

CONTRIBUIÇÃO PARA O CONHECIMENTO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS LATERÍTICOS UTILIZADOS EM PAVIMENTOS NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

Graziella Pereira Pires dos Santos
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães
Instituto Militar de Engenharia

RESUMO

No presente trabalho são apresentados aspectos geológicos do sudoeste da Amazônia brasileira e analisadas as características geotécnicas e o comportamento mecânico de solos lateríticos pedregulhosos daquela região do país. Os solos estudados neste trabalho foram divididos em dois grupos: solos selecionados para o projeto da BR-429/RO e uma jazida de laterita localizada no município de Porto Velho. São apresentados resultados de ensaios triaxiais de carga repetidas para a determinação do módulo resiliente e avaliação da deformação permanente total considerando-se variados estados de tensões. Nos resultados dos ensaios foi possível observar elevados valores de módulo resiliente e baixos valores de deformação permanente para todos os materiais analisados, fato que corrobora o bom comportamento mecânicos destes materiais utilizados como materiais de pavimentação rodoviária.

ABSTRACT

This study presents geological aspects of the southwestern Brazilian Amazon and analyzes the geotechnical characteristics and mechanical behavior of lateritic gravel soils of this region in the country. The soils in this paper were divided into two groups: soils selected for the BR-429/RO project and a laterite deposit located in the Porto Velho city. Resilient modulus was determined by repeated load triaxial test for determination and evaluation of the total permanent deformation considering various stress states. In results of the tests was observed high resilient modulus values and low values of permanent deformation for all materials analyzed, a fact which corroborates the good mechanical behavior of materials used as road paving materials.

1. INTRODUÇÃO

O sudoeste da região amazônica engloba os estados de Rondônia, Acre e parte do Amazonas, constituindo uma região de baixa densidade de rodovias, se comparada à região centro-sul do país, sendo pouco comuns as publicações técnicas a respeito do comportamento dos materiais de pavimentação utilizados naquela região. Assim, o presente trabalho constitui uma pequena contribuição para uma melhor compreensão do comportamento tensão versus deformação dos solos tropicais lateríticos utilizados em pavimentos.

Em geologia o termo Cráton é utilizado para identificar grandes regiões que não sofreram ação de processos orogenéticos recentes, tais como dobramentos, falhamentos e intrusões em grande escala. Ou seja, são áreas pouco suscetíveis a processos geológicos endógenos, como vulcanismo, sismicidade, e, por isso, geralmente composta por rochas muito antigas, ou do chamado embasamento cristalino brasileiro. No Brasil há pelo menos dois Crátons, o do São Francisco e o Amazônico, do qual o estado de Rondônia faz parte. Sobre as rochas antigas que compõem o embasamento podem ocorrer depósitos sedimentares de origens e idades diversas, inclusive os depósitos aluvionares quaternários (até 1,8 m.a).

De acordo com os estudos constantes do Levantamento Geológico do Brasil, elaborado pela companhia brasileira de recursos Minerais (CPRM), o estado de Rondônia está localizado a oeste da região conhecida como província Tapajós, figura 1, de acordo com a compartimentação elaborada por Almeida *et al.*, (1977) *apud* Guimarães (2009), também recebendo a denominação de Subprovíncia Madeira. O quadro geotectônico do sudoeste do Cráton Amazônico, no qual está incluído o estado de Rondônia, é retrato de sucessivas reativações relacionadas a episódios orogenéticos à medida que o pré-cambriano foi chegando ao seu final, sendo que na publicação supracitada da CPRM os autores propõem que a identificação da região objeto seja a seguinte: extensa zona tectônica que envolve um amplo segmento litosférico, palco de deformações

policíclicas, relações metamórficas complexas, granitização significativa, migmatização sintectônica e retrabalhamento crustal, produto de uma evolução segundo processos superimpostos no curso de um ou mais ciclos orogênicos. O trabalho citado também é proposto que a região seja denominada de Faixa Orogênica Policíclica Guaporé e descrevem detalhadamente aspectos pertinentes à concepção de sua coluna litoestratigráfica.

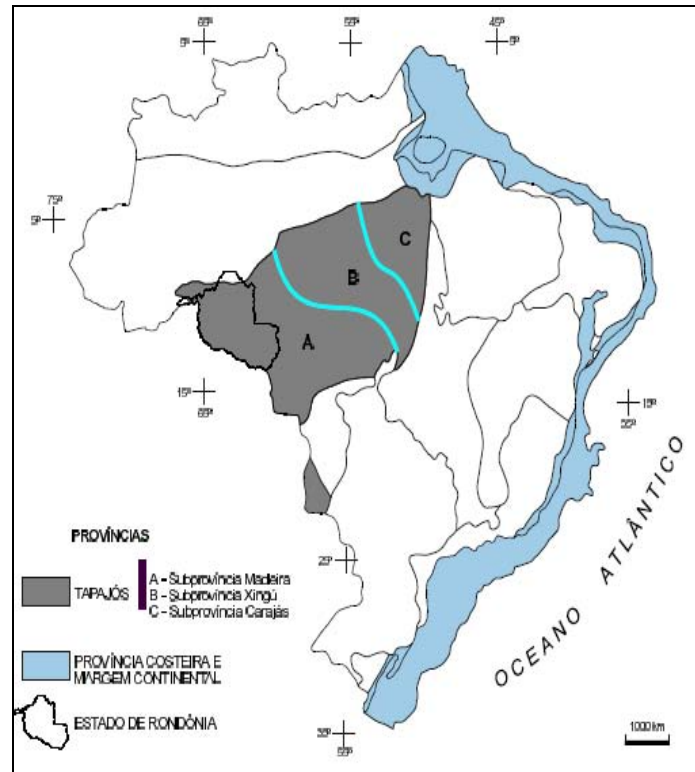


Figura 1: Províncias Estruturais do Brasil e o Estado de Rondônia. Modificado de Amaral *et al.*, (1977).

