XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/34

Correlação entre a Permeabilidade de Campo e a Granulometria da Areia Aplicada como Elemento Drenante: Estudo de Caso na Região do Pará

Isabela das Graças Machado
Engenheira Geotécnica, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil,
Isabela.machado@bvp.eng.br

Rayala Lisboa Masensini
Engenheira Geotécnica, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil,
Rayala.lisboa@bvp.eng.br

Lucas Golçalves de Faria
Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil,
Lucas.faria@bvp.eng.br

Guilherme de Almeida Silva
Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil,
Guilherme.silva@bvp.eng.br

Francisco Moreira Mindêllo
Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil,
Francisco.mindello@bvp.eng.br

RESUMO: Na construção de barragens e diques, materiais granulares são utilizados em filtros verticais, tapetes drenantes e drenos de pé, com a função de conduzir o fluxo de água percolada no interior do maciço e evitar gradientes hidráulicos excessivos que possam comprometer a estabilidade da estrutura. O desempenho desses sistemas está diretamente relacionado à capacidade de drenagem do material, a qual depende de sua distribuição granulométrica. Nesse contexto, compreender a relação entre a permeabilidade medida em campo e parâmetros granulométricos, como o diâmetro efetivo (D_{10}), é essencial para o controle tecnológico e a otimização do comportamento hidráulico desses elementos. Este estudo investiga a correlação entre a permeabilidade de campo da areia, empregada como material de transição em sistemas de drenagem de um dique e seus parâmetros granulométricos D_{10} e D_{15}. A metodologia envolveu revisão bibliográfica e análise de ensaios de granulometria e permeabilidade in situ, buscando estabelecer relações empíricas que permitam estimar a permeabilidade a partir da curva granulométrica. Os resultados indicam que a correlação direta entre permeabilidade e diâmetro efetivo se apresenta dispersa, podendo ser influenciada por outras variáveis tais quais, grau de compacidade, índice de vazios entre outros.

PALAVRAS-CHAVE: Diâmetro Efetivo, Permeabilidade, Drenagem Interna, Granulometria.

ABSTRACT: In the construction of dams and dikes, granular materials are widely used in vertical filters, drainage blankets, and toe drains to control seepage within the embankment and prevent excessive hydraulic gradients that may compromise structural stability. The effectiveness of these drainage systems depends directly on the material's hydraulic conductivity, which is strongly influenced by its grain size distribution. Therefore, understanding the relationship between field-

measured permeability and granulometric parameters, such as the effective grain size (D_{10}), is essential for quality control and performance optimization. This study evaluates the correlation between the in situ permeability of crushed aggregate (Sand), used as a transition material in a dike drainage system, and its particle size parameters D_{10} and D_{15}. The methodology included a literature review and the analysis of grain size distribution and in situ permeability tests, aiming to establish empirical relationships to estimate permeability from the gradation curve. The results indicate that the direct correlation between permeability and effective grain size shows significant dispersion and may be influenced by additional factors such as degree of compaction, void ratio, among others.

KEYWORDS: Effective Size, Permeability, Internal Drainage, Grain Size Distribution.

1 INTRODUÇÃO

Em estruturas geotécnicas, especialmente em sistemas drenantes de barragens, diques e pilhas de estéril ou rejeito, materiais granulares são frequentemente empregados, desempenhando papel fundamental no controle da percolação e na dissipação de pressões neutras. Elementos como filtros verticais, tapetes drenantes e drenos de pé são projetados com o objetivo de conduzir a água percolada de forma segura, reduzindo gradientes hidráulicos e contribuindo para a estabilidade global das estruturas (Terzaghi; Peck; Mesri, 1996; Das, 2010). O desempenho hidráulico desses sistemas depende diretamente da permeabilidade do material utilizado, a qual está intimamente relacionada à sua distribuição granulométrica.

Entre os parâmetros granulométricos, o diâmetro efetivo (D_{10}) é frequentemente utilizado como indicador do comportamento hidráulico de materiais granulares. Diversos estudos clássicos estabelecem correlações empíricas entre o coeficiente de permeabilidade e o diâmetro efetivo das partículas, destacando-se a equação proposta por Hazen (1930), que relaciona a permeabilidade ao quadrado do diâmetro efetivo para materiais arenosos relativamente uniformes. Essas correlações são amplamente utilizadas como estimativas preliminares em projetos geotécnicos e na avaliação do desempenho de materiais drenantes.

