

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Análise da Resistência ao Cisalhamento da Interface Solo-Estaca

Baby, L. M.

Estudante de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil,
luisa.mazzinibaby@gmail.com

Futai, M. M.

Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, futai@usp.br

RESUMO: A interface solo-sólido tem grande importância no desempenho de diversas obras da engenharia geotécnica. O estudo do comportamento da interface é importante para se compreender como é mobilizada a resistência ao cisalhamento e de que forma as variáveis intrínsecas ao problema afetam o seu desempenho. Foram compilados dados de onze artigos cujos objetivos circundavam a determinação do ângulo de atrito da interface solo-estaca (δ) e a análise da influência da variação de certos parâmetros tanto do solo quanto da superfície sólida no valor de δ . Observou-se estatisticamente a variação do ângulo de atrito e da tensão cisalhante máxima com a rugosidade para cada um dos artigos estudados e por fim determinou-se correlações entre a razão do ângulo de atrito de interface e interno do solo (δ/ϕ) com a rugosidade.

PALAVRAS-CHAVE: Interface Solo-Estaca, Ângulo de Atrito, Resistência ao Cisalhamento

ABSTRACT: The soil-solid interface has primary importance on the performance of several geotechnical systems. The study of the interface behavior is crucial to better understand how the shear strength is mobilized and in what way the variables of the problem affect its fulfillment. Data from eleven articles were combined to establish relations between the soil-pile interface friction angle (δ) and the variables that may influence its behavior. The variation of the friction angle and shear strength with the roughness of the interface were statistically analyzed for each article and correlations were made between the ratio of the interface friction angle to the internal soil friction angle (δ/ϕ) and the interface roughness.

KEYWORDS: Soil-Pile Interface, Friction Angle, Shear Strength

1 Introdução

A interface solo-sólido tem grande relevância em diversas obras de geotecnia, tais como estruturas de contenção, barragens de concreto, reforço de muros com geossintéticos e fundações em estacas. O estudo do comportamento da interface é importante para compreender como se é mobilizada a resistência ao cisalhamento e de que forma as variáveis afetam o seu desempenho.

Alguns parâmetros tanto do solo quanto da face sólida têm sua influência analisada em inúmeros estudos (e.g. Uesugi e Kishida, 1986a, 1986b; Uesugi et al., 1988; Martinez e Frost, 2017; Han *et al.*, 2018). Potyondy (1961) foi pioneiro no assunto e realizou centenas de ensaios abrangendo diferentes combinações de rugosidade, materiais de interface e tipos de solo. O autor indicou quatro fatores principais que afetam o comportamento da interface: a umidade do solo, sua composição, a rugosidade da interface e a tensão normal aplicada. Atualmente, a literatura sugere os seguintes fatores como mais importantes: as características da interface, principalmente a rugosidade, as características do solo, a condição de ensaio (tensão normal, rigidez ou volume constante), a umidade do solo e a temperatura. Os materiais da face sólida citados na bibliografia são muitos, sendo mais estudadas as interações do solo com aço e com concreto para as interfaces solo-estaca.

O presente artigo tem como objetivo unir informações da literatura sobre as variáveis que afetam o ângulo de atrito de interface, realizando uma análise de parâmetros como a rugosidade, a tensão normal aplicada, o formato dos grãos e a densidade relativa e como esse resultado é influenciado por essas propriedades. Também são propostas correlações entre a razão do ângulo de atrito de interface e do ângulo de atrito interno do solo com a rugosidade ensaiada.



1.1 Resistência ao cisalhamento de interface

Usualmente, a análise da resistência ao cisalhamento da interface solo-estaca é realizada por meio de ensaios de cisalhamento direto. A condição de ensaio em que se mantém constante a tensão normal aplicada (CNL) é a mais tradicional, sendo também utilizada a condição de rigidez constante (CNS), em que se simula a reação do solo adjacente à região cisalhada e se observa aumento ou redução da tensão normal a depender da tendência a contração ou dilatação do solo.

Para areias, a resistência ao cisalhamento é obtida pelo modelo de ruptura de Mohr – Coulomb, como descrito a seguir:

$$\tau = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1)$$

sendo τ a tensão cisalhante na ruptura; σ_n a tensão normal; e δ o ângulo de atrito da interface.

