

ANÁLISE MECÂNICA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO POR MEIO DE ENSAIOS EMPÍRICOS E MECANÍSTICOS

MAYARA DA SILVA LIMA¹, THAÍS CAVALCANTE DOS SANTOS¹,
JUCELINE BATISTA DOS SANTOS BASTOS¹, TERESA RAQUEL LIMA FARIAS¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

<myasl16@yahoo.com.br>, <thais-c.d.s@hotmail.com>,
<jucelinebatista@hotmail.com>, <raquelfarias@yahoo.com.br>

DOI: 10.21439/conexoes.v12i1.1230

Resumo. Tendo em vista as vantagens técnicas, econômicas e socioambientais que o agregado reciclado pode oferecer e a busca por materiais alternativos que apresentem características adequadas para utilização em camadas de pavimentos rodoviários, nesta pesquisa buscou-se avaliar a viabilidade do uso de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) em camadas de pavimentos. Para tanto, o comportamento mecânico de três materiais foi avaliado, sendo um RCD puro, um solo natural e o mesmo solo estabilizado com RCD na proporção de 50%. Foram realizados ensaios de: caracterização, compactação com emprego de diferentes energias, determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Módulo de Resiliência (MR). A análise granulométrica demonstrou que o RCD e o solo apresentaram, respectivamente, características predominantemente pedregulhosa (51,4%) e arenosa (69,8%). Ambas as amostras (RCD e solo) foram classificadas como A-1-b, classificação da AASHTO. Os resultados do estudo sugerem a necessidade de uma maior energia de compactação nas camadas granulares estabilizadas com RCD, tendo em vista o significativo incremento proporcionado aos valores de CBR obtidos com o aumento da energia (com valores de aproximadamente 20% na energia intermediária, superou 140% na energia modificada). Os valores de CBR e MR indicaram a viabilidade técnica do RCD puro e do solo estabilizado com RCD, para ser empregado em camadas de bases, visto o comportamento mecânico desses materiais, a compatibilidade com os agregados convencionais e o atendimento às especificações para uso em pavimentos rodoviários.

Palavras-chaves: Resíduos da Construção e Demolição, Energias de Compactação, Módulo de Resiliência.

ANALYSIS MECHANICAL OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE THROUGH EMPIRICAL AND MECHANICAL TESTS

Abstract. This study evaluated the feasibility of the use of Construction and Demolition Waste (CDW) in pavement layers, considering the technical, economic, social and environmental advantages that this recycled aggregate can offer and the need to find alternative materials suitable for use in road pavement layers. For that, the mechanical behavior of three materials was evaluated, being a pure CDW, a natural soil and the same soil stabilized with CDW in the proportion of 50%. Characterization, compaction using different energies, determination of California Bearing Ratio (CBR) and Resilience Module (MR) were performed. The Aggregate gradation showed that the CDW and soil presented predominantly, respectively, gravel (51.4%) and sandy (69.8%) characteristics. Both samples (CDW and soil) were classified as A-1-b, according to AASHTO classification. The results of the study suggest the need for a higher compaction energy in the CDW -stabilized granular layers, given the significant increase in the CBR values obtained with the energy increase (with values of approximately 20% in the intermediate energy, and 140% in the modified energy). The values of CBR and MR indicated the technical feasibility of the pure CDW and the CDW used in soil stabilization to be used in base layers, considering the mechanical behavior of these materials, compatibility with conventional aggregates and compliance with construction specifications of road pavements.

Keywords: Construction and Demolition Waste, Energy of Compaction, Resilient Modulus.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma indústria que tem relevância na economia e é um dos setores que mais gera empregos. Entretanto, causa significativos impactos ambientais, pois há um elevado dispêndio de recursos naturais e gera alto volume de resíduos. A disposição irregular desses resíduos em áreas de botafora das cidades ainda é um problema, seja por meio de inundações e/ou prejuízos ao meio ambiente, representando custos elevados ao poder público e à coletividade.

Sob esta ótica, o setor da infraestrutura de transportes vem buscando reaproveitar os mais diversos materiais produzidos pela própria indústria, como as escórias resultantes de produção industrial, e a produção de agregados a partir da moagem do Resíduo de Construção e Demolição (RCD). Aplicabilidades para esses agregados de RCD vêm sendo avaliadas em diversas pesquisas que estudaram seu emprego em produção de concretos, argamassas e camadas de pavimentos (CABRAL, 2007; SAMPAIO, 2013; RODRIGUES; FUCALE, 2014; OLIVEIRA, 2015).

