

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/680

Estatística aplicada a parâmetros de subleito rodoviário no Distrito Federal

Gisandra Faria de Paula ¹

Engenheira, Departamento de Estradas de Rodagem do DF (DER-DF), Brasília, DF, Brasil, gisandrafp@gmail.com

Paulo Costa Fernandes ²

Engenheiro, DER-DF, Brasília, DF, Brasil, paulocostaf@gmail.com

Mateus Ribeiro Caetano ³

Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, Brasil, mateusribeirocaetano@gmail.com

Josiene Chrystina Ribeiro Cardoso ⁴

UnB, Brasília, DF, Brasil, josychrystina@gmail.com

Rafael Cerqueira Silva ⁵

Docente, UnB, Brasília, DF, Brasil, rafael.silva@unb.br

RESUMO: Apresenta-se neste estudo o uso de ferramentas estatísticas que objetivam fornecer subsídios para o melhor entendimento do comportamento de solos tropicais de subleito rodoviário no Distrito Federal, com a presença de latossolo e textura silto arenosa. A avaliação estatística constituiu-se na análise de variância de classificações de solo, obtenção das medidas de posição e dispersão, seguida pela avaliação de dados de tensão \times deformação e parâmetros experimentais de regressões e equações de modelos de módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP). A análise de variância da classificação dos solos demonstrou a importância da avaliação de parâmetros físicos e mecânicos separadamente por tipo de solo visando contribuir para análises futuras que objetivam a obtenção de coeficientes de correlação e regressões. Em função do estado de tensões aplicado durante os ensaios triaxiais de cargas repetidas, verificaram-se os modelos matemáticos e parâmetros experimentais de regressões do MR e DP por meio de procedimentos e análises estatísticas estabelecidos em normas brasileiras de dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Demonstra-se, por fim, a importância preliminar do uso da estatística no processamento de informações coletadas, na consideração de hipóteses, indicação de concepções de técnicas construtivas, bem como uma ferramenta relevante para subsidiar o orçamento básico em um dado projeto geotécnico.

PALAVRAS-CHAVE: estatística, variabilidade, tratamento de dados, subleito, solo tropical

ABSTRACT: This study presents statistical tools that aim to better understand the behavior of tropical road subgrade soils in the Federal District, with the presence of latosol and sandy silt texture. The statistical analysis consisted of the analysis of variance of soil classifications, obtaining position and dispersion measurements, and analyzing stress \times strain data and experimental parameters of regressions and model equations of resilience modulus (MR) and strain. permanent (DP). The analysis of variance of soil classification demonstrated the importance of evaluating physical and mechanical parameters separately by soil type in order to contribute to future analyzes that aim to obtain correlation coefficients and regressions. Depending on the stress state applied during the triaxial repeated load tests, the mathematical models and experimental parameters of MR and DP regressions were verified through procedures and statistical analyzes established in Brazilian standards for the design of flexible pavements by the Sizing Method National (MeDiNa). Finally, the preliminary importance of using statistics in processing collected information, considering hypotheses, indicating conceptions of construction techniques, as well as a relevant tool to support the basic budget in a given geotechnical project, is demonstrated.

KEYWORDS: statistics, variability, data processing, subgrade, tropical soil

1 INTRODUÇÃO

O solo, considerado um material heterogêneo, anisotrópico, elástico não linear constitui-se uma estrutura complexa, onde a variabilidade das suas propriedades é bastante ampla devido aos diferentes tipos de graus de intemperismo que ocorrem espacialmente em um perfil de solo. Assim, uma determinada área, embora constituída por um mesmo tipo de solo, apresenta uma ampla variabilidade espacial inerente ao material, mas que não sendo considerada como discrepante, implica em grande amplitude de dados de uma mesma propriedade de interesse, com diferentes coeficientes de variação.

Uma vez que o conhecimento da variável de interesse em toda a área de pesquisa do solo é impossível, tem-se a estatística como um poderoso instrumento em quaisquer processos que envolvam o estudo da variabilidade (Assis *et al.*, 2018).

Desta forma, a partir do uso de ferramentas estatísticas, objetiva-se neste estudo investigar o comportamento de algumas propriedades físicas e mecânicas de solos tropicais de uma determinada área de subleito de rodovia distrital não pavimentada, no DF (Planalto Central), buscando seu entendimento por meio de análises sobre a classificação dos solos e caracterização estatística destas propriedades, visando indicar a melhor forma e parâmetros para representação destas variáveis da amostra de estudo.

2 SOLO ESTUDADO

O solo utilizado localiza-se na rodovia distrital DF-440, sob circunscrição do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF), conforme Figura 1, na região administrativa de Sobradinho/DF.