Diversos estudos analisaram a influência da rugosidade da interface sólida na resistência ao cisalhamento e no ângulo de atrito de interface. Uesugi e Kishida (1986) propuseram medida de rugosidade de interface bastante difundida na literatura. A rugosidade normalizada (R_n) correlaciona o D_{50} , diâmetro médio dos grãos, com a rugosidade máxima (R_{\max}), ou seja, a distância entre o maior pico e o maior vale por um comprimento igual ao próprio D_{50} (Equação 2).

$$R_n = R_{\max} / D_{50} \quad (2)$$

Outro parâmetro utilizado para designar rugosidade é a rugosidade média (R_a), definida como sendo a média aritmética dos valores absolutos das variações do perfil de rugosidade dentro de um determinado comprimento e medidos a partir da linha média (ASME, 2009). Dessa forma, a rugosidade média é um parâmetro específico da superfície sólida, ao contrário da rugosidade normalizada, que associa as características dos dois materiais.

Há um consenso na literatura sobre a influência da rugosidade. A tensão cisalhante e o ângulo de atrito aumentam com o aumento da rugosidade da interface. Para rugosidade normalizada, esse comportamento é verdadeiro até um valor de rugosidade crítico, acima do qual não há mais influência (Uesugi e Kishida, 1986). Além disso, a diferença entre os valores de tensão e de ângulo de atrito de pico e residual torna-se maior. Por fim, muitas vezes observa-se maior dilatação das amostras independentemente da compactidade, amostras densas dilatam mais e amostras fofas passam a dilatar ao invés de reduzirem de volume como esperado (Uesugi e Kishida, 1986; Frost et al., 2002; Dietz e Lings, 2006; DeJong e Westgate, 2009; Samanta et al., 2018; Su et al., 2018).

2 Metodologia

Foram coletados e analisados os resultados de ângulo de atrito e de tensão cisalhante máxima apresentados por onze referências encontradas na bibliografia. Todas as referências utilizadas apresentaram solo arenoso em condição seca, sendo os equipamentos utilizados os de cisalhamento direto convencional e de grande porte e de *simple shear* na condição de ensaio CNL. Os estudos foram agrupados de forma que o parâmetro utilizado para designar rugosidade e as cargas de ensaio coincidissem.

A divisão dos grupos seguiu primeiramente o critério de parâmetro de rugosidade e em seguida as condições de ensaio. As referências dos grupos 1 e 2 utilizaram a rugosidade média para designar a face sólida enquanto o grupo 3 utilizou a rugosidade normalizada. A diferença entre os grupos 1 e 2 reside na tensão normal aplicada nos ensaios: o grupo 1 utilizou tensões baixas (25kPa) e o grupo 2 tensões elevadas (95 – 200kPa).

Para cada um dos três grupos, os resultados foram apresentados seguindo os parâmetros de densidade relativa ou de formato dos grãos. O Grupo 1 apresentou um formato apenas (arredondados – subarredondados) em três compactidades diferentes (fofa, medianamente compacta e compacta), logo, para cada rugosidade apresentou-se três colunas de dados, cada uma referente a uma compactidade. Já os grupos 2 e 3 apresentaram resultados para uma única compactidade e dois formatos dos grãos (arredondados – subarredondados e

angulares – subangulares), os gráficos estatísticos desses grupos, portanto, apresentam duas colunas para cada rugosidade representando cada formato dos grãos. Os dados do agrupamento estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Referências utilizadas

| Grupo | Referência | Interface | Rugosidade | σ_n (kPa) | Formato dos grãos | Densidade relativa |
|-------|--|-------------------------|-------------------------|------------------|--|--------------------|
| 1 | Dietz and Lings (2006) | Aço | R_a (μm) | 25 | Arredondados - Subarredondados | Fofa a Compacta |
| 2 | Reddy et al. (2000) Frost et al. (2002) Dietz and Lings (2006) Pando et al. (2006) | Aço, madeira e concreto | R_a (μm) | 95 - 200 | Arredondados - Subarredondados Angulares - Subangulares | Compacta |
| 3 | Gómez et al. (2008) DeJong e Westgate (2009) Su et al. (2018) Samanta et al. (2018) Han et al. (2018) Uesugi and Kishida (1986) | Aço e concreto | R_n | 75 - 200 | Arredondados - Subarredondados Angulares - Subangulares | Compacta |

Após a separação dos estudos como descrito, os dados de ângulo de atrito e tensão cisalhante máxima foram analisados estatisticamente conforme o formato dos grãos, a compactidade relativa do solo e a rugosidade da interface. Posteriormente, procurou-se encontrar correlações entre a razão dos ângulos de atrito de interface e interno do solo e a rugosidade da interface.