Os materiais para pavimentação estão cada vez mais escassos e de difícil acesso e exploração no meio ambiente, devido a fatores diversos, e isso pode gerar custos extras a obra e degradar a região explorada (ARAUJO; BARROSO, 2007). Sabe-se que o modal rodoviário exerce papel fundamental no sistema logístico do Brasil, tanto na movimentação de pessoas quanto de cargas. Contudo, dada à deterioração precoce dos pavimentos rodoviários frente ao número de solicitações de cargas, e ainda aos fatores climáticos, há a necessidade de selecionar materiais que aumentem a durabilidade e a resistência desses pavimentos. Dessa forma, faz-se necessário a busca de materiais que melhorem as características das camadas de pavimentos e causem menos deterioração ao meio ambiente. Alguns autores já avaliaram que a viabilidade dos RCDs nessas camadas é uma alternativa a ser considerada (SILVA, 2009; SAMPAIO, 2013; PALACIO, 2014; LEITE et al., 2016), pois oferece vantagens técnicas, econômicas e socioambientais.

Nesse contexto, o presente artigo objetiva avaliar Resíduos de Construção e Demolição por meio de uma abordagem empírica e mecanística, visando o seu reaproveitamento em camadas de pavimentos, buscando indicar também qual é a energia de compactação mais adequada para execução dessas estruturas com tal material. Assim, o comportamento de três materiais (RCD puro, solo natural e a estabilização do solo com RCD), sob a aplicação de diferentes energias de compactação, é verificado por meio do Índice de Suporte Califórnia (atual parâmetro usado no dimensionamento de pavi-

mentos rodoviários no Brasil) e do Módulo de Resiliência obtido por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas (parâmetro utilizado no método mecanístico-empírico em todo o mundo e no método em desenvolvimento no Brasil).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Sobre Resíduo de Construção e Demolição (RCD)

Para o CONAMA (2002), nos resíduos da construção civil encontram-se os materiais derivados de construções, reformas, restaurações e demolições de obras civis, e os resultantes do preparo e da cubagem de terrenos, tais como: tijolos, materiais cerâmicos, concretos, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gessos, telhas, pavimentação asfáltica, vidros, plásticos, tubulações, instalação elétrica etc., usualmente titulados de entulhos de obras.

Esses materiais podem ser originários de diferentes fontes. Conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduos sólidos e semissólidos derivam de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e varrição. São abrangidos ainda os lodos oriundos de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como líquidos cujas características inviabilizem o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou demandem para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis frente à melhor tecnologia disponível.

2.2 Considerações Sobre o California Bearing Ratio (CBR) e Módulo de Resiliência (MR)

O California Bearing Ratio (CBR) analisa a capacidade de suporte dos materiais das camadas e do subleito dos pavimentos flexíveis em termos de ruptura plástica (MEDINA J.; MOTTA, 2015). Nele ocorre a determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão em um Corpo de Prova (CP) do material investigado e a pressão necessária para produzir a mesma penetração em uma brita padronizada. O valor dessa relação, expressa em porcentagem, permite determinar, por meio de equações empíricas, a espessura de pavimento flexível necessária em função do tráfego (DNIT, 2006). Para um material ser utilizado na camada de base de um pavimento asfáltico, o valor de seu CBR deve ser maior ou igual a 60% ou 80%, dependendo do número N do projeto, fator determinante no dimensionamento de pavimentos

flexíveis. Se aceita um CBR maior ou igual a 80%, se o N for superior a $5 * 10^6$. Caso o N seja menor ou igual a $5 * 10^6$, aceita-se um CBR maior ou igual a 60%. A expansão para camadas de base deve sempre ser igual ou menor a 0,5%. Para camadas de sub-base o CBR deve ser igual ou superior a 20% e expansão aceitável de até 1% (DNIT, 2006).