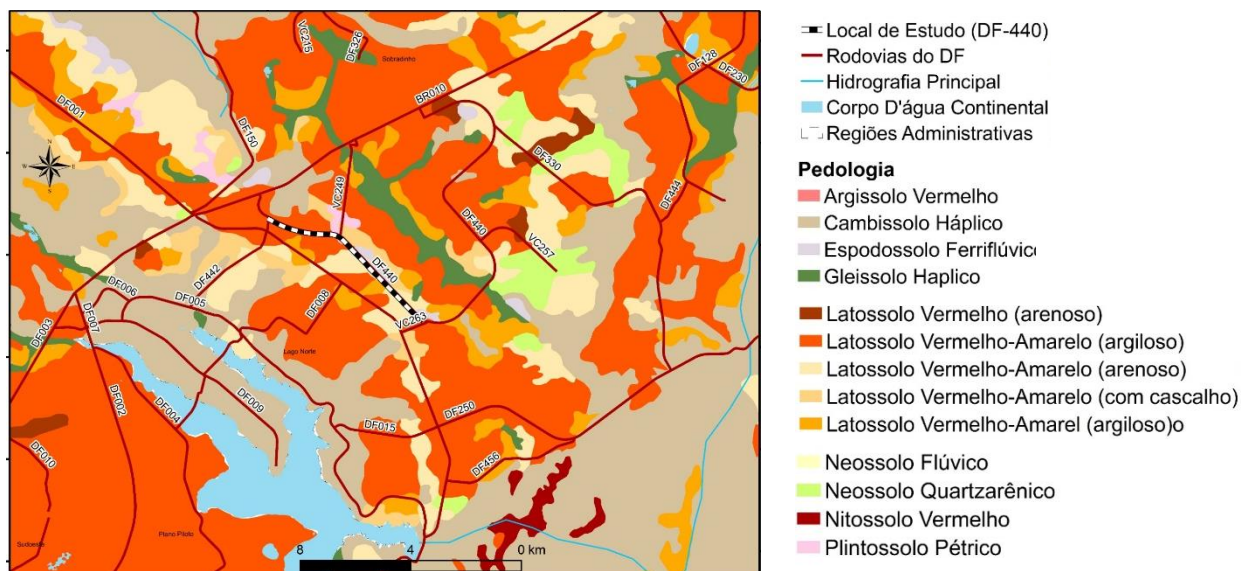


Figura 1. Localização da rodovia distrital DF-440, no mapa pedológico do Distrito Federal.

O mesmo está, considerando-se as suas características tátil visuais, presente ao longo de 6,1 km de extensão para a realização do projeto de pavimentação da referida rodovia, sendo classificado como Latossolo.

Estes solos recobrem cerca de 54% do DF, ocorrendo em áreas de topografia plana a suave ondulada e são originados a partir de um alto grau de intemperismo e lixiviação, formando uma estrutura bastante porosa, metaestável, com alto índice de vazios e, conseqüentemente, baixo peso específico, formados a partir de rochas metamórficas, como ardósias, metarritmitos e quartzitos (Lima, 2003). São solos de coloração avermelhada, muito profundos, bem drenados, distróficos, ácidos e com teores de argila variando entre 15% e 80%.

Foram realizadas coletas de 31 amostras deste solo, com distância aproximada de 200,00 m entre elas, profundidade variando de 0,10 a 2,00 m. Os ensaios geotécnicos para a caracterização do subleito foram realizados segundo orientações das Instruções de Serviços IS-206 e IS-247, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

A análise estatística constituiu-se na análise de variância de classificações de solo, obtenção das medidas de posição e dispersão, seguida pela análise de dados de tensão \times deformação por meio do *software* *Statística* e parâmetros experimentais de regressões e equações de modelos de MR e DP.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Classificação das Amostras de Solos

Na tabela 1, apresenta-se a classificação dos solos analisados segundo a metodologia MCT (miniatura, compactado, tropical): LG' (laterítico argiloso), LA' (laterítico arenoso), NA' (não laterítico arenoso) e LA (areia laterítica quartzosa), proposta por Nogami e Villibor (1980), TRB (*Transportation Research Board*): A-7-5, A-4 e A-2-4, bem como os grupos amostrais propostos por Cardoso (2002) para solos tropicais do Planalto Central: argiloso, arenoso e siltoso.

Tabela 1. Classificações das amostras – subleito DF-440.

