

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/583

Análise do Ensaio de Cisalhamento Direto de Areias Sob a Perspectiva Energética

Lucas Marques Pires da Silva

Engenheiro, Benthic, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.silva@coc.ufrj.br

Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Professor, Instituto Politécnico/UFRJ, Macaé, Brasil, guimaraes@macae.ufrj.br

RESUMO: O objetivo deste estudo foi realizar uma análise do ensaio de cisalhamento direto, considerando primariamente o conceito de trabalho, ou seja, o gasto de energia dissipado pelo movimento dos grãos de areia durante a realização do ensaio. A partir de um banco de dados de ensaios de cisalhamento direto na areia da praia de Cavaleiros (Macaé/RJ) e da areia de Hokksund na Noruega, para diversos graus de compactidade e tensões verticais, verificou-se o trabalho realizado por cada amostra durante toda a fase de cisalhamento até o ponto de ruptura. A comparação de amostras com compactidades distintas e sob a mesma tensão vertical mostrou uma relação entre o trabalho até a ruptura e a tensão vertical independente da compactidade. Vale destacar que esses resultados mostram que o valor da tensão de cisalhamento na ruptura e o deslocamento horizontal correspondente a ruptura possuem uma relação constante.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de Cisalhamento Direto, Areias, Energia, Ruptura, Trabalho.

ABSTRACT: The aim of this study was to conduct an analysis of direct shear testing, primarily considering the concept of work, i.e., the energy expended dissipated by the movement of sand grains during the test. Using a database of direct shear tests on sand from Cavaleiros Beach (Macaé/R.J.) and Hokksund sand in Norway, for various degrees of compactness and vertical stresses, the work performed by each sample throughout the shear phase until the point of failure was determined. Comparing samples with different compactnesses under the same vertical stress revealed a relationship between the work until failure and the vertical stress independent of compactness. It is worth noting that these results indicate that the shear stress value at failure and the corresponding horizontal displacement have a constant relationship.

KEYWORDS: Direct Shear Test, Sands, Energy, Failure, Work.

1 INTRODUÇÃO

O conceito de energia é amplamente utilizado nos conceitos de física sendo a base da mecânica quântica através da equação de Schrodinger em 1926 e primordial na relatividade de Einstein, em 1905. De acordo com Feynman (1963) a variação de energia potencial de uma partícula para ir do ponto A ao B é o oposto do trabalho realizado pela partícula. Ainda segundo Feynman (1963) o trabalho para movimentar um bloco do ponto A até o ponto B é a força multiplicada pela distância percorrida.

O ensaio de cisalhamento direto é um ensaio fundamental na geotecnia para avaliar a resistência ao cisalhamento dos solos. Em sua execução, uma amostra do material é preparada, frequentemente em formato de paralelepípedo ou cilindro, com uma superfície específica designada para o cisalhamento. Um deslocamento horizontal é imposto na amostra e a carga horizontal é medida perpendicularmente ao plano de cisalhamento na seção transversal da amostra.

Durante o ensaio, são medidas tanto a carga horizontal aplicada quanto os deslocamentos verticais e horizontais resultante para uma determinada carga vertical atuante. Esses dados permitem calcular a resistência ao cisalhamento do material. Essa resistência representa a quantidade de energia necessária para deformar o material por cisalhamento. Quanto maior a resistência ao cisalhamento, mais energia é requerida para causar a deformação.

Um fato muito importante observado primeiramente por Casagrande (1936) está associado ao comportamento das areias na ruptura. O autor percebeu que as amostras de areias compactas, quando

cisalhadas, aumentavam de altura, ou seja, tinham um comportamento dilatante. Já as amostras de areia fofas tendiam a ter sua altura reduzida quando cisalhadas, ou seja, um comportamento compressivo. Posteriormente, Lee e Seed (1967) fizeram ensaios triaxiais drenados para entender melhor aquele comportamento. Os autores verificaram que além da compactidade, as tensões normais aplicadas nas amostras também interferiam nos comportamentos dilatantes ou compressíveis.

A figura 1 apresenta de forma simples o comportamento dilatante para uma areia compacta e o comportamento compressível para uma areia fofa.