Souza Junior (2005) analisou o uso de diferentes energias de compactação dos materiais utilizados em pavimentos do estado do Ceará e verificou a variação de algumas das propriedades de interesse à pavimentação, tais como: umidade ótima, massa específica, CBR e expansão. Os resultados desse estudo mostraram que com o acréscimo da energia de compactação a massa específica e o valor do CBR tendem a aumentar. Entretanto, o referido autor observou que com a aplicação da energia modificada existe a possibilidade de alguns tipos de materiais se desintegrarem estruturalmente, ocorrendo a quebra dos grãos, diminuindo a capacidade de suporte, tornando mais indicado, para estes materiais, o uso da energia intermodificada.

Até a década de 70, o método de dimensionamento comumente usado no Brasil focava, fundamentalmente, na capacidade de ruptura plástica dos materiais, retratada pelo valor do CBR. Apesar disso, observou-se que parte significativa da malha rodoviária vinha exibindo dano precoce, atribuído à fadiga dos materiais em função da ininterrupta solitação dinâmica do tráfego. Isso motivou o ingresso, no país, das investigações da resiliência de materiais empregados em pavimentos, permitindo a avaliação estrutural, com uma abordagem mais realista desta problemática no Brasil (DNIT, 2006).

Atualmente, há um grande empenho para a inserção, no Brasil, de um método de dimensionamento de pavimentos tendo como referência o Módulo de Resiliência (MR). Contudo, a dificuldade de realização do experimento e o maior investimento inicial para aquisição do equipamento, comparado ao CBR, tem sido um agravante para a disseminação desse método.

Segundo Medina J.; Motta (2015), o termo “resiliência” foi assinalado pelo engenheiro Francis Hveem, em 1938, a partir de uma investigação sobre deformabilidade dos pavimentos, que consistia em medições deflectométricas desses pavimentos quando solicitados pelo tráfego de veículos. Para tanto, sensores mecano-eletromagnéticos foram instalados nessa estrutura de forma a medir os deslocamentos verticais. Nesse período, surgiu o entendimento empírico da admissibilidade de valores de deflectometria para uma adequada vida dos pavimentos sob distintas características e sujeitos aos mais diversos tipos de carga.

Para Huang (2007), muitos dos materiais usados na pavimentação não apresentam comportamento elástico, pois sofrem deformações plásticas em cada aplicação de carga, por menores que sejam. Contudo, se a carga aplicada for pequena em relação à resistência do material e for repetida inúmeras vezes, a deformação em cada carregamento é quase inteiramente recuperável (e proporcional à carga) e pode ser considerada elástica.

A partir da Mecânica dos Pavimentos, foi possível desenvolver uma classificação de solos baseada em suas características resilientes, qualificando-os quanto ao comportamento mecânico a partir da deformabilidade elástica e permitindo conhecer o MR dos solos DNIT (2006).

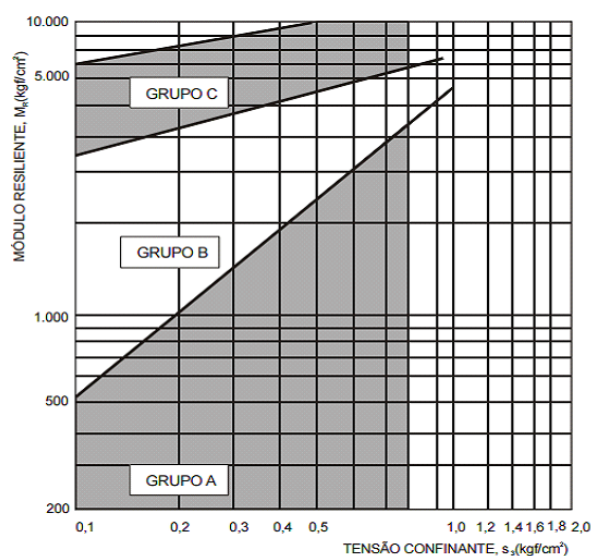


Figura 1: Classificação resiliente de solos granulares
FONTE : (DNIT, 2006)

Na figura 1 é mostrada a classificação resiliente de solos granulares, que relaciona o Módulo Resiliente com a tensão confinante de materiais. O grupo A representa solos com elevado grau de resiliência e tem seu uso não recomendado em estruturas de pavimentos. O grupo B mostra solos com grau de resiliência intermediário, aplicável em todas as camadas do pavimento, mas dependente da espessura da camada e da qualidade do subleito e o grupo C é de solos com baixo grau de resiliência, em que seu uso é recomendado em todas as camadas do pavimento.

