

Ensaio Triaxiais Dinâmicos em Misturas de Solo e RCD

Juliana Maria de Souza
UEM, Maringá, Brasil, jumaria.souza13@gmail.com

Jesner Sereni Ildefonso
UEM, Maringá, Brasil, jesner@hotmail.com

Juliana Azoia Lukiantchuki
UEM, Maringá, Brasil, jazoia@yahoo.com.br

Jeselay Hemetério Cordeiro Reis
UEM, Maringá, Brasil, jeselay@hotmail.com

RESUMO: Neste trabalho foram avaliados os resultados de ensaios triaxiais dinâmicos não drenados realizados em misturas de solo e RCD (resíduos de construção e demolição) para aplicação em pavimentação. Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização de cinco misturas que diferem na quantidade de solo e RCD nas proporções: 100% solo, 75% solo 25% RCD, 50% solo 50% RCD, 25% solo 75% RCD e 100% RCD. Os materiais consistiam basicamente de um solo laterítico residual de arenito e RCD com resíduos de tijolos cerâmicos e alvenaria. A caracterização dos mesmos consistiu na determinação da distribuição granulométrica, do peso específico dos sólidos, dos limites de liquidez e plasticidade (LL e LP) e das propriedades de compactação na energia normal (w_d máx, $w_{ótima}$). Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, compactados em cinco camadas e submetidos a ensaios triaxiais dinâmicos, com tensões confinantes de 80 kPa, 160 kPa e 240 kPa. No ensaio triaxial dinâmico, em condição exclusivamente natural, foram aplicados pulsos de carga correspondentes a aproximadamente um terço da confinante atuante, possibilitando a medição da deformação permanente do cilindro e também a montagem das envoltórias de resistência. Os resultados dos ensaios triaxiais dinâmicos permitiram determinar o Módulo de Resiliência das misturas de solo e RCD, bem como determinar o nível de degradação desse valor em função de cada ciclo e da tensão confinante aplicada. A deformação permanente ficou em torno de 5% da deformação total observada quando da aplicação dos pulsos iniciais e correspondendo a praticamente a deformação total nos pulsos finais. Os resultados obtidos foram comparados com valores de módulo de resiliência de solos argilosos e siltosos.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação permanente, RCD, Módulo de resiliência.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil contribui em larga escala com a produção de resíduos, principalmente derivados de demolição, reformas, inadequação de materiais aos processos e da execução de novas obras (AMORIM, 2013). Para amenizar a disposição dessas escórias no ambiente e diminuir a

poluição causada pelos mesmos, a engenharia estuda a possibilidade de incorporar tais resíduos para fins de pavimentação como, por exemplo, na fabricação de bases de rodovias.

A combinação de solo e RCD, por meio da estabilização granulométrica, tem por objetivo avaliar a possibilidade desse composto apresentar comportamento típico de um solo natural e ainda proporcionar as propriedades

mecânicas necessárias aos materiais usados em estruturas de pavimentos. De acordo com BALBO (2006), um dos fatores que determinam a viabilidade desta técnica é a compactação adequada dos materiais, o que lhes confere resistência aos esforços verticais aplicados na estrutura dos pavimentos pela ação das cargas. Esta resistência é chamada de resistência ao cisalhamento propiciada através do entrosamento entre as partículas sólidas.

A verificação da resistência é feita a partir de ensaios, como o cisalhamento direto, que objetiva a obtenção de parâmetros que caracterizem a coesão dos sólidos e como se dá o atrito entre eles. No ensaio em questão, um corpo de prova prismático é levado à ruptura quando é submetido à aplicação de cargas verticais e horizontais, podendo acontecer em condições de umidade natural ou inundação.

Para definir as propriedades que representam os tipos de solicitações que tratam das deformações permanentes, ou seja, compressão e cisalhamento, submeteu-se corpos de provas de solo-RCD cilíndricos a ensaios triaxiais dinâmicos. No experimento, os cilindros ficaram submetidos a uma pressão confinante pré-definida e receberam pulsos de carga a uma determinada frequência, sendo o tempo de aplicação da carga definido.