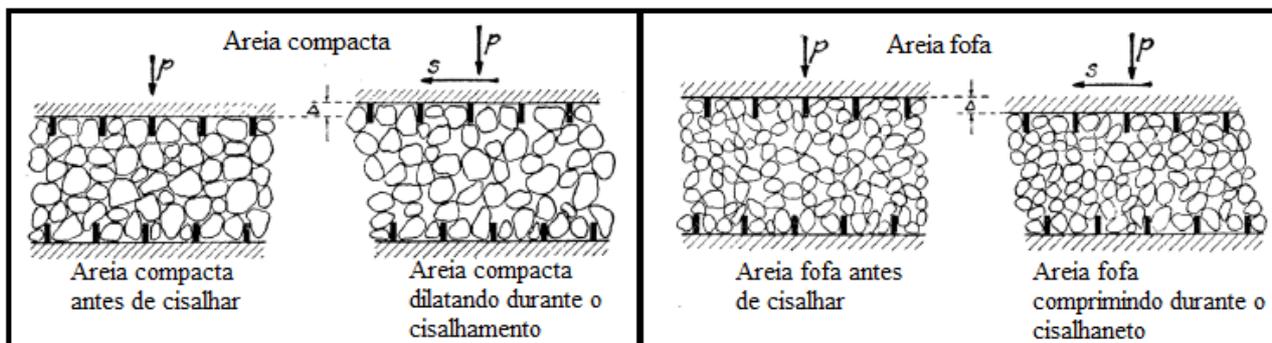


Figura 1 – Comportamento de areia – Adaptado de Casagrande (1936).

2 BANCOS DE DADOS

2.1 Pinheiro (2018)

Um trabalho de conclusão de curso do instituto politécnico da UFRJ em Macaé realizado por Pinheiro (2018) estudou a areia da praia de Cavaleiros na cidade de Macaé/RJ. A pesquisa contou com a caracterização completa de amostras deformadas da areia, determinação dos índices de vazio mínimo e máximo e a execução de ensaios de cisalhamento direto em diferentes compactidades.

As curvas granulométricas realizadas por peneiramento de uma amostra da areia, seca em estufa, mostrou que é uma areia média. A figura 2 mostra as três curvas granulométricas da mesma amostra realizadas na ocasião por Pinheiro (2018).

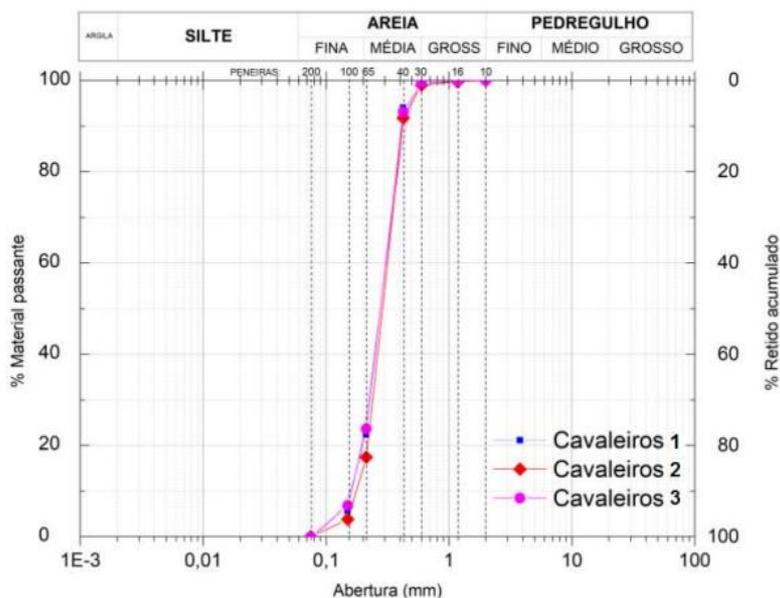


Figura 2 – Curvas granulométricas da areia da praia de Cavaleiros – Adaptado de Pinheiro (2018).

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com compactidade relativa média de 18%, sendo a compactidade fofa associado a um índice de vazios de 0,712; e com compactidade relativa média de 41% sendo

a compactidade medianamente compacta associado a um índice de vazios de 0,637. Por fim foram realizados ensaios com compactidade relativa média de 88%, sendo considerada uma areia compacta associado a um índice de vazios de 0,490. As tensões verticais aplicadas variaram de 12,5 kPa até 1600 kPa.

A Figura 3 apresenta as curvas de tensão cisalhamento versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras fofas (compactidade relativa média de 18%).

