

# CARACTERIZAÇÃO DE ALGUNS SOLOS DE SUBLEITOS RODOVIÁRIOS DO ESTADO DE SÃO PAULO UTILIZANDO ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGA REPETIDA

Leopoldo Baptista Testa Neto <sup>1</sup>; Caio Rubens Gonçalves Santos <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor Associado da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

## Resumo.

O módulo de resiliência dos materiais existentes no pavimento e no subleito rodoviário é indispensável para projetar os pavimentos de rodovias e para analisar o comportamento destes, frente a cargas rodoviárias. Tendo isso em vista, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) desenvolveu o método de dimensionamento de pavimentos (MeDiNa) que utiliza o valor do módulo para determinar o estado de tensões do pavimento. Este parâmetro é obtido a partir de resultados do ensaio triaxial de cargas dinâmicas em função das tensões principais e de confinamentos determinados por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas. Neste trabalho, além da caracterização dos módulos de resiliência, foram também realizados ensaios correntes de caracterização dos solos do subleito em 7 amostras coletadas em rodovias estaduais no Estado de São Paulo. Os resultados foram analisados com o objetivo de identificar o modelo mais adequado para a determinação do módulo de resiliência de cada amostra de.

## 1. Introdução

A pavimentação rodoviária tem sido motivo de grandes discussões nos últimos anos, evidenciando-se a necessidade de revisão dos métodos de dimensionamento e alteração no modelo atual de cálculo do módulo de resiliência dos materiais existentes na pavimentação e no subleito rodoviário.

Atualmente o desempenho mecânico dos pavimentos tem sido avaliado em função do Índice de Suporte Califórnia (ISC), visto que o ensaio possibilita também o dimensionamento da pavimentação, porém constatou-se que este apresenta deficiências em seus cálculos. Dentre as defasagens do ensaio é relevante citar o fato de que este não representa os efeitos reais das cargas no pavimento, visto que a tensão dos veículos, assim como a tensão de confinamento dos solos não é utilizada como base para o cálculo dos demais parâmetros, impossibilitando o cálculo correto da previsão de carga no pavimento, acarretando problemas futuros tanto nos solos dos subleitos quanto nos pavimentos.

Para solucionar esse impasse, o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) está desenvolvendo o novo método nacional de dimensionamento de pavimentos (MeDiNa), o qual baseia-se em uma junção de conceitos já utilizados em outros métodos internacionalmente reconhecidos. Já formalmente oficializado em manuais internacionais como o norte-americano (ASSHTO) e o australiano (AUSTROADS), o Módulo de Resiliência vem sendo estudado e averiguado como indicador principal para a formatação e concretização do método MeDiNa. Mesmo que atualmente no Brasil os métodos mecanicista-empíricos não sejam normatizados, o Módulo de Resiliência já é mundialmente aceito como parâmetro para a caracterização de solos dos subleitos e para a determinação dos estados de tensões e deformações do pavimento.

Os ensaios avaliados pelas pesquisas de mecânica dos pavimentos permitem, majoritariamente, analisar as deformações plásticas frente a níveis de tensões, e os resultados cíclicos obtidos são avaliados. A análise é feita a partir de resultados obtidos

por ciclos, o qual não são lineares, prevendo a necessidade de que o estudo seja feito por meio de relações empíricas entre o estado de tensões e os valores do módulo de resiliência, sendo estes obtidos por ensaios triaxiais. O método criado pelo DNIT utiliza a regressão entre os valores do Módulo de Resiliência e os componentes de tensão, confinante e desviadora.

O módulo de resiliência, que será utilizado pelo DNIT para a formatação do método MeDiNa, é diretamente influenciado pela granulometria do solo, variando dessa forma os resultados em função do solo da região estudada, o que possibilita a criação de padrões e modelos que prevejam o comportamento de cada tipo de solo em função das cargas exercidas sobre eles. Sendo assim, espera-se que por meio dos ensaios triaxiais de carga repetida e da análise granulométrica clássica da engenharia rodoviária, seja possível obter uma correlação entre o tipo de solo e o modelo que deve ser utilizado.