Nesta conjuntura, o trabalho desenvolvido utiliza estas técnicas de averiguação da resistência e propriedades de deformação permanente através da análise da compactação de misturas de solo e RCD em cinco conjuntos alterando a proporção de cada material, sendo estes: 100% solo, 75% solo 25% RCD, 50% solo 50% RCD, 25% solo 75% RCD e 100% RCD. Os complexos foram previamente caracterizados por ensaios de distribuição granulométrica, peso específico dos sólidos, limites de liquidez e plasticidade e propriedades de compactação na energia normal.

2 REVISÃO TEÓRICA

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados por atividades de construção, reformas e demolições, sendo compostos por

uma grande variedade de materiais. Alguns estudos, realizados no Brasil, mostraram que uma construção vertical gera, em média, 0,050 a 0,150 t/m² de resíduos, enquanto uma reforma gera, aproximadamente, 0,470 t/m². Esse RCD representa cerca de 50% da massa de resíduos sólidos urbanos. Dispostos de forma irregular e, muitas vezes, em aterros clandestinos, tornaram-se uma realidade problemática no país (ANGULO et al., 2011).

Devido à essa elevada produção de resíduos nos canteiros de obras, faz-se necessário uma destinação adequada e se possível um reaproveitamento de tal material com o objetivo de minimizar os impactos que estes causam ao meio ambiente. Para amenizar esses impactos, a possibilidade de implementar esse material nos processos construtivos de diferentes atividades, como exemplo, na pavimentação, vem sendo amplamente estudada no país.

Nas camadas de base da estrutura do pavimento, estuda-se a possibilidade de ser feita a estabilização granulométrica a partir do uso de RCD como o agregado constituinte da mistura.

É de suma importância que para ser reutilizado, o RCD deve passar por um processo de britagem, onde os materiais indesejados quanto ao seu reaproveitamento são removidos por triagem. Após passar por um beneficiamento, o resíduo se torna o agregado reciclado (AMORIM, 2013).

Para a utilização do agregado reciclado deve-se atentar para os requisitos estabelecidos na NBR 15116/04. A norma em questão especifica que os agregados reciclados destinados ao uso em obras de pavimentação devem ser de classe A, de acordo com a classificação prevista neste documento, ou seja, os resíduos que podem ser reutilizados e reciclados para serem usados como agregados.

Logo, havendo a disponibilidade de tal material e a tecnologia necessária para fazer sua reciclagem, o uso de misturas de solo-RCD torna-se altamente viável (HORTEGAL et al., 2009).

Por fim, para a caracterização do comportamento dessas misturas como camadas de pavimentos desenvolveram-se alguns ensaios para tal avaliação, como o ensaio triaxial

dinâmico.

O ensaio triaxial dinâmico avalia nas misturas as solicitações que representam as deformações permanentes, ou seja, a compressão e o cisalhamento. A versão dinâmica deste tipo de experimento se assemelha muito aos resultados dos simuladores de tráfego, por isso representa melhor o que realmente acontece em campo. O processo consiste na aplicação de pulsos de carga a uma determinada frequência, com um tempo de aplicação definido (BERTI et al., 2004).

Neste ensaio de cargas repetidas é feito um registro oscilográfico, onde sensores LVDTs medem a deformação horizontal dos cilindros ensaiados, além de acompanhar a variação do diâmetro do corpo de prova (MEDINA, 1997).

Ainda segundo este autor, se ao solo estudado aplica-se a Lei de Hooke generalizada, conhecendo-se os valores de σ_1 (tensão axial) e σ_3 (tensão confinante) e fazendo a medida das deformações, é possível achar o valor do módulo de resiliência do solo (M_r). No ensaio triaxial, definimos o módulo de resiliência por:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} \quad (1)$$

onde, σ_d é a tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) e ε_1 ou ε_r é a deformação resiliente axial. Temos que:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2)$$

Sabendo que Δh é o deslocamento vertical máximo e h_0 é o comprimento inicial de referência do corpo de prova cilíndrico.