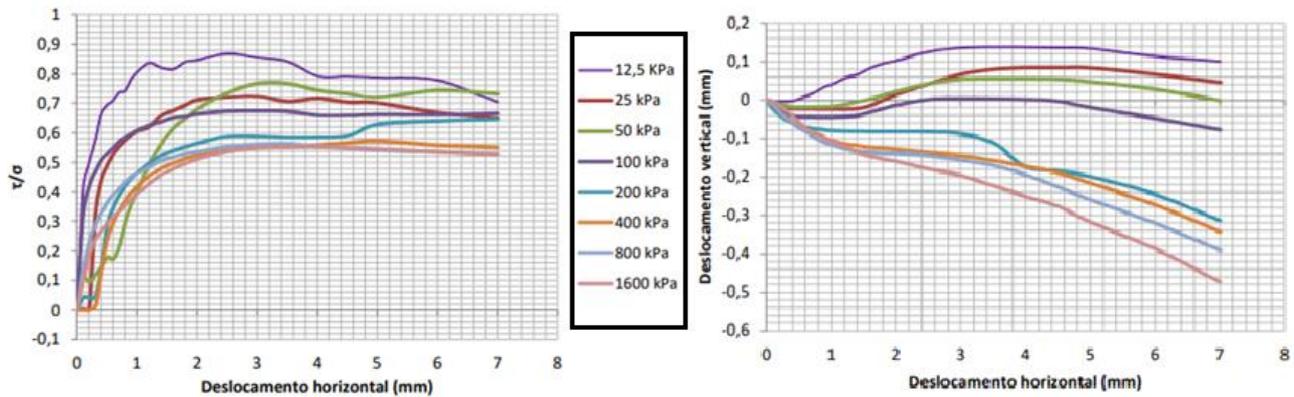


Figura 3 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto para compactidade fofa da areia da praia de Cavaleiros - adaptado de Pinheiro (2018).

A Figura 4 apresenta as curvas de tensão cisalhamento versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras medianamente compactas (compactidade relativa média de 40%).

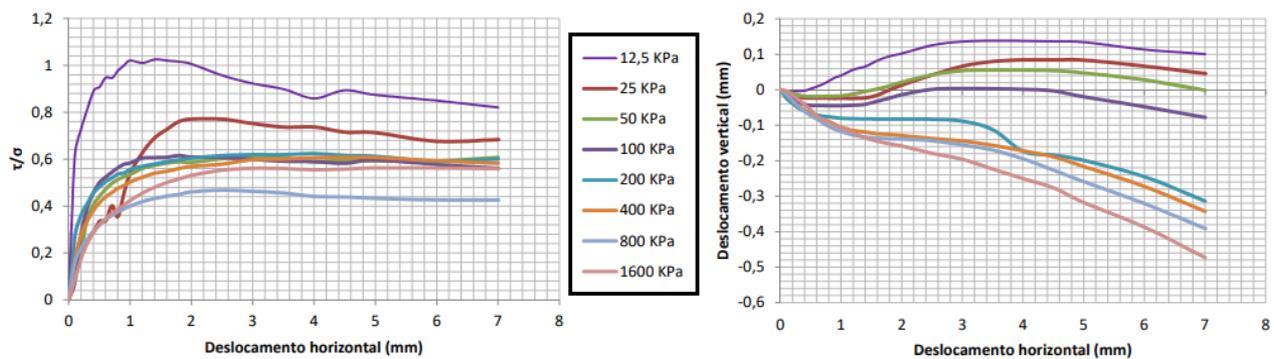


Figura 4 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto para compactidade medianamente compacta da areia da praia de Cavaleiros - adaptado de Pinheiro (2018).

A Figura 5 apresenta as curvas de tensão cisalhamento versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras compactas (compactidade relativa média de 88%).