Na figura 2 é apresentado um fragmento mapa rodoviário de Rondônia no qual pode se visualizar uma parte do traçado da rodovia BR-429, ao longo do qual foram coletadas parte das amostras de lateritas utilizadas no presente trabalho.

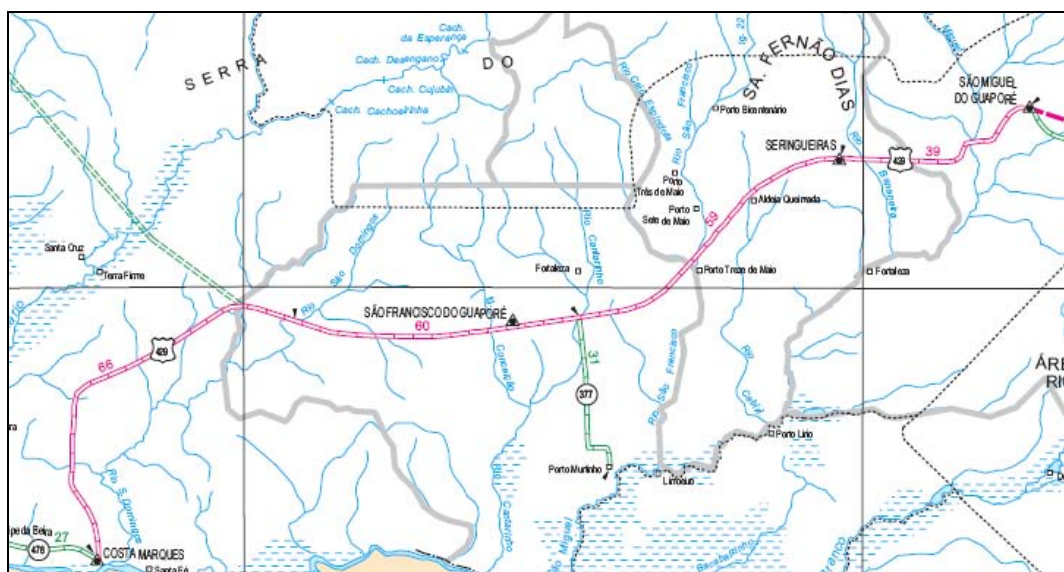


Figura 2: Mapa Rodoviário de Rondônia Incluindo Parte da Rodovia BR-429/RO.

2. MATERIAIS ESTUDADOS

Os vários solos lateríticos que compõem o presente trabalho podem ser agrupados em dois conjuntos de materiais:

- Solos estudados para o projeto da BR-429/RO
- Jazida da “Coca-cola” em Porto Velho

Os solos estudados para a elaboração do projeto da rodovia BR-429/RO constituem um conjunto de seis jazidas de lateritas pedregulhosas de base e sub-base, cuja caracterização geotécnica e valores de módulo resiliente foram utilizados por Ferreira (2008), entre muitos outros materiais, para a elaboração de um estudo de previsão do módulo resiliente através de redes neurais. Os dados relativos à avaliação da deformação permanente foram utilizados para a elaboração de um modelo de previsão da deformação permanente em solos (Guimarães, 2009). Os materiais mostraram-se predominantemente pedregulhos, conforme pode ser observado na figura 3, com porcentagem máxima passante na peneira nº 200 de 25%.

