

# ENSAIOS DE CISALHAMENTO SIMPLES NA AREIA DA PRAIA DE IPANEMA

## Direct simple shear tests on the Ipanema Beach sand

Tiago E. S. Schuck<sup>a</sup>, Vitor N. Aguiar<sup>b</sup>, Graziella M. F. Jannuzzi<sup>c</sup>, Alberto S. F. J. Sayão<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

<sup>b</sup> Fugro, Brasil

<sup>c</sup> Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

**RESUMO** – Este trabalho teve como objetivo investigar o comportamento tensão-deformação-resistência da areia da Praia de Ipanema/RJ, Brasil, em ensaios de cisalhamento simples (DSS), realizados em corpos de prova cilíndricos secos, cisalhados a volume constante sob carregamento monótono de deformação controlada. Os corpos de prova foram moldados em classificações de compactidade relativa (CR) que variaram de fofo a muito compacto, e cisalhados a partir de valores de tensão vertical inicial ( $\sigma_0$ ) que variaram de 25 a 750 kPa. Os resultados permitiram avaliar a influência de  $\sigma_0$  e do índice de vazios pré-cisalhamento (epc) no comportamento tensão-deformação durante o cisalhamento simples.

**ABSTRACT** – This paper aimed to investigate the stress-strain-strength behavior of the Ipanema Beach (RJ) sand, Brazil, in direct simple shear tests (DSS), carried out on dry cylindrical specimens, sheared at constant volume under strain-controlled monotonic loading. The specimens were prepared in relative density classifications ranging from loose to very dense and sheared from initial vertical stress values ( $\sigma_0$ ) that varied from 25 to 750 kPa. The influence of  $\sigma_0$  and pre-shear void ratio on the stress-strain behavior during the direct simple shear was evaluated.

**Palavras Chave** – ensaio de cisalhamento simples (DSS), areia, resistência ao cisalhamento, compactidade relativa.

**Keywords** – simple shear test, sand, shear strength, relative density.

## 1 – INTRODUÇÃO

Em função da ocorrência de espessos depósitos de argila mole ao longo do litoral brasileiro, onde está concentrada a maior parte das cidades mais populosas do país, aliada aos desafios de engenharia decorrentes das características geotécnicas deste tipo de solo (baixa permeabilidade e elevada compressibilidade, o que resulta em baixo coeficiente de adensamento; comportamento não drenado frente às solicitações mais comuns de engenharia; baixa resistência não drenada etc.), inúmeras pesquisas já foram e estão sendo desenvolvidas no âmbito acadêmico para determinação das propriedades geotécnicas desses depósitos. Por outro lado, são poucas as pesquisas que visam investigar as propriedades geotécnicas dos depósitos de areia do litoral brasileiro, como por exemplo, a desenvolvida por Oliveira Filho (1987), que realizou ensaios triaxiais CID na areia da Praia de São Francisco, Niterói, RJ. Visando suprir ao menos em parte essa carência, em 2014, foi iniciado um programa de pesquisa na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) com a

---

E-mails: tiagoschuck@yahoo.com.br (T.Schuck), vitor.aguiar@fugro.com (V.Aguiar), jannuzzi@coc.ufrj.br (G.Jannuzzi), sayao@puc-rio.br (A.Sayão)

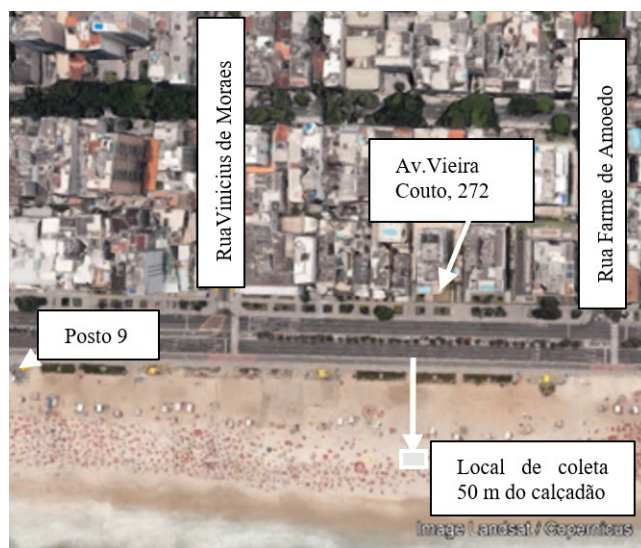
finalidade de determinar as propriedades geotécnicas das areias do litoral do estado do Rio de Janeiro, Brasil. Embora o programa tenha sido iniciado com a areia da praia de Itaipuaçu, Niterói (Nunes, 2014), a areia da Praia de Ipanema, na cidade do Rio de Janeiro, tem sido, até então, a mais estudada, com a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) unindo-se à UFRJ nesta linha de pesquisa (Simões, 2015; Costa, 2020; Coutinho, 2021; Soares et al, 2022 e Domingos, 2022). Ainda antes da criação desta linha de pesquisa, a areia da Praia de Ipanema já tinha sido objeto de investigação na PUC-Rio (Ratton, 1993). Conforme destacado por Costa et al. (2022), a areia da Praia de Ipanema é relevante no contexto da engenharia geotécnica por se encontrar numa região de alta densidade populacional, com muitas obras civis e de infraestrutura urbana, a exemplo da recente expansão do metrô da cidade do Rio de Janeiro.

No âmbito desta linha de pesquisa, um programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de investigar a influência da compacidade relativa (CR) e da tensão vertical inicial ( $\sigma_0$ ) no comportamento tensão-deformação-resistência da areia da Praia de Ipanema em ensaios de cisalhamento simples (DSS). Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos secos, cisalhados a volume constante, sob carregamento monótono de deformação controlada. Neste artigo, os principais resultados desse programa de ensaios são apresentados e analisados.

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 – Coleta e preparação da amostra

A amostra deformada da areia da Praia de Ipanema foi coletada próximo ao Posto 9, em frente ao edifício nº 272 da Avenida Vieira Souto, a cerca de 50 m de distância do calçadão (Figura 1). Com a finalidade de evitar resíduos na amostra, foi removida uma camada superficial da areia de cerca de 20 cm de espessura. Em seguida, cerca de 20 kg de areia foram coletados e transportados ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, onde a amostra foi preparada e submetida aos ensaios de caracterização geotécnica. A areia foi lavada com água destilada com o objetivo de diminuir a concentração de sais e retirar impurezas. Em seguida, a amostra foi mantida em estufa a 60° C por 24 horas para secagem, sendo posteriormente armazenada em um recipiente plástico para evitar contaminação. O teor de umidade da areia foi determinado através do método da estufa, obtendo-se um valor médio de 0,05 %.

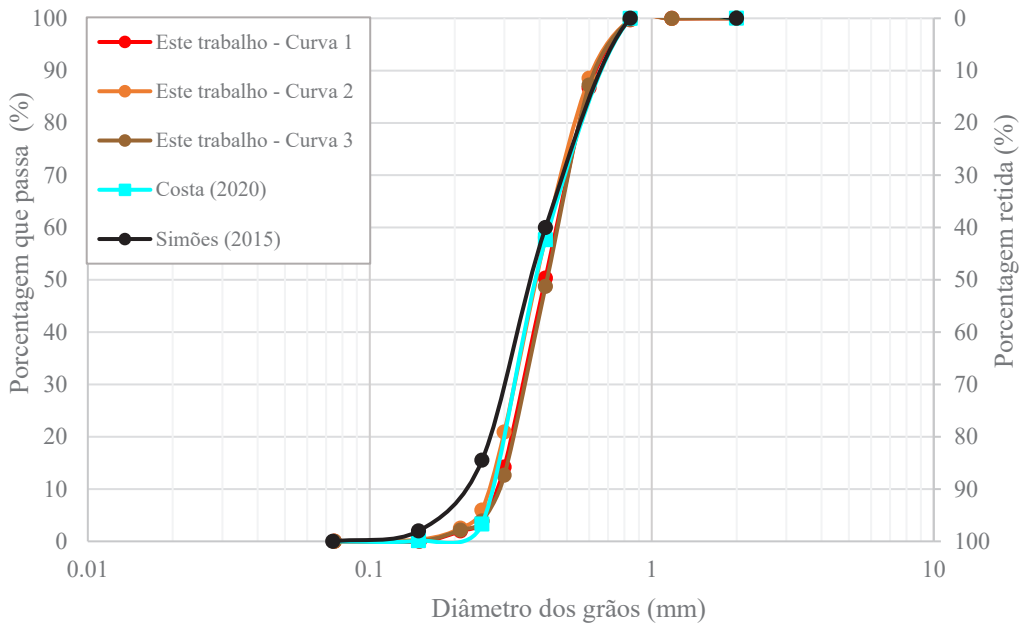


**Fig. 1** – Local de coleta da amostra da areia da Praia de Ipanema (Google Earth).

## 2.2 – Caracterização geotécnica

A análise granulométrica foi realizada com três ensaios de peneiramento, seguindo a norma NBR 7181 (ABNT, 2016). Constatou-se que nenhuma fração da amostra passava na peneira nº 200 (abertura 0,075 mm). A Figura 2 apresenta as três curvas granulométricas da areia da Praia de Ipanema obtidas neste trabalho, juntamente com as curvas granulométricas obtidas por Simões (2015) e Costa (2020) em amostras coletadas exatamente no mesmo local (Figura 1).