Estaca / Amostra	Cardoso (2002)	MCT	TRB	Estaca / Amostra	Cardoso (2002)	MCT	TRB
1	Siltoso	LG'	A-7-5	17	Arenoso	NA'	A-2-4
2	Siltoso	LG'	A-4	18	Arenoso	NA'	A-2-4
3	Siltoso	LG'	A-7-5	19	Arenoso	NA'	A-2-4
4	Siltoso	LG'	A-4	20	Arenoso	NA'	A-2-4
5	Siltoso	LG'	A-4	21	Arenoso	LA'	A-4
6	Siltoso	LG'	A-7-5	22	Arenoso	LA'	A-4
7	Siltoso	LG'	A-7-5	23	Arenoso	LA'	A-4
8	Siltoso	LG'	A-7-5	24	Arenoso	LA'	A-2-4
9	Siltoso	LG'	A-4	25	Impenetrável a trado		
10	Arenoso	LA'	A-4	26	Arenoso	NA'	A-2-4
11	Arenoso	LA'	A-4	27	Arenoso	NA'	A-2-4
12	Arenoso	LA'	A-4	28	Arenoso	LA'	A-4
13	Arenoso	LA'	A-4	29	Arenoso	LA'	A-2-4
14	Arenoso	LA'	A-2-4	30	Arenoso	NA'	A-2-4
15	Arenoso	NA'	A-2-4	31	Arenoso	NA'	A-2-4
16	Arenoso	LA	A-2-4				

Objetivamente, propriedades geotécnicas de um mesmo grupo/classe de um solo deveriam apresentar características similares. Visando definir qual das classificações identifica as amostras avaliadas no estudo de forma a atenderem claramente este critério, foi aplicada a metodologia da análise de variância (ANOVA – fator único) apoiada em parâmetros relacionados à granulometria dos solos, como o coeficiente de uniformidade (C_u) e o D_{50} que corresponde ao diâmetro em que 50% das partículas de solo sejam inferiores a ele. Ressalta-se que o ensaio de sedimentação foi realizado apenas com o uso de defloculante. Os resultados constam na Tabela 2.

As amostras 16 e 25 não foram incluídas no conjunto de dados da amostragem, por apresentar classificação MCT – LA e pela impossibilidade de coleta de solo, respectivamente. Assim, o banco de dados amostral foi composto por 29 amostras.

Tabela 2. ANOVA das classificações das amostras propostas por Cardoso (2002), MCT e TRB.

Cardoso (2002)						
Parâmetro	SQ	MQ	F	p-valor	$F_{crítico}$	Resultado
C_u	85475,31	85475,31	6,146313	0,019706324	4,210008	Significativo
D_{50}	0,066804	0,066804	22,36017	6,31564E-05	4,210008	Significativo
MCT						
Parâmetro	SQ	MQ	F	p-valor	$F_{crítico}$	Resultado
C_u	92453,13	46226,57	3,261534	0,054470816	3,369016	Não Significativo
D_{50}	0,090475	0,045237	20,63611	4,29327E-06	3,369016	Significativo
TRB						
Parâmetro	SQ	MQ	F	p-valor	$F_{crítico}$	Resultado
C_u	72353,9454	36176,97	2,42046271	0,10864189	3,369016	Não Significativo
D_{50}	0,07822316	0,039112	14,6850145	5,3961E-05	3,369016	Significativo

SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro fisher; p-valor = probabilidade de significância; $F_{crítico}$ = Parâmetro de Fisher crítico para o teste de significância; Resultado = resultado da análise, indicando se o efeito é significativo ou não.

A técnica de análise de variância ANOVA considera um grupo estatisticamente homogêneo e diferente dos demais grupos quando o coeficiente F for superior ao índice Fisher ($F_{crítico}$). Para um grau de significância (α) de 0,05, houve diferença considerável entre as médias dos grupos apenas para o D_{50} das classificações MCT e TRB. Entretanto, para a classificação proposta por Cardoso (2002), houve diferenças consideráveis entre os coeficientes tanto para o parâmetro C_u quanto D_{50} .

Para a verificação das propriedades físicas, foi escolhida a metodologia de classificação dos solos proposta por Cardoso (2002) por ser a mais simples, considerando que tem o menor número de grupos e que sua especificação pode ser obtida pela fração granulométrica predominante do solo com o uso de defloculante.