## 2. Materiais e Métodos

Inicialmente foram selecionadas 7 amostras dentre um universo de 140 pontos de coletas localizados em rodovias estaduais pertencentes às 14 regionais do estado de São Paulo (Figura 1). As amostras de solos utilizadas para a elaboração desta pesquisa são apresentadas na figura 2. Cada amostra foi coletada de uma respectiva subdivisão regional, para que fosse possível a análise seguinte a predefinição do DER/SP. As sub-regiões previamente definidas pelo estado foram estabelecidas de acordo com a formação geológica da região, desse modo os solos estudados passaram pelo processo de caracterização que permitiu a análise mais precisa sobre cada tipo de solo.

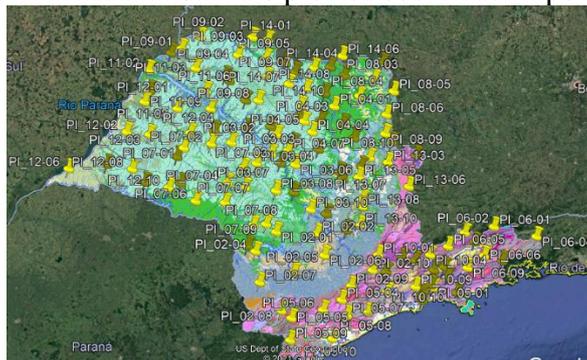


Figura 1: Mapa da coleta das amostras das regionais



Figura 2 : Amostras de solo coletadas, divididas em estoque

Foram realizados os ensaios clássicos de mecânica dos solos

### 2.1. Peso específico real dos grãos (NBR 6508/2016)

O ensaio de peso específico dos grãos permite que a seja calculada a massa específica da amostra por meio de relação de ensaio estabelecida entre o volume de água e o volume com a amostra inserida no meio. Neste ensaio a amostra é deixada durante 24 horas dentro de um picnômetro com volume de água e massa de amostra pré-definidos. Após esse período verifica-se o volume para cálculo da densidade permitindo o cálculo da massa específica.

## 2.2. Análise granulométrica (NBR 7181/2016).

A análise granulométrica dos ensaios foi feita por meio de ensaios de sedimentação, peneiramento e cálculo de umidade. A sedimentação foi realizada em um espaço de tempo de 24 horas no qual averiguou-se o nível com que o solo sedimentava dentro da proveta de ensaio. Já o peneiramento foi realizado em duas etapas, sendo dividido em grosso, no qual passa-se o material destorroado na peneira N° 10 (2,0 mm), e fino, no qual o restante do material passa pelas demais peneiras estabelecidas pela norma, utilizando o equipamento apresentado na figura 4. E por fim o cálculo de umidade, no qual 3 cápsulas de amostra são primeiramente retiradas e pesadas, e posteriormente deixadas 24 horas em uma estufa, para que ao final desse período sejam pesadas novamente, permitindo o cálculo da diferença de peso após a secagem do material.

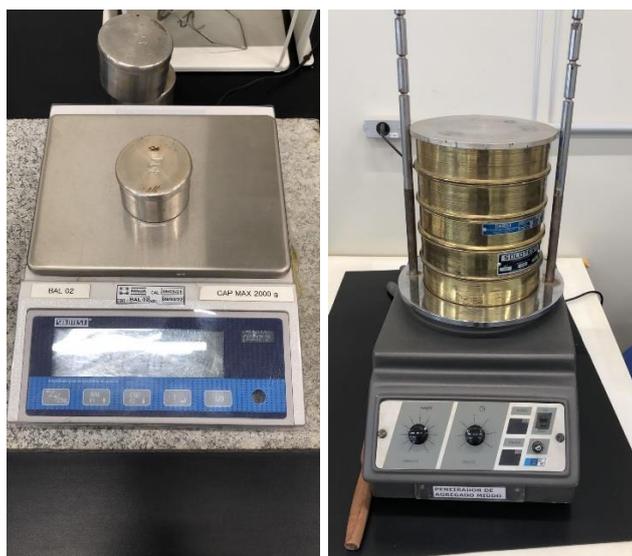


Figura 4 : Balança e conjunto de peneiras

Além destes ensaios serão realizados também ensaios de caracterização específica para fins de pavimentação dos solos dos subleitos das rodovias, sendo eles:

## 2.3. Índice de Suporte Califórnia com expansão (NBR 9895/2016)

Atualmente utilizado como indicador principal, o CBR é utilizado para avaliar a resistência do solo a penetração de um cilindro padronizado com relação a penetração de uma brita padrão, sendo fundamental para a construção de pavimentos principalmente em estradas e rodovias. O ensaio é dividido em 3 etapas, a saber:

- Compactação do Corpo de Prova

Os 5 corpos de prova (número estabelecido pela norma) são compactados na energia normal com 12 golpes por camada, utilizando o ciclindro e o soquete apresentados na

figura 5. Esta etapa permite o cálculo da relação entre densidade e umidade, possibilitando a criação de um gráfico que mostre a correlação

- Expansão

Após a compactação os corpos de prova são submersos na água durante o período de 4 dias, e um medidor de deslocamento realiza a medida a cada 24 horas, que permite o cálculo da relação entre expansão e umidade

- Resistência a penetração

Após a etapa de Expansão os corpos de prova são drenados durante o período de 15 minutos, e posteriormente levados a prensa de penetração do ensaio CBR, em que há a penetração de um cilindro a velocidade de 1,27mm/min durante 10 minutos, possibilitando o cálculo do CBR em percentual em função da umidade



Figura 5 : Cilindro e soquete utilizados para o ensaio de CBR

#### 2.4. Ensaios de compactação na energia normal (NBR 7182/2016)

O ensaio de Compactação permite por meio de medição do peso do corpo de prova a averiguação da umidade ótima do solo. Durante o ensaio adiciona-se água na amostra separada, e a compacta em um cilindro de volume conhecido (Figura 6), por meio de um soquete, como o mostrado na figura 9, para que ao final da compactação o corpo seja pesado. O nível de umidade ótima é estabelecido no instante em que o valor do peso do corpo começa a diminuir, demonstrando que a amostra apresenta uma quantidade alta de água em sua composição.



Figura 6: Cilindro e soquete de utilizados no ensaio de compactação

### 2.5. Ensaio triaxial de carga repetida

O ensaio triaxial de carga repetida será realizado seguindo a norma DNIT-ME 134/2018, como demonstrado pelo equipamento da figura 7, sendo assim serão moldados corpos de provas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura em um molde tripartido, com a umidade ótima do solo estudado. Este ensaio permite que sejam determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para que seja possível o cálculo das fundações e pavimentações das estradas. Além disso, este ensaio apresenta como principal vantagem o fato de ser o método que mais se aproxima dos cálculos das condições reais do solo, fazendo com que cargas axiais sejam medidas e fornecendo os valores das tensões confiante e desviadora. Dessa maneira o ensaio permite que sejam determinadas as propriedades mecânicas dos solos.

