo melhores propriedades para aplicação rodoviária.

Santanna (1998) menciona que a estabilização é maior para distribuições granulométricas que proporcionem uma máxima densificação, através do preenchimento, por grãos menores, dos vazios existentes entre os grãos maiores, mas sem que seja perdido o contato entre eles.

Muitas vezes não é possível a utilização do solo local, mas dispõe-se de solos onde predominam pedregulhos, areias ou siltes e argilas. Assim, é necessária a composição artificial de solo estabilizado, usando a proporção adequada de cada um deles e sua mistura, a fim de obter a granulometria final desejada (Vargas, 1977).

2.3. Estabilização Mecânica (Compactação)

Segundo Hilf (1975), a compactação serve como forma de redução do volume de vazios, fazendo com que as partículas menores preencham os espaços existentes entre as maiores, conferindo ao solo, maior resistência, menor permeabilidade e principalmente maior estabilidade.

Hoje, as energias utilizadas para a compactação de solos em obras rodoviárias, no Brasil, são determinadas pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (DNIT). Três energias são empregadas: normal (12 golpes), intermediária (26 golpes) e modificada (55 golpes). No Ceará, em obras realizadas pelo Departamento de Edificações e Rodovias (DER), foi observada a utilização de uma nova energia para compactação das camadas do pavimento, denominada de “intermodificada” (39 golpes), sendo sua intensidade situada entre as energias intermediária e modificada.

A energia intermodificada tem sido aplicada para a compactação de materiais que, com a utilização da energia intermediária, não atenderam às especificações exigidas pelo DNIT, no que se refere ao valor do Índice de Suporte Califórnia (CBR). Para alguns materiais o uso de uma energia maior (modificada) poderia descaracterizar o solo, ocasionando modificação na sua granulometria pela quebra de grãos e diminuindo sua resistência.

3. OBJETIVO

O presente trabalho objetiva analisar o efeito da estabilização granulométrica, sendo esta realizada com adição de areia de rio, bem como o efeito da mudança da energia de compactação em um solo típico da região do Agropólo Baixo Jaguaribe/CE.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A organização espacial do estado do Ceará foi feita com a implantação de agropólos, ou seja, regiões onde predominam, de forma intensiva, atividades agrícolas. Com vista no crescimento econômico e desenvolvimento, o Governo do Estado do Ceará, em 1998, lançou o projeto denominado Agropólos, visando à promoção de atividades agroindustriais. Inicialmente foram implantados seis agropólos: Ibiapaba, Baixo Acaraú, Metropolitano, Baixo Jaguaribe, Centro-Sul e Cariri, como ilustra a figura 1.

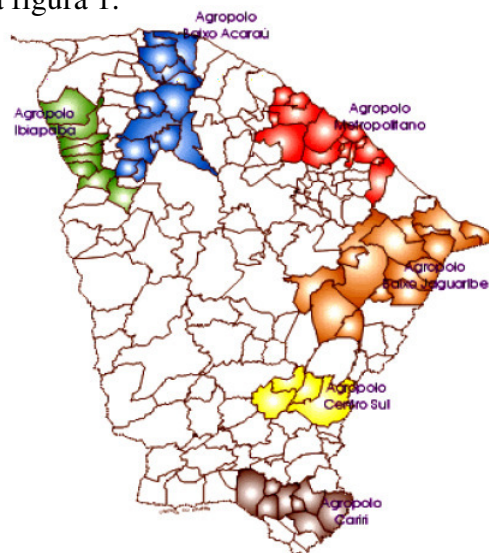
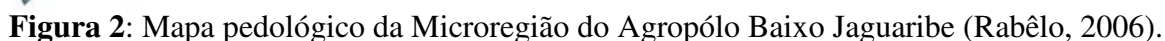


Figura 1: Agropólos do Ceará no ano de implantação do projeto (Girão et al, 2000).