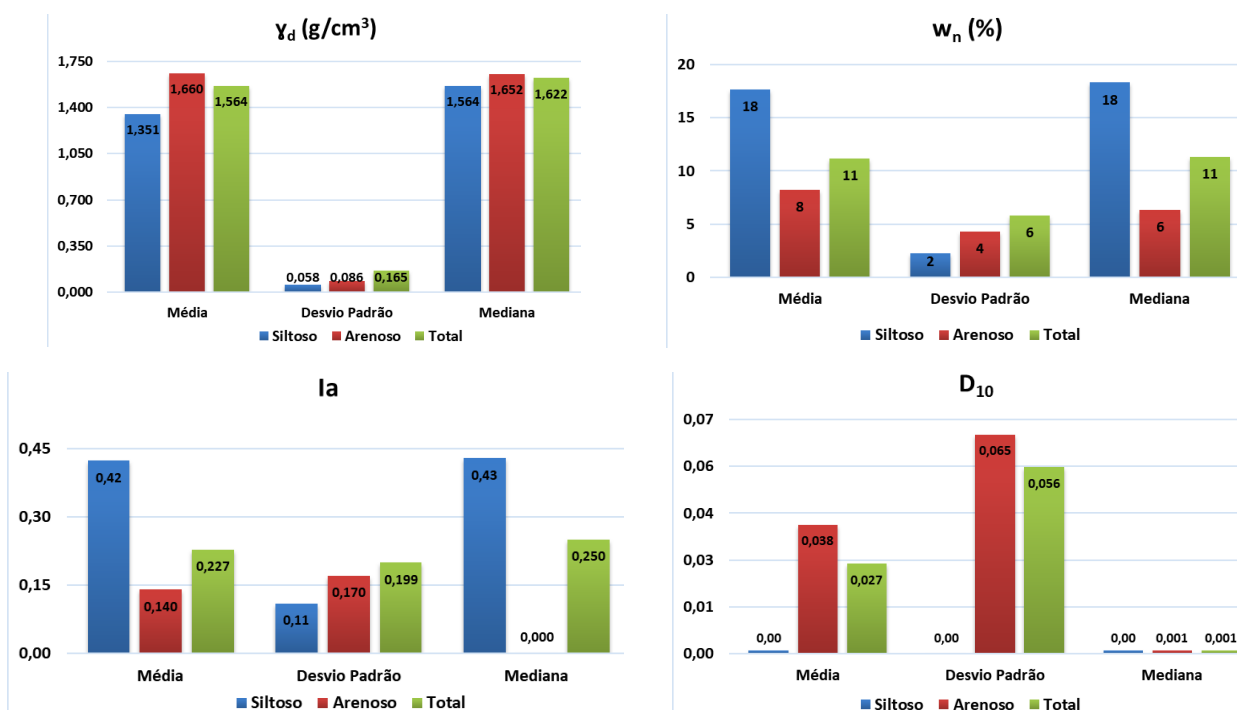
Em seu estudo, Cardoso (2002) infere que (i) os grupos amostrais possuem comportamentos distintos, sendo a fração granulométrica predominante a principal característica distintiva entre cada um deles, (ii) as propriedades físicas apresentam-se, normalmente, em função da granulometria e (iii) cada um dos diferentes grupos possui seus próprios padrões químicos e mineralógicos, sendo estas análises não avaliadas neste estudo.

3.2 Propriedades Físicas

As análises estatísticas sobre as propriedades físicas do presente estudo foram realizadas considerando (i) todas as amostras pertencentes a populações com o mesmo valor médio para as propriedades analisadas e, (ii) partindo-se do princípio que existiriam diferenças significativas entre as amostras e que as mesmas pertenceriam a populações com médias distintas, o uso de parâmetro para distinguir as populações de solos, a classificação proposta por Cardoso (2002): arenosos, argilosos e siltosos.

Na Figura 2, são apresentados os resultados das medidas estatísticas média, desvio padrão (medida de dispersão em torno da média) e mediana para as variáveis peso específico aparente seco (γ_d), umidade natural (w_n), diâmetro correspondente a 10% das partículas (D_{10} – diâmetro efetivo), diâmetro correspondente a 50% das partículas (D_{50}), coeficiente de uniformidade (C_u), coeficiente de curvatura (C_c) e índice de atividade de Skempton (I_a), considerando o total das amostras e separando-as por tipo de solo.

Observa-se, inicialmente, que os valores da média e mediana são muito próximos apenas para γ_d , indicando que este parâmetro apresenta dados que se encontram distribuídos simetricamente ao redor da média e da mediana e que estas medidas podem ser consideradas como valores típicos do conjunto de observações, ou seja, os resultados observados podem ser sumarizados por uma dessas medidas. Os valores médios de w_n e I_a são maiores para os solos siltosos. Em contrapartida, D_{10} , D_{50} , C_u e C_c apresentam valores de amostras siltosas bem inferiores em relação ao solos arenosos.