Apesar da ampla utilização de correlações granulométricas para estimativa da permeabilidade, existem incertezas quanto à sua aplicabilidade em materiais submetidos a diferentes condições de compactação. Em sistemas drenantes de obras geotécnicas, os materiais frequentemente são lançados e compactados durante a construção, alterando sua estrutura interna e, consequentemente, suas características hidráulicas. Dessa forma, questiona-se a utilização do diâmetro efetivo (D_{10}), isoladamente, para representar o comportamento permeável do material quando ocorrem modificações na sua densidade e no arranjo das partículas.

Nesse contexto, o presente trabalho investiga a relação entre o diâmetro efetivo (D_{10}) e o coeficiente de permeabilidade corrigido para 20°C (K_{20}) em material granular utilizado em sistemas drenantes. A análise é realizada a partir de dois conjuntos de resultados experimentais: ensaios executados em material sem compactação e ensaios realizados após a compactação do material. O objetivo é avaliar a influência da granulometria e da compactação no comportamento hidráulico do material, bem como discutir a aplicabilidade de correlações granulométricas para estimativas de permeabilidade em condições representativas de campo.

2 METODOLOGIA

Os dados de amostras utilizados são da granulometria e permeabilidade de uma areia com granulometria predominantemente média a grossa segundo a ABNT NBR 7181:2016, proveniente da cidade de Marabá-PA. Estes foram organizados, tratados e posteriormente agrupados em gráficos de análise, sendo, a permeabilidade em função do diâmetro efetivo.

Foram selecionadas 12 amostras de uma areia que foi aplicada na construção de um dreno de fundo e 09 amostras de estoque que foram analisadas antes da sua aplicação para conferência dos critérios de projeto. A partir desses dados as curvas granulométricas foram plotadas em um gráfico e as permeabilidades calculadas.

Após a consolidação das curvas granulométricas, foram obtidos os parâmetros D_{10}, D_{15}, D_{30}, D_{50} e D_{60}. Os parâmetros D_{10}, D_{15} e D_{50} foram selecionados para análise de correlação com a permeabilidade, enquanto D_{30} e D_{60} foram utilizados para o cálculo dos coeficientes granulométricos, e estimou-se a permeabilidade de acordo com a equação de Hazen (1930).

Além do D_{10}, utilizado em correlações empíricas de permeabilidade, foram avaliados os parâmetros D_{15} e D_{50} com o objetivo de verificar se outras frações representativas da curva granulométrica apresentariam melhor associação com os valores de permeabilidade obtidos experimentalmente.

Assim, foram plotados os gráficos para análise da permeabilidade em função do D_{10}, D_{15} e D_{50} da areia, bem como analisado os resultados da permeabilidade calculada pela equação de Hazen (1930) em função da permeabilidade a carga constante obtida em laboratório para amostras de areia aplicadas, ou seja, adensadas e para as amostras em estoque, ou seja, em seu estado natural.

2.1 Consolidação das Curvas Granulométricas e Estimativa da Permeabilidade pela Equação de Hazen

Para este estudo foram selecionadas 21 amostras de areia com distribuição granulométrica predominantemente média a grossa, sendo 12 amostras aplicadas e ensaiadas após o adensamento/compactação e 09 amostras ensaiadas nos estoques antes da aplicação na praça. Na Figura 1 são apresentadas as curvas granulométricas utilizadas.