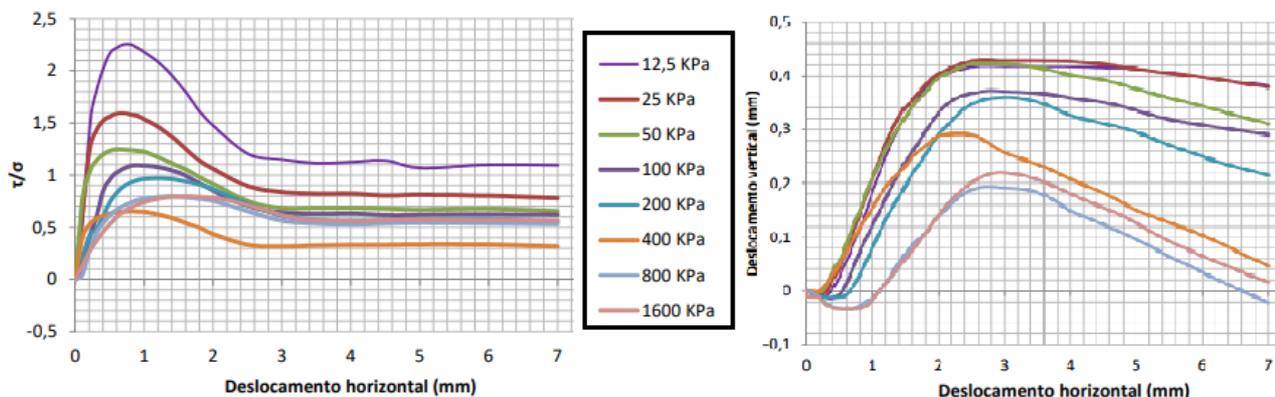


Figura 5 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto para compactidade compacta da areia da praia de Cavaleiros - adaptado de Pinheiro (2018).

2.2 Parkin e Lunne (1982) e Marques e Oliveira (2009)

Uma pesquisa realizada por Parkin e Lunne (1982) no NGI (Norewegian Geotechnical Institute) realizou uma série de ensaios de caracterização da areia de Hokksund, um rio na Noruega. Posteriormente, Marques e Oliveira (2009), em um projeto de iniciação científica na escola Politécnica da UFRJ fizeram novos ensaios na mesma areia de Hokksund, mas desta vez com a execução de ensaios de cisalhamento direto em diferentes compactidades.

A granulometria realizada por Parkin e Lunne (1982) mostrou que essa é uma areia média e bem graduada. A figura 6 mostra a curva granulométrica adaptada de Parkin e Lunne (1982) para a areia de Hokksund.

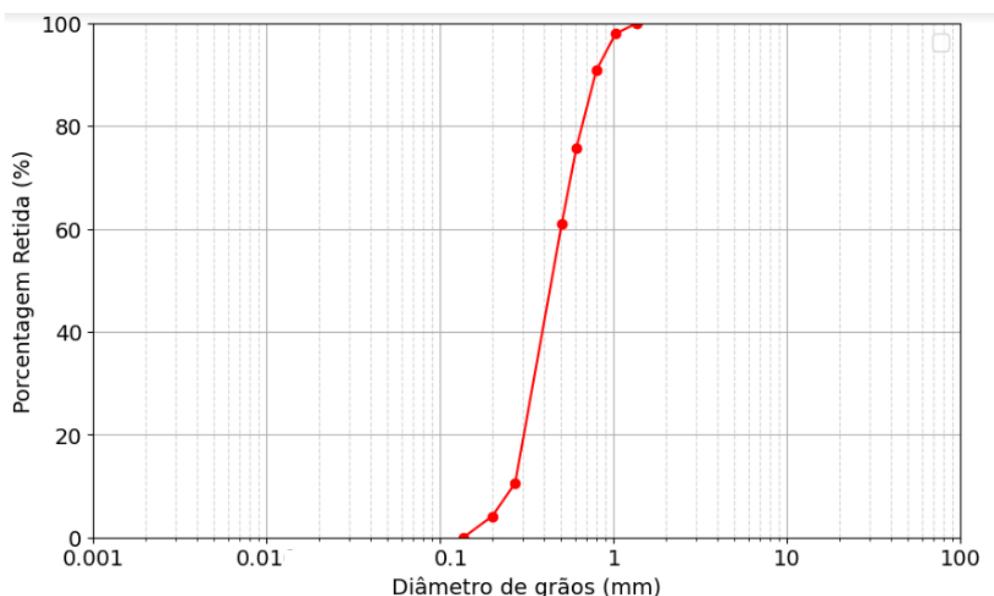


Figura 6 – Curva granulométrica da areia de Hokksund na Noruega – Adaptado de Parkin e Lunne (1982)

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com compactidade relativa média de 40%, sendo a compactidade medianamente compacta associado a um índice de vazios de 0,709; e com compactidade relativa média de 69% sendo a compactidade compacta associado a um índice de vazios de 0,620. Por fim foram realizados ensaios com compactidade relativa média de 90%, sendo também considerada uma areia compacta associado a um índice de vazios de 0,554. As tensões verticais aplicadas variaram de 25 kPa até 200 kPa.