No presente trabalho, a região escolhida para estudo foi a região do Baixo Jaguaribe. No que toca aos recursos naturais esta é farta, pois se encontram solos aluviais férteis e água abundante em parte considerável de seu território. É, também, na referida região que se concentram grandes investimentos públicos e privados nas áreas dos perímetros irrigados. Devido ao seu grande potencial de crescimento econômico, se faz necessária a abertura e

Diante da necessidade de intervenções na malha viária, faz-se necessário o reconhecimento preliminar dos solos existentes na região do Agropólo Baixo Jaguaribe. Rabêlo (2006) elaborou um mapa pedológico (ver figura 2) da microrregião do Agropólo do Baixo Jaguaribe a partir de informações contidas em um mapa pedológico publicado em 1973 pela Embrapa.



Em virtude de se tratar de uma estabilização com a adição de outro material ao solo natural, foi coletada areia proveniente do rio Quixeré, por ser esta abundante e ter localização próxima à jazida de onde o solo foi coletado. Destaca-se que esse tipo de areia também pode ser encontrada em outros rios da região, tais como o Banabuiú e Jaguaribe.

O solo natural, bem como a areia e as misturas foram submetidos aos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Logo após, foi determinado o índice de plasticidade (IP). Em seguida, foi executada uma análise granulométrica do solo e da areia, por peneiramento e sedimentação.

A fim de se obter a umidade ótima e massa específica seca máxima de cada mistura, realizaram-se ensaios de compactação Proctor, utilizando-se a energia intermediária (I). Em seguida, para avaliar os parâmetros de resistência, foram realizados ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e módulo de resiliência (MR), este último realizado conforme o método da COPPE/RJ, sendo ambos executados em energia intermediária de compactação (I).

Após a conclusão dessa primeira fase foram escolhidas duas misturas (as que apresentaram melhores resultados) para avaliação do efeito da energia intermodificada nas propriedades de interesse à pavimentação.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente, é importante citar que os resultados aqui apresentados são comparados com o estabelecido no estado do Ceará para rodovias de baixo volume de tráfego. A estrutura adotada é composta por uma camada única de sub-base/base de 20 cm e $\text{CBR} \geq 40\%$ (em alguns casos são utilizados valores acima de 30%) sobre subleito de suporte $\text{CBR} > 6\%$ ou sobre material da última camada de terraplanagem com suporte $\text{CBR} > 10\%$. Os valores de LL e IP não devem ultrapassar os valores máximos de 25% e 6%, respectivamente. O revestimento utilizado, na maioria dos casos, é o tratamento superficial simples (TSS).

5.1. Ensaios Convencionais

No Estado do Ceará, a classificação HRB (Highway Research Board) tem sido mais usada para prever o comportamento dos solos. O solo natural (M1) foi classificado como um A-2-6 e a areia como um A-2-4. As misturas M2, M3, M4 e M5 foram classificadas em A-2-6, A-2-4, A-2-6 e A-2-4, respectivamente.

A figura 3 mostra as curvas granulométricas do solo, juntamente com as curvas da areia e das misturas. Pode-se perceber que a areia de rio apresenta granulometria uniforme, enquanto que o solo natural apresenta granulometria contínua. Já as misturas apresentam comportamento que varia com a adição da areia, passando de uma graduação contínua (M1, M2 e M3) a uniforme (M4 e M5).