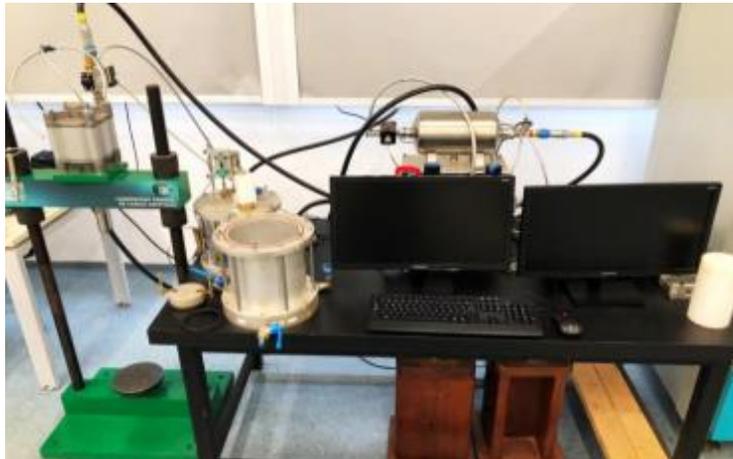


Figura 7: Equipamento Triaxial de cargas repetidas

## 3. Resultados e Discussão

Os resultados do ensaio de módulo obtidos foram expressos graficamente em função das tensões confinante e desviadora, como os apresentados no exemplo abaixo (figuras 8 e 9) de uma das amostras, para que fosse possível comparar os resultados obtidos com os ensaios de caracterização do solo. Dessa forma, foi possível obter uma correlação entre o tipo de tensão e o módulo de resiliência do solo analisado, e por meio da análise gráfica determinar de forma empírica qual modelo deve ser seguido para os cálculos da pavimentação rodoviária. Nos gráficos apresentados, os módulos foram expressos em

função das tensões seguindo o estabelecido pela norma, porém nesse solo entende-se que a distribuição dos pontos resultantes do ensaio foram melhor definidos pela correlação com a tensão confinante.

