

A Otimização no Processo de Estabilização Granulométrica de Solos

Vanderson Pereira Santos Soares

Mestrando, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE, Brasil, vandersope@gmail.com

Guilherme Bravo de Oliveira Almeida

Professor Adjunto, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE, Brasil, gbravo1982@gmail.com

RESUMO: Na estabilização granulométrica, algumas composições entre solos, ou solos com outros materiais, são ensaiadas, seguida de uma análise dos resultados para, enfim, verificar qual delas melhor atende aos requisitos técnicos. No entanto, os ensaios demandam esforços físico-financeiros, tempo e de matéria-prima. Por outro lado, o engenheiro pode aderir ao uso de ferramentas de otimização e da estatística para racionalizar esses esforços. Uma das ferramentas neste processo é o Solver, presente nos softwares Excel. Nele, ao indicar as restrições, as variáveis e o tipo de resolução, seja linear ou não linear, retorna um valor otimizado para a função objetivo definida para o problema proposto. Entre as técnicas estatísticas, o uso do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe e o teste não paramétrico de Wilcoxon parecem se adequar bem quando aplicados na geotecnia. Nesse sentido, apresenta-se um estudo inicial para um modelo otimizado de estabilização granulométrica de solos, com base nessas duas técnicas estatísticas que são comuns a outras áreas da engenharia. Como ferramenta de trabalho, o Solver será utilizado auxiliando na obtenção dos resultados da composição para alguns solos. Espera-se que o modelo reduza aqueles esforços no processo de estabilização granulométrica de solos, auxiliando a tomada de decisões.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização. Estatística. Solver. Estabilização de solos.

ABSTRACT: In soil stabilization, some compositions of soils, or soils with other materials, are tested, followed by an analysis of the results to finally check which one best suited the technical requirements. However, testing requires physical and financial effort, time and raw materials. On the other hand, the engineer can use optimization tools and statistics to rationalize these efforts. One of the tools in this process is Solver, which is available in Excel software. By indicating the constraints, the variables and the type of resolution, whether linear or non-linear, it returns an optimized value for the objective function defined for the proposed problem. Among statistical techniques, the use of the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and the non-parametric Wilcoxon test seem to be well suited when applied to geotechnics. An initial study is presented for an optimized soil granulometric stabilization model, based on these two statistical techniques that are common to other areas of engineering. As a working tool, Solver will be used to help obtain the composition results for some soils. It is hoped that the model will reduce the effort involved in the process of stabilizing soil granulometry, helping with decision-making.

KEYWORDS: Optimization. Statistics. Solver. Soil stabilization.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT), a infraestrutura rodoviária do Brasil é fundamental para o crescimento do país, sendo responsável pela movimentação de mais de 65% das mercadorias entre os estados e cerca de 95% dos passageiros. Ainda assim, apenas 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada, e do total de quilômetros avaliados, na última pesquisa CNT de rodovias, 67,5% (75.190 quilômetros) possuem estado de conservação inadequado (CNT, 2023).

A má conservação e deterioração dos pavimentos, também é influenciado pela escolha dos materiais de suas camadas, sendo o solo um dos seus principais componentes. Pela existência de vários tipos de solos, nem sempre a coleta de uma jazida satisfaz às especificações de norma para utilização em camadas de pavimentação, ou, muitas das vezes, um solo adequado se localiza distante da obra, tornando seu uso inviável do ponto de vista econômico e ambiental (BUDNY, 2018). Neste aspecto, o reaproveitamento de outros tipos de materiais tem sido objeto de inúmeros estudos no mundo (PASCHÉ et al. 2017).

Para realização de tal procedimento algumas técnicas são utilizadas, dentre estas, a estabilização. Villibor (1982) aborda a questão da estabilização granulométrica como a combinação e manipulação de solos com outros solos, ou tipos de materiais, em proporção adequada, de forma a obter um produto final de estabilidade maior que os solos de origem. No entanto, este processo, demanda uma quantidade considerável de tempo e ensaios, devido ao seu processo ainda empírico.

A otimização, então, entra neste contexto, pois, de maneira global, é o processo de busca da melhor opção em termos do aproveitamento dos recursos dentro de uma categoria de possíveis soluções a partir das variáveis (Martins e Ning, 2021). No aspecto de otimização, muito se utiliza de técnicas estatísticas. Na engenharia, como afirmam Montgomery e Runger (2012), a estatística busca formular e resolver problemas que refinam as soluções para um problema. Essa área de concentração da ciência exata é de fundamental importância para a tomada de decisões. Dentre as várias técnicas, duas podem ser citadas: o coeficiente de Nash-Sutcliffe e o Teste não paramétrico de Wilcoxon.