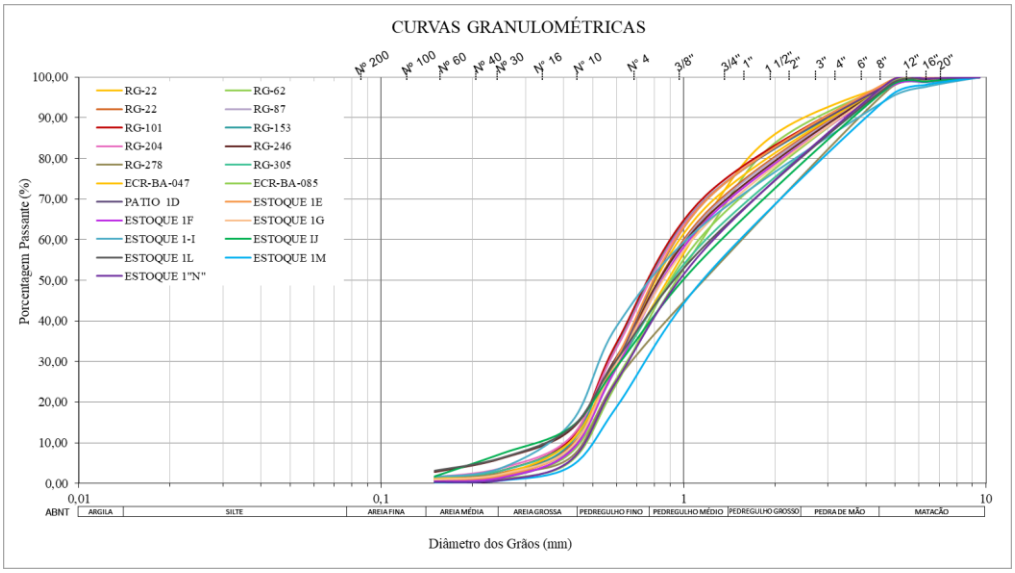


Figura1. Curva de Distribuição Granulométrica da Areia.

A permeabilidade foi calculada a partir da distribuição granulométrica de acordo com a equação de Hazen (1930) definida por:

$$K = cD_{10}^2 \quad (1)$$

Onde:
K = coeficiente de permeabilidade, em cm/s;
C = constante com variação entre 1,0 e 1,5;
D10 = Diâmetro efetivo, em mm.

Hazen (1930) menciona também que a equação se aplica apenas para coeficientes de uniformidade menores do que 05 e diâmetro efetivo entre 0,10 e 3,00 mm. Desta forma, são apresentados na Tabela 1 os valores dos diâmetros analisados, assim como o coeficiente de uniformidade, a permeabilidade obtida a partir da equação supracitada e a permeabilidade a carga constante medida em laboratório.

Tabela 1. Dados Utilizados nas Análises.

Amostra	D10	D15	D30	D50	D60	Cu	K Hazen (c=1) (cm/s)	K_{20} (cm/s)
RG-22	0,43	0,48	0,61	0,88	1,05	2,4	1,85E-01	1,58E-01
RG-62	0,45	0,49	0,64	0,94	1,15	2,6	2,03E-01	5,47E-02
RG-22	0,43	0,48	0,60	0,82	0,99	2,3	1,85E-01	1,58E-01
RG-87	0,44	0,48	0,61	0,84	1,02	2,3	1,94E-01	9,94E-02
RG-101	0,41	0,45	0,55	0,75	0,9	2,2	1,68E-01	8,12E-02
RG-153	0,42	0,46	0,56	0,77	0,9	2,1	1,76E-01	7,29E-02
RG-204	0,40	0,46	0,56	0,77	0,92	2,3	1,60E-01	1,26E-01
RG-246	0,36	0,44	0,59	0,82	1,02	2,8	1,30E-01	1,10E-01
RG-278	0,46	0,50	0,66	1,14	1,53	3,3	2,12E-01	1,45E-01
RG-305	0,42	0,48	0,61	0,91	1,17	2,8	1,76E-01	1,27E-01
ECR-BA-047	0,42	0,47	0,59	0,80	0,95	2,3	1,76E-01	8,87E-02
ECR-BA-085	0,47	0,51	0,65	0,90	1,11	2,4	2,21E-01	2,33E-01
Patio 1D	0,44	0,48	0,60	0,79	0,93	2,1	1,94E-01	9,95E-02
Patio 1E	0,43	0,48	0,59	0,78	0,93	2,2	1,85E-01	1,55E-01
Patio 1F	0,44	0,49	0,62	0,84	1,03	2,3	1,94E-01	1,25E-01
Patio 1G	0,43	0,48	0,60	0,84	1,05	2,4	1,85E-01	5,57E-02
Patio 1I	0,35	0,42	0,52	0,76	1,02	2,9	1,23E-01	9,24E-02
Patio 1J	0,49	0,44	0,62	1,00	1,31	2,7	2,40E-01	1,09E-01
Pátio 01L	0,35	0,44	0,59	0,91	1,22	3,5	1,23E-01	1,81E-01
Pátio 1M	0,46	0,55	0,74	1,15	1,24	2,7	2,12E-01	1,34E-01
Pátio 01N	0,49	0,51	0,65	0,97	1,5	3,1	2,40E-01	2,50E-01

Conforme apresentado, os valores de D_{10} e Cu atendem aos critérios de aplicabilidade da equação de Hazen (1930). Entretanto, ao calcular o coeficiente de permeabilidade, os valores encontrados apresentam alta dispersão conforme Figura 2.