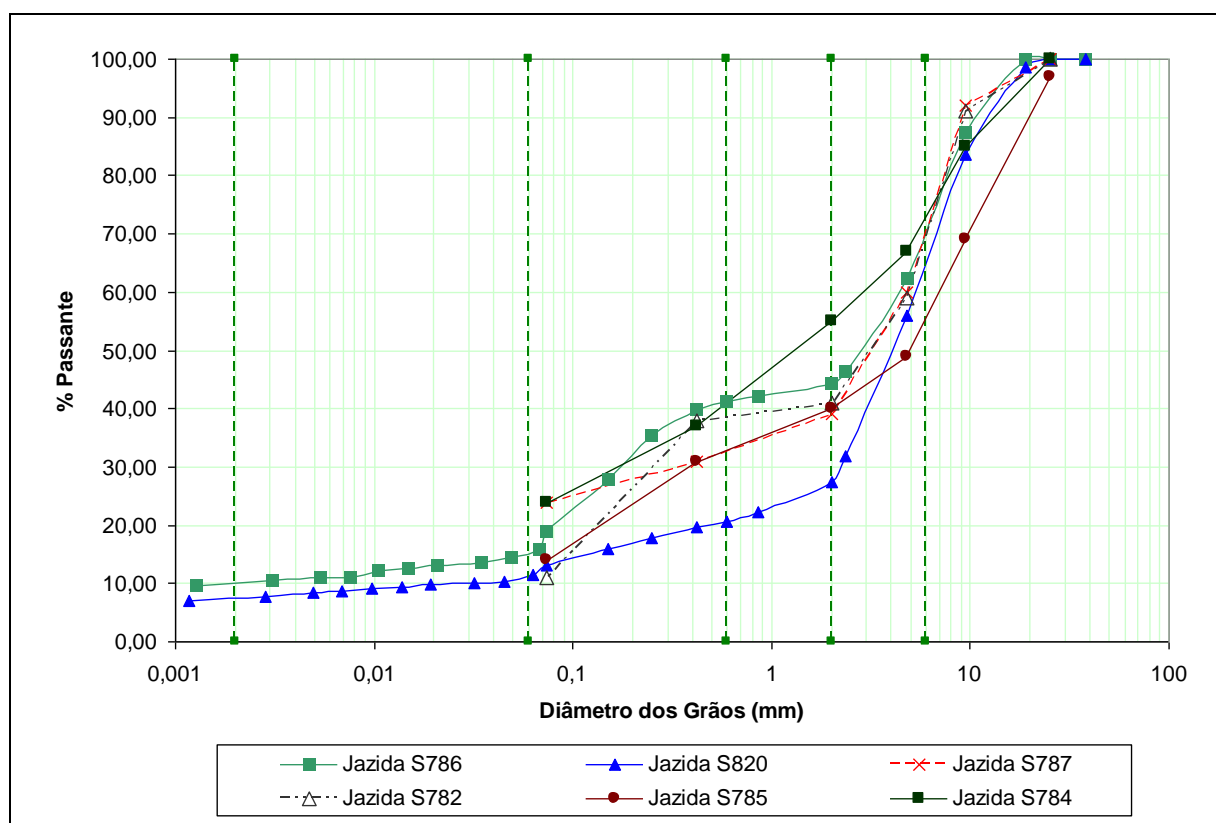


Figura 3: Composição Granulométrica das Lateritas de Rondônia Estudadas.

A jazida de cascalho laterítico, ou laterita, oriunda da cidade de Porto Velho é localizada junto à fábrica da empresa Coca-Cola naquela cidade e vem sendo explorada para pavimentação urbana, seja como camada de base, sub-base ou revestimento primário. Um aspecto geral da jazida é apresentado nas figuras 4 e 5, nas quais podem ser observados além do aspecto pedregulhoso do material a típica coloração vermelho-escuro das lateritas ferruginosas.



Figura 4: Vista da Jazida de Laterita de Porto Velho/RO. Jazida da “Coca-Cola”.



Figura 5: Aspecto Concrecionário da Jazida de Laterita de Porto Velho/RO.

A umidade ótima do material foi de 12,6% e a massa específica aparente seca foi de 2,029 g/cm³.

3. METODOLOGIA

A metodologia de ensaios de laboratório realizado para o presente trabalho variou conforme o material analisado. Para o caso da laterita de Porto Velho foram coletados cerca de 100 cem quilogramas de material, que foram conduzidos ao laboratório de geotecnia da COPPE/UFRJ, no qual foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, módulo resiliente e deformação permanente considerando vários níveis de tensões distintos.

Os corpos-de-prova foram moldados em cilindros tri-partidos, de dimensões 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura, para a realização dos ensaios de módulo resiliente e deformação permanente, tendo sido adotado para estes ensaios os procedimentos desenvolvidos na COPPE/UFRJ, conforme pode ser verificado em Medina e Motta (2005) e Guimarães (2009).

Para cada corpo-de-prova moldado durante o ensaio de compactação foi realizado o ensaio de módulo resiliente, considerando-se a adição das seguintes quantidades de água: 400 ml, 450 ml, 480 ml e 500 ml. Pesquisou-se assim a influência do teor de umidade no valor de módulo resiliente do material.

No caso dos materiais utilizados no projeto de pavimentação da BR-429/RO adotou-se um procedimento análogo, porém utilizou-se estados de tensões variados no caso do estudo da deformação permanente.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Com amostras de Laterita de Porto Velho foi possível realizar um ensaio de compactação conjugado com ensaios de módulo resiliente, cujos dados são apresentados na tabela 1.

As quantidades de água utilizadas e respectivos acréscimos diferiram do usual do ensaio de compactação, pois o objetivo principal era definir com maior acurácia a umidade ótima. Além

disso, corpos-de-prova muito úmidos frequentemente apresentam ruptura durante o ensaio triaxial, fato que nada acrescentaria a esta pesquisa.

A umidade ótima assim obtida foi de 12,6%, porém, mesmo para teor de umidade de um ponto percentual abaixo do ótimo a massa específica aparente seca é muito próxima da equivalente à ótima.

Tabela 1: Dados do Ensaio de Compactação Realizado com a Laterita de Porto Velho/RO.