3 Resultados

3.1 Análise da bibliografia

Para o grupo 1, composto pelos resultados dos estudos de Dietz e Lings (2006) obtidos com ensaios com tensão normal aplicada baixa (25kPa), tem-se os seguintes resultados.

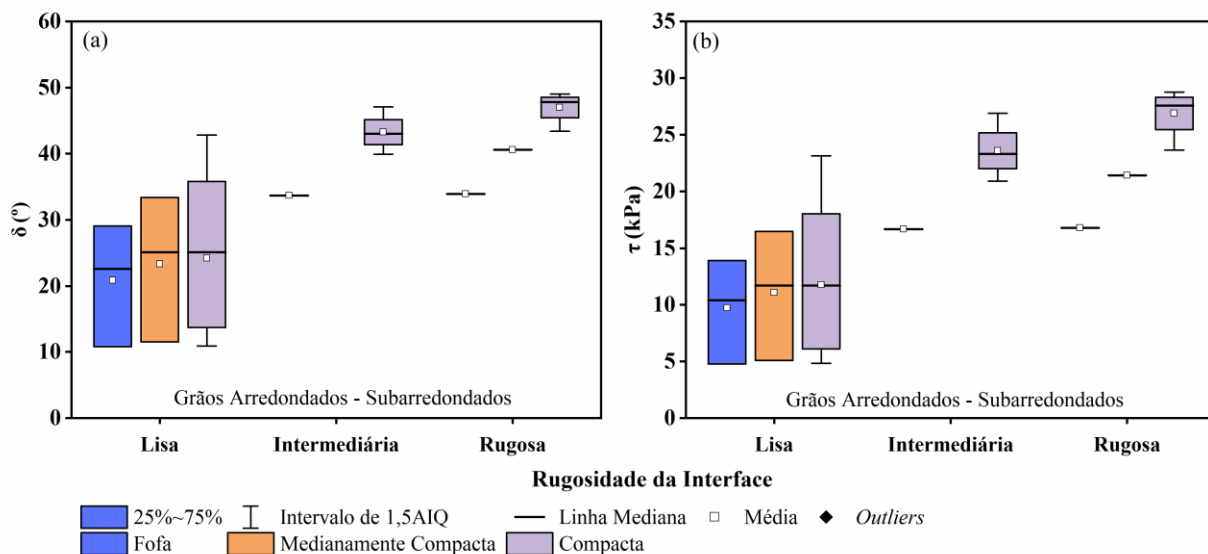


Figura 1. Análises estatísticas do Grupo 1: (a) Ângulo de atrito; (b) Tensão cisalhante máxima para tensão normal de 25kPa

Os gráficos do tipo *box plot* agregam uma visualização mais clara da distribuição dos resultados da literatura. Primeiramente percebe-se que os dados não apresentaram nenhum valor discrepante. Em segundo lugar, torna-se possível visualizar o crescimento dos valores de ângulo de atrito e de tensão cisalhante máxima

tanto para uma mesma rugosidade da interface, aumentando-se a compactidade, quanto para o aumento da rugosidade. O critério para classificação da face sólida quanto à rugosidade média foi determinado com base na análise das referências utilizadas, sendo considerado conforme a tabela abaixo.

Tabela 2. Classificação da rugosidade média

| Classificação | Intervalo (μm) |
|---------------|-----------------------------|
| Lisa | ≤ 10 |
| Intermediária | $10 < R_a < 70$ |
| Rugosa | ≥ 70 |

Para o Grupo 2, cuja divisão interna foi determinada pelo formato dos grãos de apenas densidades relativas maiores que 70% (compacta), novamente realizou-se análise dos dados de ângulo de atrito e de tensão cisalhante máxima conforme a rugosidade da interface seguindo o critério apresentado anteriormente. Os resultados estão apresentados na Figura 2.

Percebe-se o mesmo formato de valores crescentes de ângulo de atrito como na Figura 1(a), porém agora com relação ao formato dos grãos. Grãos mais angulares apresentaram resultados de ângulo de atrito maiores que grãos arredondados para uma mesma rugosidade da interface. Além disso, a tensão cisalhante máxima aumentou cerca de três vezes se comparado os dados análogos aos da Figura 1(b) devido ao aumento da tensão normal aplicada no ensaio. Novamente, os dados não apresentaram valores discrepantes e a maior parte dos subgrupos apresentaram os valores limites máximos e mínimos dentro do intervalo de 1,5 vezes a amplitude interquartil (AIQ).