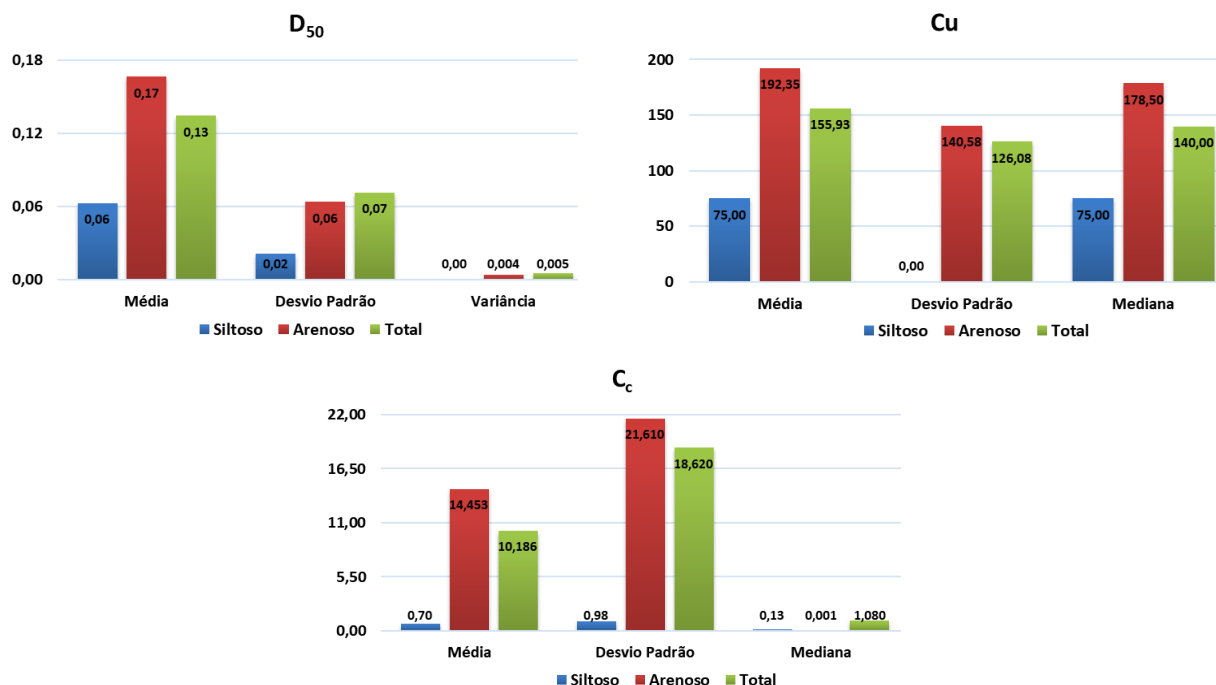


Figura 2. Parâmetros físicos – média, desvio padrão e mediana.