No Brasil ainda se tem como referência o CBR para o dimensionamento de pavimentos. Isso se dá devido ao fato de que esse ensaio é de fácil execução, além da viável logística de locomoção dos equipamentos, podendo ser realizado em laboratórios não tão sofisticados. Já



Figura 2: Materiais - Solo (a) e RCD (b)

o ensaio de Módulo Resiliente resulta em uma caracterização mais adequada dos materiais, mas ainda exige mais investigações e divulgação para o meio técnico. Atualmente, grande parte dos equipamentos triaxiais de cargas repetidas encontram-se em universidades e centros de pesquisas, dificultando a difusão dessa metodologia no Brasil.

Para Ribeiro (2016), há um grande empenho de pesquisas sendo realizadas no Brasil objetivando contribuir para o desenvolvimento de um método de dimensionamento que utilize os conceitos de Mecânica dos Pavimentos, em substituição ao método padrão do DNIT que tem por base o CBR. Nessa substituição a caracterização mecânica de solos, seja para o subleito ou para as camadas dos pavimentos, tem como base a rigidez desses materiais por meio do MR. Esse esforço pode ser representado pelo projeto chamado Rede Temática de Asfaltos da Petrobras, iniciado em 2006, que contempla pesquisa, aquisição de equipamentos, reforma e construção de laboratórios de pavimentação em várias universidades brasileiras. Isso pode contribuir para a progressão da pavimentação nacional.

3 METODOLOGIA

Com base nas considerações sobre RCD e sobre metodologias que podem ser adotadas para seleção de materiais com vista ao aproveitamento de rejeito para pavimentação, são detalhados os materiais e os métodos da presente pesquisa.

3.1 Materiais

O solo analisado nesta pesquisa foi utilizado como camada de sub-base em obra de pavimentação realizada no processo de duplicação da Av. Padre José Holanda do Vale – Maracanaú e foi retirado de uma jazida localizada em Caucaia [Figura 2 (a)]. O RCD foi coletado na Usina de Reciclagem de Fortaleza [Figura 2 (b)] e a estabilização do solo com RCD foi realizada em laboratório na proporção de 50% de solo e de 50% de RCD.

Figura 3: (a) Triaxial de cargas repetidas e (b) Corpos de Prova após ensaio de MR

3.2 Métodos

O trabalho experimental foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa foram realizados os ensaios de caracterização, densidade real (RODAGEM, 1994) e granulometria (DNER, 1994a; DNER, 1994b). Na segunda etapa, as amostras foram submetidas aos ensaios de compactação (DNER, 1994c), CBR e expansão (DNER, 1994d) e Módulo de Resiliência (DNIT, 2010). Os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE (campus Fortaleza) e no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará – UFC.

Foi analisada a influência exercida pelo grau de compactação sobre os ensaios mecânicos dos materiais em estudo. Dessa forma, os ensaios de compactação e CBR foram investigados na energia intermediária, intermodificada e modificada, tendo em vista o comportamento variável apresentado por materiais utilizados em pavimentação no Ceará, quando da aplicação de diferentes energias (SOUZA JUNIOR, 2005).

Já o Módulo de Resiliência dos materiais foi avaliado somente na energia modificada, tendo em vista que nessa energia os valores do CBR foram os mais elevados para o RCD puro e para a estabilização do solo com RCD. Na Figura 3 (a) e (b), têm-se, respectivamente, equipamento triaxial de cargas repetidas, utilizado na realização do ensaio de determinação do Módulo de Resiliência e corpos de prova após a execução do ensaio.