A partir das três curvas granulométricas deste trabalho, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), norma D 2487 (ASTM, 2017), a areia da Praia de Ipanema é composta por 60 % de areia fina e 40 % de areia média, com  $D_{10} = 0,28$  mm,  $D_{30} = 0,35$  mm,  $D_{50} = 0,41$  mm e  $D_{60} = 0,45$  mm, que levam a valores de coeficiente de não uniformidade (CNU) de 1,61 e de coeficiente de curvatura (CC) de 0,97, sendo classificada como “poorly graded sand” (SP), isto é, “areia mal graduada”, conforme a Figura 2. De acordo com a norma NBR 6502 (ABNT, 1995), o valor de CC leva ainda a areia a ser classificada como “uniforme”. Portanto, a areia da Praia de Ipanema é classificada como “areia fina e média, mal graduada e uniforme”



**Fig. 2** – Curvas granulométricas da areia da Praia de Ipanema.

Com base na análise microscópica realizada em uma amostra coletada no mesmo local (Figura 1), Costa et al. (2022) constataram que a areia da Praia de Ipanema é composta por grãos de quartzo, com alguns fragmentos de concha. Com base no gabarito de Pettijohn (1949), apud Lambe & Whitman (1969, p.45), foram identificados na amostra grãos sub-angulares a sub-arredondados. De acordo com o gabarito de Krumbein & Sloss (1963) apud Cho et al. (2006), os grãos possuem esfericidade (S) de 0,7, arredondamento (R) de 0,5, e regularidade ( $\rho$ ) de 0,6, corroborando a classificação obtida pelo gabarito de Pettijohn (1949).

Neste trabalho, em três determinações de densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) realizadas pelo ensaio do picnômetro seguindo a norma NBR 6458 (ABNT, 2016b), obteve-se um valor médio de 2,654.

Os ensaios de determinação de índice de vazios máximo e mínimo foram realizados não apenas para a caracterização da areia da Praia de Ipanema, mas principalmente para o planejamento dos procedimentos que viriam a ser adotados para moldagem dos corpos de prova dos ensaios de DSS. Para tanto, foram realizados também ensaios de determinação de índice de vazios intermediários.

Costa et al. (2022), Coutinho (2021) e Soares et al. (2022) compararam resultados obtidos pela aplicação de diferentes métodos indicados na literatura para determinação do índice de vazios máximo ( $e_{\text{máx}}$ ) da areia da Praia de Ipanema. No presente trabalho, com base na experiência adquirida pelos referidos autores, foi utilizado o método B da norma ASTM D 4254-16 (2016). Ciente da influência das dimensões do molde nos resultados, foi utilizado um molde cilíndrico de latão com dimensões internas iguais às dos corpos de prova dos ensaios DSS ( $d = 63,5$  mm,  $h = 16,0$  mm,  $V = 51$  cm<sup>3</sup>), e um tubo de acrílico com dimensões internas apropriadas ao molde conforme preconizado pela referida norma ( $d = 44,5$  mm e  $h = 42,4$  mm). Nas dez determinações efetuadas, foram obtidos valores de índice de vazios entre 0,672 e 0,695, sendo o valor médio igual a 0,683. Esses valores são menores do que o valor de  $e_{\text{máx}}$  obtido por Costa et al. (2022) na areia da Praia de Ipanema, igual a 0,760, também pelo método B da norma ASTM D 4254-16 (2016), porém utilizando como molde o cilindro Proctor Normal ( $V = 1000$  cm<sup>3</sup>).

Para a determinação dos índices de vazios mínimo e intermediários, foi aplicado o método de pluviação através de peneiras (Miura & Toki, 1982), utilizando funis com diâmetros de boca iguais a 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 mm. O método prevê que quanto menor o diâmetro da boca do funil, menor o índice de vazios ( $e$ ) obtido para a mesma altura de queda. Foi utilizada uma sequência de sete peneiras, sendo, de cima para baixo, quatro peneiras n° 4 (malha com abertura de 4,75 mm) e três peneiras n° 5/16" (malha com abertura de 7,94 mm). Com essa sequência, obteve-se uma pluviação de areia bastante uniforme.

O molde utilizado foi o mesmo descrito para obtenção do índice de vazios máximo. Foram realizadas duas baterias de ensaios, sendo que, em cada bateria, foram realizadas cinco determinações para cada diâmetro. A Figura 3 apresenta as curvas “índice de vazios x diâmetro da boca do funil” obtidas nas duas baterias. As curvas passam pelos valores médios de “ $e$ ” obtidos para cada diâmetro

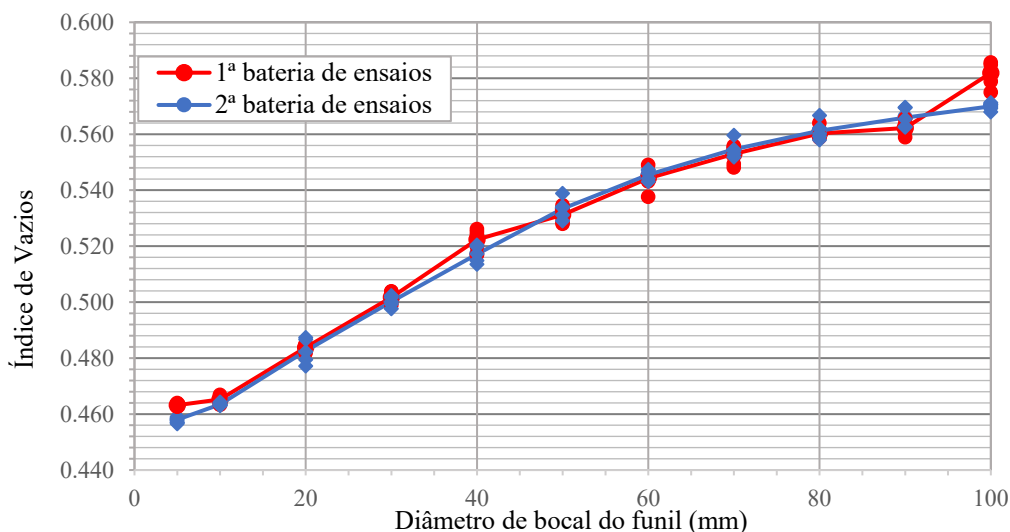


Fig. 3 – Curvas “índice de vazios x diâmetro da boca do funil”.

### 2.3 – Procedimento dos ensaios de cisalhamento simples (DSS)

Os ensaios de DSS foram realizados no Laboratório de Ensaio de Campo e Instrumentação Prof<sup>o</sup> Marcio Miranda Soares, da COPPE/UFRJ, no equipamento ShearTrac-II-DSS, Geocomp. Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos da areia da Praia de Ipanema, secos em estufa de 60 °C ( $w = 0,05\%$ ), com diâmetro de 63,5 mm e altura de 16 mm. Todos os ensaios, desde a moldagem dos corpos de prova até a finalização da etapa de cisalhamento, foram realizados mantendo a temperatura da sala em  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .

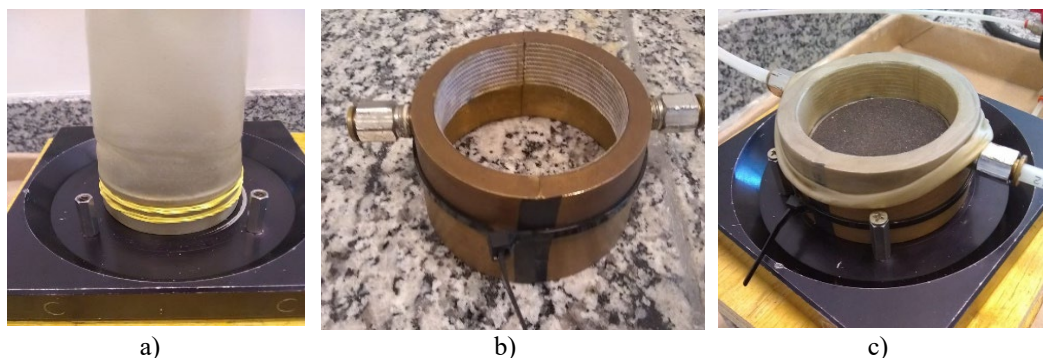
As classificações quanto à compactidade relativa (CR) utilizadas como referência para a moldagem dos corpos de prova foram as apresentadas por Lambe & Whitman (1969). Adotando como referência os valores de  $e_{\text{min}}$  e  $e_{\text{máx}}$  reportados por Costa et al. (2022), respectivamente iguais a 0,435 e 0,760, o valor médio de índice de vazios obtido aplicando o método B da norma ASTM D 4254-16 (2016) com o molde com as mesmas dimensões do corpo de prova do ensaio de DSS (item 2.2), igual a 0,683, corresponde a  $CR = 24\%$ . Este valor é superior ao limite máximo da classificação “muito fofo” de Lambe & Whitman (1969), igual a 15%, razão pela qual não foi possível moldar corpos de prova “muito fofos” para os ensaios de DSS. Para a moldagem dos corpos de prova nas demais classificações de CR foram adotados os métodos apresentados no Quadro 1, planejados com base nos valores de CR calculados a partir dos valores de índice de vazios obtidos dos ensaios de caracterização descritos no item 2.2.