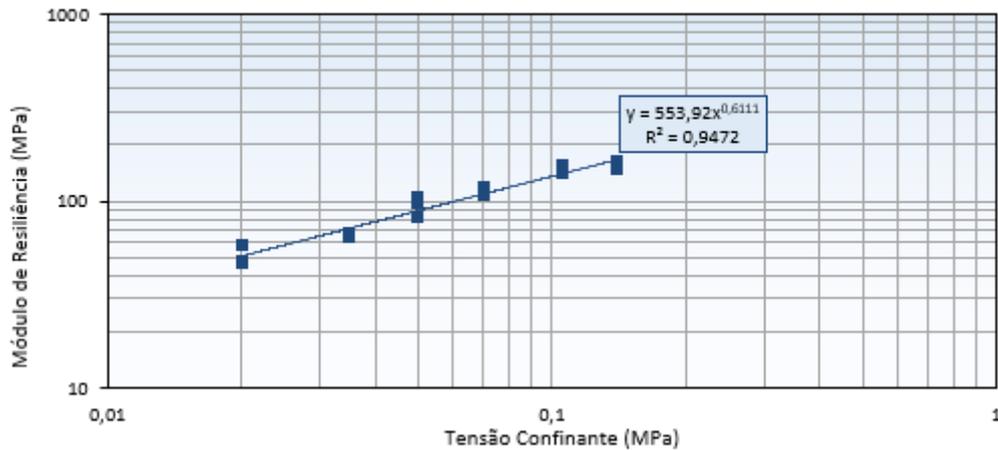


Figura 8: Gráfico do módulo de resiliência em relação a tensão confinante

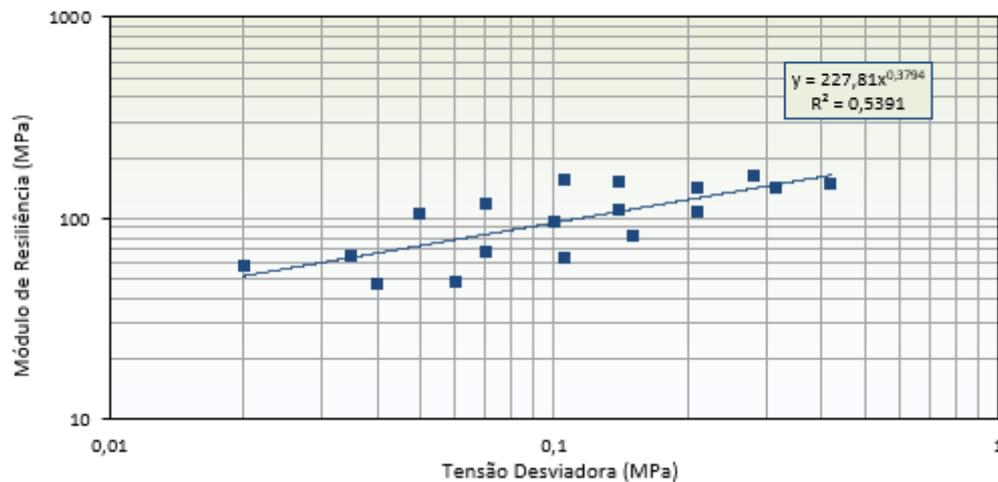


Figura 9: Gráfico do módulo de resiliência em relação a tensão desviadora

Os primeiros ensaios realizados foram de granulometria para determinação do tipo de solo, por meio da análise de seus componentes, como quantidade de areia, silte e argila, mostrados na figura 10. Essa etapa de ensaios foi importante para estabelecer as características físicas do solo, que foram futuramente avaliadas em conjunto com os resultados do ensaio de módulo, para estabelecer padrões que correspondessem ao comportamento do solo de acordo com seus índices físicos.

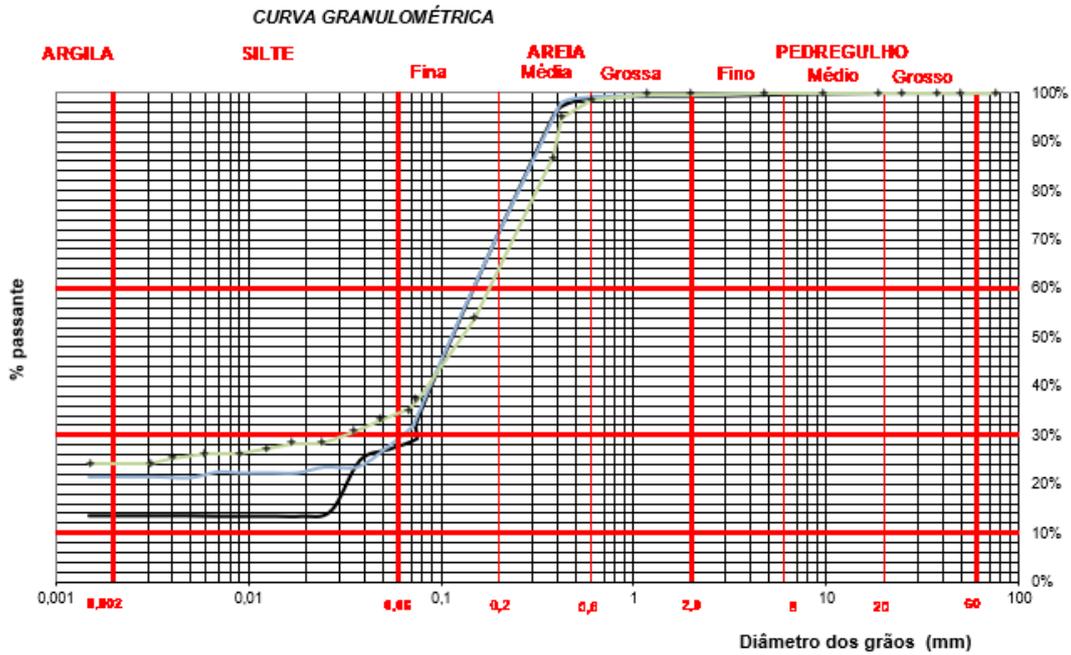


Figura 10: gráfico das curvas granulométricas

A partir dos ensaios de compactação foi possível traçar curvas de umidade pela massa específica como as apresentadas no figura 11, possibilitando dessa forma achar a umidade ótima das amostras. O valor da umidade ótima foi relevante para a pesquisa, pois possibilitou a adequação dos níveis do solo par a realização do ensaio triaxial permitindo que este fosse realizado com o valor esperado de resistência a tensão.