De forma a avaliar a aplicabilidade dos materiais estudados em camadas do pavimento, tendo como referência o comportamento resiliente destes, selecionou-se o modelo composto (FERREIRA; MOTTA, 2002) para representar o Módulo de Resiliência em função da Tensão Confinante e da Tensão Desvio. Esse modelo foi traduzido para o Brasil por Macedo (1996) a partir de Pezo (1993), representado pela Equação 1.

$$k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

A escolha do modelo foi baseada em pesquisas realizadas anteriormente por Gondim (2008), Araujo

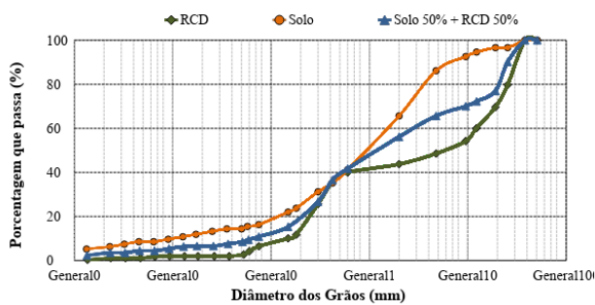


Figura 4: Granulometria das amostras

(2009), Bastos (2013), evidenciando que este é o modelo que mais se ajusta aos solos do estado Ceará. Esse modelo ficou conhecido no Brasil como Modelo Composto, capaz de eliminar as dificuldades quanto à necessidade de definição prévia do comportamento resiliente dos solos. O MR foi analisado também por modelos lineares (Equações 2 e 3).

$$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} \quad (2)$$

$$MR = k_1 * \sigma_d^{k_2} \quad (3)$$

Em que: MR - Módulo de Resiliência (MPa); - Tensão Confinante (MPa); - Tensão desvio (MPa); , e - constantes obtidas por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quanto à caracterização geotécnica dos materiais, ambas as amostras (solo e RCD) foram classificadas como A-1-b conforme classificação da AASHTO, esse grupo caracteriza um material com predominância de pedregulhos e areias, com comportamento considerado de excelente a bom para uso geral em subleito. Observa-se na 4 que a amostra de RCD apresenta uma característica predominantemente pedregulhosa, com 51,4% desse material e 42,1% de material arenoso, enquanto o solo apresenta 13,8% de pedregulho e 69,8% de material arenoso. A mistura na proporção de 50% de ambos os materiais conduziu a uma granulometria intermediária com 34,3% de pedregulhos e 54,8% de areias. Os materiais não apresentaram plasticidade.

Analisando as curvas granulométricas, verifica-se que o solo, RCD e mistura apresentaram, respectivamente, coeficientes de uniformidade (Cu) iguais a 160, 69 e 45, sendo estes caracterizados como desuniformes ($Cu \geq 15$). Quanto à granulação, avaliada atra-

vés do coeficiente de curvatura (Cc), solo, RCD e mistura apresentaram valores respectivos de 4,6, 0,1 e 0,6, sendo ambos classificados como materiais mal graduados, pois os valores encontram-se fora do intervalo que classifica os materiais como bem graduados ($1 < Cc < 3$).

Foram realizadas também análises granulométricas das amostras antes e após a execução dos ensaios de Módulo de Resiliência, a fim de se identificar a possível degradação de partículas de agregados, contudo, não se verificou uma parcela significativa de degradação das frações maiores como já apontava Gomez (2016).

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de CBR e expansão (Exp.) para as três energias de compactação investigadas, bem como os resultados do ensaio de compactação.

Os resultados dos ensaios de compactação mostraram que a massa específica (γ_{smax}) das amostras aumentou à medida que as energias de compactação foram maiores, se comportando de forma crescente. A umidade ótima (w_{ot}) na amostra de solo natural decresceu à medida que se aumentou a energia de compactação, como esperado. Porém, a umidade das amostras com RCD variou bastante, isso se deve à maior absorção de água pelo RCD, conduta já evidenciada e relatada por Cabral (2007), Evangelista e Brito (2010). Assim, dadas às características do RCD, menor massa específica que o agregado natural devido a sua maior porosidade, a absorção de água supera em até 80% o material natural. Gomez (2016) recomenda a construção de uma boa rede de drenagem em pavimentos onde for empregado RCD na construção de suas camadas, mantendo o material em condições de umidade ótima.

Na Figura 5 são apresentados os valores de CBR obtidos para as amostras de RCD, solo e solo estabilizado com RCD, compactadas nas energias intermediária, intermodificada e modificada. Quando comparados os resultados das amostras de solo e de solo estabilizado com RCD, verificou-se que o incremento de RCD nas energias intermediária e modificada resultou em CBRs maiores, enquanto na energia intermodificada os valores de CBRs foram semelhantes, mas ainda viável técnica e socioambiental, tendo em vista à destinação desse passivo ambiental. Os valores de expansão de todas essas amostras foram inferiores a 0,5% e atenderam ao critério necessário para aplicação em qualquer camada de pavimento (DNIT, 2006).