**Quadro 1** – Métodos aplicados para moldagem dos corpos de prova dos ensaios de DSS com diferentes classificações de CR.

<b>Classificação quanto ao valor de CR</b>	<b>Intervalo de valores de CR (Lambe &amp; Whitman, 1969)</b>	<b>Método utilizado neste trabalho</b>	<b>Intervalo de valores de CR obtidos nos ensaios de caracterização deste trabalho (%)</b>
Fofo	15 % a 35 %	Método B da norma ASTM D 4254-16 (2016)	20 % a 27 % (*)
Médio	35 % a 65 %	Pluviação através de peneiras, funil $\phi = 100$ mm	55 % a 57 % (*)
Compacto	65 % a 85 %	Pluviação através de peneiras, funil $\phi = 40$ mm	73 % a 74 % (*)
Muito Compacto	85 % a 100 %	Pluviação através de peneiras, funil $\phi = 5$ mm	91 % a 93 % (*)

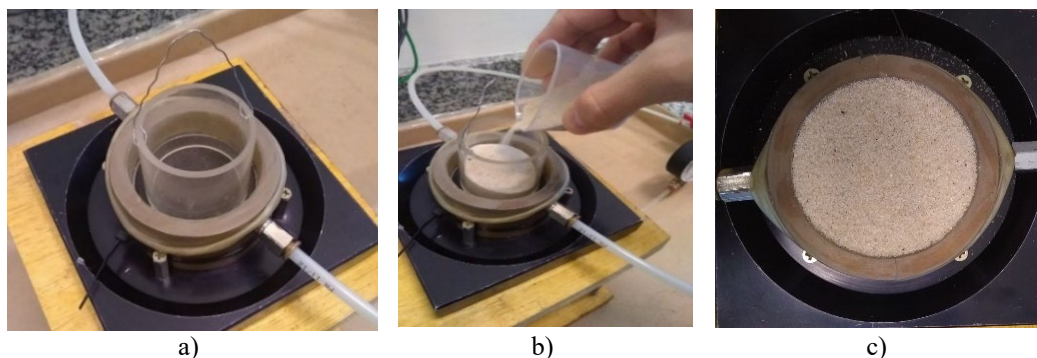
(\*) valores calculados com os valores de “e” obtidos nos ensaios de caracterização descritos no item 2.2 e considerando os valores de  $e_{\text{máx}}$  e  $e_{\text{min}}$  obtidos por Costa et al. (2022).

Os corpos de prova foram moldados diretamente sobre o pedestal do equipamento de DSS. Primeiramente, uma membrana de látex era fixada junto ao pedestal com elásticos de borracha (Figura 4a), e um molde bipartido de latão era montado e posicionado sobre o pedestal (Figuras 4b e 4c). Em seguida, uma sucção de 13 kPa era aplicada entre a parede interna do molde e a membrana via duas mangueiras acopladas ao molde por dois engates rápidos diametralmente opostos, com a finalidade de garantir a perfeita aderência da membrana à superfície interna do molde. A membrana era então dobrada junto à borda do molde (Figura 4c).



**Fig. 4** – (a) Posicionamento da membrana de látex; (b) Molde bipartido sendo montando(c) Membrana de látex dobrada junto à borda do molde bipartido.

Para moldagem dos corpos de prova fofos, realizada segundo o método B da norma ASTM D 4254-16 (2016), um tubo de acrílico era centralizado sobre o pedestal (Figura 5a) e, em seguida, a areia era depositada cuidadosamente dentro do tubo de acrílico (Figura 5b). Com uma caneta levantando o anel de arame fixado junto ao topo do tubo, realizava-se um movimento rápido vertical para cima, de forma a retirar o tubo de dentro do molde, com a areia preenchendo rapidamente todo o interior do molde (Figura 5c).



**Fig. 5** – (a) Tubo de acrílico centralizado sobre o pedestal; (b) Preenchimento do tubo com areia; (c) Molde preenchido com areia e superfície arrasada.

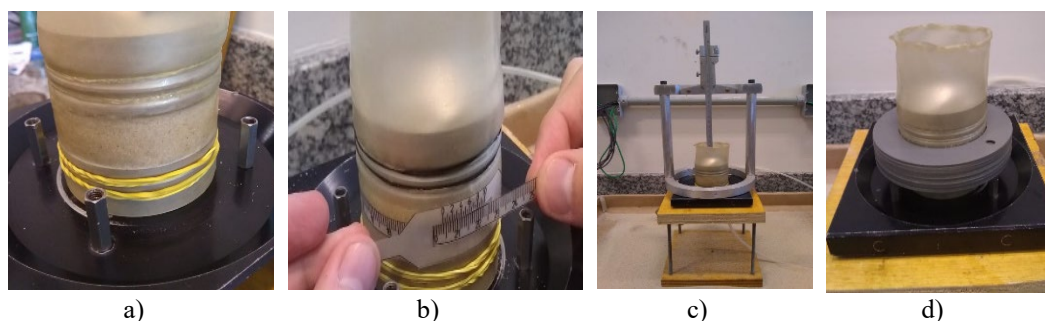
A moldagem dos corpos de prova médios, compactos e muito compactos foi realizada pelo método de pluviação através de peneiras utilizando a sequência de peneiras descrita no item 2.2 (Figura 6a). A areia era depositada dentro do funil, cuja boca era tampada com uma placa de madeira (Figura 6b). Com um movimento horizontal rápido, a placa de madeira era retirada, dando início à pluviação da areia através das peneiras, com deposição dentro do molde bipartido.

Após o preenchimento do molde com areia, o topo do corpo de prova era nivelado junto ao topo do molde, o cabeçote era posicionado sobre o corpo de prova e a membrana de látex era desdobrada, vestindo a lateral do cabeçote e presa ao cabeçote com elásticos de borracha. Para dar sustentação ao corpo de prova, antes da retirada do molde bipartido, era aplicada uma sucção de 5 kPa na base do corpo de prova por uma mangueira acoplada à base do pedestal. Em seguida, desconectavam-se as mangueiras laterais, o molde bipartido era retirado e verificava-se a uniformidade da geometria do corpo de prova (Figura 7a). Posteriormente, tomavam-se medidas do perímetro do corpo de prova com uma fita milimétrica (Figura 7b). A altura do corpo de prova era calculada a partir da distância vertical, tomada com um paquímetro de profundidade, entre a viga de um pórtico e o topo do



**Fig. 6** – (a) Aparato para moldagem dos corpos de prova médios, compactos e muito compactos; (b) Deposição da areia para iniciar a pluviação.

cabeçote (Figura 7c), e a partir da mesma distância tomada previamente de maneira idêntica, porém com um cilindro de aço de altura conhecida no lugar do corpo de prova. Com a sucção ainda aplicada à base do corpo de prova, uma camada bem fina de glicerina era passada ao longo da superfície externa da membrana, e dezessete anéis justapostos de teflon eram então cuidadosamente posicionados ao redor do corpo de prova (Figura 7d). Finalmente, limpava-se e pesava-se o conjunto “base do DSS + corpo de prova + cabeçote + acessórios” na mesma balança digital utilizada na pesagem prévia do mesmo conjunto porém sem o corpo de prova. O conjunto era então posicionado dentro da caixa de cisalhamento do equipamento DSS (Figura 8a).

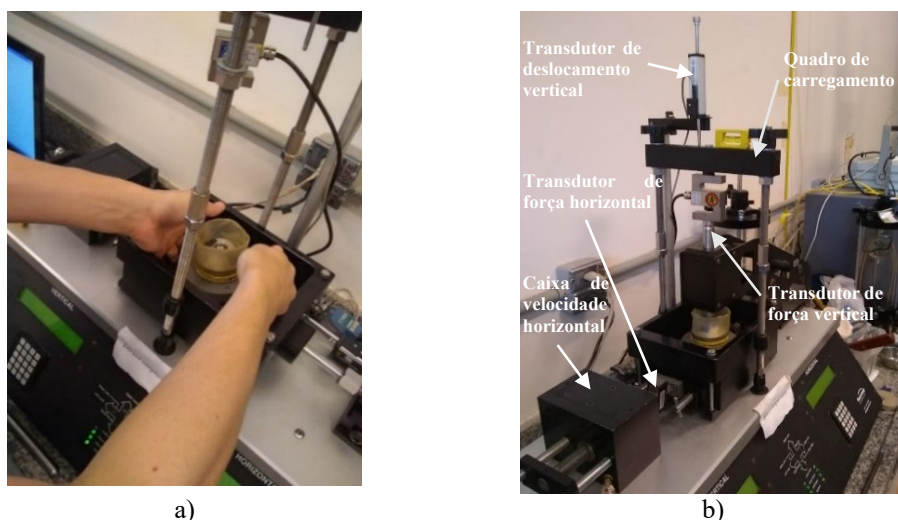


**Fig. 7** – Finalização da moldagem e tomada das medidas do corpo de prova.

O ensaio era constituído de duas fases: compressão edométrica e cisalhamento simples. Na fase de compressão edométrica, a força vertical e a consequente variação de altura do corpo de prova eram registradas por transdutores eletrônicos de força e de deslocamento, respectivamente. A fase de compressão edométrica era realizada em um único estágio de carregamento, com duração mínima de 10 min, mas até a estabilização da deformação vertical.