A Figura 7 apresenta as curvas de tensão cisalhamento versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras medianamente compactas (compactidade relativa média de 40%).

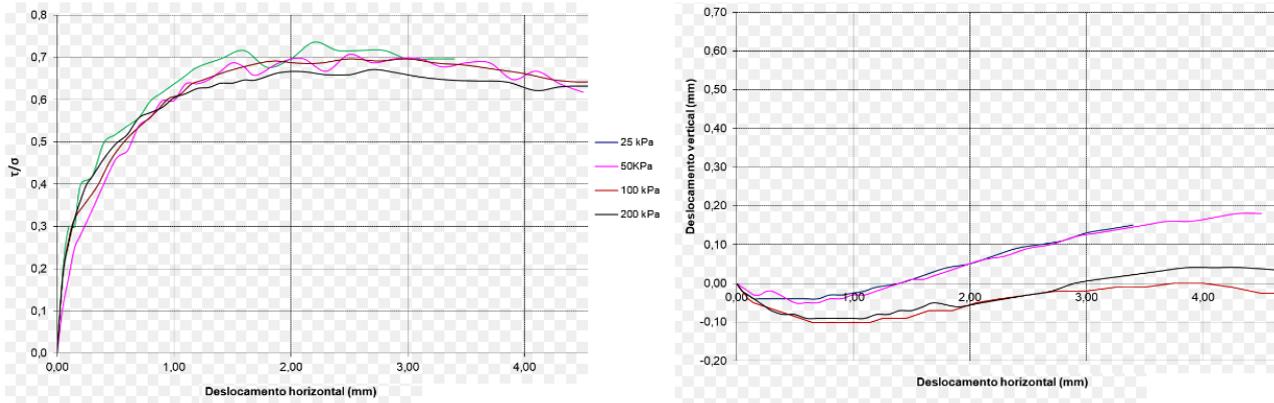


Figura 7 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto para compactidade medianamente compacta da areia de Hokksund - adaptado de Marques e Oliveira (2009).

A Figura 8 apresenta as curvas de tensão cisalhamento versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras medianamente compactas (compactidade relativa média de 69%).

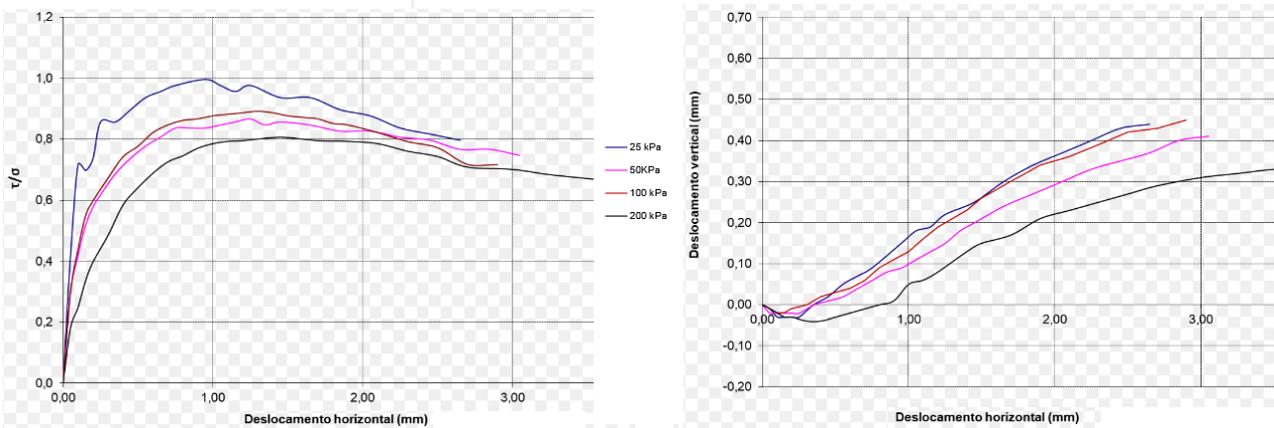


Figura 8 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto para compactidade medianamente compacta da areia de Hokksund - adaptado de Marques e Oliveira (2009).

A Figura 9 apresenta as curvas de tensão cisalhamento versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal dos ensaios de cisalhamento direto para as amostras compactas (compactidade relativa média de 90%).