Da Figura 5 percebe-se que a energia modificada se mostrou inadequada para compactação em campo do solo natural. Esse material apresentou-se frágil, com maior quebra de grãos nessa energia, observada pelo

Tabela 1: Resultados das compactações, CBRs e expansões

Material / Energia	RCD				Solo				RCD+Solo			
	CBR (%)	Exp. (%)	Y	w (%)	CBR (%)	Exp. (%)	y	w (%)	CBR (%)	Exp. (&)	y	w (%)
E. Intermediária	19,2	0,04	2,030	9,6	33,9	0,03	2,136	8,4	44,2	0,07	2,048	8,8
E. Intermodificada	71,7	0,01	2,042	10,1	56,3	0,25	2,140	7,9	53,1	0,04	2,103	7,5
E. Modificada	147,2	0,02	2,060	9,5	42,3	0,14	2,187	7,5	78,7	0,04	2,128	8,0

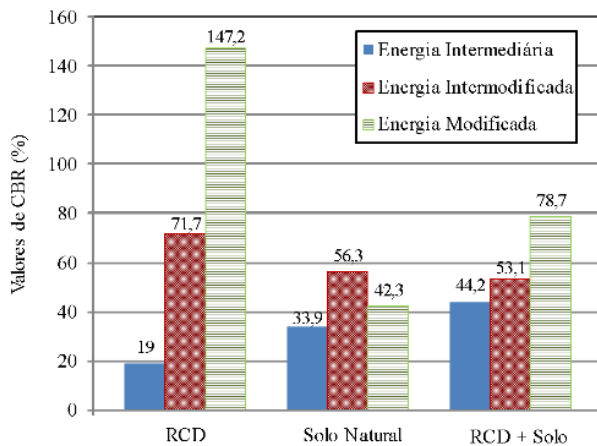


Figura 5: CBRs das amostras sob diferentes energias de compactação

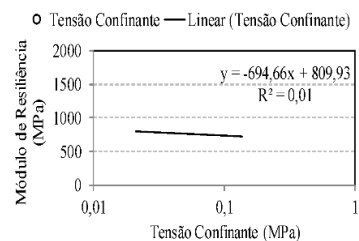
menor valor de CBR. Esse material apresentou melhores características na energia intermodificada. Resultado semelhante também foi observado por Souza Junior (2005) onde ao estudar o efeito das energias de compactação, o autor ressaltou que a energia de compactação intermodificada, quase sempre aplicada para camadas de base de pavimentos, tem sido utilizada no Ceará para aqueles materiais que não atenderam às condições geotécnicas exigidas pelas normas do DNER, particularmente no que se refere aos valores de CBR, quando compactados na energia intermediária. Destacou também, que existe a possibilidade de se aplicar um esforço de compactação bem maior, como a energia modificada, e o material se desintegrar estruturalmente, com a quebra dos grãos, perdendo sua capacidade de suporte. Tendo em vista esta realidade, surgiu a justificativa para o uso da energia intermodificada, que foi regulamentada pelo DERT/CE, em setembro de 1994.

Para a amostra de solo estabilizado com RCD, maiores energias proporcionaram maiores valores de CBRs, mostrando que para essa estabilização a energia modificada é mais adequada. A amostra de RCD seguiu a mesma tendência apresentada pelo material estabilizado. Para utilização em camadas de bases de pavimentos asfálticos, os materiais e energias indicadas são:

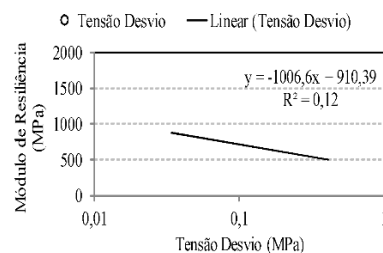
solo+RCD na energia modificada e RCD nas energias intermodificada e modificada.

Nas Figuras 6 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) encontram-se as respectivas relações de MR com a Tensão Confinante (σ_3) (Equação 2), Tensão Desvio (σ_d) (Equação 3) para cada amostra.