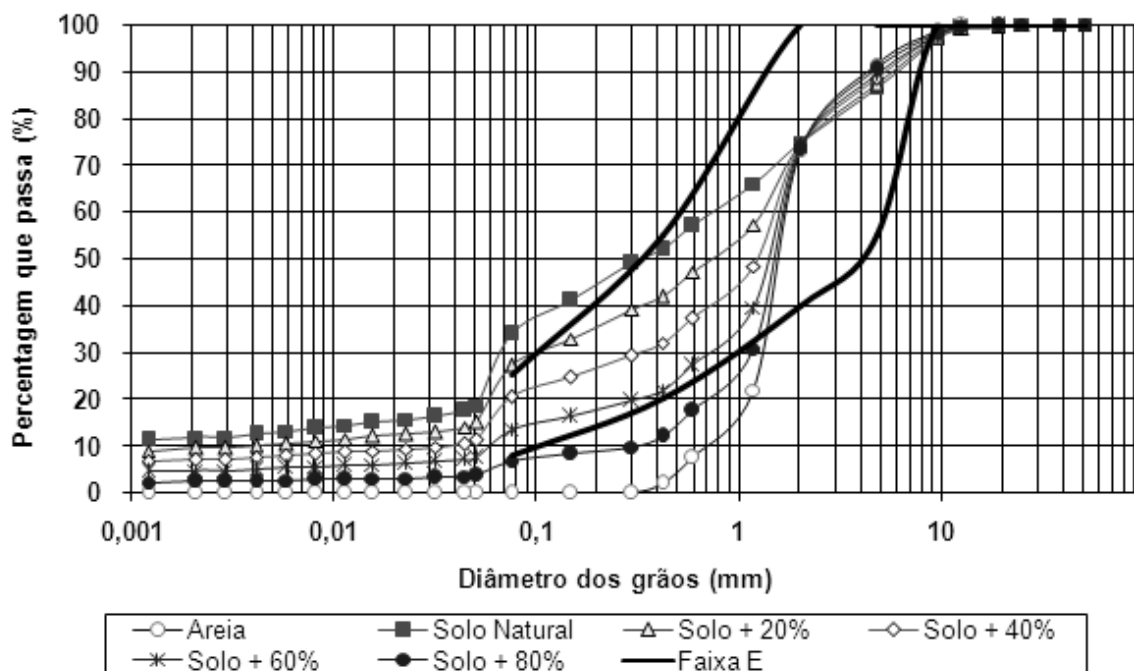


Figura 3: Curvas granulométricas do solo natural, areia e misturas.

A figura 4 mostra a variação do LL e IP com adição de areia. Observa-se que a mistura M5 se enquadra nos limites estabelecidos pelo DNIT, porém a mistura M4 também pode ser considerada como adequada, pois o seu valor de IP está muito próximo do limite aceitável.

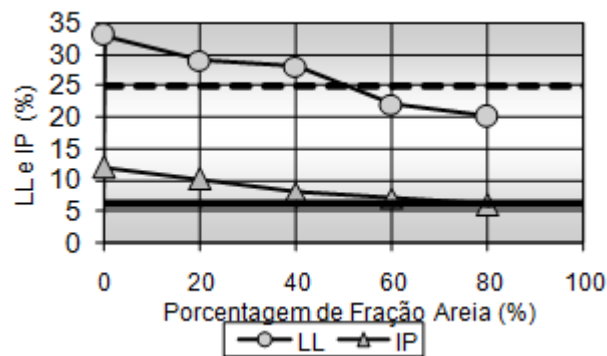


Figura 4: Variação do LL e IP com a adição de areia.

Os resultados dos ensaios de compactação são apresentados na figura 5, que mostra a variação da umidade e da massa específica seca máxima com o aumento do teor de areia no solo. Observa-se que há tendência da umidade ótima diminuir com o acréscimo de areia e da massa específica seca máxima aumentar. Na mistura 5, esse comportamento não foi evidenciado e isso pode ter acontecido devido às péssimas condições de trabalho, ocasionadas pela pouca coesão da mistura, o que pode explicar a diferença dos valores para esta mistura.