A cada aplicação da tensão de desvio, tem-se uma parcela plástica ou permanente na deformação axial, ou seja:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r + \varepsilon_p \quad (3)$$

Para o cálculo do módulo resiliente, é considerada apenas a primeira parcela, de deformação resiliente. Essa deformabilidade elástica das camadas do pavimento condicionam a vida de fadiga das camadas mais

rijas, sujeitas a flexões sucessivas.

MEDINA (1997) ainda afirma que o módulo resiliente dos solos depende de fatores como: natureza, densidade, umidade e estado de tensões. Nos solos arenosos, o módulo depende principalmente da tensão de confinamento (σ_3), ou da soma das tensões principais (Θ). Podemos, a partir desta conjuntura, obter as seguintes expressões:

$$M_r = K_1 + \sigma_3^{K_2} \quad (4)$$

$$M_r = K'_1 + \theta^{K'_2} \quad (5)$$

Onde K_1 e K_2 são pontos de transição, cujos valores são obtidos no ensaio triaxial de cargas repetidas e são específicos para cada solo ou mistura estudada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

A amostra de solo laterítico residual de arenito da formação Caiuá, recolhida na cidade de Mandaguaçu, foi retirado de um talude em corte localizado ao lado da rodovia BR-376, entre os municípios de Maringá e Mandaguaçu. O talude em questão é formado de dois horizontes, sendo o superior de solo evoluído, com coloração avermelhada, e o inferior, de onde colheu-se a amostra, de solo residual jovem de arenito, apresentando coloração rósea. A amostra de RCD usada é constituída de resíduos de tijolos cerâmicos e alvenaria, contendo um pouco de argamassa de assentamento, com sólidos passantes na peneira 10, ou seja, menores que 2 mm.

3.2 Métodos

3.2.1 Granulometria

Os ensaios de granulometria foram realizados de acordo com as normas DNER-ME 041/94, DNER-ME 051/94, DNER-ME 080/94 e NBR 7181/84. As misturas analisadas foram as de

100% solo, 75% solo 25% RCD, 50% solo 50% RCD, 25% solo 75% RCD e 100% RCD.

Solo e RCD apresentaram 100% de material passante na peneira 10, ou seja, ambos apresentam grãos de tamanho inferior a 2 mm. Através do peneiramento fino, observou-se que pouco mais de 40% da amostra de solo passa na peneira 100, portanto caracteriza-se pela composição de areia fina e silte. O RCD apresenta mais de 30% de material passante na peneira 60, ou seja, é constituída em maior parte por areia média e em menor quantidade por areia fina.

3.2.2 Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade (LL e LP)

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade seguiram os procedimentos prescritos nas normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente. Os ensaios foram realizados para as amostras de 100% solo e 75% solo 25% RCD, visto que com as outras amostras não foi possível realizar tais ensaios.

A fração pura de solo obteve um valor de limite de liquidez de 28, limite de plasticidade igual a 15 e índice de permeabilidade igual a 12.

A mistura de 75% solo 25% RCD obteve os valores de limite de liquidez igual a 22, limite de plasticidade de 15 e índice de permeabilidade igual a 7.

3.2.3 Compactação

Os ensaios de compactação na energia normal seguiram os procedimentos descritos na norma NBR 7182/86. Consistiu no ensaio das cinco porções com frações que diferem na quantidade de solo e RCD, com as seguintes frações: 100% solo, 75% solo 25% RCD, 50% solo 50% RCD, 25% solo 75% RCD e 100% RCD.

Com a curva de compactação de cada mistura conseguida através dos ensaios, obteve-se o peso específico aparente seco e a umidade ótima, sendo estes os parâmetros utilizados posteriormente para a moldagem dos corpos de provas utilizados nos ensaios de cisalhamento direto e cisalhamento triaxial

dinâmico.