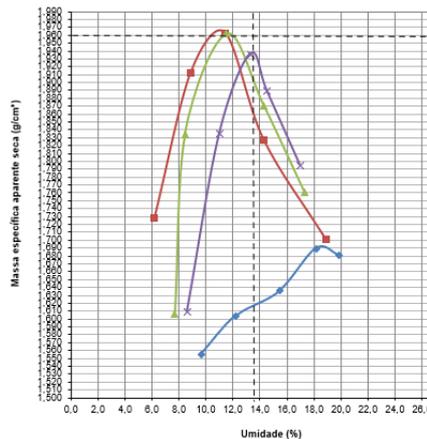


Figura 11: Curvas de compactação

Após os ensaios para obtenção dos índices físicos, foi realizado em duas das amostras o ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC), para obtenção dos valores de expansão. Esse ensaio foi importante, pois foi possível através dele comparar também os valores esperados em relação a resistência do solo, uma vez que pela norma atual este é o ensaio que deve ser utilizado como padrão para preparação do solo e cálculo futuro da pavimentação. Os valores obtidos foram expressos por gráficos como o demonstrado abaixo da amostra 207 (figura 12):

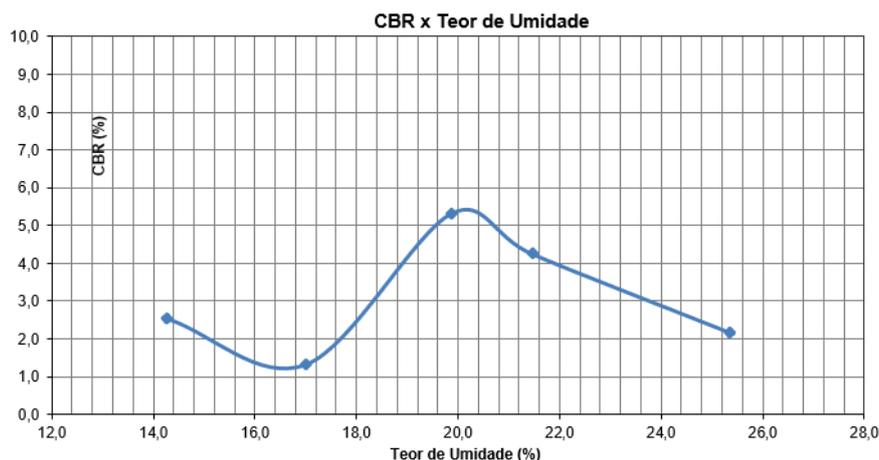


Figura 12: Ensaio CBR

As conclusões do trabalho ainda são parciais, e estão sendo desenvolvidas. Estão sendo realizados análises para comparar os resultados obtidos entre o ensaio triaxial e os ensaios de solos já realizados. Juntamente a etapa de análise gráfica, será realizada a modelagem de uma função matemática que determine o módulo baseado em suas respectivas tensões. Dessa forma será possível por meio da caracterização do solo determinar o tipo de solo utilizado e suas respectivas propriedades, otimizando o cálculo do módulo de resiliência. Até o momento as amostras analisadas indicaram que a tensão confinante se adequou melhor aos padrões matemáticos, conforme os gráficos (figuras 13 a 16) abaixo:

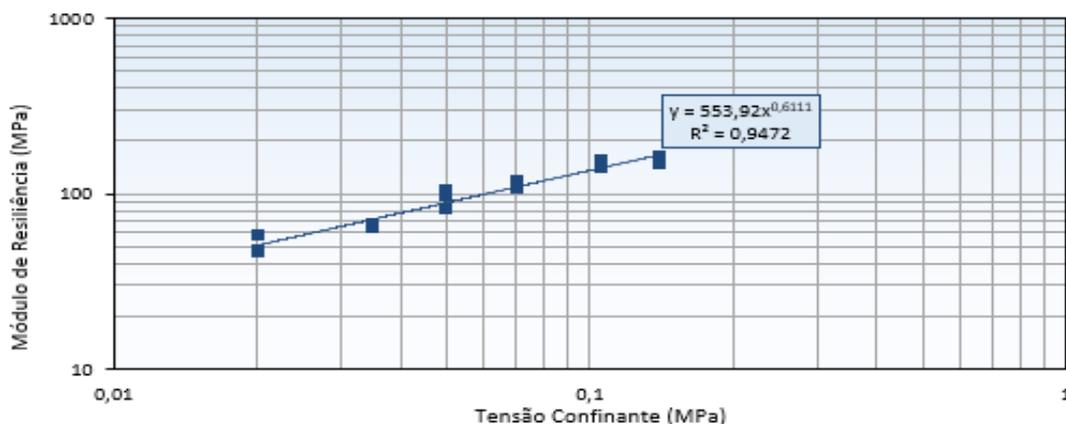


Figura 13: Módulo de resiliência em relação a tensão confinante da amostra 207

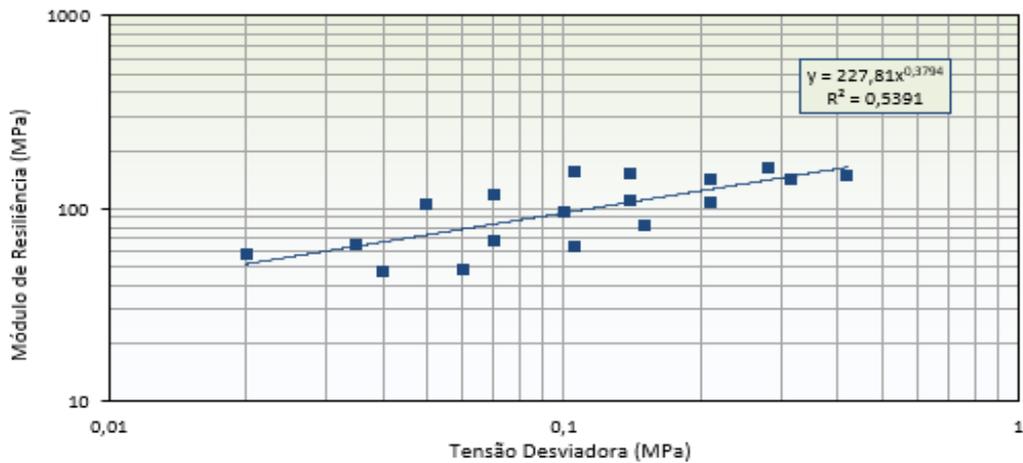


Figura 14: Módulo de resiliência em relação a tensão desviadora da amostra 207

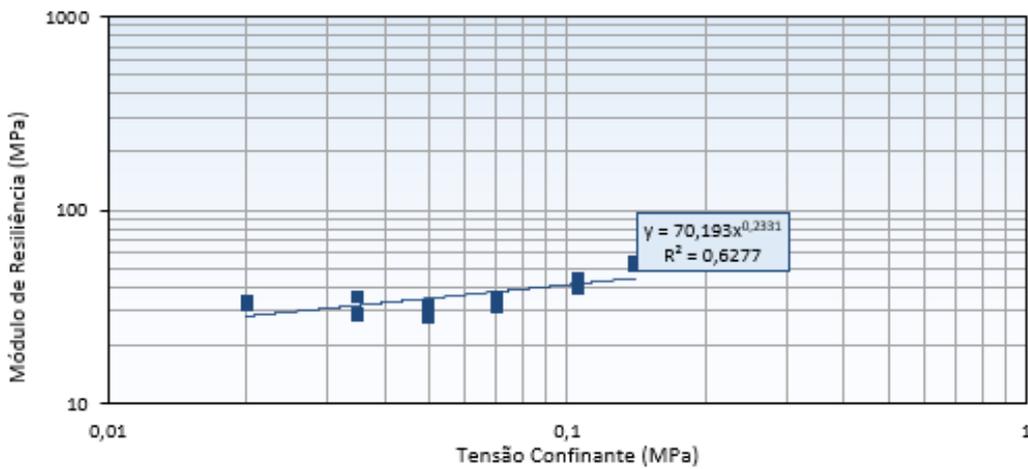


Figura 15: Módulo de resiliência em relação a tensão confinante da amostra 210

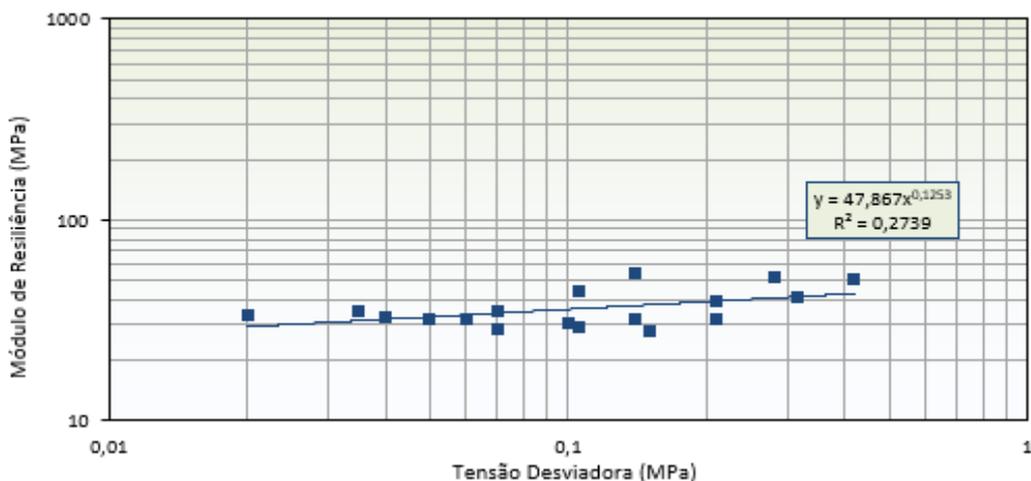


Figura 16: Módulo de resiliência em relação a tensão desviadora da amostra 210

Por fim, foi criada a tabela 1, apresentada a seguir, contendo o resumo dos resultados dos ensaios analisados, e com os respectivos valores de módulo considerando a tensão no subleito de 0,1 MPa, em que foi possível analisar de acordo com os resultados de módulo e composição física dos solos, qual tipo de modelo e tensão era mais adequado para cada

tipo de solo. Dentre todos os gráficos analisados, a tensão que mais se adequou para o cálculo foi a confinante, pois os resultados do ensaio triaxial ao serem alocados no gráfico se assimilaram mais do que os de tensão desviadora na formação de uma correlação linear para cálculo do módulo e análise do solo.

Tabela 1: Resumo geral dos ensaios

Tabela - Resumo Geral dos Ensaios																
Amostr a	Umidade Natural (%)	Compactação (Energia Normal)				Composição Granulométrica					MR					
		γ <sub>s</sub> máximo (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade óptima (% em massa)	CBR (%)	Expansã o (%)	(% em massa)					T1		t3		Tensão	Valor do módulo (para 0,1 Mpa)