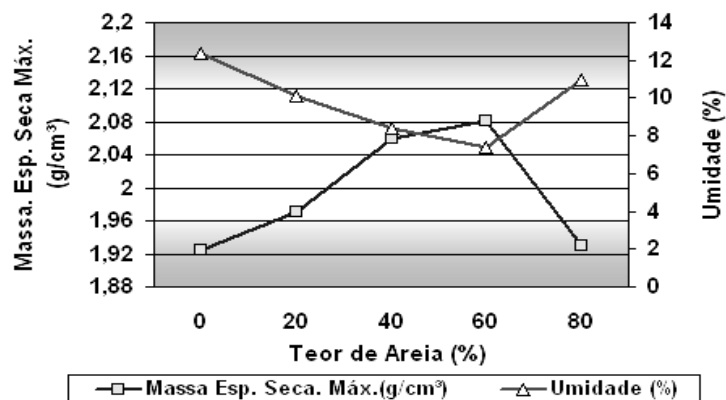


Figura 5: Variação da Umidade e Massa Específica Seca Máxima em função do Teor de Areia.

A figura 6 mostra os diferentes valores de CBR obtidos para as misturas investigadas. Inicialmente para o solo natural (M1) o valor encontrado foi de 8%. Com o aumento do teor de areia observou-se que o valor do CBR aumentou consideravelmente e para as misturas M3, M4 e M5 atinge valores que o qualificam a serem utilizados em camadas de sub-base para rodovias de alto volume de tráfego e, possivelmente, como base em rodovias de baixo volume. Para uma análise posterior, serão consideradas as misturas M3 e M4, pois estas apresentaram os melhores resultados de CBR, 23% e 35%, respectivamente.

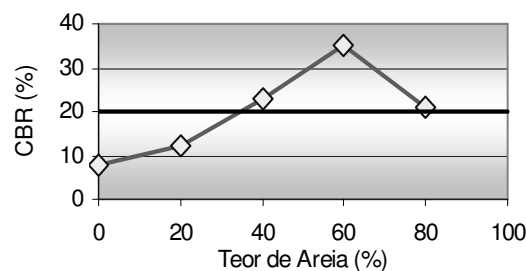


Figura 6: Variação dos valores do CBR em função do acréscimo de areia.

Klinsky (2008) obteve resultados muito similares ao da presente pesquisa. Esse autor buscou reaproveitar areia de fundição ao adicioná-la a um solo, cujo programa experimental proposto em sua pesquisa resultou nos seguintes resultados: os valores do LL, IP e a umidade ótima decresceram e os valores da massa específica seca máxima e CBR cresceram com o aumento do teor de areia.

5.2. Módulo de Resiliência

Para a análise do MR, deve-se escolher qual o modelo que melhor representa o comportamento resiliente do material em estudo. Os modelos utilizados no presente trabalho simulam o comportamento tensão x deformação e são apresentados nas equações 1 a 4.

$$MR = k1.\sigma_d^{k2} \quad (1)$$

$$MR = k1.\sigma_3^{k2} \quad (2)$$

$$MR = k1.\theta^{k2} \quad (3)$$

$$MR = k1.\sigma_3^{k2} . \sigma_d^{k3} \quad (4)$$

Onde: MR é o Módulo de Resiliência, σ_3 é a tensão de confinamento, σ_d é a tensão desvio, θ é o invariante de tensão e os valores de k são constantes obtidas através da realização do ensaio triaxial dinâmico.

Elaborou-se a tabela 1, a partir da aplicação dos quatro modelos de resiliência relatados. Observando-se os valores R^2 , o modelo 4 (composto) que leva em consideração as influências conjuntas das tensões confinantes e desvio é o que melhor representa o comportamento do solo e das misturas ensaiadas.

Tabela 1: Modelos estudados.