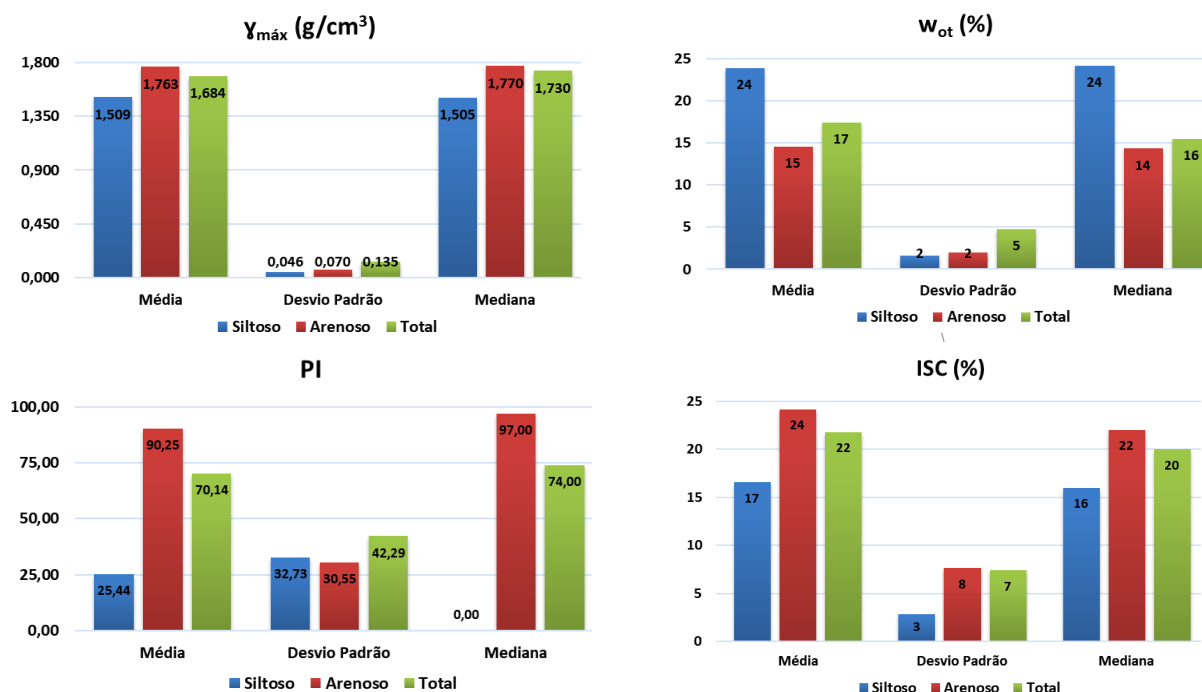
3.3 Limites de Atterberg

Tendo em vista o comportamento geotécnico característico de solos arenosos (ausência de plasticidade, liquidez), os limites de *Atterberg* foram avaliados somente para as amostras de solos classificadas como siltosas, ou seja, 09 amostras que foram verificadas separadamente com ênfase estatística.

Em média, as amostras de silte apresentaram limite de liquidez (w_L) 39%, limite de plasticidade (w_P) de 28% e índice de plasticidade (IP) 10 e desvio padrão 3%, 2% e 2%, respectivamente.

3.4 Propriedades Mecânicas

São apresentados, na Figura 3, os resultados para os parâmetros: peso específico aparente seco máximo (γ_{max}), umidade ótima (w_{ot}), perda de massa por imersão (PI), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão.



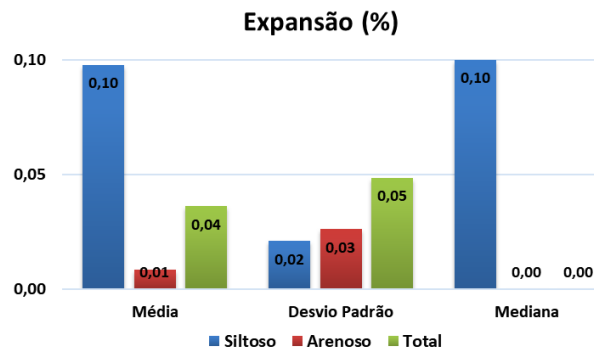


Figura 3. Parâmetros mecânicos – média, desvio padrão e mediana.

Novamente, para $\gamma_{m\acute{a}x}$, os valores de média e mediana são muito próximos entre os tipos de amostras analisados, configurando-se, a exemplo de γ_d , uma distribuição simétrica em torno destas medidas e que os dados obtidos podem ser representados por uma destas grandezas.

Os valores de $\gamma_{m\acute{a}x}$, PI e ISC são em média menores para os solos siltosos. Já a w_{ot} e expansão apresentaram valores médios bem maiores para os siltes. Ressalta-se que os valores médios de expansão, em termos conceituais desta propriedade física, atingiram índices muito pequenos, significativamente distantes do valor máximo aceito para camadas de pavimento (2%).

Cabe destacar que atualmente o dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil está passando por significativas modificações em seus processos e formulações sobre o tema, no qual os parâmetros ISC e expansão vem sendo substituídos por definições incorporadas pela mecânica dos pavimentos, em que parâmetros de deformações resiliente e permanente de cada camada do pavimento são as causas principais de verificações em relação à vida útil da estrutura (trincas por fadiga e afundamento de trilha de roda).

Assim, a seguir, serão apresentados dados sobre estes parâmetros analisados conforme as normas DNIT 134/2018 e DNIT 179/2018, as quais contemplam análises estatísticas em seus resultados para o dimensionamento de pavimentos por meio do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), lançado pelo DNIT em 2021.

3.5 Modelos Tensão Deformação

Paula *et al.* (2022) realizaram estudo sobre modelos tensão \times deformação e parâmetros de solos tropicais de subleito do Distrito Federal, considerando as amostras 1 e 31 da Tabela 1, uma abordagem mecanística-empírica e ensaios triaxiais de cargas repetidas (Módulo de Resiliência – MR e Deformação Permanente – DP) para a definição das características de deformabilidade por meio de modelos matemáticos e parâmetros experimentais.

Os dados dos parâmetros experimentais de regressão (k_i) obtidos para o MR após o tratamento estatístico dos dados no *software Statistica* encontram-se na Tabela 3.

O MR é significativamente influenciado pela condição de carregamento, o estado de tensão, a natureza do solo, umidade, entre outros fatores, podendo ocasionar modificações em seu valor a depender da situação verificada. Os modelos estatísticos para a representação do comportamento preditivo do MR com o estado de tensão adotados na mecânica dos pavimentos foram desenvolvidos, em sua maioria, a partir da natureza do solo, com predomínio da tensão confinante (σ_3) ou da tensão desvio (σ_d), relacionando estas tensões aplicadas com as constantes (parâmetros) auferidas no ensaio triaxial de carga repetida.