Corpos-de-prova	Água Adicionada (ml)	Umidade do Cp(%)	MEAS (g/cm ³)
CP 01	400	10,7	2,029
CP 02	450	11,7	2,105
CP 03	480	12,4	2,140
CP 04	500	12,6	2,156

4.1 Módulo Resiliente da Laterita de Porto Velho

A equação 1 representa o valor do Módulo Resiliente da Laterita de Porto Velho obtido para corpo-de-prova de dimensões 10 cm por 20 cm e compactado com energia equivalente ao ensaio proctor intermediário e umidade ótima de compactação.

$$MR = 203 \sigma_3^{0,16} \sigma_d^{-0,32} \text{ MPa} \quad R^2 = 0,77 \quad (1)$$

em que: MR: módulo resiliente [MPa];
 R^2 : coeficiente de correlação;
 σ_d : tensão desvio [MPa];
 σ_3 : tensão confinante [MPa].

Nas figuras de 6 a 13 são apresentados gráficos de variação do módulo resiliente em função das tensões confinante e desvio separadamente, para cada um dos corpos-de-prova listados na tabela 2.

A idéia inicial foi verificar em conjunto a influência da umidade de compactação no módulo resiliente, entretanto o baixo coeficiente de correlação obtido na maioria dos gráficos impede que as respectivas curvas sejam, de fato, representativas do comportamento do material.

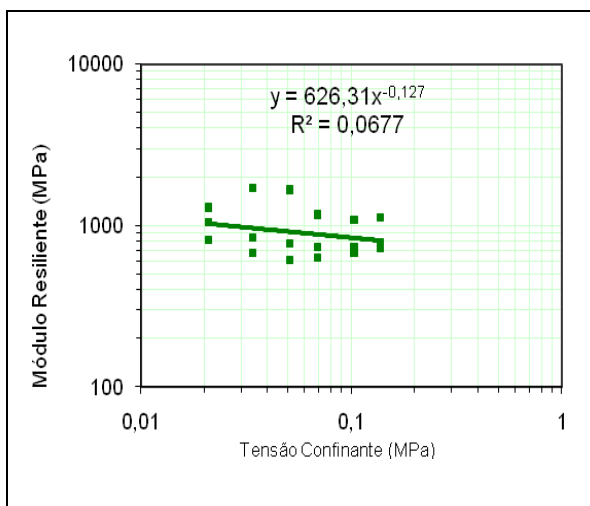


Figura 6: Variação do módulo resiliente com a tensão confinante. Laterita de Porto Velho CP 1 (400 ml).

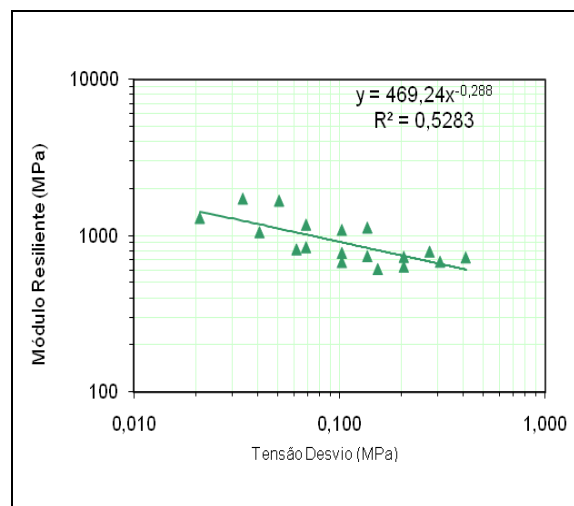


Figura 7: Variação do módulo resiliente com a tensão desvio. Laterita de Porto Velho CP 1 (400 ml).

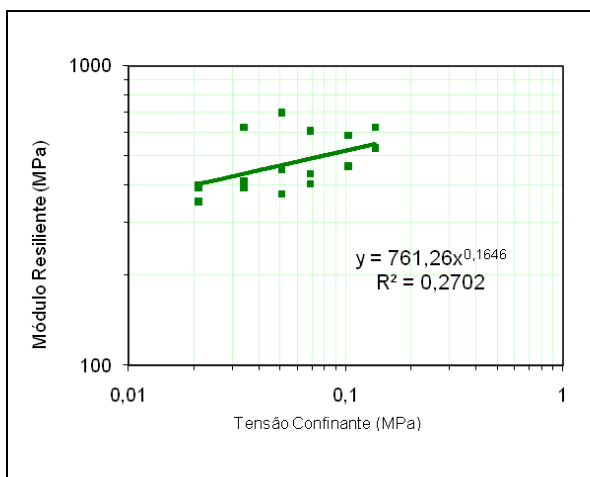


Figura 8: Variação do módulo resiliente com a tensão confinante. Laterita Porto Velho CP 2 (450 ml).

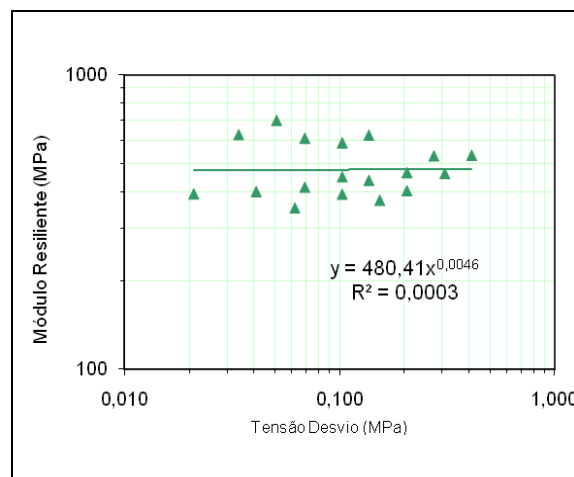


Figura 9: Variação do módulo resiliente com a tensão desvio. Laterita de Porto Velho CP 2 (450 ml).