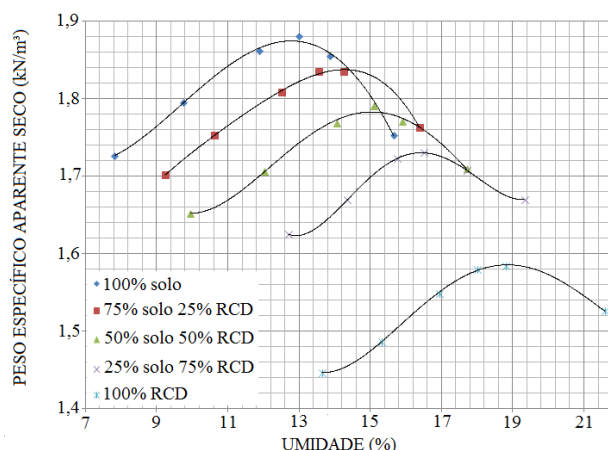


Figura 1. Curva de compactação geral

4 ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Para a realização do ensaio triaxial dinâmico, moldou-se corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. As frações utilizadas foram: 100% solo, 75% solo 25% RCD, 50% solo 50% RCD, 25% solo 75% RCD e 100% RCD. Os cilindros foram envolvidos por uma membrana impermeável e colocados dentro de uma câmara que era preenchida com água. Ao fluido em questão foi aplicada uma pressão, que correspondia à pressão de confinamento (σ_3) a que a amostra deveria ser submetida durante o ensaio, com os valores de 80 kPa, 160 kPa e 240 kPa, seguido de período de consolidação de 10 minutos. Os CPs foram ensaiados na umidade ótima de compactação (grau de saturação em torno de 79%), sem controle de sucção.

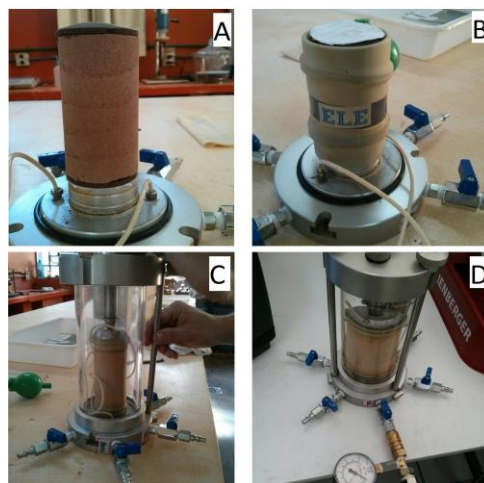


Figura 2. Montagem da câmara de confinamento

O conjunto foi posicionado dentro da prensa logo abaixo do pistão responsável pela aplicação do pulso de cargas repetidas. Este ensaio mediu as propriedades que representam as solicitações que tratam da deformação permanente, que são a compressão e o cisalhamento.

Os sensores LVDTs possibilitaram a percepção da aplicação da carga nos intervalos de 1 segundo e também a percepção da deformação durante o ensaio, gerando os gráficos de tempo por carga.

O ensaio se deu através da aplicação de uma determinada carga, ou seja, um carregamento axial, no pistão que penetra na câmara e deforma o cilindro. Durante o processo, é possível medir a deformação vertical específica do corpo de prova dividindo-se a deformação vertical pela altura inicial do mesmo.

A tensão em função da deformação axial indica o valor máximo que corresponde à ruptura, permitindo dessa maneira o traçado das envoltórias de Mohr.

5 RESULTADOS

Os ensaios triaxiais realizados geraram os gráficos: carga x tempo e deslocamento x tempo. No gráfico de carga temos o valor da máxima força axial aplicada pelo pistão ao corpo de prova. Através dessa força é possível calcular a tensão de desvio (σ_d), para cada confinante, pela seguinte equação:

$$\sigma_d = \frac{F}{A} \quad (6)$$

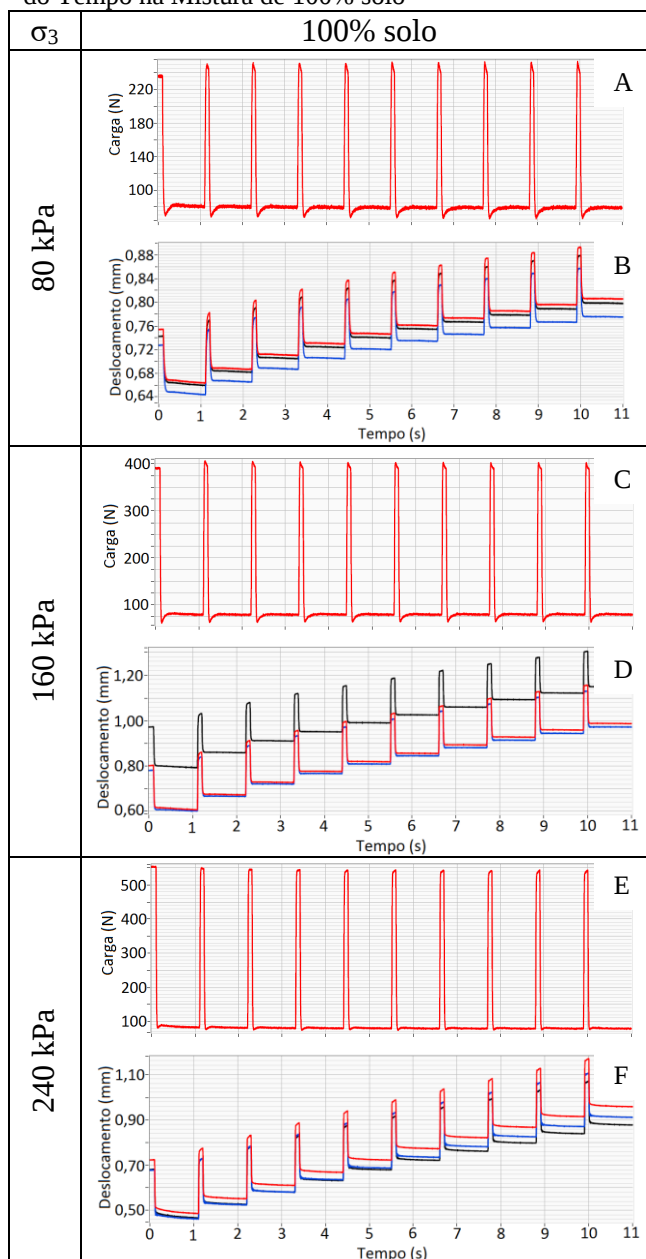
Onde F é a máxima força axial e A é a área do corpo de prova em milímetros.

O gráfico de deslocamento nos permite avaliar o comportamento do corpo de prova, sendo possível observar as deformações elásticas e plásticas sofridas pelo mesmo. Além disso, têm-se os valores da deformação total, o que, conhecendo a altura total do corpo de prova e a deformação plástica depois de cada pulso, torna possível o cálculo da deformação resiliente axial (ϵ_1) pela Equação 2. Com esses

valores, calculamos o módulo de resiliência como descrito na Equação 1.

A seguir serão apresentadas as tabelas das misturas de 100% solo, 50% solo 50% RCD e 100% RCD, com os gráficos de carga e deslocamento em função do tempo de acordo com a tensão confinante aplicada ao corpo de prova.