Considerando 12 pares de tensões (σ_3 - σ_d), a aplicação de 20 ciclos em cada par e obtendo-se os valores das 05 últimas leituras de cada ciclo, os mesmos foram tratados estaticamente, em cada amostra, a partir de médias amostrais de cada par de tensão e o comportamento resiliente foi verificado por meio do modelo composto, o qual é adotado no MeDiNa, conforme Equação 1, sendo obtidos ótimos coeficientes de determinação (R^2) por meio deste modelo, da ordem de 0,99 para as duas amostras de solos.

A DP resulta do somatório dos afundamentos verticais permanentes no revestimento e em camadas subjacentes causados pelo carregamento (tensão) atuante na superfície do pavimento.

De acordo com a norma DNIT 179/2018, o modelo de DP que representa o comportamento plástico do solo submetido a vários níveis de tensão com 150.000 ciclos cada é o proposto por Guimarães (2009), conforme a Equação 2. A partir desta equação, foram realizados os modelos de DP para cada amostra, com nível de confiabilidade de 95%, conforme a Tabela 3. Foram consideradas todas as DP com os respectivos

estados de tensão (total de 06 para cada amostra), incidindo em 57 registros para cada estado de tensão, a partir de leituras de ciclos pré-definidos na norma, totalizando 342 dados para cada amostra. Por meio dos resultados dos R^2 , verifica-se que os modelos apresentados são bastante satisfatórios. Ambos os solos apresentaram os valores de erro padrão, p -value, iguais a zero. De acordo com Guimarães (2009), valor de erro padrão abaixo de 5% indica que o parâmetro de regressão apresenta relevante importância estatística.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

$$\varepsilon_p (\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (2)$$

Onde: ε_p (%) = deformação permanente específica; ψ_i = parâmetros de regressão; ρ_0 = tensão de referência (pressão atmosférica – 0,1 MPa); N = número de ciclos de aplicação de carga.

Tabela 3. Parâmetros do modelo composto para MR, modelo de Guimarães para DP e R^2 .

Amostra	Módulo de Resiliência							Deformação Permanente				
	Linear (MPa)			Não Linear				Coeficientes de Regressão				
	Mín	Médio	Máx	k_1	k_2	k_3	R^2	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	R^2
1	39,04	99,13	171,07	414,73	0,03677	0,50696	0,998	0,105838	2,920233	1,619961	0,095727	0,957
31	30,40	58,07	102,92	314,54	0,106271	0,462601	0,989	0,162977	-0,416081	2,324348	0,112325	0,975

A fim de representar graficamente a variável de resposta MR em função das variáveis independentes (σ_3 e σ_d), estão representadas as superfícies de respostas obtidas, a partir dos resultados de MR. Verifica-se, para ambos os solos, a nítida interferência dos parâmetros σ_3 e σ_d . Os valores de k_2 e k_3 positivos influenciam para que, com o aumento de tensão confinante e desvio, haja um acréscimo no módulo de resiliência, sendo k_2 mais significativo para a amostra 31, o que reflete um maior efeito da tensão confinante no comportamento resiliente deste solo, arenoso, pela classificação proposta por Cardoso (2002) e metodologia MCT.

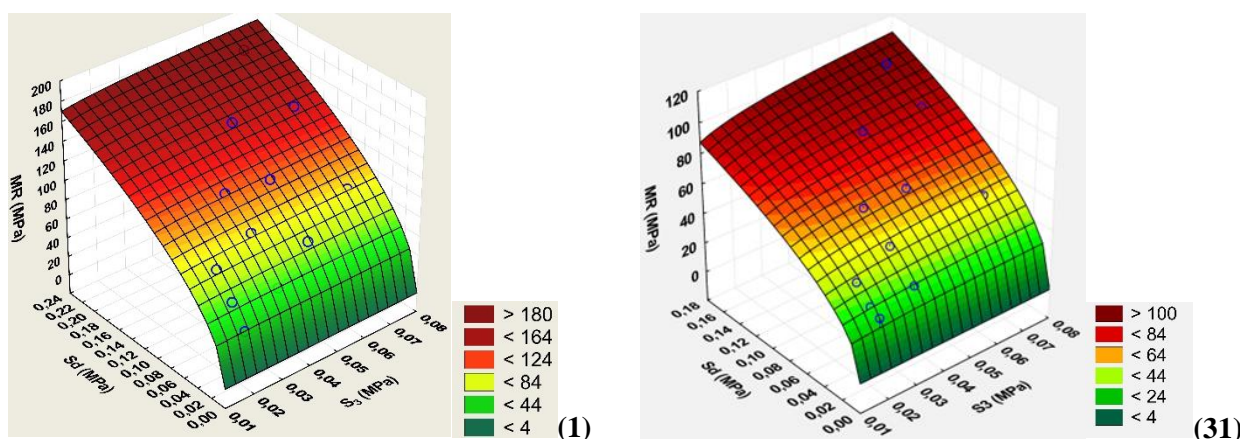


Figura 4. Modelo Composto do MR para as amostras 1 e 31.