Amostra	Modelos	K1	K2	K3	R ²
M1	MR = k1. σ_d^{k2}	198,91	-0,25	0,00	0,40
	MR = k1. σ_3^{k2}	224,79	-0,15	0,00	0,10
	MR = k1. θ^{k2}	264,43	-0,22	0,00	0,22
	MR = k1. $\sigma_3^{k2} . \sigma_d^{k3}$	169,50	0,00	-0,58	0,60
M2	MR = k1. σ_d^{k2}	270,68	0,04	0,00	0,03
	MR = k1. σ_3^{k2}	411,57	0,18	0,00	0,41
	MR = k1. θ^{k2}	289,51	0,13	0,00	0,23
	MR = k1. $\sigma_3^{k2} . \sigma_d^{k3}$	486,60	0,41	-0,22	0,76
M3	MR = k1. σ_d^{k2}	481,07	0,22	0,00	0,39
	MR = k1. σ_3^{k2}	815,55	0,36	0,00	0,79
	MR = k1. θ^{k2}	468,03	0,33	0,00	0,73
	MR = k1. $\sigma_3^{k2} . \sigma_d^{k3}$	936,10	0,42	-0,02	0,85
M4	MR = k1. σ_d^{k2}	341,25	0,30	0,00	0,51
	MR = k1. σ_3^{k2}	691,75	0,48	0,00	0,87
	MR = k1. θ^{k2}	302,95	0,44	0,00	0,78
	MR = k1. $\sigma_3^{k2} . \sigma_d^{k3}$	832,70	0,55	0,01	0,91

Para visualização e melhor entendimento dos resultados foi elaborado um modelo gráfico em três dimensões. A figura 7 mostra a variação do módulo para o modelo composto, onde o solo natural apresenta comportamento resiliente, cujo módulo decresce com o aumento da tensão confinante e cresce com o aumento da tensão desvio. Ressalta-se que, para a mistura 5 esse ensaio não pôde ser realizado, pois devido à baixa coesão não foi possível a moldagem do corpo de prova.

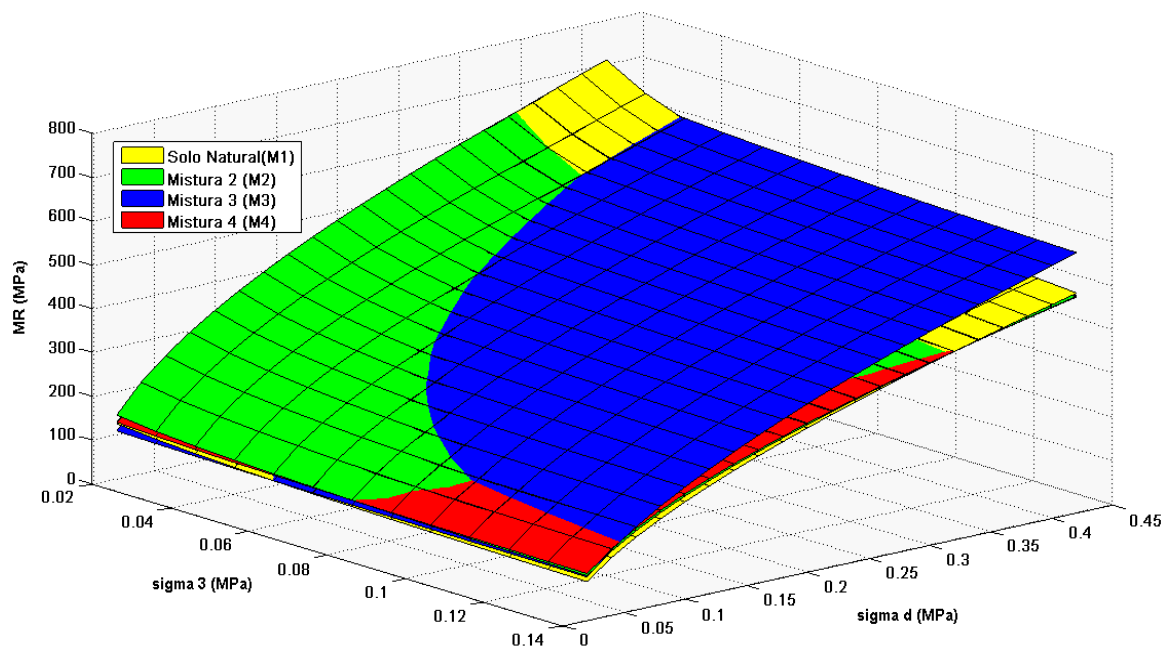


Figura 7: Variação do módulo com a utilização do modelo composto para energia intermediária.