						Ped.	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte + Argila	k1	k2	k1	k2		
207	0,03	1,867	10,9	19,9	1,05	0,23	0,73	38,37	32,97	27,7	553,82	0,6111	227,81	0,3794	Confinante	135,67
208	2,29	1,862	11,6	5,3	0,91	0,11	0,63	38,36	31,7	29,2	108,83	0,0946	77,907	-0,028	Confinante	87,53
209	1,17	1,938	13,1	-	-	0,17	5,03	14,04	19,46	34,3	-	-	-	-	-	-
210	0,44	1,603	11,1	-	-	3,86	13,73	16,54	12,47	53,4	70,193	0,2331	47,867	0,1253	Confinante	41,04
211	2,85	1,718	19,7	-	-	1,6	2,46	16,87	25,57	53,5	70,823	0,2363	48,172	0,1282	Confinante	41,10
212	7,1	-	-	-	-	0,56	6,22	21,66	15,56	56	-	-	-	-	-	-
213	0,77	1,780	15,8	-	-	0,81	8,89	32,1	21,5	36,7	109,34	0,3146	63,049	0,154	Confinante	52,99

## Referências Bibliográficas

Brito, L. **Design methods for low volume roads**. Nottingham, 2011.

**ABNT** – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICA, NBR NM 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio. Brasil, 2016

**ABNT** – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICA, NBR NM 7182: Solo - Ensaio de Compactação. Brasil, 2016

**ABNT** – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICA, NBR NM 7181: Solo - Análise granulométrica. Brasil, 2016

**DNIT** – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE, DNIT NM 134/2018-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio. Brasil, 2018