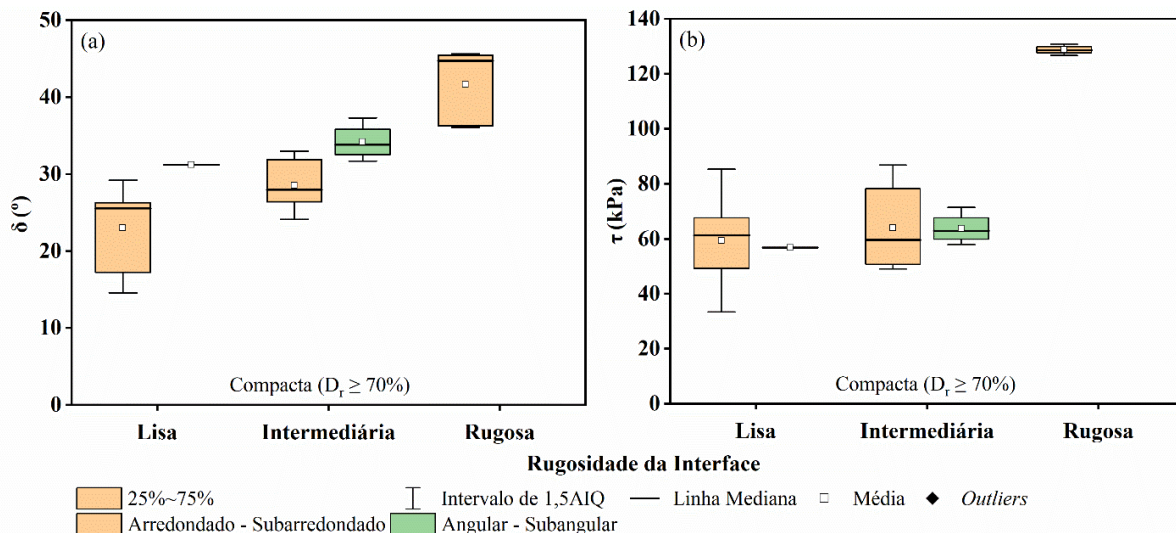


Figura 2. Análises estatísticas do Grupo 2: (a) Ângulo de atrito; (b) Tensão cisalhante máxima

Nos dados do Grupo 3 já são encontrados valores denominados de *outliers*, discrepantes do restante dos dados do mesmo subgrupo. Na Figura 3(a) percebe-se que não há uma diferença significativa e não se observa o aumento do ângulo de atrito entre as interfaces intermediária e rugosa, tendo a última alguns valores extremos. Na Figura 3(b) visualiza-se melhor esse aumento esperado da tensão cisalhante máxima com o aumento da rugosidade, menos significativo dentro dos subgrupos das rugosidades intermediária e rugosa. Nesse grupo de dados, comparado com os demais, é possível perceber uma maior variabilidade dos resultados devido à extensão da AIQ.