O coeficiente de Nash (também chamado de coeficiente de Nash-Sutcliffe) ou NSE é bastante utilizado em modelos hidrológicos, com valor que pode variar entre $-\infty$ e 1. Pela definição obtida por Brighenti et al. (2016), o teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância dos dados medidos. Ou seja, a eficiência de Nash-Sutcliffe indica quão bem o gráfico de dados observados versus dados simulados se ajusta à linha, ou seja, quão próximo de uma linha esperada os dados estarão. Quanto mais próximo de “1”, melhor a concordância entre a previsão do modelo e observação da atividade. (NASH e SUTCLIFFE, 1970).

Já o teste de Wilcoxon é uma opção de teste não paramétrico para variáveis contínuas que pode ser usado no lugar do teste t pareado para comparar duas amostras pareadas. A hipótese nula do teste é que a mediana da diferença entre os pares é igual a zero. Este teste avalia a diferença entre o número de pares com diferenças positivas e o número de pares com diferenças negativas, não sendo recomendado quando há muitos pares com diferenças zero, pois estes acabarão por reduzir o tamanho da amostra e, portanto, serão excluídos da análise (CAPP e NIENOV, 2020).

Diante disso, e com base nos requisitos da norma de bases estabilizadas granulometricamente, DNIT 141/2022, este estudo vem demonstrar a utilização das técnicas estatísticas do coeficiente de Nash-Sutcliffe e no teste não paramétrico de Wilcoxon, com intuito de minimizar o tempo gasto na estabilização granulométrica de solos através de um modelo otimizado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram material asfáltico fresado e solo granular. Ambos cedidos pela Empresa Municipal de Obras e Urbanização (EMURB) da cidade de Aracaju.

2.2 Métodos

O procedimento experimental será dividido em três etapas:

- Etapa I – realizar de ensaios para definição da granulometria dos materiais;
- Etapa II – utilizar o coeficiente de Nash – Sutcliffe e Wilcoxon para realizar a composição entre os materiais na ferramenta solver do Excel;
- Etapa II – realizar ensaios granulométricos da composição para confirmar a previsão de NES e Wilcoxon

Etapa I

Nesta etapa, será realizada a granulometria conforme descreve a norma DNER 080/94. Foram executadas quatro repetições para se obter a mediana dos ensaios e, assim, definir a granulometria do material. Optou-se por essa quantidade de repetições dada a heterogeneidade dos materiais estudados.

Etapa II

Nesta etapa, tem-se como instrumento fundamental o programa Excel. Nesse, foram utilizadas ferramentas de planilha, na qual foi alimentada como dados de entrada os valores obtidos na análise granulométricas da Etapa I. Tomou-se como escolha a curva granulométrica que melhor se encaixa nas faixas granulométricas da norma DNIT 141/2022.

Para verificação do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), a fórmula utilizada está indicada na equação 1

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q})} \quad (1)$$

em que:

Q_{obs} são os dados esperados

Q_{sim} são os dados simulados

\bar{Q} é a média dos dados esperados

Os dados esperados (Q_{obs}) é a média da faixa granulométrica escolhida, conforme exemplo mostrado na Tabela 1, para a Faixa B da norma DNIT 141/2022.

Tabela 1. Exemplo dos dados esperados na escolha de uma faixa granulométrica.

Peneira	Faixa B		
	Limite Superior (%)	Média (%)	Limite Inferior (%)
50,8	100	100	100
25,4	75	83	90
9,5	40	58	75
4,8	30	45	60
2,0	20	31	42
0,42	15	23	30
0,074	5	20	15

A média dos dados esperados (\bar{Q}) é a média dos valores de média da faixa, do exemplo da Tabela 1, ou seja, realizada a soma dos valores de Média (%) e dividido pelo número de peneiras exigidas na norma, no caso 7.