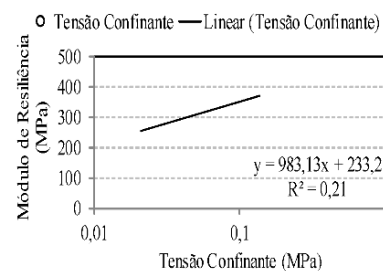
Figura 6: Avaliação do Módulo de Resiliência das amostras por meio de modelos lineares



(a) MR x σ_3

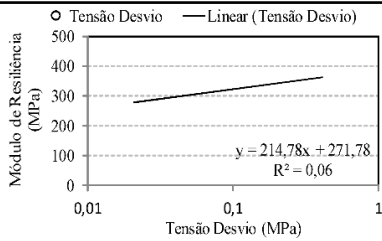


(b) MR x σ_d

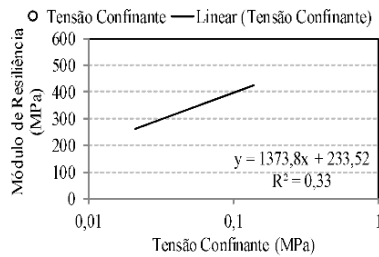


(c) MR x σ_3 - solo

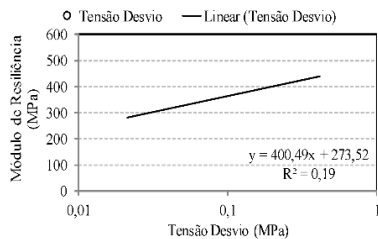
Para a obtenção dos parâmetros referentes à Equação 1 (modelo composto), os dados obtidos nos ensaios de MR foram submetidos ao processamento pelo pro-



(d) MR x σ_d - solo



(e) MR x σ_3 - solo + RCD



(f) MR x σ_d - solo + RCD

grama LABfit Ajuste de Curvas (SILVA et al., 2004), desenvolvido para tratamento e análise de dados experimentais. Na Tabela 2 são apresentados os valores de Módulo de Resiliência obtidos para o RCD, solo e RCD + solo por meio do programa LABfit. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo explica os valores analisados, K_1 , K_2 e K_3 são parâmetros que variam com o material investigado.

Tabela 2: Avaliação do Módulo de Resiliência das amostras por meio do modelo composto

Material	Modelo composto				MR_{medio}
	K_1	K_2	K_3	R^2	
RCD	622,03	0,46	-0,67	0,62	753
Solo	562,38	0,47	-0,31	0,42	328
RCD+Solo	993,90	0,44	-0,19	0,65	292

Conforme esperado e fundamentado nos coeficientes expostos na Tabela 2, observam-se valores de K_2 positivos, indicando que o MR aumenta com o aumento da tensão confinante, e K_3 negativos, indicando que o MR diminui com o aumento da tensão desvio. Ana-

lisando os coeficientes de determinação (R^2), obtidos para os modelos lineares (Figura 6) e composto (Tabela 2), percebe-se que o modelo composto fornece um R^2 mais próximo de 1, mas ainda baixo. Considerou-se, para o universo amostral estudado, uma inexpressiva representatividade do modelo composto, sendo o valor médio de MR mais representativo.

O MR atua no regime elástico, quanto menor a deformação elástica resultante da aplicação de uma determinada tensão desvio (simulando a carga do tráfego) maior o MR (maior rigidez). Conforme os dados obtidos a partir do MR, obtém-se o seguinte ranqueamento: RCD, solo e RCD+solo. Houve um incremento de cerca de 130% da amostra de solo para o RCD. Foram observados ainda valores muito aproximados de rigidez do solo e do RCD+solo, indicando a viabilidade de utilizar esse resíduo e, com isso, reduzir a exploração das jazidas de solo e utilizar materiais que contribuam para a sustentabilidade ambiental.