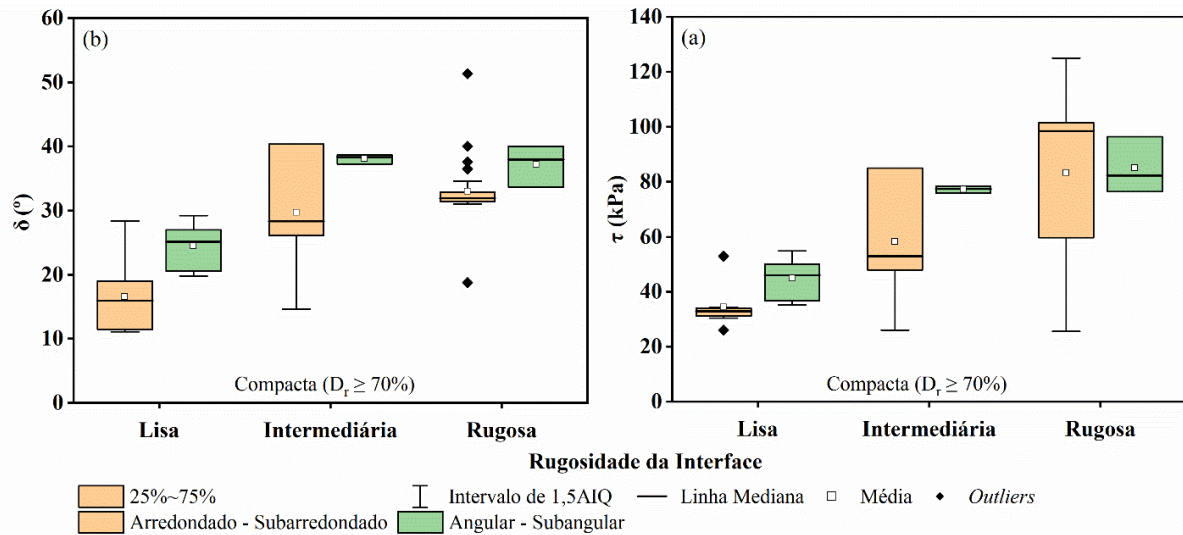


Figura 3. Análises estatísticas do Grupo 3: (a) Ângulo de atrito; (b) Tensão cisalhante máxima

3.2 Razão δ/ϕ

Com base nos dados adquiridos, procurou-se determinar correlações entre a razão δ/ϕ e a rugosidade da interface para cada grupo de dados. O Grupo 1 apresentou correlações bastante satisfatórias. Com o gráfico semi-logarítmico da Figura 4 é possível observar uma tendência de comportamento linear baseada na equação destacada, em que os coeficientes de ajuste μ e λ variam conforme os subgrupos dos dados. Os valores de μ e λ para cada subgrupo bem como o valor do coeficiente de determinação (R^2) estão apresentados na Tabela 3. Percebe-se que os valores de R^2 são bastante elevados, comprovando a validade dos modelos apresentados.

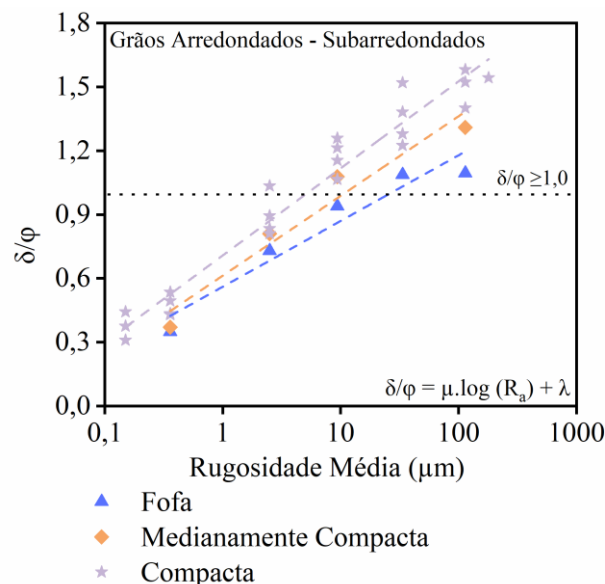


Figura 4. Gráfico δ/ϕ versus logarítmico da Rugosidade média para o Grupo 1

Tabela 3. Coeficientes das correlações do Grupo 1

| Subgrupo | μ | λ | R^2 |
|-----------------------|-------|-----------|-------|
| Fofa | 0,31 | 0,56 | 0,93 |
| Medianamente Compacta | 0,37 | 0,61 | 0,95 |
| Compacta | 0,41 | 0,71 | 0,96 |

O Grupo 1 é o único grupo em que não há variação do material da face sólida, sendo todos os ensaios realizados com aço, apenas com variação na forma com que a rugosidade é adquirida e conseqüentemente no seu valor. Percebe-se que para os ensaios com areia compacta, para uma mesma rugosidade, há valores diferentes da razão δ/φ , fato que provavelmente se deve à variação na areia utilizada. Além disso, pode-se observar que para rugosidade acima de $10\mu\text{m}$ as areias de compacidades média e alta apresentaram razão maior que 1,0, ou seja, com o ângulo de atrito de interface maior que o ângulo de atrito interno do solo. A maior parte desses resultados advêm da interface em que as areias ensaiadas foram aderidas à placa de aço com cola, formando superfícies irregulares que provocaram ângulos de atrito da ordem de 40° .