Já os dados simulados (Q_{sim}) são obtidos a partir das porcentagens apresentadas pelo Solver como resposta no Excel, para o coeficiente de Nash, conforme Modelo de Combinação de Solo MCS_{Geopav} a seguir e os parâmetros no Solver são demonstrados na Figura 1, logo abaixo:

$$MCS_{Geopav} = 1 - NSE \quad (2)$$

Onde

- Minimizar o valor de MCS_{Geopav}
- Variar o valor da Porcentagem do material A, entre 0% a 100% (B varia automaticamente)
- A soma das porcentagens dos materiais A e B deve ser 100%

- Para melhorar o modelo, foi definido o valor de NSE maior que 0,95
- Método de resolução não linear evolucionário

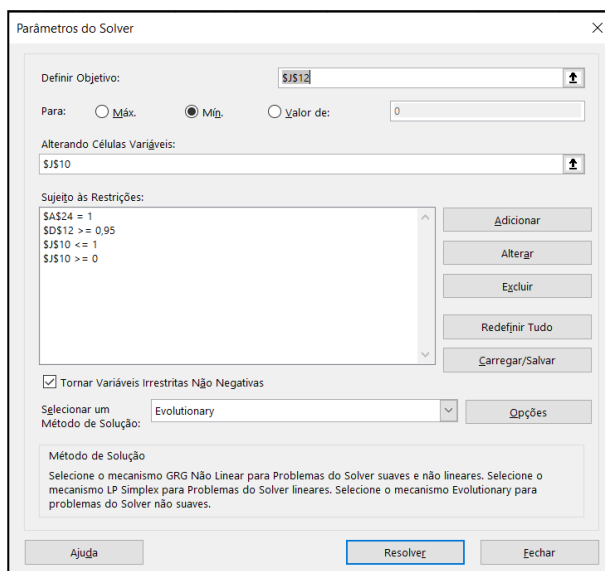


Figura 1. Parâmetros no Solver do Excel para o MES_d

Para verificação do teste não paramétrico de Wilcoxon no Excel

Nesta etapa, serão comparados os dados simulados (Q_{sim}) com os dados esperados (Q_{obs}), seguindo os passos abaixo:

1. Para cada peneira, verificar a diferença entre Q_{sim} e Q_{obs} ;
2. Verificar o valor absoluto das diferenças de cada peneira do procedimento anterior;
3. Colocar as diferenças em ordem crescente;
4. Eliminar os itens que não tem diferença (igual a zero) e somar a quantidade dos que restaram;
5. Ordenar os itens que restaram;
6. Somar os itens que restaram com seu sucessor na ordem;
7. Eliminar as diferenças iguais, se houver e reordenar os que sobraram, se necessário;
8. Dos itens que sobraram, se a diferença no procedimento 1 for positiva atribuir valor “1”, caso negativa, atribuir valor “-1”;
9. Multiplica-se os valores atribuídos no item anterior, pela ordem dos elementos, somando os negativos e positivos;
10. O valor final vai ser o menor dos valores absolutos do item anterior;
11. Com a tabela de valor crítico, se o valor do item anterior for menor que do valor crítico do item tabelado para a significância escolhida de 0,05, será rejeitada a hipótese, caso não, será aceita.

Etapa III

Após a Etapa II, será realizada na composição real, com as porcentagens fornecidas, os mesmos ensaios realizados na etapa I e comparar com composição simulada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas granulométricas do solo e do material fresado podem ser observadas na Figura 2. Essas curvas foram traçadas a partir dos valores da mediana das quatro repetições realizadas durante o ensaio.

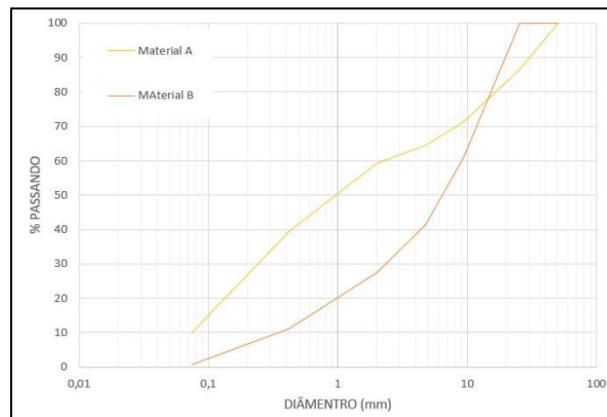


Figura 2. Curvas granulométrica do solo (material A) e do material fresado (material B).

Utilizando-se a ferramenta do Excel, tomando-se como dados de entrada o resultado da granulometria da Etapa I, foi escolhida uma faixa da norma DNIT141/2022. Como simulação, foi escolhida a Faixa C, sendo executada a interação do Solver e fornecendo as seguintes respostas:

- Porcentagem do material A – 38%
- Porcentagem do material B – 62%
- Resultado NSE – 0,993266495
- Resultado do Wilcoxon – Não rejeita

Esses resultados podem ser visualizados na Figura 3, a seguir.