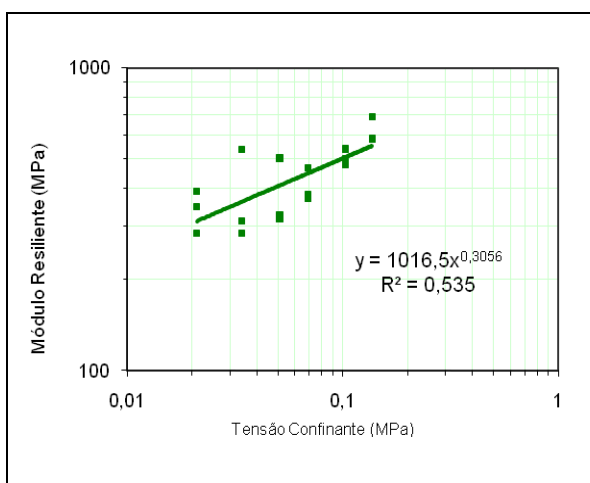


Figura 10: Variação do módulo resiliente com a tensão confinante. Laterite de Porto Velho CP 3 (480 ml).

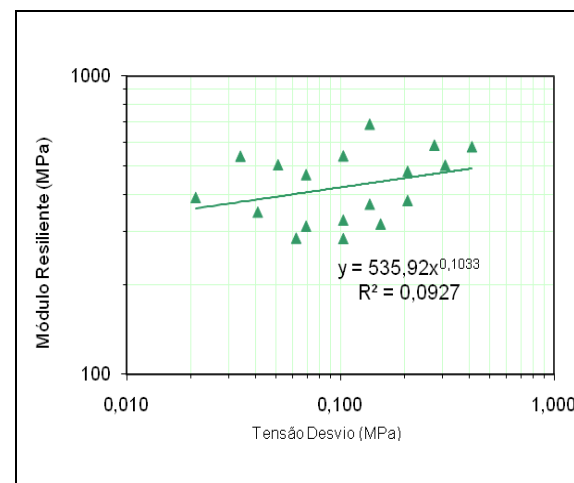


Figura 11: Variação do módulo resiliente com a tensão desvio. Laterite de Porto Velho CP 3 (480 ml).

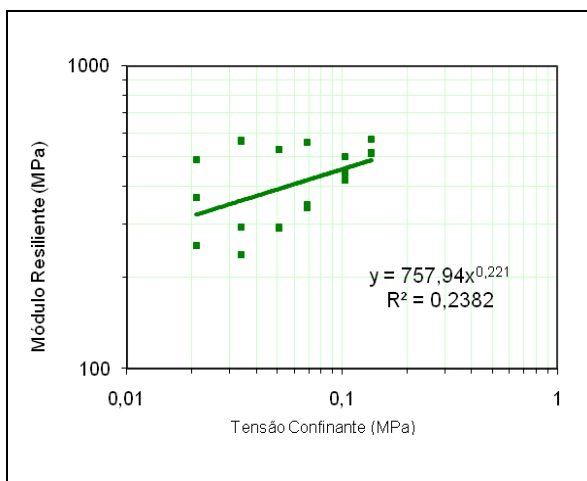


Figura 12: Variação do módulo resiliente com a tensão confinante. Laterita de Porto Velho CP 4 (500 ml).

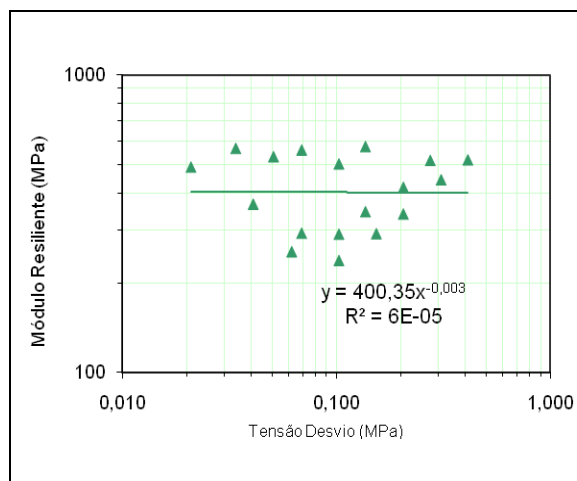


Figura 13: Variação do módulo resiliente com a tensão desvio. Laterita de Porto Velho CP 4 (500 ml).

Conforme pode ser observado nas figuras de 6 a 13, no caso do cp moldado com 400 ml de água a ordem de grandeza do valor médio do módulo resiliente foi de 1000 MPa, tendo sido obtido um melhor enquadramento no modelo que representa o módulo resiliente variando em função da tensão desvio. Este cp, porém, apresentou-se com umidade abaixo da umidade ótima, fato que explica a sua elevada rigidez. Obtiveram-se os valores médios do módulo de resiliente dos Cp's através da média dos resultados anotados na ficha técnica dos ensaios.