5 CONCLUSÕES

Essa pesquisa foi motivada pela busca da destinação nobre de Resíduos de Construção e Demolição e a demanda de grandes volumes de materiais requerida na construção de pavimentos. Conclui-se que o solo estabilizado com RCD teve uma considerável melhora na sua capacidade de suporte obtido pelo ensaio empírico tradicionalmente utilizado no dimensionamento de pavimentos (CBR). Além disso, a energia modificada é incentivada na execução de camadas de bases estabilizadas com esse resíduo. Quanto à avaliação mecanística (Módulo de Resiliência), os materiais foram classificados como grupo A, a proposta apresentou um baixo grau de resiliência que, podendo ser usada em todas as camadas do pavimento. Por fim, sugere-se a avaliação de outras proporções na estabilização de solo com RCD, além da avaliação de outros solos.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**, Rio de Janeiro, 2004. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ARAUJO, A. F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com Cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do Estado do Ceará**. Fortaleza - CE: Universidade Federal do Ceará, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes).
- ARAUJO, A. F.; BARROSO, S. H. A. O uso da técnica de solo-cal para melhoramento das propriedades

tecnológicas de um solo da região do baixo jaguaribe no estado do ceará. In: **SN. XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. [S.l.], 2007.

BASTOS, J. B. S. **Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes).

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2007.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. 2002. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Disponível em: <<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>>.

DNER. **Análise Granulométrica**, DNER ME 051/94: Solos, Brasília, DF, 1994. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem.

_____. **Análise Granulométrica por Peneiramento**, DNER ME 080/94: Solos, Brasília, DF, 1994. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem.

_____. **Ensaio de Compactação utilizando Amostras Trabalhadas**, DNER ME 162/94: Solos, Brasília, DF, 1994. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem.

_____. **Determinação da Densidade Real**, DNER ME 049/94: Solos, Brasília, DF, 1994. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem.

DNIT. **Manual de Pavimentação**, Rio de Janeiro, 2006. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

_____. **Determinação do Módulo de Resiliência**, Rio de Janeiro, RJ, 2010. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010.

FERREIRA, J. G. H. M.; MOTTA, L. Análise comparativa de modelos de resiliência de solos e materiais não tratados quimicamente. In: **Congresso**

de Pesquisa e Ensino em Transportes. Natal, RN: Anais do XVI ANPET, 2002.

GOMEZ, A. M. J. **Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado a Partir de Resíduos de Construção e Demolição Submetido a Carregamentos Cíclicos**. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016. Departamento de Engenharia Civil.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe - Estado do Ceará**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2007. ISBN 978-0131424739, 0131424734.

LEITE, C. A. V. G.; PIMENTEL, T. F.; AGUIAR, M. F. P.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise de melhoramento de solo com brita de resíduos de construção e demolição para camadas de pavimentos no estado do ceará. **Conexões e Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 17–23, 2016.

MACEDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

MEDINA J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica Dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. ISBN 9788571933668.

OLIVEIRA, B. T. **Uso de resíduos de construção e demolição em argamassa para revestimento de alvenaria**. 2015. Monografia (Graduação) Curso de Graduação em Engenharia Civil.

PALACIO, C. H. Estabilização de solos com resíduos de construção e demolição reciclados (rcd-r) para fins rodoviários. 2014.

PEZO, R. F. A general method of reporting resilient modulus tests of soils: A pavement engineer's point of view. In: **Presented at the 72nd Annual Meeting of the Transportation Research Board**. Washington, D.C.: [s.n.], 1993.

RIBEIRO, A. J. A. **Um Modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no estado do**

Ceará para fins de pavimentação. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, 2016.

RODAGEM, D. N. de Estradas e. **Determinação da Densidade Real**, DNER ME 093/94: Solos, Brasília, DF, 1994.

RODRIGUES, C. R. D. S.; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído (Online)**, Porto Alegre, v. 14, p. 99–111, 2014. ISSN 1678-8621.

SAMPAIO, L. L. **Comportamento mecânico de resíduos beneficiados da construção e demolição utilizados na fabricação de concreto e estabilização de solos.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2013.

SILVA, B. T. A. **Utilização de Materiais Alternativos para a Construção de Pavimentos Urbanos na Região Metropolitana de Fortaleza.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte).

SILVA, W. P.; S, S. C. M. D. P.; CAVALCANTI, C. G. B.; SILVA, D. D. P. S.; SOARES, I. B.; OLIVEIRA, J. A. S.; SILVA, C. D. P. S. Lab fit ajuste de curvas”: um “software” em português para tratamento de dados experimentais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, p. 4, 2004.

SOUZA JUNIOR, J. D. **O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do estado do Ceará.** Fortaleza - CE: [s.n.], 2005.