De acordo com a figura 7, observa-se que o comportamento resiliente do solo varia pouco com a adição de areia, pois as superfícies se mostraram praticamente sobrepostas. No tocante as tensões, observa-se que o módulo permanece constante para incrementos de tensão confinante e cresce com o aumento da tensão desvio. A mistura de melhor comportamento é a M3, que para valores de tensão desvio elevados apresenta valores superiores de módulo resiliente. Portanto, M3 e M4, serão submetidas a novos ensaios, dessa vez com o uso da energia intermodificada.

5.3. Compactação (Comparativo)

Os resultados obtidos com a energia de compactação intermodificada são apresentados nas figuras 8 e 9 para as misturas M3 e M4, respectivamente. Observa-se que, com o aumento de energia de compactação, há um acréscimo no valor da massa específica e um pequeno decréscimo no valor da umidade, o que pode ser explicado pelo aumento da energia e conseqüente diminuição do volume de vazios.

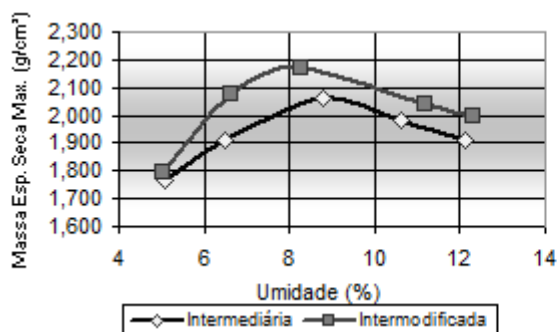


Figura 8: Compactação da mistura M3 para diferentes energias.

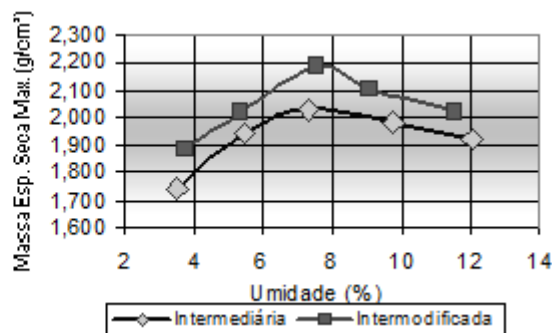


Figura 9: Compactação da mistura M4 para diferentes energias.

5.4. Ensaio CBR (Comparativo)

A figura 10 mostra a variação do CBR com o aumento da energia de compactação. Percebe-se que ocorreu um aumento considerável no índice, devido ao solo se encontrar mais compacto, menos expansivo e mais resistente. Observa-se que, com a aplicação da energia intermodificada (IM), as misturas M3 e M4 apresentaram, respectivamente, 46% e 48% de CBR, o que possibilita sua aplicação em camadas de base em RBVT's e sub-base para as de alto volume segundo as recomendações do DNIT.

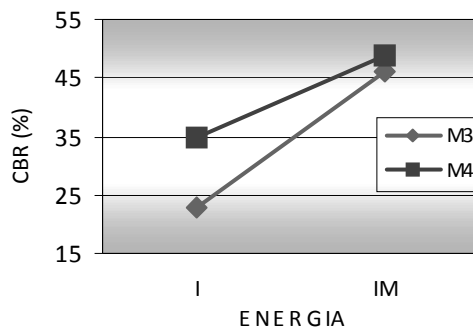


Figura 10: Variação do CBR com a energia de compactação.