4. Considerações Finais

Primeiramente, destaca-se que as análises estatísticas efetuadas no presente estudo limitaram-se a certas propriedades físicas e geomecânicas. Entretanto, análises como o índice de agregação de argilas por meio do ensaio de sedimentação sem o uso de defloculante, porosidade, índice de vazios, sucção, bem como análises mineralógicas e químicas do solo são muito importantes para um melhor entendimento do comportamento dos solos tropicais, especialmente aqueles do Distrito Federal, o qual compreende em sua maioria um latossolo com alto grau de intemperismo, lixiviação e porosidade.

Roriz (2009) ao analisar estatisticamente vários parâmetros sobre o comportamento de solos finos no Distrito Federal, constatou alterações relevantes entre os valores médios de vários parâmetros estudados, recomendando a avaliação dos solos separadamente por classificação para a obtenção de coeficientes de correlação e regressões. Com base nos dados de parâmetros físicos e mecânicos verificados no presente estudo

segundo a classificação dos solos proposta por Cardoso (2002), o mesmo corrobora para tal fato em relação aos valores médios obtidos.

Tendo em vista o comportamento tensão-deformação elástico não linear do solo, buscaram-se as relações experimentais ($MR = f(\sigma_3 \text{ e } \sigma_d)$ e $DP = f(\sigma_3, \sigma_d \text{ e } N)$) do módulo de resiliência e deformação permanente com os estados de tensões. Os modelos adotados pelo MeDiNa para as análises do comportamento resiliente e plástico evidenciaram significativa relação com a natureza dos solos estudados, bem como relevante correlação entre as variáveis e constantes experimentais (k_i) obtidas nos ensaios triaxiais, corroborando com estudos já realizados no país sobre o assunto (Malysz, 2009; Maia, 2016; entre outros).

Demonstra-se que as ferramentas estatísticas (organização e tratamento dos dados) corroboram para o melhor entendimento do comportamento do solo, possibilitando inferir e/ou melhorar equações para a estimativa de parâmetros geotécnicos.

Por fim, cabe ressaltar que a utilização e o significado físico de resultados a partir de ferramentas estatísticas, mesmo que bastante representativos, devem ser cuidadosamente empregadas, já que a aplicabilidade e representatividade de modelos estatísticos dependem da qualidade de materiais e ensaios, de quantidade expressiva de dados coletados e da consideração que se trata de verificações prévias com o intuito de se estabelecer hipóteses e indicar concepções de técnicas construtivas e orçamento em um dado projeto. Outro fator relevante é a regionalidade dos dados estatísticos levantados e processados, não se recomendando, definitivamente, sua utilização fora da área de pesquisa. No presente estudo, fora do domínio da DF-440.

AGRADECIMENTOS

À Diretoria de Estudos Tecnológicos/Superintendência Técnica (DITEC/SUTEC) do DER-DF pela disponibilização dos dados e à Universidade de Brasília (UnB) pelos conhecimentos técnicos-científicos oportunizados por meio do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG).

REFERÊNCIAS

- Assis, A. P. & Barbosa, T. J. E. & Almeida, M. G. G. & Maia, J. A. C. 2018. *Métodos estatísticos e probabilísticos em geotecnia*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 217 p.
- Cardoso, F. B. F. 2002. *Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 351 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes 2006. Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos/instruções de serviço. *IS-206: Estudos geotécnicos*. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ, p. 273-281.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). *DNIT 134/2018-ME. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). *DNIT 179/2018-ME. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes 2021. *DNIT IS-247. Estudos para elaboração de projetos de implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa*. Brasília, DF.
- Guimarães, A. C. R. 2009. *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 352 p.
- Lima, M. C. 2003. *Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 364 p.
- Maia, C. L. 2016. *Análise comparativa de módulos de resiliência obtidos com o geogauge para o controle de qualidade de camadas granulares dos pavimentos*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 150 p.
- Malysz, R. 2009. *Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 350 p.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. 1980. Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitação do método tradicional, apresentação de uma nova sistemática. *In: Reunião Anual de Pavimentação, 15.*, Belo Horizonte. Anais... [S.l.: s.n.].
- Paula, G. F.; Fernandes, P. C.; Silva, R. C. 2022. Modelos tensão-deformação e parâmetros de subleito do Distrito Federal. *10º Congresso Rodoferroviário Português*, Lisboa, Portugal.
- Roriz, C. O. 2009. *Análise estatística do comportamento de solos finos*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 126 p.