Para os corpos-de-prova moldados com 450 ml e 480 ml a ordem de grandeza do valor médio do módulo resiliente foi de 400 MPa tendo sido obtido um melhor enquadramento no modelo do módulo variando em função da tensão confinante. Esses valores de módulo resiliente são compatíveis com aqueles obtidos para pedregulhos lateríticos em pesquisas anteriores, tais como em Vertamatti (1988), Santos (1998) e Motta (1991).

No caso do corpo-de-prova moldado com 500 ml de água, observa-se uma ligeira queda no valor do módulo resiliente e um melhor enquadramento no modelo em função da tensão confinante.

4.2 Deformação Permanente da Laterita de Porto Velho

Na tabela 2 encontram-se listados os ensaios de deformação permanente que foram realizados com a Laterita de Porto Velho, sendo a idéia básica a fixação de algumas razões de tensões e variadas tensões desvio. Procurou-se utilizar um estado de tensões compatível com as tensões que possam ser obtidas no campo, considerando-se a carga de roda padrão.

Tabela 2: Relação dos Ensaios de Deformação Permanente Realizados com a Laterita de Porto Velho.

Ensaio	Tensão (kPa)		Tensão	Razão	N	$\epsilon_p (\mu\mu)$
	Desvio	Confinante	σ_1 (kPa)	σ_1/σ_3		
1	400	100	500	5	156.000	1,225
2	200	200	400	2	214.000	1,289
3	160	80	240	3	180.576	0,382
4	280	140	420	3	417.000	0,828
5	360	180	540	3	180.000	1,166
7	300	100	400	4	336.000	0,721
8	160	40	200	5	153.000	0,768
9	240	60	300	5	250.000	0,542
10	125	25	150	6	250.000	0,413

O máximo valor de deformação permanente total obtido foi de 1,289mm, no caso do ensaio 2, realizado com tensão desvio e confinante iguais a 200kPa. Este valor pode ser considerado como baixo, pois um pavimento comum pode apresentar até o fim da vida útil um afundamento de trilha de roda na ordem de 12mm. Assim, a laterita de Porto Velho apresentou um bom comportamento em relação à deformação permanente.

4.3 Deformação Permanente das Lateritas da BR-429/RO

As amostras de lateritas da BR-429/RO receberam as seguintes numerações: S786, S820 e S787, sendo seus respectivos valores de umidade de compactação, e Massa Específica Aparente Seca (MEAS) apresentados na tabela 3. A tabela mostra também o estado de tensões dos respectivos ensaios.

Tabela 3: Valores de umidade de compactação e Massa Específica Aparente Seca das Lateritas da BR-429/RO.

Material	Ensaio	Tensão (kPa)		w_{cp} (%)	γ_s (g/cm ³)
		σ_d	σ_3		
S786	1	40	40	10,5	2,017
	2	120	40	11,5	1,953
	3	150	100	11,9	1,981
	4	250	100	10,8	2,015
	5	100	100	12,6	2,055
S820	1	40	40	12,9	1,927
	2	120	40	12,3	1,915
	3	150	100	13,1	1,883
	4	250	100	13,3	1,909
	5	420	100	13,7	1,929
S787	1	70	70	14,3	2,008
	2	70	70	13,1	2,027
	3	70	70	14,6	1,975
	4	70	70	14,4	1,922
	5	70	70	14,2	1,976

4.4 Avaliação da Deformação Permanente Total

A variação da deformação permanente ao longo dos ciclos de aplicação de cargas é mostrada nas figuras 14, 15 e 16, para as lateritas das jazidas S786, S820 e S787, respectivamente. As curvas obtidas possuem formas similares, apresentando um crescimento muito rápido até os 10.000 ciclos iniciais, em geral, e depois tendendo a um valor constante à medida que se aumenta o número de aplicação de cargas.

Em todos os ensaios fica evidenciada a forte influência do estado de tensão, sendo que no caso da laterita da jazida S786, figura 14, o aumento da tensão desvio entre os ensaios 3 e 4, ou seja, de $\sigma_d = 150$ kPa para $\sigma_d = 250$ kPa, representou um aumento da deformação permanente total de 0,471 mm para 0,930 mm, que corresponde a um acréscimo de 102%.

Para a laterita da jazida S786, no ensaio 1 conduzido com um nível de tensão muito baixo ($\sigma_d = \sigma_3 = 40$ kPa) a deformação permanente total observada foi de 0,189 mm após 156.000 ciclos de aplicação de carga. Já no ensaio 2 manteve-se a mesma tensão confinante e aumentou-se em três vezes a tensão σ_d , aumentando a deformação permanente total para 0,452 mm, ou seja, um acréscimo de 139%.

Ainda para a laterita da jazida S786, tem-se que os ensaios 2 e 3 foram conduzidos com um nível de tensão desvio muito próximo e tensão confinante bastante diferente, $\sigma_3 = 40$ kPa no ensaio 2 e $\sigma_3 = 100$ kPa no ensaio 3. Observa-se que as curvas que representam as deformações permanentes são muito similares, quase superpostas, indicando que a tensão confinante possui reduzida influência na deformação permanente total daquele material, para o universo de variação de tensão confinante adotado. Tal tendência também foi observada nas lateritas das jazidas S787 e S820.