O Grupo 2 também apresentou correlação satisfatória para os grãos do tipo arredondados – subarredondados. Agora, por sua vez, o modelo que se adequou aos dados apresentados foi do tipo exponencial conforme indicado na Figura 5. Para os dados de grãos com formato angular – subangular apresentou-se a mesma formulação, porém devido à falta de dados, não se conseguiu averiguar de maneira satisfatória sua validade. Os valores dos coeficientes de ajuste α , β e γ , assim como o valor de R^2 estão dispostos na Tabela 4.

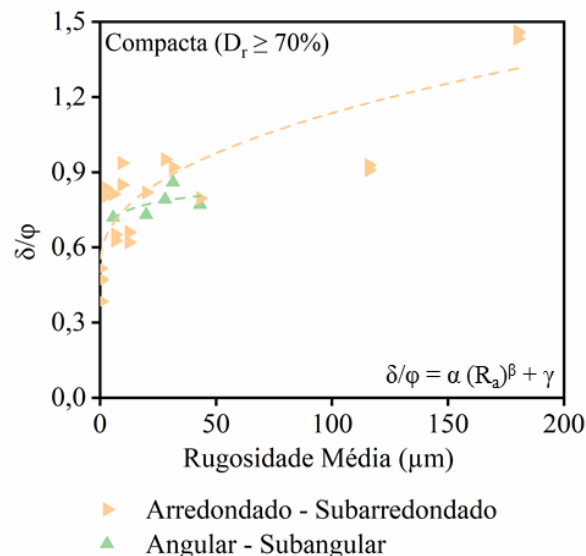


Figura 5. Gráfico δ/φ versus Rugosidade média para o Grupo 2

Tabela 4. Coeficientes da correlação do Grupo 2

| Subgrupo | α | β | γ | R^2 |
|--------------------------------------|----------|---------|----------|-------|
| Grãos arredondados - subarredondados | 0,08 | 0,43 | 0,52 | 0,75 |

Os valores discrepantes, próximos de 1,5, são coerentes com os ensaios de Dietz e Lings (2006) e são justificados pelo método de obtenção da rugosidade citado anteriormente, com a aderência da areia ensaiada à placa de aço. A diferença entre esses pontos e os correspondentes à rugosidade em torno de $115\mu\text{m}$ pode residir nos fatos de que estes foram ensaiados com interface de concreto, ou seja, há uma variação com tendência a diminuição do ângulo de atrito, e de que o ângulo de atrito interno da areia em questão é muito maior do que o da areia com razão $\delta/\varphi \approx 1,5$.

Para o Grupo 3, único com utilização do parâmetro de rugosidade normalizada, percebe-se um comportamento semelhante ao descrito por Uesugi e Kishida (1986), em que o valor do ângulo de atrito da interface aumenta com o aumento da rugosidade normalizada até um valor limite, no caso $R_n=0,5$, a partir do qual não há mudanças no valor de δ . Pode-se perceber um valor máximo em torno de 0,96 no gráfico da Figura 6.

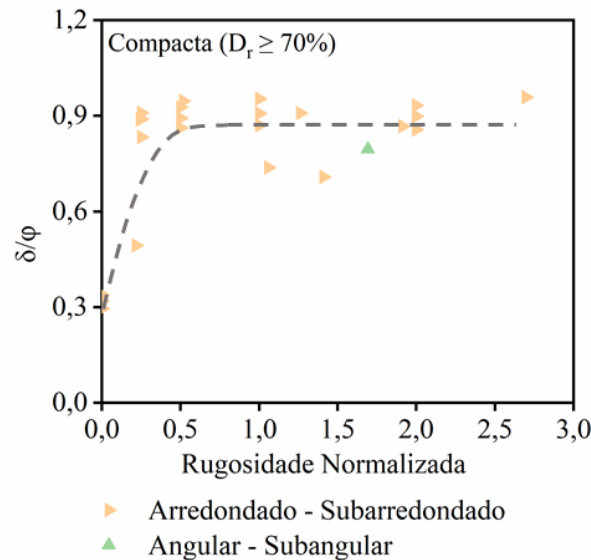


Figura 6. Gráfico δ/ϕ versus Rugosidade média para o Grupo 3

4 Conclusões

As análises realizadas com os dados compilados dos artigos confirmaram a correlação crescente do ângulo de atrito de interface com a rugosidade. Além disso, indicaram que os outros parâmetros analisados também influenciaram nesse resultado, como a angulosidade dos grãos e a densidade relativa da amostra ensaiada. Os resultados foram bastante consistentes, com baixa variabilidade e poucos pontos discrepantes tanto para os dados de ângulo de atrito, como para os dados de tensão cisalhante máxima.