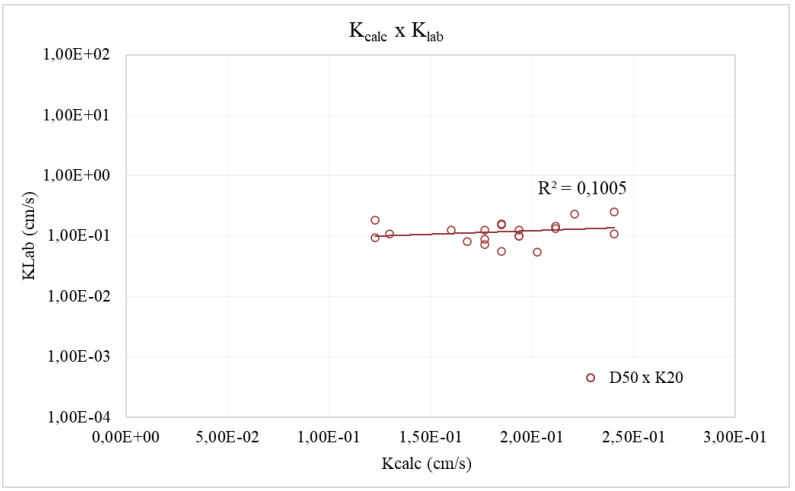


Figura 2. Gráfico de dispersão de k calculado em laboratório e k estimado pela equação de Hazen.

Tendo em vista o resultado gerado, foram analisados também os gráficos correspondentes a D_{10} x K_{20} (laboratório), D_{15} x K_{20} e D_{50} x K_{20} para as amostras aplicadas e as amostras de estoque conforme apresentado na Figura 3.