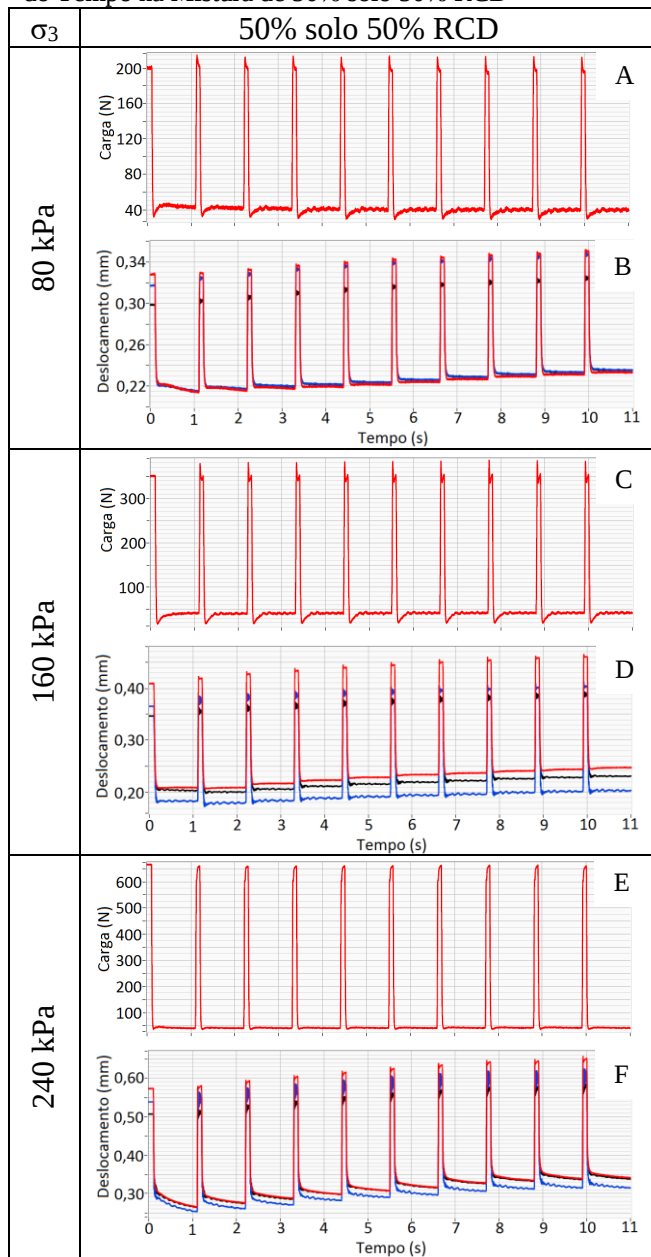
Tabela 1 - Gráficos de Carga e Deslocamento em Função do Tempo na Mistura de 100% solo



Nota-se que, com o aumento da tensão confinante, tanto a deformação total quanto a deformação plástica tendem a aumentar. Para a porção de solo puro, os valores da tensão de desvio foram de 0,130 MPa, 0,204 MPa e 0,280

MPa, respectivamente para as confinantes de 80 kPa, 160 kPa e 240 kPa. O valor do módulo de resiliência da mistura foi, em média, 107 MPa.

Tabela 2 - Gráficos de Carga e Deslocamento em Função do Tempo na Mistura de 50% solo 50% RCD