Antes de iniciar a fase de cisalhamento, calculava-se a altura pré-cisalhamento do corpo de prova descontando da altura inicial a variação de altura devido à tensão vertical inicial ( $\sigma_0$ ) aplicada na fase de compressão edométrica, levando-se em conta a compressibilidade do sistema, previamente determinada. Com este valor, calculava-se o deslocamento horizontal final a ser atingido na fase de cisalhamento, correspondente a uma distorção ( $\gamma$ ) de 30%. Calculava-se também a velocidade de deslocamento horizontal a ser imposta à caixa de cisalhamento, correspondente a

uma velocidade de distorção ( $dy/dt$ ) de 10 %/h. O cisalhamento era realizado a volume “constante” via servo-controle do equipamento, que ajustava a força vertical aplicada ao longo do cisalhamento de modo a manter a altura do corpo de prova “constante”. A velocidade de 10 %/h foi definida com base em resultados de ensaios preliminares realizados com o intuito de investigar a influência da velocidade no funcionamento do servo-controle do equipamento. Após a configuração do equipamento, iniciava-se a fase de cisalhamento, durante a qual eram registradas medidas de força horizontal, força vertical, deslocamento horizontal e deslocamento vertical por transdutores eletrônicos (Figura 8b).



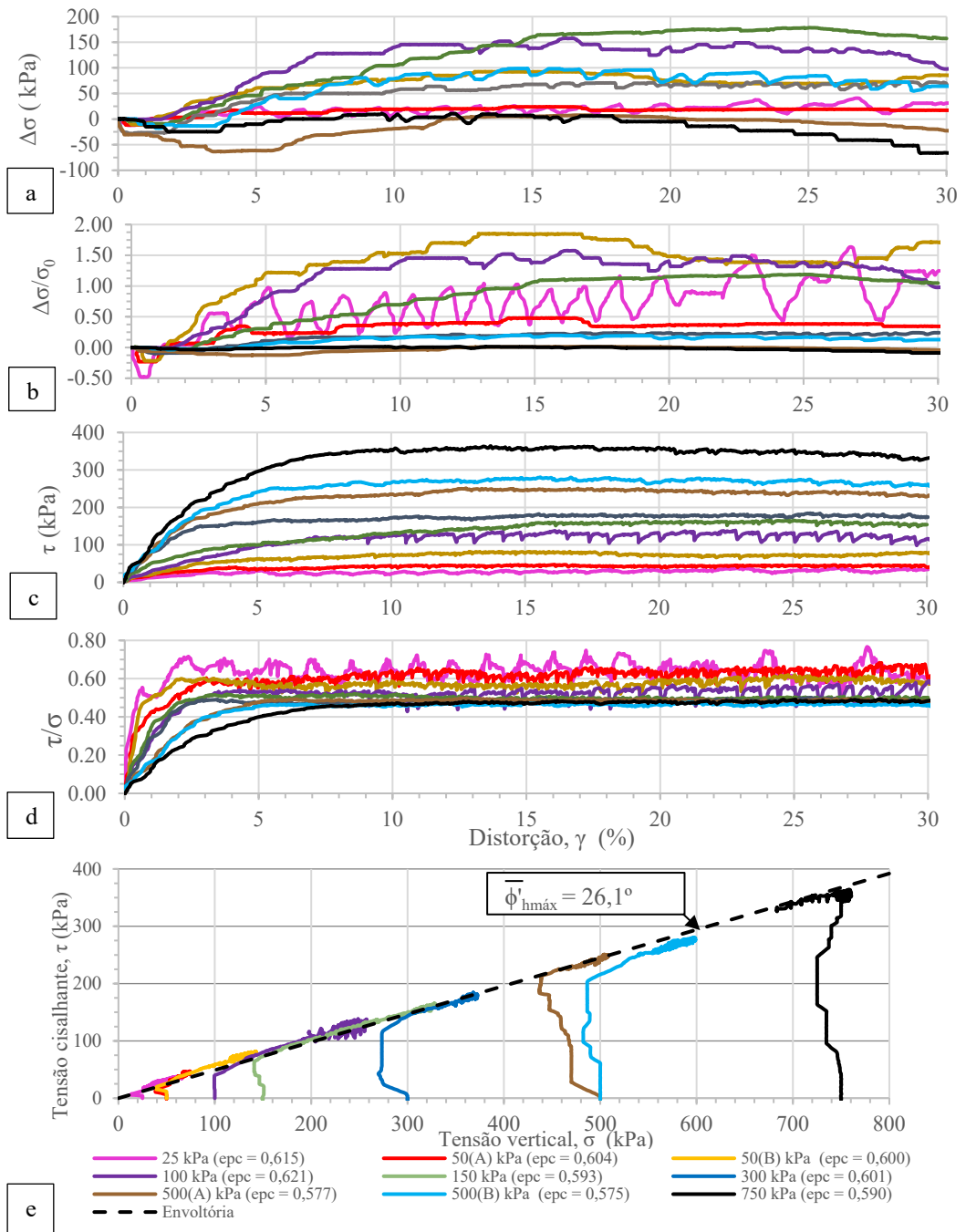
**Fig. 8** – (a) Posicionamento do conjunto no equipamento de DSS; (b) Equipamento DSS durante um ensaio.

Os ensaios de DSS foram realizados em corpos de prova moldados em quatro diferentes classificações de  $CR_0$ : fofo, médio, compacto e muito compacto. Para cada uma dessas classificações de  $CR_0$ , foram realizados ensaios sob sete diferentes valores de tensão vertical inicial ( $\sigma_0$ ): 25, 50, 100, 150, 300, 500 e 750 kPa. Para  $CR_0$  fofo, dois ensaios foram repetidos, sendo um com  $\sigma_0 = 50$  kPa e o outro com  $\sigma_0 = 500$  kPa. Sendo assim, foi realizado um total de trinta ensaios de DSS.

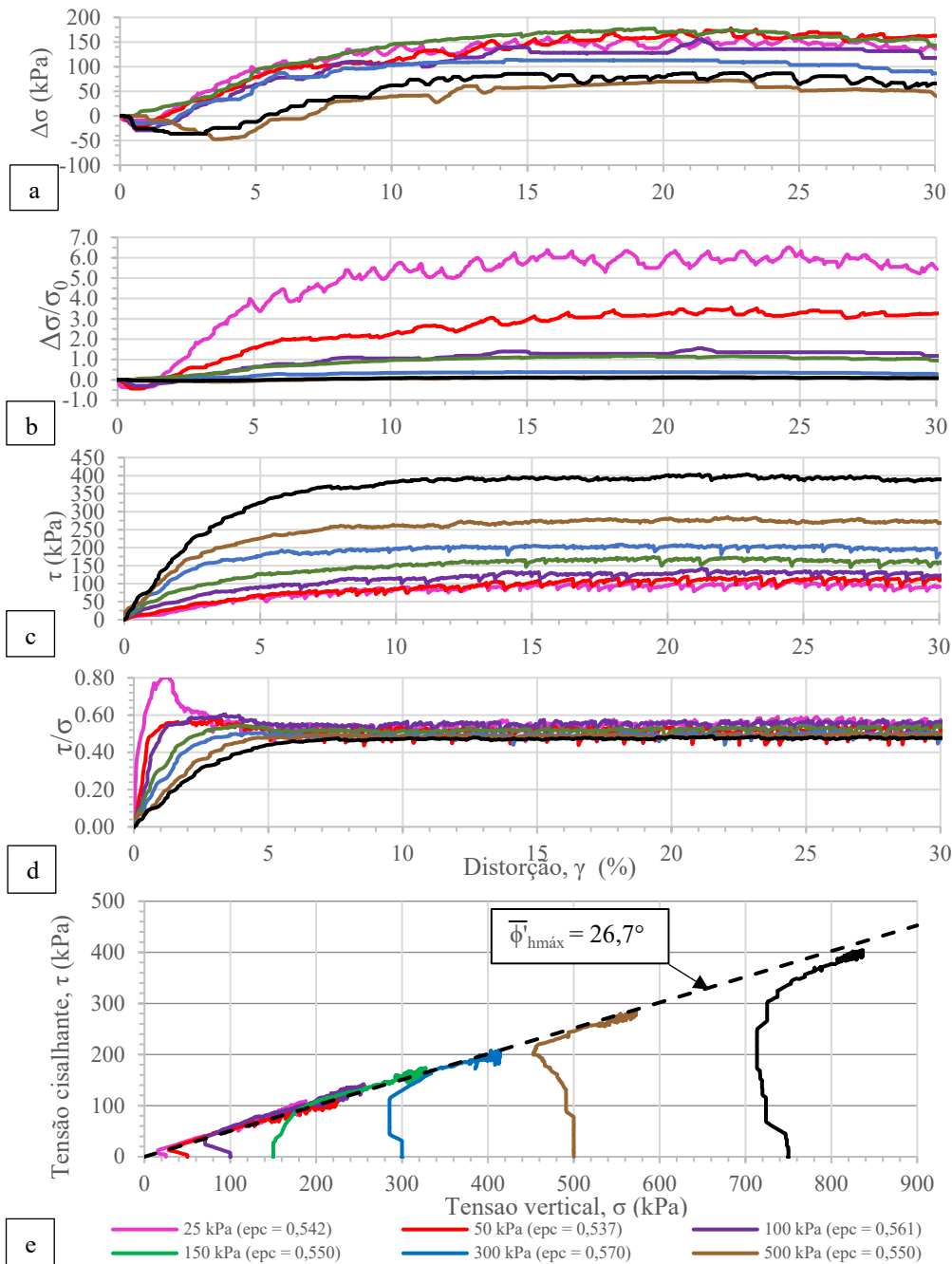
### 3 – RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS DE DSS