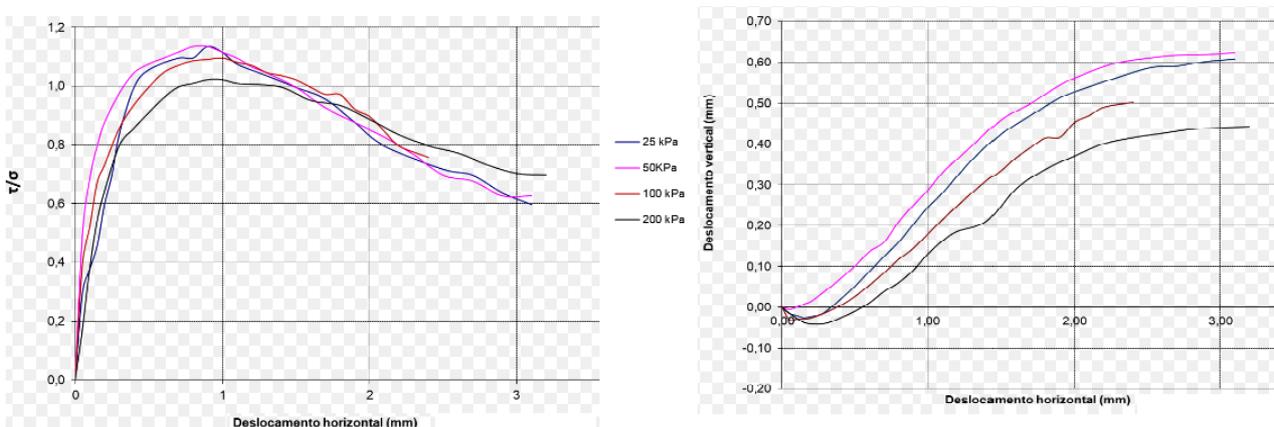


Figura 9 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto para compactidade compacta da areia de Hokksund - adaptado de Marques e Oliveira (2009).

2.3 Perspetiva Energética

O cálculo do trabalho realizado até a ruptura segue a equação 1 que quantifica o trabalho na direção horizontal e na direção vertical. Note que os trabalhos na diferentes direções são somados, apesar de ortogonais, pois a grandeza desejada é o trabalho realizado pelo solo até a ruptura.

$$W = (\vec{F}_v \cdot \delta_v \cdot \hat{i}) + (\vec{F}_h \cdot \delta_h \cdot \hat{j}) \quad (1)$$

Onde W é o trabalho, F_v é a força na direção vertical e F_h a força na direção horizontal no momento da ruptura, δ_v é o deslocamento na direção vertical e δ_h o deslocamento horizontal até o momento da ruptura e \hat{i} e \hat{j} são os versores da direção vertical e horizontal respectivamente.

Observa-se que a força e o deslocamento horizontal estão sempre na mesma direção devido a natureza do ensaio de cisalhamento direto, todavia na direção vertical isso não é verdade, pois o solo pode contrair ou dilatar o que deixaria a força vertical na mesma direção ou na direção contrária do deslocamento vertical, respectivamente. Quando o solo tende a dilatar na ruptura, esse efeito pode gerar um trabalho “negativo” o que seria um absurdo sob qualquer ótica que não a convenção matemática adotada para analisar o resultado do experimento.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 10 mostra o resultado do trabalho para alcançar a ruptura em função das tensões normais (vertical) para a areia da praia de Cavaleiros e para a areia de Hokksund.