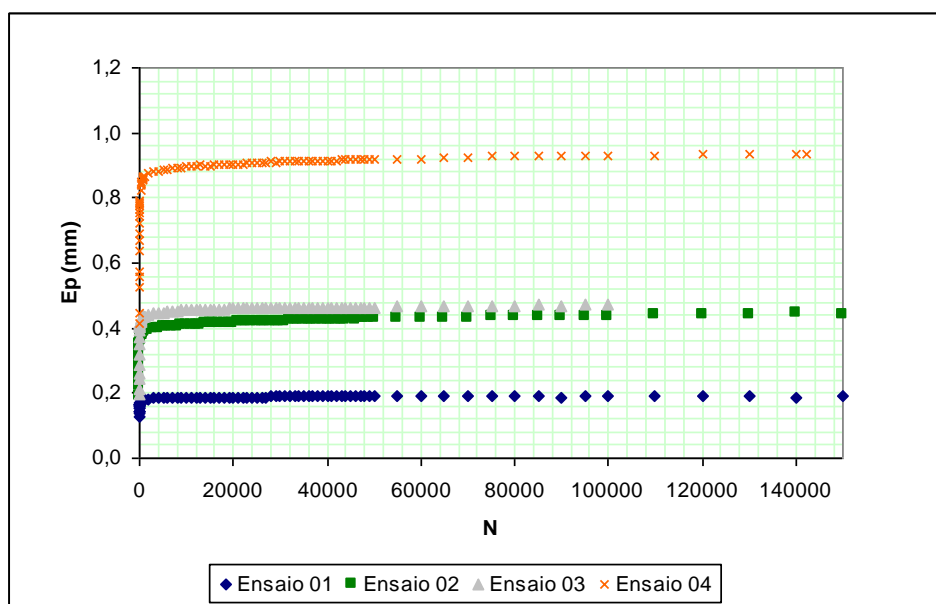


Figura 14: Variação da Deformação Permanente Total para a Laterita da Jazida S786.

No caso da laterita da jazida S820, cuja variação da deformação permanente total é mostrada na figura 15, foi possível realizar um ensaio a mais do que para a jazida S786. Trata-se do ensaio 05, conduzido com tensão $\sigma_d = 420$ kPa e tensão confinante $\sigma_3 = 100$ kPa, sendo

observada uma deformação permanente total de 2,843 mm para 160.000 de aplicação de cargas. Neste caso convém ressaltar que a tensão de ensaio é bastante elevada se comparada com a tensão de 560 kPa induzida por uma carga padrão de 8,2 tf no topo do revestimento de um pavimento qualquer.

Ou seja, em uma situação real o revestimento asfáltico estaria submetido a um nível de tensão mais próximo de 560 kPa, enquanto que a camada de base ou sub-base restariam tensões mais baixas usualmente inferiores às tensões utilizadas no ensaio.

Desejando-se uma aplicação direta dos resultados, tem-se que o ensaio 05 indica uma contribuição da camada de base de laterita na ordem de 2,843 mm, para o afundamento total da trilha-de-roda, cujo valor admissível pode ser considerado como 12,5 mm. Ou seja, o material mesmo em condições desvantajosas apresenta boa resistência à deformação permanente, para condição de umidade ótima de compactação e energia de compactação equivalente à energia do ensaio proctor intermediário.

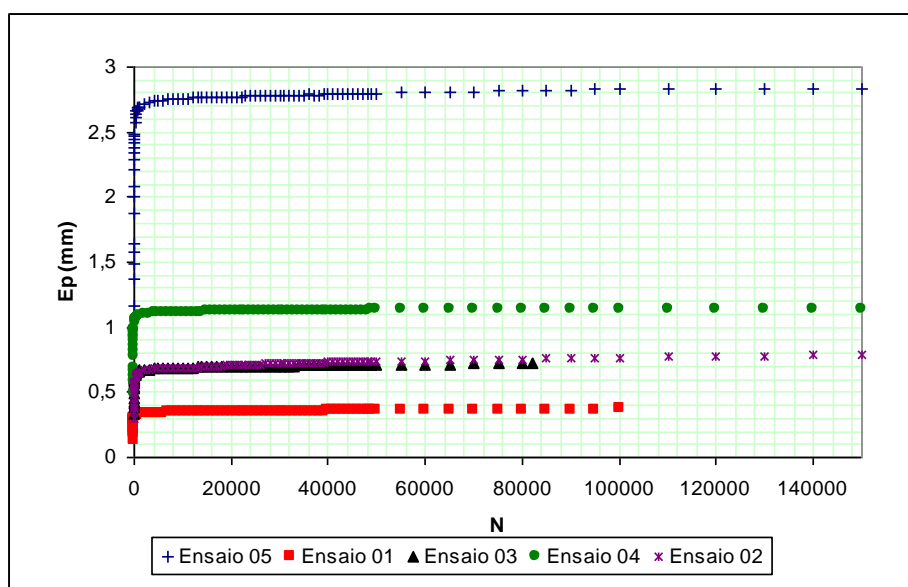


Figura 15: Deformação Permanente Total para a Laterita da Jazida S820.