As Figuras 9 a 12 apresentam as seguintes curvas obtidas dos corpos de prova moldados das fases de cisalhamento dos ensaios de DSS, agrupadas por classificação de  $CR_0$ : variação da tensão vertical ( $\sigma_0$ ) versus  $\gamma$ ; ( $\Delta\sigma/\sigma_0$ ) versus  $\gamma$ ; tensão cisalhante no plano horizontal ( $\tau$ ) versus  $\gamma$ ; ( $\tau/\sigma$ ) versus  $\gamma$ ;  $\tau$  versus  $\sigma$ . As Figuras 13 e 14 apresentam as curvas  $\sigma$  versus  $\gamma$ ,  $\tau$  versus  $\gamma$ , ( $\tau/\sigma$ ) versus  $\gamma$  agrupadas por valor de  $\sigma_0$ , para  $\sigma_0 = 25$  kPa e  $\sigma_0 = 750$  kPa, respectivamente. As curvas agrupadas para os demais valores de  $\sigma_0$  são apresentadas por Schuck (2022). Nas legendas das figuras, os ensaios são identificados como “X kPa ( $e_{pc} = Y$ )”, onde X é o valor de  $\sigma_0$  em kPa, e Y é o valor do índice de vazios após a compressão edométrica, isto é, pré-cisalhamento ( $e_{pc}$ ). O Quadro 2 apresenta os valores de algumas grandezas obtidas dos ensaios de DSS

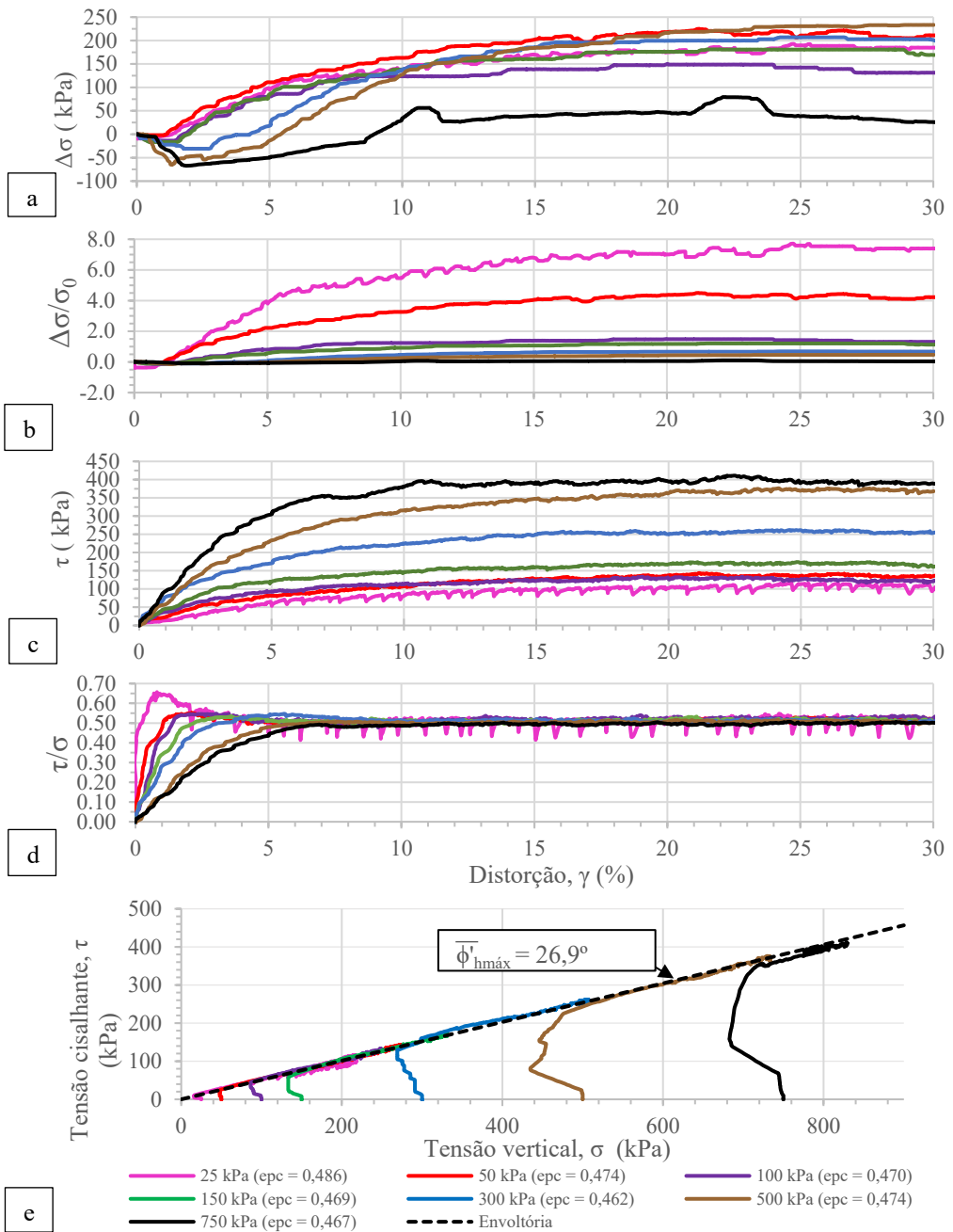




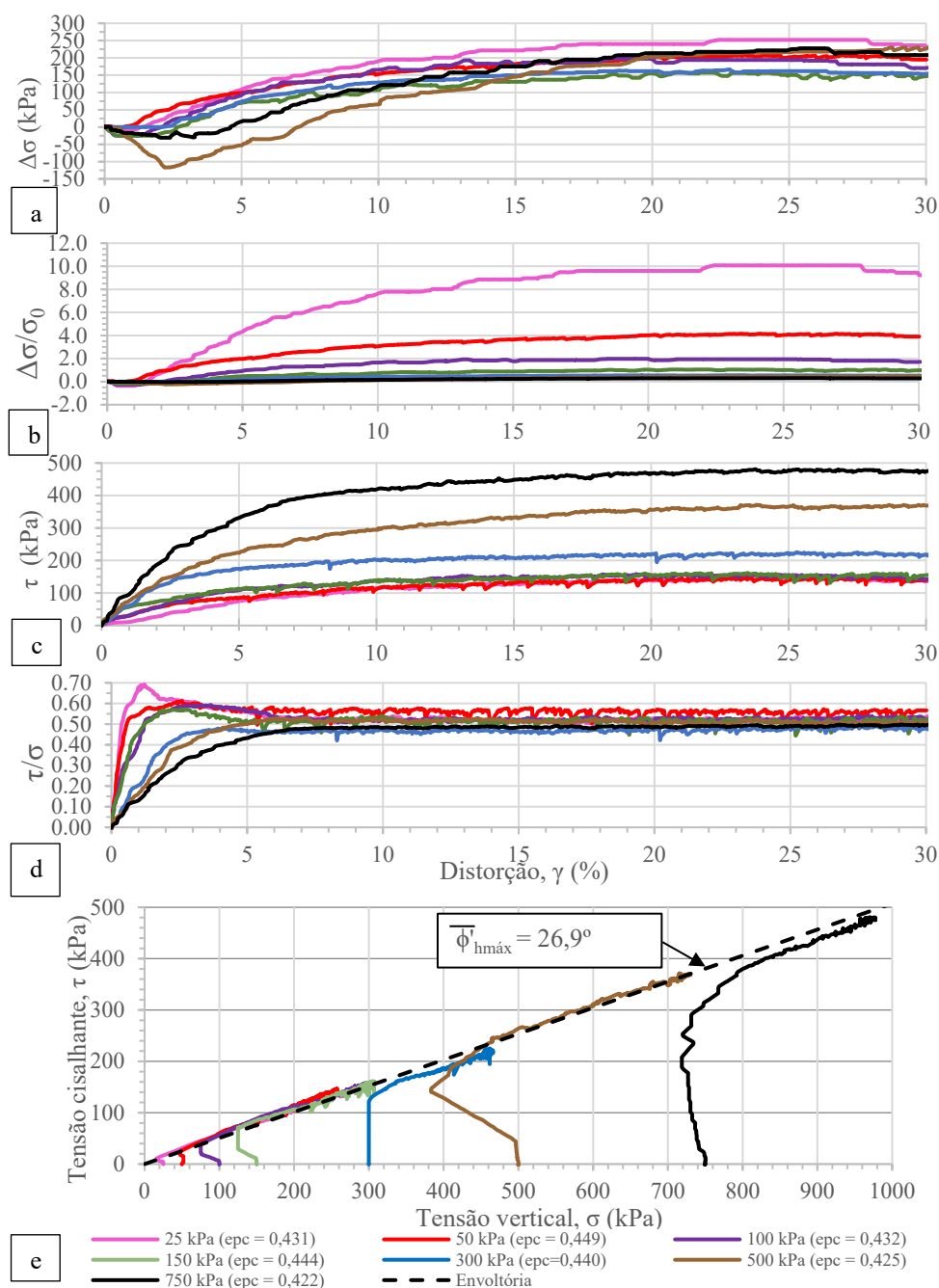
**Fig. 9** – Curvas (a)  $\Delta\sigma$  x  $\gamma$ , (b)  $(\Delta\sigma/\sigma_0)$  x  $\gamma$ , (c)  $\tau$  x  $\gamma$ , (d)  $\tau/\sigma$  x  $\gamma$  e (e)  $\tau$  x  $\sigma$  CR<sub>0</sub> fofo.