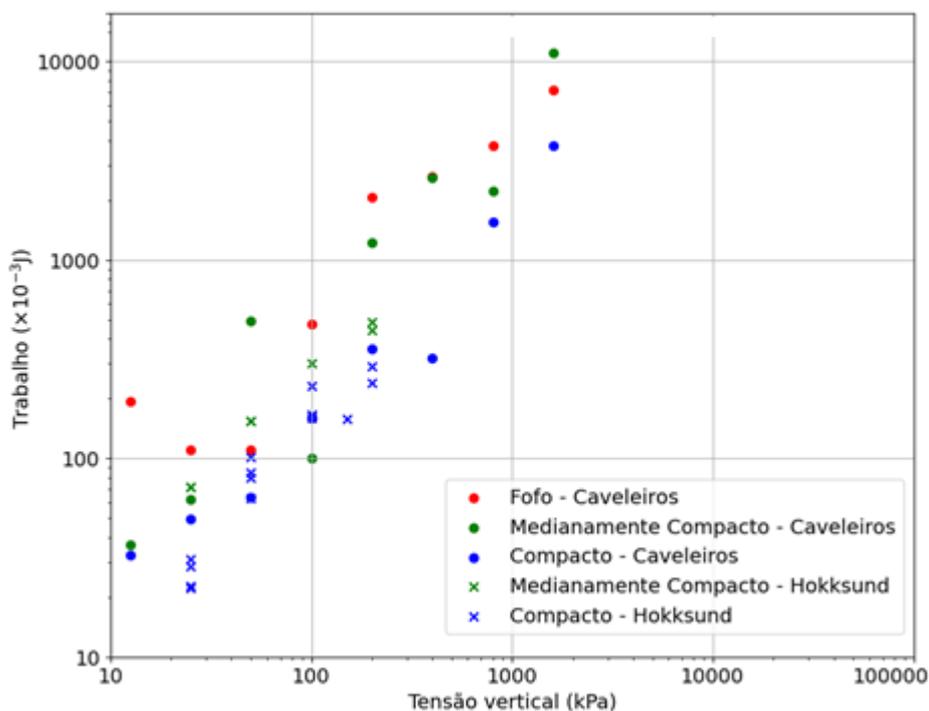


Figura 10 – Trabalho para chegar na ruptura pela tensão vertical

No presente estudo, uma análise de regressão de ordem logarítmica foi empregada para modelar a relação entre a tensão vertical e o trabalho. Após o ajuste do modelo aos dados experimentais, foram determinadas margens de incerteza para representar a variabilidade esperada dos dados em relação à linha de regressão.

As margens de incerteza foram calculadas considerando a magnitude dos valores ajustados e aplicando uma abordagem percentual em torno desses valores. Especificamente, margens inferiores e superiores foram

definidas multiplicando os valores ajustados pela linha de regressão por fatores de 0.6 e 1.2, respectivamente. Com efeito, a Figura 11 ilustra essa análise. Um ponto, destacado em vermelho, foi retirado de análise devido a disparidade do valor do trabalho.

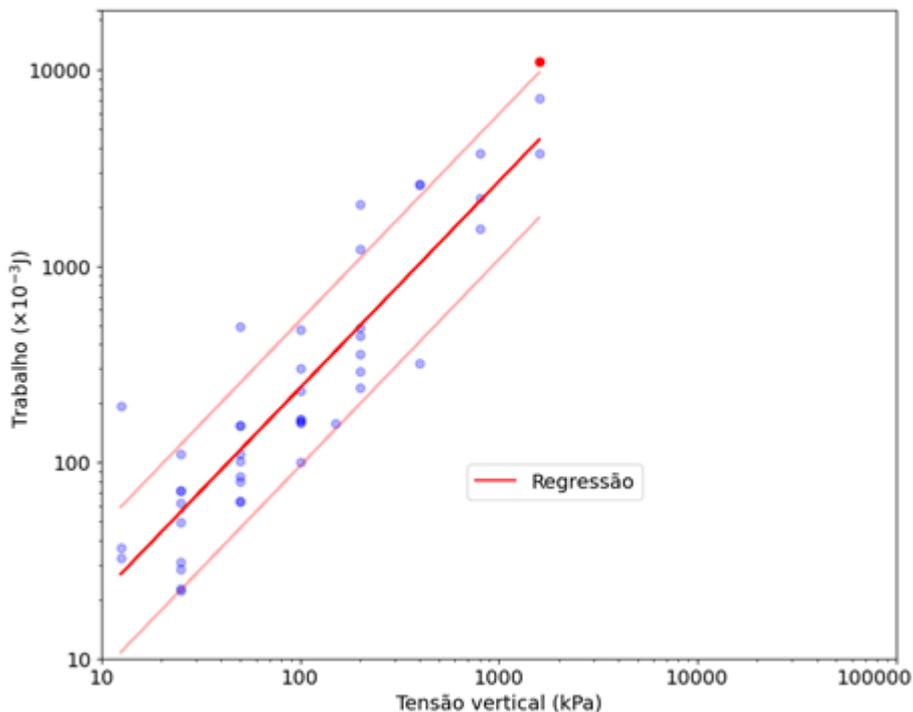


Figura 11 – Linha de tendência linear com margem de erro.