Para as correlações da razão dos ângulos de atrito de interface e interno do solo com a rugosidade os resultados foram satisfatórios trazendo observações relevantes quanto ao comportamento global da interface solo-estaca. Para as referências do Grupo 1 foi possível atribuir modelos lineares em um gráfico semi-logarítmico para as três compacidades analisadas. Observou-se que a maior parte dos resultados apresentou razão δ/ϕ maior que 1,0 para as amostras de compacidades média e alta para rugosidades acima de $10\mu\text{m}$, de maneira geral advindos da interface em que as areias ensaiadas foram aderidas à placa de aço com cola. Acredita-se que a formação de uma superfície totalmente irregular e de perfil heterogêneo tenha provocado um maior entrosamento entre as partículas com aumento significativo o ângulo de atrito de interface. Essa peculiaridade se diferiu dos demais grupos, em que valores superiores à unidade foram escassos.

O Grupo 2 apresentou correlação com bom coeficiente de determinação para as amostras de solo com grãos arredondados – subarredondados. Para grãos angulares – subangulares, porém, a ausência de número elevado de dados impossibilitou a caracterização de um modelo. Novamente, foram observados pontos com razão δ/ϕ maior que 1,0, porém agora em número reduzido. Esses pontos seguem a mesma explicação apresentada para a grande maioria dos pontos do Grupo 1 citada anteriormente, porém ensaiados com tensões normais maiores que justificam o Grupo designado.

Por fim, para o Grupo 3 foi possível observar comportamento similar ao apresentado por Uesugi e Kishida (1986), em que δ/ϕ tendeu a um valor máximo constante a partir de uma determinada rugosidade normalizada, que para as referências analisadas foi R_n de 0,5. O trecho inicial ascendente do modelo não é bem definido, porém apresenta uma possibilidade de comportamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa (concessão nº 1610466 / 2019-3) e bolsa de produtividade em pesquisa.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASME (2009) Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay).
- DeJong, J. T., Westgate, Z. J. (2009) Role of Initial State, Material Properties, and Confinement Condition on Local and Global Soil-Structure Interface Behavior. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11), p. 1646–1660.
- Dietz, M. S., Lings, M. L. (2006) Postpeak Strength of Interfaces in a Stress-Dilatancy Framework. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), p. 1474–1484.
- Frost, J. D., Dejong, J. T., Recalde, M. (2002) Shear failure behavior of granular – continuum interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, 69, p. 2029–2048.
- Gómez, J. E. *et al.* (2008) Sand-to-Concrete Interface Response to Complex Load Paths in a Large Displacement Shear Box. *Geotechnical Testing Journal*, 31(4), p. 358–369.
- Han, F. *et al.* (2018) Effects of Interface Roughness, Particle Geometry, and Gradation on the Sand–Steel Interface Friction Angle. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(12).
- Martinez, A., Frost, J. D. (2017) The influence of surface roughness form on the strength of sand–structure interfaces. *Géotechnique Letters*, 7(1), p. 104–111.
- Pando, M. A. *et al.* (2006) *A laboratory and field study of composite pile for bridge substructures*. Federal Highway Administration. Disponível em: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=789882>.
- Potyondy, J. G. (1961) Skin Friction Between Various Soils and Construction Materials. *Géotechnique*, 11, p. 339–353.
- Reddy, E. S., Chapman, D. N., Sastry, V. V. R. N. (2000) Direct Shear Interface Test for Shaft Capacity of Piles in Sand. *Geotechnical Testing Journal*, 23(2), p. 199–205.
- Samanta, M., Punetha, P., Sharma, M. (2018) Effect of roughness on interface shear behavior of sand with steel and concrete surface. *Geomechanics and Engineering*, 14(4), p. 387–398.
- Su, L. *et al.* (2018) Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface. *Measurement*, 122, p. 339–346.
- Uesugi, M., Kishida, H. (1986a) Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel. *Soils and Foundations*, 26(4), p. 139–149.
- Uesugi, M., Kishida, H. (1986b) Influential factors of friction between steel and dry sands. *Soils and Foundations*, 26(2), p. 33–46.
- Uesugi, M., Kishida, H., Tsubakihara, Y. (1988) Behavior of sand particles in sand-steel friction. *Soils and Foundations*, 28(1), p. 107–118.