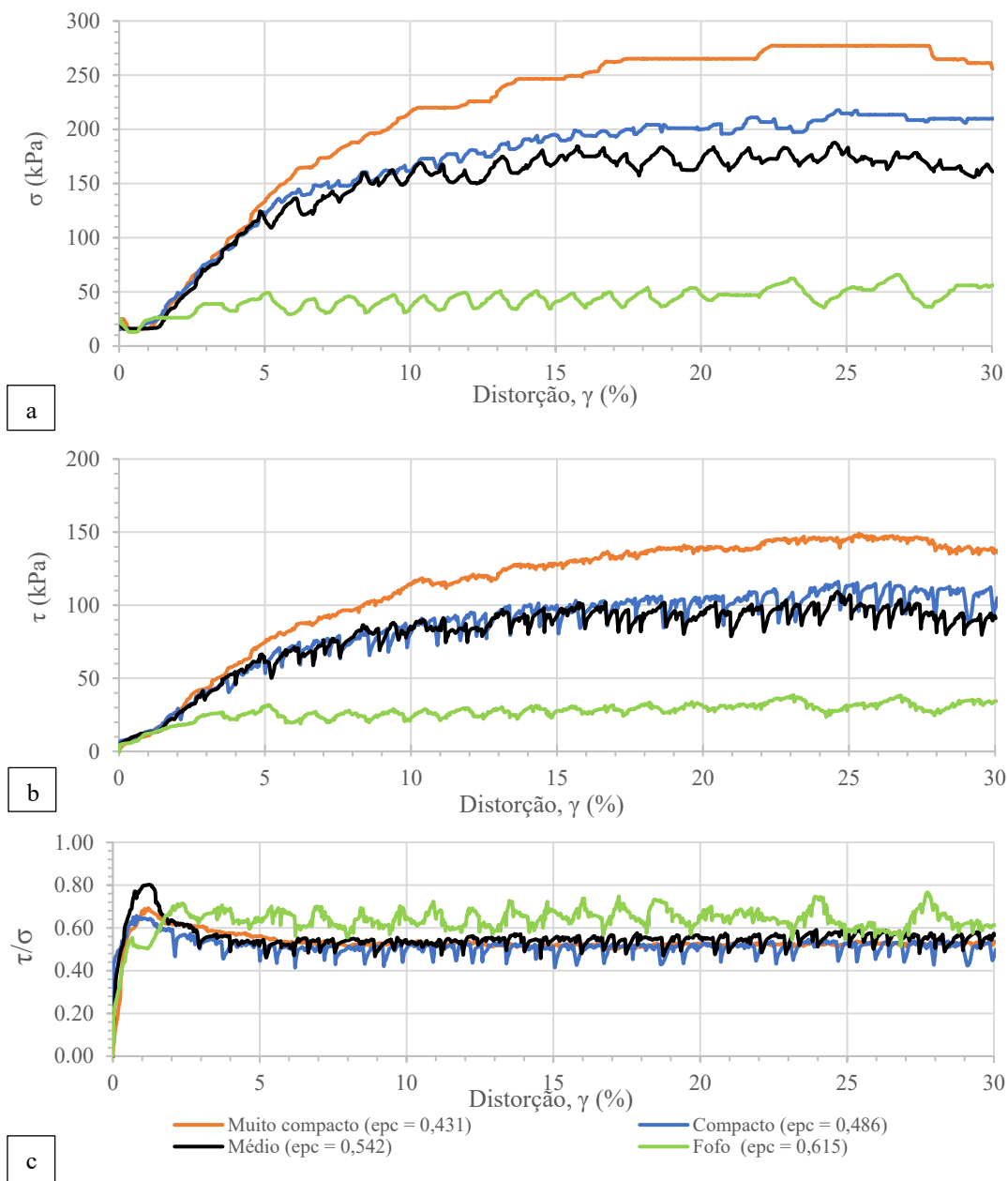
**Fig. 10** – Curvas (a)  $\Delta\sigma$  x  $\gamma$ , (b)  $(\Delta\sigma/\sigma_0)$  x  $\gamma$ , (c)  $\tau$  x  $\gamma$ , (d)  $\tau/\sigma$  x  $\gamma$  e (e)  $\tau$  x  $\sigma$  CR<sub>0</sub> médio.



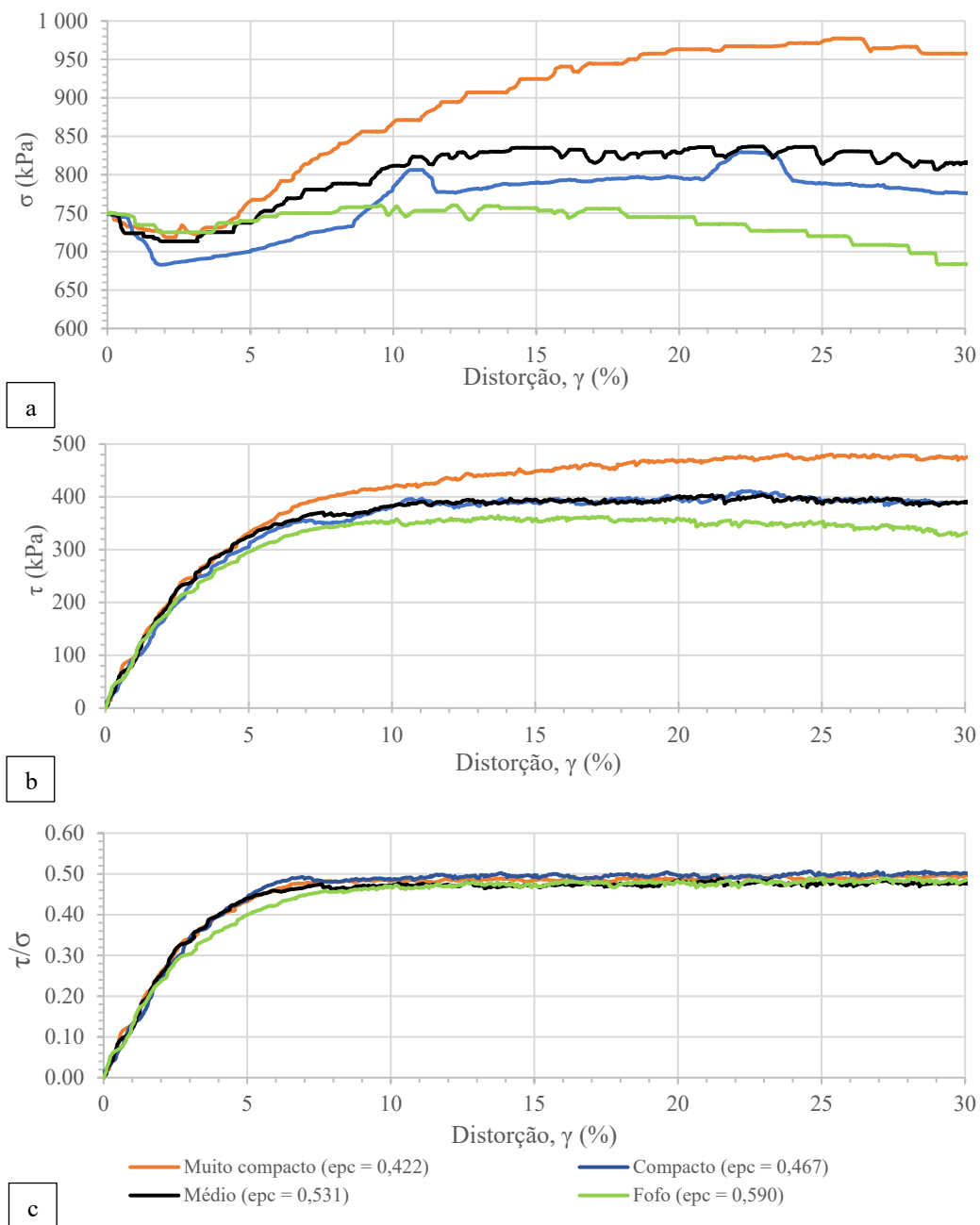
**Fig. 11** – Curvas (a)  $\Delta\sigma$  x  $\gamma$ , (b)  $(\Delta\sigma/\sigma_0)$  x  $\gamma$ , (c)  $\tau$  x  $\gamma$ , (d)  $\tau/\sigma$  x  $\gamma$  e (e)  $\tau$  x  $\sigma$  CR<sub>0</sub> compacto.