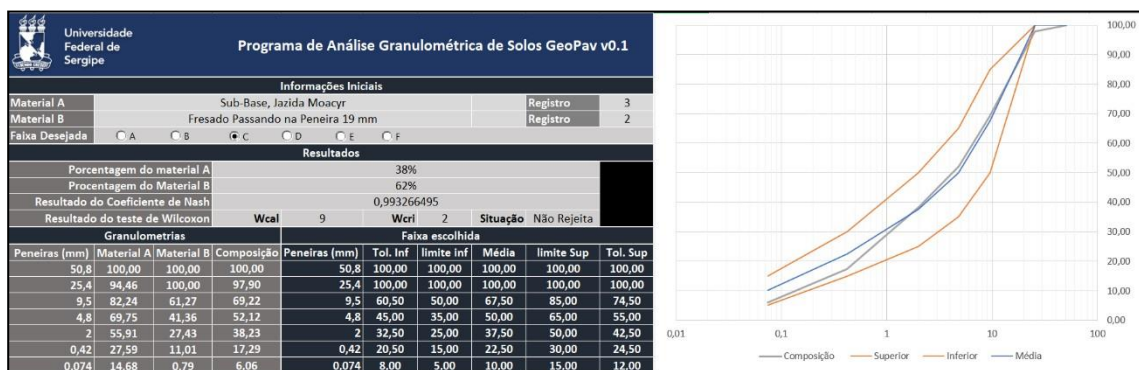


Figura 3. Tela de resultados no Excel

Os passos realizados para se chegar nessas respostas, para a Etapa II, foram:

- ✓ os dados granulométricos dos materiais alimentam a planilha;
- ✓ indica-se uma faixa granulométrica, segundo a norma DNIT 141/2022;
- ✓ os dados granulométricos são então trabalhados estatisticamente levando em consideração a Equação 1 do coeficiente NSE e a Equação 2, do Modelo MES_d utilizando-se do Solver, como indicado na Figura 2;
- ✓ o teste não paramétrico de Wilcoxon também é verificado, seguindo os passos detalhados no item anterior;
- ✓ as interações realizadas apresentam como resultado uma porcentagem de cada material que deve ser então comprovada na Etapa III.

Graficamente, o resultado também pode ser apresentado na Figura 3 com as curvas granulométricas. Observa-se as curvas para os limites superior e inferior, de acordo com as faixas da norma DNIT 141/2022; a curva média obtida a partir da média da faixa escolhida (como demonstrado numericamente na Tabela 1).

Ao simular, a otimização realizada indica uma porcentagem de cada material. Para o exemplo da Figura 3, foi dado como resultado um percentual de 38% para o material A (solo granular) e 62% para o material B (material fresado). E essas porcentagens tiveram como base a curva média da granulometria da faixa C, tomada

como exemplo na simulação. Nessa Figura é possível visualizar a curva da composição simulada, isto é, uma curva que se aproxima o máximo possível daquela curva média da faixa escolhida.

Dessa otimização, finaliza-se o programa experimental realizando novos ensaios granulométricos, seguindo os mesmos procedimentos de ensaios da Etapa I. Assim, foi executada a mistura entre os materiais A e B nas porcentagens indicadas na Etapa II, ou seja, 38% de solo e 62% de material fresado. O resultado desse ensaio das misturas é apresentado na Figura 4.

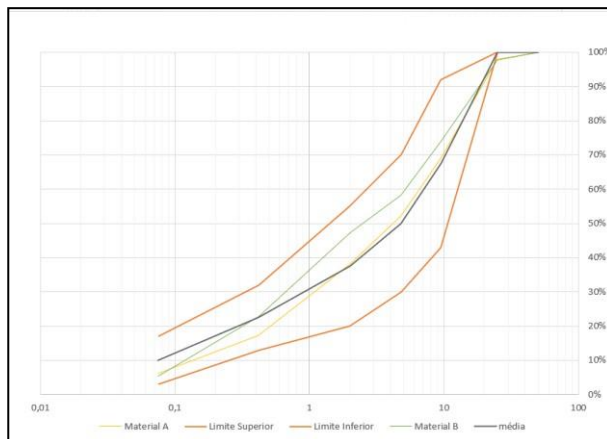


Figura 4. Comparação entre as curvas simulada e real

Pode-se observar que as curvas granulométricas da simulação da composição (Etapa II) e a composição real da mistura (obtida desta Etapa III) estão ambas próximas ao valor de referência da Faixa C da norma DNIT 141/2022, sendo:

- ✓ A curva em amarelo representa a granulometria simulada pelo programa;
- ✓ A curva verde representa a granulometria real;
- ✓ A curva mais escura, central é a referência da faixa.