5.5. Ensaio MR (Comparativo)

As figuras 11 e 12 mostram os resultados de MR obtidos para M3 e M4, respectivamente, com a nova energia de compactação (intermodificada), comparando-os com os obtidos anteriormente e com o solo natural (M1), na energia intermediária. Com o aumento da energia, em ambos os casos, o módulo decresceu em relação aos valores obtidos com a energia anterior, tornando visível que o aumento da energia não foi benéfico para as misturas. Para fins de comparação e melhor entendimento deste comportamento, foram selecionados dois pares de tensões representativos, com os seguintes valores para σ_3 e σ_d , respectivamente: par 1 (0,069 e 0,206) e par 2 (0,137 e 0,412), explicitados nas figuras 13 e 14.

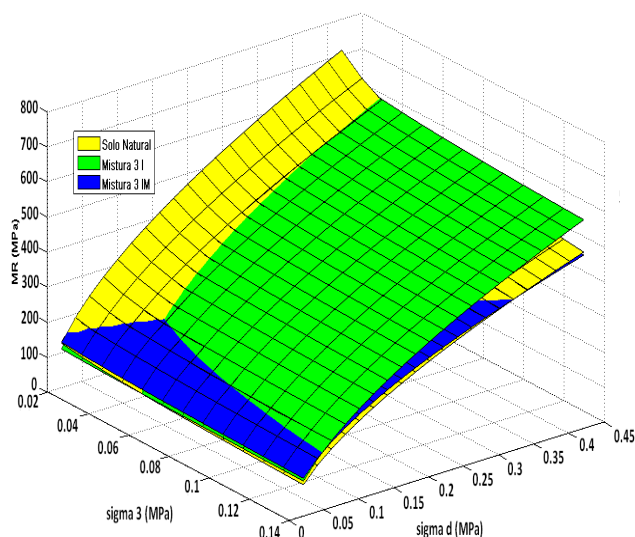


Figura 11: Variação do MR com a energia para M3.

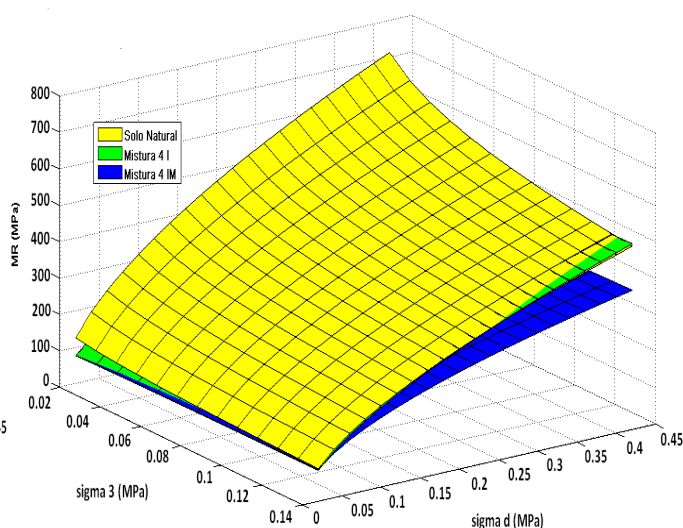
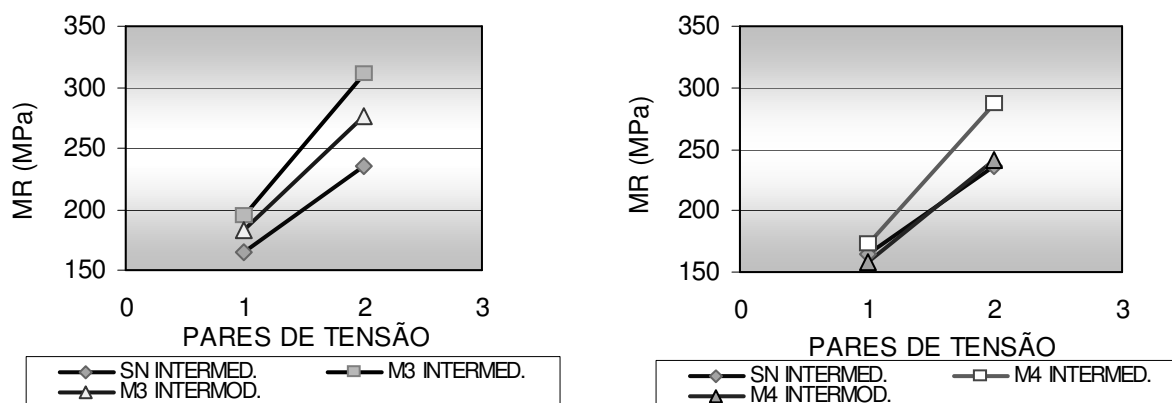