**Fig. 12** – Curvas (a)  $\Delta\sigma$  x  $\gamma$ , (b)  $(\Delta\sigma/\sigma_0)$  x  $\gamma$ , (c)  $\tau$  x  $\gamma$ , (d)  $\tau/\sigma$  x  $\gamma$  e (e)  $\tau$  x  $\sigma$  CR<sub>0</sub> muito compacto.



**Fig. 13** – Curvas (a)  $\sigma$  x  $\gamma$ , (b)  $\tau$  x  $\gamma$  e (c)  $\tau/\sigma$  x  $\gamma$  dos corpos de prova submetidos a  $\sigma_0 = 25$  kPa.



**Fig. 14** – Curvas (a)  $\sigma \times \gamma$ , (b)  $\tau \times \gamma$  e (c)  $\tau/\sigma \times \gamma$  dos corpos de prova submetidos a  $\sigma_0 = 750$  kPa.

**Quadro 2 – Resultados obtidos nos ensaios de DSS.**

e <sub>0</sub>	CR <sub>0</sub> (%)	Classif. de CR <sub>0</sub>	σ <sub>0</sub> (kPa)	Δh <sub>c</sub> (mm)	ε <sub>pc</sub>	CR <sub>pc</sub> (%)	Δσ <sub>máx</sub> (kPa)	Δσ <sub>máx</sub> /σ <sub>0</sub>	γ <sub>Δσmáx</sub> (%)	Mobilização máxima do atrito no plano horizontal			Ruptura		G <sub>2,5</sub> (kPa)	G <sub>50</sub> (kPa)
										(τ/σ) <sub>máx</sub>	φ <sub>h máx</sub> (°)	γ <sub>φ máx</sub> (%)	τ <sub>f</sub> (kPa)	γ <sub>f</sub> (%)		
0,651	34	Fofo	25	0,38	0,615	45	41	1,64	26,7	0,618	31,7	4,3	39	23,1	1257	787
0,674	26	Fofo	50(A)	0,72	0,604	48	24	0,48	15,8	0,588	30,5	4,7	47	16,1	1333	859
0,661	30	Fofo	50(B)	0,64	0,600	49	93	1,86	12,9	0,566	29,5	5,2	82	12,9	1954	1732
0,657	32	Fofo	100	0,42	0,621	43	158	1,58	16,2	0,526	27,7	5,7	138	22,9	2832	2070
0,645	35	Fofo	150	0,61	0,593	51	179	1,19	24,8	0,494	26,3	6,3	165	24,1	4922	2844
0,647	35	Fofo	300	0,56	0,601	49	72	0,24	23,0	0,477	25,5	7,1	185	25,6	8513	6495
0,640	37	Fofo	500(A)	0,83	0,577	56	10	0,02	16,6	0,486	25,9	7,4	251	12,8	7453	7225
0,639	37	Fofo	500(B)	0,85	0,575	57	100	0,20	14,8	0,476	25,5	8,1	281	15,6	9507	7372
0,651	34	Fofo	750	0,86	0,590	52	7,5	0,01	9,6	0,477	25,5	9,5	364	13,7	9455	8192
0,562	61	Médio	25	0,24	0,542	67	163	6,52	24,6	0,529	27,9	4,9	109	24,6	1371	1259
0,575	57	Médio	50	0,45	0,537	69	178	3,56	22,5	0,517	27,3	5,5	120	20,7	1654	1323
0,596	50	Médio	100	0,43	0,561	61	157	1,57	21,4	0,553	28,9	5,8	142	21,3	3408	2393
0,590	52	Médio	150	0,50	0,550	65	177	1,18	19,2	0,516	27,3	6,0	174	19,5	5762	3614
0,615	45	Médio	300	0,56	0,570	58	114	0,38	14,3	0,491	26,2	6,8	209	18,3	7622	6441
0,583	54	Médio	500	0,55	0,550	65	70	0,14	22,3	0,484	25,8	7,2	285	22,2	7998	7317
0,570	58	Médio	750	0,68	0,531	70	83	0,11	22,6	0,478	25,5	7,8	404	22,9	9036	8931
0,511	77	Compacto	25	0,30	0,486	84	193	7,72	24,7	0,504	26,7	5,2	116	24,6	1444	1262
0,498	81	Compacto	50	0,29	0,474	88	225	4,50	21,2	0,510	27,0	5,8	144	21,2	2363	1755
0,502	79	Compacto	100	0,42	0,470	89	150	1,50	19,9	0,515	27,2	6,0	134	19,0	4321	2596
0,503	79	Compacto	150	0,48	0,469	90	182	1,21	21,8	0,511	27,1	6,4	174	24,8	4881	3618
0,495	82	Compacto	300	0,51	0,462	92	207	0,69	24,5	0,514	27,2	9,1	262	24,6	7792	4662
0,510	77	Compacto	500	0,60	0,474	88	235	0,47	28,9	0,507	26,9	9,2	376	24,2	6537	5380
0,499	80	Compacto	750	0,62	0,467	90	83	0,11	22,0	0,486	25,9	10,1	411	22,5	8282	7877

OBS: e<sub>min</sub> = 0,435 e e<sub>max</sub> = 0,760

**Quadro 2 – Resultados obtidos nos ensaios de DSS. (continuação)**

e <sub>0</sub>	CR <sub>0</sub> (%)	Classif. de CR <sub>0</sub>	σ <sub>0</sub> (kPa)	Ah <sub>c</sub> (mm)	e <sub>pc</sub>	CR <sub>pc</sub> (%)	Δσ <sub>máx</sub> (kPa)	Δσ <sub>máx</sub> /σ <sub>0</sub>	γ <sub>Δσ<sub>máx</sub></sub> (%)	Mobilização máxima do atrito no plano horizontal			Ruptura		G <sub>25</sub> (kPa)	G <sub>50</sub> (kPa)
										(τ/σ) <sub>máx</sub>	φ <sup>h</sup> <sub>máx</sub> (°)	γ <sub>φ<sup>h</sup><sub>máx</sub></sub> (%)	τ <sub>r</sub> (kPa)	γ <sub>f</sub> (%)		
0,459	93	Muito compacto	25	0,34	0,431	101(*)	252	10,1	25,8	0,523	27,6	6,0	149	25,3	1527	1497
0,460	92	Muito compacto	50	0,18	0,449	96	208	4,16	23,4	0,574	29,9	5,9	147	24,1	2947	2218
0,445	97	Muito compacto	100	0,22	0,432	101(*)	198	1,98	19,5	0,525	27,7	6,4	158	19,5	3132	2534
0,480	86	Muito compacto	150	0,50	0,444	97	158	1,05	21,9	0,513	27,2	6,9	162	23,5	6999	3091
0,483	85	Muito compacto	300	0,62	0,440	98	165	0,55	22,8	0,476	25,5	6,4	225	25,3	7385	6047
0,463	91	Muito compacto	500	0,64	0,425	103(*)	230	0,46	29,9	0,514	27,2	7,6	372	23,8	7143	5260
0,452	95	Muito compacto	750	0,61	0,422	104(*)	225	0,30	25,6	0,489	26,1	7,9	481	23,9	9677	8923

OBS: e<sub>mi</sub> = 0,435 e e<sub>ma</sub> = 0,760

(\*) valor superior a 100 % uma vez que o valor de e<sub>pc</sub> é inferior ao valor adotado para e<sub>mi</sub>.

**Legenda:** e<sub>0</sub>: índice de vazios de moldagem do corpo de prova; CR<sub>0</sub>: compactidade relativa de moldagem do corpo de prova; σ<sub>0</sub>: tensão vertical aplicada ao corpo de prova na fase de compressão edométrica; Ah<sub>c</sub>: deformação vertical do corpo de prova na fase de compressão edométrica; e<sub>pc</sub>: índice de vazios do corpo de prova pré-cisalhamento (pós-compressão edométrica); CR<sub>pc</sub>: compactidade relativa de moldagem do corpo de prova na fase de compressão edométrica; Δσ<sub>máx</sub>: máxima variação da tensão vertical ocorrida durante o cisalhamento; γ<sub>Δσ<sub>máx</sub></sub>: distorção referente a Δσ<sub>máx</sub>; (τ/σ)<sub>máx</sub>: máxima razão tensão cisalhante sobre tensão vertical corrente; φ<sup>h</sup><sub>máx</sub>: ângulo de atrito máximo mobilizado no plano horizontal calculado como arctg(τ/σ)<sub>máx</sub>; γ<sub>φ<sup>h</sup><sub>máx</sub></sub>: distorção correspondente a (τ/σ)<sub>máx</sub>; τ<sub>r</sub>: tensão cisalhante no plano horizontal na ruptura; γ<sub>f</sub>: distorção na ruptura; G<sub>25</sub> e G<sub>50</sub>: módulos cisalhantes secantes obtidos para a tensão cisalhante correspondente a 25 % de τ<sub>r</sub> e para a tensão cisalhante correspondente a 50 % de τ<sub>r</sub>, respectivamente.