Vale ressaltar que, pela heterogeneidade dos solos, houve diferença entre o que foi simulado e o real, mas dentro da premissa inicial de permanecer dentro da faixa. Abaixo, pode ser vista na tabela 2, as diferenças entre as porcentagens entre as duas granulometrias

Tabela 2. Comparação entre as granulometrias simulada e a real

Peneiras (mm)	% Passando Simulada	% Passando Real	Diferença
50,8	100	100	0
25,4	97,90	97,75	0,15
9,5	69,22	73,97	-4,75
4,8	52,12	58,12	-6,08
2,0	38,23	47,35	-9,12
0,42	17,29	22,78	-5,49
0,074	6,06	5,25	0,81

4 CONCLUSÕES

Neste estudo, o parâmetro utilizado foi apenas para comparar com uma composição ideal de alguma faixa escolhida da norma DNIT 141/2022, com uma composição simulada. Os resultados mostraram que a simulação foi bastante acurada, pelo apresentando no modelo desenvolvido, ao se comparar com a composição real, com as porcentagens de cada material. A diferença real não foi significativa, mostrando-se bastante confiável a sua utilização.

Esta norma, ainda fornece outros requisitos que também podem ser aplicados em outros modelos para tornar o programa mais robusto e ideal para utilização em maior escala. Por exemplo, com a busca de uma granulometria ideal, muito provavelmente o parâmetro de massa específica aparente seca máxima também

tenha aumentado, pois quanto mais próximo a curva ideal, mais denso o material e também provavelmente o Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) também tenham aumentado em relação ao solo.

Além disso, vários outros parâmetros podem ser adicionados, inclusive na melhora do modelo para adequar tanto as faixas da norma citada, como de qualquer outra norma ou modelo de referência. Inclusive, as ferramentas estatísticas utilizadas aqui, que se mostraram eficientes para a situação proposta, mas que também podem ser aprimoradas, modificando os parâmetros no solver, ou adicionando outros testes estatísticos que tornariam o modelo mais eficiente e robusto.

Portanto, a apresentação de soluções otimizadas se mostrou bastante eficiente na diminuição de tempo na realização de ensaios, pois o método, que ainda empírico, para realização dos ensaios pode ser racionalizado e acurado. Vários outros testes estatísticos podem ser implementados também no auxílio em laboratório e no campo reduzindo tempo e custos.

AGRADECIMENTOS

Os autores desta pesquisa agradecem à CAPES pelo fomento à pesquisa. Além do apoio do laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal de Sergipe e do Laboratório de Solos e Asfaltos da EMURB por acreditar e valorizar a pesquisa, fornecendo materiais necessários e compartilhar o conhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brighenti, T. M., Bonumá, N. B., Chaffe, P. L. B. (2016). *Calibração Hierárquica do modelo SWAT em bacia hidrográfica Catarinense*. RBRH, VOLUME. 21 - Nº. 1. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p53-64>.
- Budny, J. (2018). *Verificação do potencial de estabilização de um solo laterítico com uso de ácido fosfórico, ácido cítrico e cinza de casca de arroz*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Capp, E., Nienov, O. H. (2020) *Bioestatística Quantitativa Aplicada*. UFRGS. Porto Alegre,
- CNT – Confederação Nacional de Transportes. *Pesquisa CNT de rodovias 2023*. – Brasília: CNT: SEST SENAT: ITL
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma *DNIT 141/2022 – ES: pavimentação: base estabilizada granulometricamente: especificação de serviço*. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2012b.
- Martins, J.R.R.A., Ning, A. (2021) *Engineering Design Optimization*. Cambridge University Press
- Montgomery, D. C., Runger, G.C. (2012) *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros 4º ed*. FTC. Phoenix
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970) *River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles*, J. Hydrol., 10, 282-290, 1970
- Pasche, E., Specht, L. P., Tansky, M. C., Consoli, N. C. (2017) *Avaliação da rigidez de misturas recicladas cimentadas: Abordagem elástica e viscoelásticas*. Revista Transportes, Vol 26, nº 01
- Villibor, D. F. (1982) *Estabilização Granulométrica ou Mecânica*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Paulo.