No caso da laterita da jazida S787, figura 16, os ensaios tiveram como objetivo pesquisar a influência da umidade de compactação na deformação permanente total do material, sendo todos os ensaios conduzidos com o mesmo estado de tensão ($\sigma_d = \sigma_3 = 70$ kPa)

O ensaio 2, mostrado na figura 16, corresponde ao material compactado na umidade ótima e apresentou deformação permanente total de 0,437 mm para 100.000 ciclos de aplicação de carga, portanto muito baixa. As variações de umidade foram muito pequenas em torna desta, principalmente porque não foi possível moldar outros corpos-de-prova com umidades mais elevadas.

Analisando-se a figura 16 é possível observar que as curvas obtidas tendem a ficar paralelas entre si, à medida que se aumenta o número de aplicação de cargas. Além disso, as deformações permanentes totais aumentaram com o acréscimo das umidades de compactação

dos corpos-de-prova, embora não sejam diretamente proporcionais. Com valores absolutos de umidade de compactação variando de 13,1%, 14,3 %, 14,6% e 15,6% obteve-se deformação permanente total de 0,437 mm, 1,992 mm, 3,298 mm e 3,427 mm, respectivamente.

Nestes ensaios, ao contrário dos demais, a deformação permanente total para condição de umidade de compactação acima da ótima atingiu valores que podem ser considerados como elevados, casos dos ensaios 3 e 4.

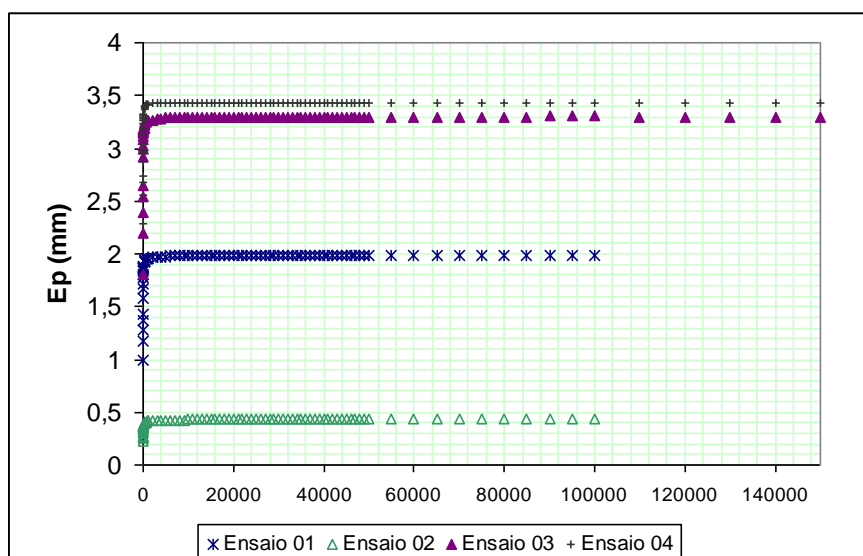


Figura 16: Deformação Permanente Total para a Laterita da Jazida S787.

5. CONCLUSÃO

Foram mostrados resultados de ensaios de módulo resiliente e deformação permanente de diversos pedregulhos lateríticos da região sudoeste da Amazônia, tendo sido possível observar elevados valores de módulo resiliente e baixos valores de deformação permanente para todos os materiais analisados, fato que corroboram o bom comportamento mecânicos destes materiais utilizados como materiais de pavimentação rodoviária.

Mostrou-se que o módulo resiliente da jazida de Porto Velho variou entre 350 e 600MPa aproximadamente, considerando os variados estados de tensões utilizados no ensaio, e para o caso de umidade aproximadamente igual à ótima. Estes valores podem ser considerados como elevados, e compatíveis com valores obtidos para solos similares, atestando o bom comportamento mecânico deste material.

Para as lateritas utilizadas na BR-429/RO foi mostrado que as curvas de deformação permanente apresentaram um crescimento inicial elevado seguido de um nítido acomodamento, resultando em um valor final baixo. Assim, estes materiais apresentaram um bom desempenho com relação a este critério. A exceção foi verificada para o caso da laterita da jazida S787, que atingiu um valor de deformação permanente de até 3,5 cm – para o caso de maior umidade - que pode ser considerado alto. Entretanto, a umidade utilizada foi acima da umidade ótima, e a curva de deformação permanente também apresentou nítida tendência de acomodamento, fato favorável para o desempenho de um material de pavimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FERREIRA, J. G. H. de M. (2007). "Tratamento de Dados Geotécnicos para Predição de Módulos Resiliência de Solos e Britas Utilizando Ferramentas de Data Mining". Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- GUIMARÃES, A. C. R. (2009). "Um Método Mecânico – Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos". Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G da (2005). Mecânica dos Pavimentos 2ª Edição. ISBN 85-905987-1-3. Rio de Janeiro 2006.
- MOTTA, L. M. (1991). "Método e Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas". Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- SANTOS, J. D. G. (1998). "Contribuição ao Estudo dos Solos Lateríticos Granulares Como Camada de Pavimento". Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- VERTAMATTI, E. (1988). "Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na Investigação de Aeroportos e Metodologia MCT e Resiliente". Tese de Doutorado. Área de Transporte Aéreo. ITA. São José dos Campos/SP.