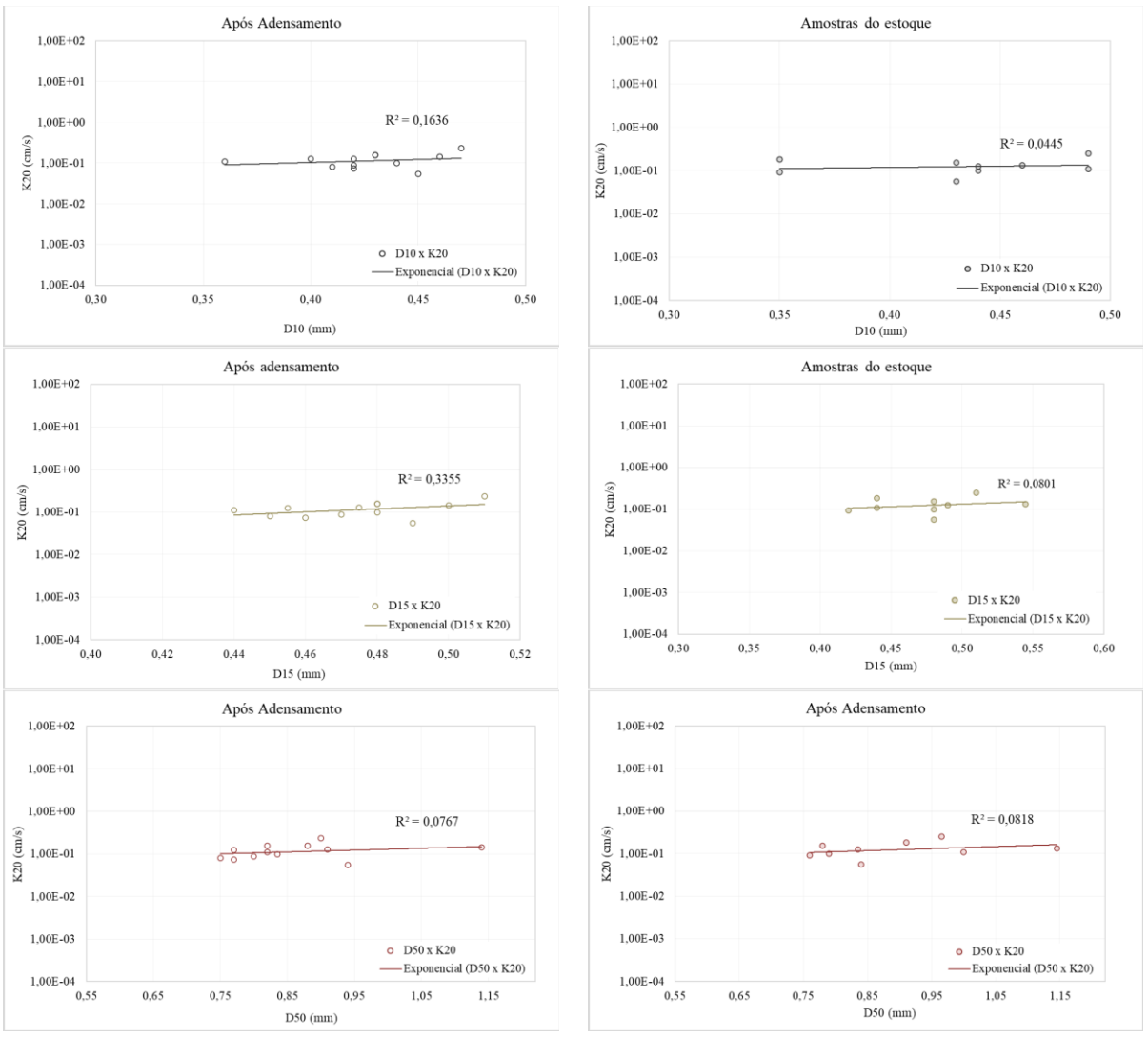


Figura 3. Grafico de dispersão: correlação dos diâmetros e permeabilidade de laboratório.

4 CONCLUSÃO

A comparação entre os valores de permeabilidade estimados pela equação de Hazen e os valores medidos em laboratório indica baixa correlação entre as variáveis analisadas ($R^2 = 0,10$). Observa-se que os valores estimados apresentam menor variabilidade quando comparados aos valores obtidos experimentalmente, resultando em dispersão significativa dos pontos no gráfico. Esse comportamento sugere que a equação de Hazen, por depender principalmente do diâmetro efetivo D_{10}, não representa adequadamente a variabilidade da permeabilidade do material estudado. Assim, os resultados indicam que a equação fornece apenas uma estimativa preliminar da permeabilidade para esse material.

A relação entre o diâmetro efetivo D_{10} e a permeabilidade após o adensamento apresentou correlação fraca. Observa-se leve tendência de aumento da permeabilidade com o aumento de D_{10}, porém com dispersão significativa dos dados. Para o material do estoque, a relação entre D_{10} e permeabilidade apresentou correlação muito baixa, indicando ausência de tendência clara entre as variáveis analisadas.

A relação entre D_{15} e permeabilidade apresentou a maior correlação entre os parâmetros analisados, indicando tendência de aumento da permeabilidade com o aumento do diâmetro D_{15}. Nas amostras do estoque, a correlação entre D_{15} e permeabilidade foi fraca, evidenciando elevada dispersão dos dados.

A relação entre D_{50} e permeabilidade apresentou baixa correlação, indicando que o diâmetro médio não representa adequadamente o comportamento hidráulico do material. Para o material do estoque, a correlação entre D_{50} e permeabilidade também foi muito baixa, indicando ausência de relação significativa entre as variáveis.

Em síntese, os resultados obtidos indicam que a equação de Hazen apresentou baixa aderência aos dados experimentais, evidenciando limitações na estimativa da permeabilidade do material avaliado a partir do diâmetro efetivo D_{10}. De forma semelhante, as análises realizadas com os parâmetros granulométricos D_{10}, D_{15} e D_{50} apresentaram coeficientes de determinação reduzidos, indicando que esses parâmetros, quando considerados isoladamente, não são suficientes para explicar a variabilidade da permeabilidade observada.

Os resultados reforçam que o comportamento hidráulico de materiais granulares é influenciado não apenas pela distribuição granulométrica, mas também por características estruturais do material, tais como índice de vazios, grau de compacidade, arranjo das partículas e presença de frações finas. Dessa forma, a utilização de correlações baseadas exclusivamente em parâmetros granulométricos deve ser realizada com cautela, especialmente para materiais submetidos a processos de compactação ou adensamento.

Além disso, o número de amostras disponível neste estudo é relativamente limitado, o que pode influenciar a confiabilidade estatística das correlações obtidas. Assim, recomenda-se que estudos futuros ampliem o banco de dados experimental e incorporem parâmetros adicionais relacionados à estrutura do material, permitindo uma avaliação mais representativa dos fatores que controlam a permeabilidade em materiais granulares utilizados em obras geotécnicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a BVP Geotecnia & Hidrotecnia pela disponibilização dos dados e apoio técnico, bem como aos familiares e amigos que foram imprescindíveis para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.

Carrier III, W. D. (2003). Goodbye Hazen; Hello Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(11), 1054-1056.

CHAPUIS, R. P. (2012). *Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review*. Bulletin Engineering Geology and the Environment.

Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning*. Boston.

HAZEN, A. (1930). *Some Physical Properties of Sands and Gravels. Massachusetts State Board of Health*. USA.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons. USA.