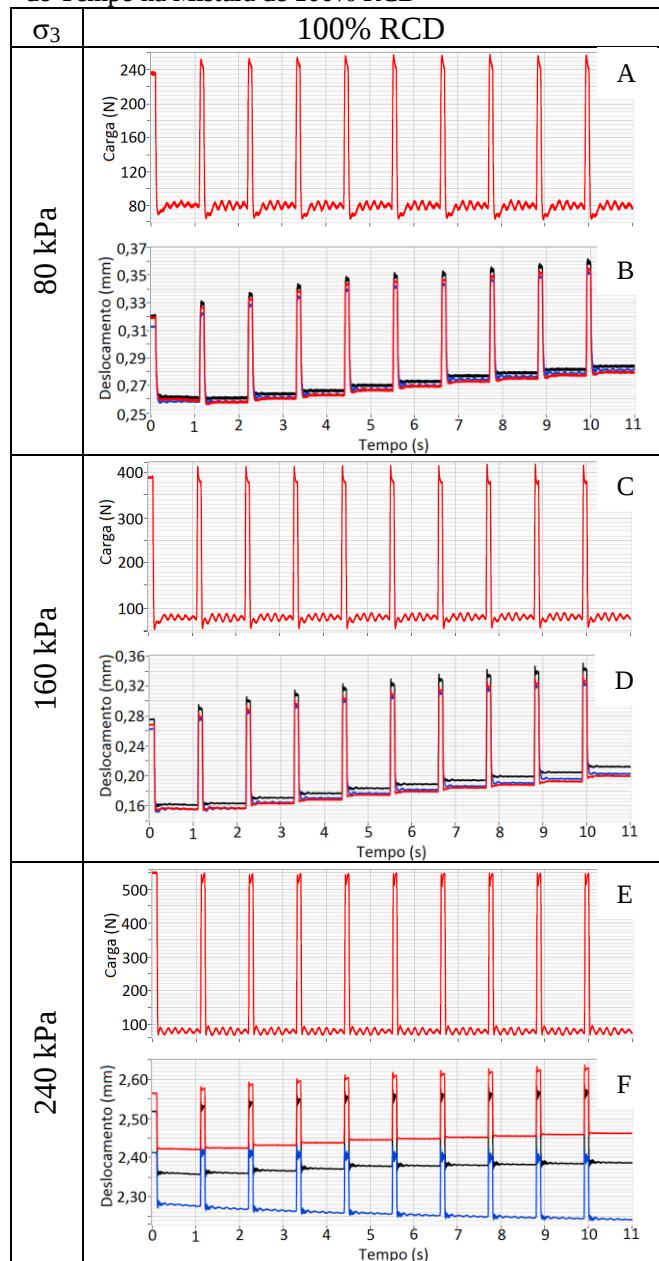


Com a adição de 50% de RCD na mistura, observamos que as deformações total e plástica ainda têm um aumento em seus valores conforme aumenta-se a confinante, porém de maneira menos expressiva. Isso acarreta um ligeiro aumento no módulo de resiliência, que ficou em cerca de 109 MPa.

Os valores da tensão desviatória (σ_d), para as tensões confinantes de 80, 160 e 240 kPa foram, respectivamente, 0,109 MPa, 0,196 MPa e

0,336 MPa.

Tabela 3 - Gráficos de Carga e Deslocamento em Função do Tempo na Mistura de 100% RCD



Na mistura pura de resíduos, para as tensões confinantes de 80, 160 e 240 kPa, obtivemos os seguintes valores de tensão de desvio: 0,130 MPa, 0,214 MPa e 0,280 MPa.

Nesta porção, destaca-se o valor reduzido de deformação total com o maior valor de confinante, que se aproxima ao valor observado com a menor confinante na mistura de 100% solo. Além disso, a deformação plástica demonstra valores mais constantes, mesmo com a elevação de σ_3 .

Como resultado, temos um módulo de

resiliência mais elevado, que tem um valor médio de 155 MPa.

Os valores de módulo de resiliência, obtidos através da análise dos ensaios realizados com essas misturas, foram comparados a valores de diferentes solos usados na construção de pavimentos, apresentado por MEDINA (1997) em seu livro Mecânica dos Pavimentos. Os solos apresentados no gráfico da Figura 3 são descritos na tabela a seguir.

Cabe ressaltar que esse valor é influenciado pela sucção do solo uma vez que o mesmo é não saturado, no entanto, nesse trabalho essa influência não foi detectada por não ter ocorrido medida da sucção.

Tabela 4. Solos de comparação do gráfico da Figura 3

Material	Descrição
Solo 10	Argila vermelha, res. de basalto, subleito (RS)
Solo 11	Argila vermelha, res. gnaise, reforço do subleito (RJ)
Solo 12	Argila amarela, res. gnaise, reforço do subleito (RJ)
Solo 13	Argila vermelha, subleito (MG)
Solo 14	Argila vermelha, reforço do subleito (PR)
Solo 15	Argila vermelha, subleito (SP)