A fim de esclarecer os resultados obtidos na análise dos ensaios de cisalhamento direto das areias da praia de Cavaleiros e Hokksund sob a ótica de uma perspectiva energética, concebeu-se um modelo gráfico. A Figura 12 apresenta a relação entre as áreas (trabalhos) necessárias para alcançar a ruptura de amostras de areias com diferentes compacidades sob a mesma tensão vertical.

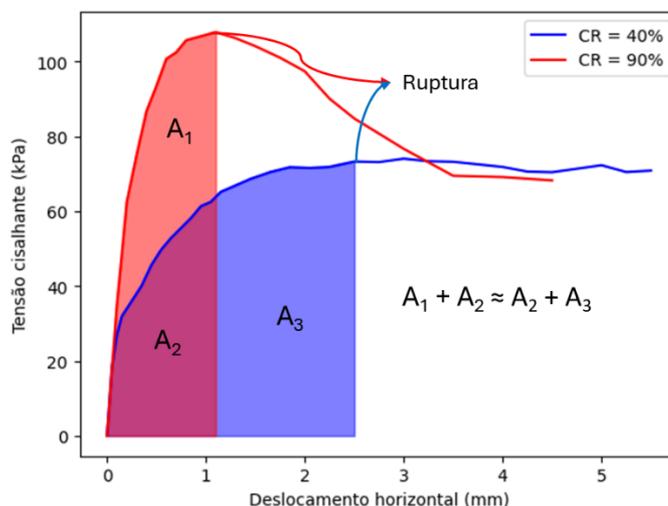


Figura 12 – Áreas associadas aos trabalhos para alcançar a ruptura.

Destaca-se que, a primeira vista, as áreas abaixo das curvas (integral) até o ponto de ruptura (associado a tensão cisalhante) é igual para qualquer compacidade relativa das areias ensaiadas, naturalmente, sob a mesma tensão vertical.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Resultados de ensaios de cisalhamento direto na areia da praia de Cavaleiros em Macaé/RJ e na areia do rio Hokksund na Noruega, sob diferentes tensões normais e distintas compacidades relativas, foram utilizados como banco de dados para quantificar o trabalho necessário até essas amostras alcançarem a ruptura.

Sabe-se que a areia exhibe tanto comportamento contrátil quanto dilatante, o que influencia a presença de um pico na curva de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal (ensaio de cisalhamento direto).

Com efeito, a análise dos dados desta pesquisa sugere que a tensão cisalhante relacionada à ruptura é inversamente proporcional ao deslocamento horizontal necessário para romper o solo, ou seja, quanto maior a tensão cisalhante na ruptura menor será o deslocamento horizontal associado àquela tensão cisalhante.

Uma maneira alternativa de entender esse fenômeno é considerar a área sob a curva de tensão versus deslocamento. Mesmo sob a mesma tensão vertical, a areia pode manifestar comportamentos distintos devido à sua compacidade relativa. No entanto, de acordo com os dados analisados, a área sob a curva de tensão versus deslocamento é constante, independentemente da compacidade.

Assumindo que o trabalho realizado para a ruptura é o mesmo conforme a Figura 12, pode-se utilizar essa metodologia para determinar o ponto (tensão-deformação) de ruptura de curvas quando não há presença de pico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Casagrande, A. (1936) *Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. Journal of the Boston Society of Civil Engineers* 23, p.13–32.
- Feynman, R.P. (1963) *The Feynman Lectures on Physics*, 1st ed., CalTech, Los Angeles, CA, USA, 1552 p.
- Lee, K.L., Seed, H.B., (1967) *Drained Strength Characteristics of Sands. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, N°SM6, pp. 117-141.*
- Marques, F. de L., Oliveira, F. da S. (2009) Ensaios com a Areia de Hokksund para Projeto de Revitalização da Câmara de Calibração. XXXI Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural, n. 856, Rio de Janeiro, 5-9 de outubro
- Parkin, A.K., Lunne, T. (1982) *Boundary Effects in the Laboratory Calibration of a Cone Penetrometer for Sand, Norwegian Geotechnical Institute Publication*, n. 138.
- Pinheiro, G. P. (2018) *Caracterização Geotécnica em Laboratório da Areia da Praia dos Cavaleiros-Macaé/RJ*. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia, UFRJ-Macaé, 124 p.