Figura 12: Variação do MR com a energia para M4.



Figuras 13 e 14: Variação do MR em função das tensões e energia de compactação, para as misturas 3 e 4, respectivamente.

Souza Junior (2005) avaliou o efeito da variação da energia de compactação, onde a adoção de energias maiores não foram benéficos para o módulo de algumas amostras por ele estudadas, o que condiz com os resultados obtidos nesta pesquisa.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, tentou-se buscar uma alternativa para melhorar um solo da Região do Agropólo Baixo Jaguaribe com a adição de areia de rio. Os resultados mostram que esta técnica é viável e, provavelmente sem elevados custos, pode melhorar as características de um solo sem potencial para uso rodoviário.

Os resultados obtidos após os ensaios de caracterização, compactação, CBR e MR mostram que houve grande melhora nas propriedades do solo natural com a adição da areia de rio. As propriedades do solo natural não permitiam seu uso em obras rodoviárias e para o teor de 60% de areia, obteve-se valores que o enquadraram nos limites estabelecidos pelo DNIT para uso em camadas de sub-base e até base para RBVT's. Com o aumento da energia de compactação houve considerável melhora nos valores de CBR, porém o módulo resiliente decresceu com relação à energia de compactação menor.

Por fim, recomenda-se o uso da mistura M4 como alternativa para as vias do Agropólo Baixo Jaguaribe. Como os materiais que a compõe são abundantes na região estudada, poderá ocorrer grande redução nos custos de execução das obras para construção de novas vias e melhoria das já existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barroso, S. H. A. (2002) *Estudo dos Solos da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação na Engenharia Rodoviária*. Tese de doutorado em Engenharia de Transporte, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP. São Carlos, São Paulo.
- Girão, A. R., I. Dutra e F. Souza (2000) *Área Irrigada e Métodos de Irrigação no estado do Ceará*. Segundo o Censo Agropecuário de 1995-1996. Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará.
- Gondim, M. L. (2008) *Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará.
- Hilf, J. W. *Compacted fill*. In: H. F. Winterkorn; H. Fang. *Foundation Engineering Handbook*. New York: Var Nostrand Reinhold, 1975. p. 244-311.
- Klinsky, L. M. G. (2008) *Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos*. Dissertação de Mestrado. Programa

- de Mestrado em Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- Marangon, M (2004) *Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para a Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Rabêlo, A. N. (2006) *Contribuição ao Estudo da Imprimação Betuminosa das Bases Rodoviárias do Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. 204p.
- Santanna, J. A. (1998) *Estudo do Comportamento de Solos Artificiais em Função da Variação das Características de sua Fração Grossa*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo.
- Souza Junior, J. D. (2005) *Efeito da energia de compactação em algumas propriedades dos solos utilizados na pavimentação do Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. 211p.
- Vargas, M. (1977) *Introdução à Mecânica dos Solos*. 1 ed, São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.

¹ Aluno de Graduação em Engenharia Civil da UFC (e-mail: isaelsjj@gmail.com)

² Professora do Departamento de Engenharia de Transportes - Universidade Federal do Ceará.
e-mail: suely@det.ufc.br Campus do Pici s/n – Bloco 703. Fone: (85) 33669488 (ramal 209) - Fortaleza, Ce – Brasil