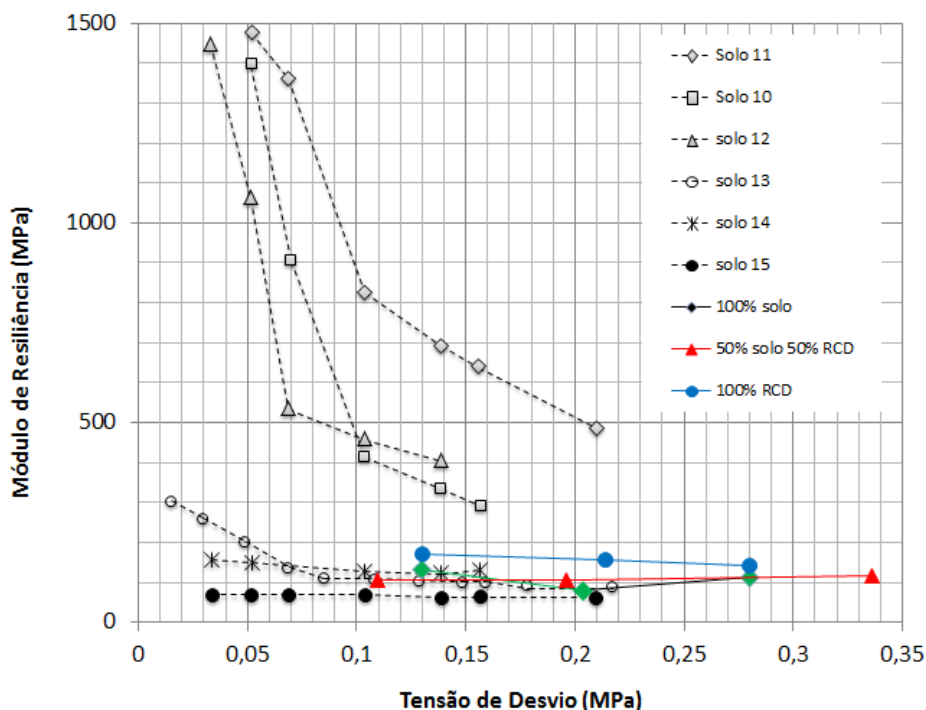


Figura 3 - Módulo Resiliente das Misturas Ensaaiadas

6 CONCLUSÃO

Percebe-se que, com o aumento da fração de RCD, a deformação se torna cada vez mais elástica, consequentemente, diminuindo a deformação total sofrida pelo corpo de prova. Este último fator acaba resultando em um módulo de resiliência maior.

Ao comparar as duas misturas puras, 100% solo e 100% RCD, nota-se que os maiores valores apresentados por este último

são muito parecidos com os menores valores do primeiro. Por esta avaliação, conclui-se que o RCD tem melhor trabalhabilidade que o solo puro para tensões maiores.

Os valores das misturas se aproximam dos observados para os solos 13, 14 e 15 da Figura 3. Logo, as porções estudadas apresentam comportamento de argila vermelha. Esses solos são usados como subleito e reforço do subleito em estruturas de pavimento em diferentes regiões do país. Portanto, havendo a disponibilidade do material, torna-se viável o

seu uso em obras rodoviárias.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária por financiar o projeto e aos técnicos do laboratório de Mecânica dos solos por toda a ajuda prestada.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, E. F. (2013) *Viabilidade técnica econômica de misturas de solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos. Estudo de caso: município de Campo Verde - MT*. 2013. 173 f. Tese - Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília.
- ANGULO, S. C. TEIXEIRA, C. E. CASTRO, A. L. NOGUEIRA, T. P. (2011) *Resíduos de Construção e Demolição: avaliação de métodos de quantificação*. 2011. Artigo Técnico. Eng Sanit Ambient.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6459: *Solo - determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7180: *Solo - determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7181: *Solo - análise granulométrica*. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7182: *Solo - ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15116: *agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- BALBO, J. T. (2007) *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos.
- BERNUCCI, L. B. MOTTA, L. M. G. CERATTI, J. A. P. SOARES, J. B. (2006) *Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA.
- BERTI, C. REIS, M. *Ensaio triaxial de cargas repetidas em misturas asfálticas*. In: 6º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica da FATEC - SP, 2004, São Paulo. Anais. São Paulo. 2004. Disponível em: <http://bt.fatecsp.br/system/articles/577/original/bt1751.pdf>. Acesso em: 15 ago 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM DNER-ME 041/94: *Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização*. DNER/DrDTc (IPR), 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM DNER-ME 051/94: *Solos - análise granulométrica*. DNER/DrDTc (IPR), 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM DNER-ME 080/94: *Solos - análise granulométrica por peneiramento*. DNER/DrDTc (IPR), 1994.
- HORTEGAL, M.V. FERREIRA, T. C. SANT'ANA, W. C. (2009) *Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luís - MA*. 2009. Departamento de Expressões Gráficas e Transportes. Universidade Estadual do Maranhão, Maranhão.
- JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. (2000) *Reciclagem de resíduos da construção*. In: SEMINÁRIO RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, 2000, São Paulo. Anais. São Paulo.
- MEDINA, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*. Editora UFRJ.