#### 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Das curvas  $\Delta\sigma$  x  $\gamma$ , Figuras 9a, 10a, 11a e 12a, observa-se que, no início do cisalhamento, a grande maioria dos corpos de prova apresentaram a tendência de contrair, revelada pelo sinal negativo de  $\Delta\sigma$ , atingindo um ponto de mínimo global ou local. Isto significa que a tensão vertical ( $\sigma$ ) foi inicialmente diminuída a fim de evitar a contração do corpo de prova, mantendo a sua altura (e o seu volume) “constante”, conforme pode ser visto também nas curvas  $\sigma$  x  $\gamma$  Figuras 9b, 10b, 11b e 12b.

Para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, de um modo geral, o valor do módulo de  $\Delta\sigma$  neste ponto de mínimo tende a ser tanto maior quanto maior o valor da tensão vertical inicial ( $\sigma_0$ ). Isto deve indicar maior tendência de contração inicial quanto maior o valor de  $\sigma_0$ . O valor da distorção ( $\gamma$ ) correspondente a este ponto de mínimo também tende a ser tanto maior quanto maior o valor de  $\sigma_0$ . Estas tendências são mais claras para  $CR_0$  compacto (Figura 11a).

Em seguida,  $\Delta\sigma$  aumenta, assumindo valores positivos e atingindo um valor de máximo, a partir do qual se mantém praticamente constante. Isto significa que a tensão vertical ( $\sigma$ ) foi aumentada para além de  $\sigma_0$  a fim de impedir a dilatação do corpo de prova, de modo a manter a sua altura (e o seu volume) “constante”, conforme pode ser visto também nas curvas  $\sigma$  x  $\gamma$ . As duas exceções são os ensaios de  $CR_0$  fofo sob  $\sigma_0 = 750$  kPa e  $\sigma_0 = 500$  kPa(A), os quais atingiram valores positivos de  $\Delta\sigma$  muito baixos e ao longo de um pequeno trecho de  $\gamma$  e, após o ponto de máximo, voltaram decrescer, assumindo novamente valores negativos de  $\Delta\sigma$  ver Figura 9a. Assim, esses corpos de prova permaneceram submetidos a valores de  $\sigma$  menores do que  $\sigma_0$  durante quase todo o cisalhamento (ver Figura 9b).

Quanto à influência do valor de  $\sigma_0$  no valor máximo de  $\Delta\sigma$  ( $\Delta\sigma_{\text{máx}}$ ), embora não seja observada uma tendência muito clara, quatro aspectos merecem ser ressaltados: (1) Para  $CR$  fofo Figura 9a, os corpos de prova sob  $\sigma_0 = 500$  kPa(A) e  $\sigma_0 = 750$  kPa apresentaram os menores valores de  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$ , ver Quadro 2; (2) Para  $CR$  médio Figura 10a, os corpos de prova sob  $\sigma_0 = 750$  kPa e  $\sigma_0 = 500$  kPa apresentaram os menores valores de  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$  e o corpo de prova sob  $\sigma_0 = 300$  kPa apresentou o terceiro menor valor de  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$ , ver Quadro 2; (3) Para  $CR$  compacto Figura 12a, o corpo de prova sob  $\sigma_0 = 750$  kPa apresentou, destacadamente, o menor valor de  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$ ; (4) Para  $CR$  muito compacto Figura 13a, o corpo de prova sob  $\sigma_0 = 25$  kPa apresentou o maior valor de  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$ .

Estas constatações são indícios de que quanto maior o valor de  $\sigma_0$ , menor a tendência do corpo de prova dilatar, traduzida em menor valor  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$ . Ou, alternativamente, quanto menor o valor de  $\sigma_0$ , maior a tendência do corpo de prova dilatar, traduzida em maior valor  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$ . Todavia, diante de uma variação tão ampla de valores de  $\sigma_0$ , de 25 kPa a 750 kPa, esta análise parece ser mais apropriada considerando os valores de  $\Delta\sigma$  normalizados em relação a  $\sigma_0$ . As curvas  $\Delta\sigma/\sigma_0$  x  $\gamma$  para  $CR_0$  médio Figura 10b, compacto Figura 11b e muito compacto Figura 12b, bem como os valores de  $(\Delta\sigma/\sigma_0)_{\text{máx}}$  apresentados no Quadro 2, mostram claramente que, para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, quanto menor o valor  $\sigma_0$ , maior o valor de  $(\Delta\sigma/\sigma_0)_{\text{máx}}$ , o que deve ser decorrência da maior tendência do corpo de prova dilatar. Ou ainda, quanto maior o valor  $\sigma_0$ , menor o valor de  $(\Delta\sigma/\sigma_0)_{\text{máx}}$ , o que deve ser consequência da menor tendência do corpo de prova dilatar. As curvas  $\Delta\sigma/\sigma_0$  x  $\gamma$  para  $CR_0$  fofo Figura 9b também mostram essa mesma tendência, embora com alguns desvios.

Tanto as curvas  $\Delta\sigma$  x  $\gamma$  como as curvas  $\Delta\sigma/\sigma_0$  x  $\gamma$  dos ensaios sob  $\sigma_0 = 25$  kPa para  $CR_0$  fofo, médio e compacto, assim como dos ensaios sob  $\sigma_0 = 50$  kPa para  $CR_0$  médio e compacto mostram oscilações periódicas, as quais devem ser decorrentes do fenômeno conhecido como *stick-slip*. Adjémian & Evesque (2001), Doanh et al. (2013) e Xiao et al. (2019) investigaram este fenômeno em areias e esferas de vidro submetidas a ensaios triaxiais CID. Domingos (2021) também identificou este fenômeno em ensaios triaxiais CID e CIU realizados em uma amostra da areia da

Praia de Ipanema coletada no mesmo local da amostra estudada nesta pesquisa. Esse fenômeno manifestou-se com muita nitidez nos ensaios de cisalhamento direto realizados também na areia da Praia de Ipanema por Coutinho (2021). Nota-se que este fenômeno também apareceu nas curvas de outros ensaios de DSS desta pesquisa, porém com menos proeminência. O padrão de comportamento deste efeito aqui observado está em consonância com a constatação de Coutinho (2021) de que, para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, quanto menor a tensão vertical aplicada, maior tende ser a manifestação do fenômeno.

As curvas  $\sigma \times \gamma$  agrupadas por valor de  $\sigma_0$  Figuras 13a e 14a não mostram uma relação clara entre o valor do índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_{pc}$ ) e o valor da tensão vertical ( $\sigma$ ) no ponto de mínimo local, no início da curva. Assim, não se observa uma relação clara entre o valor de  $e_{pc}$  e a tendência de contração inicial do corpo de prova. Por outro lado, para um dado valor de  $\sigma_0$  fixado, observa-se que, para qualquer valor de  $\gamma$  a partir do ponto de mínimo (inicial) da curva, quanto menor o valor de  $e_{pc}$ , maior tende a ser o valor de  $\sigma$ . Isto indica que, para um dado valor de  $\sigma_0$  fixado, quanto menor o valor de  $e_{pc}$ , maior a tendência do corpo de prova dilatar. Observa-se também que, para  $\sigma_0 = 25$  kPa, a influência do fenômeno *stick-slip* na curva  $\sigma \times \gamma$  é tanto maior quanto maior o valor de  $e_{pc}$ .

Para a análise das curvas  $\tau \times \gamma$ ,  $\tau/\sigma \times \gamma$  e  $\tau \times \sigma$  são adotadas as seguintes premissas: (1) A ruptura é assumida ocorrer quando a tensão cisalhante ( $\tau$ ) no plano horizontal atinge o seu valor máximo e, portanto, o momento da ruptura é avaliado nas curvas  $\tau \times \gamma$ ; (2) O valor corrente de  $\tau/\sigma$  corresponde ao coeficiente de atrito mobilizado no plano horizontal ( $\mu_{h\text{ mob}}$ ). Como o plano de ruptura é desconhecido, o ângulo de atrito calculado como  $\arctg(\tau/\sigma)$  é chamado simplesmente de ângulo de atrito mobilizado no plano horizontal ( $\phi'_{h\text{ mob}}$ ), que atinge um valor máximo chamado de ( $\phi'_{h\text{ máx}}$ ); (3) Como, de uma forma geral, os cisalhamentos ocorreram a volume “constante”, então  $\phi'_{h\text{ mob}}$  deve ser interpretado como ângulo de atrito “a volume constante” mobilizado no plano horizontal. “Desvios” dessa condição ocorreram e são analisados adiante.

Todas as curvas  $\tau \times \gamma$  Figuras 9c, 10c, 11c e 12c apresentam o mesmo padrão, com a tensão cisalhante ( $\tau$ ) crescendo monotonamente à medida das distorções ( $\gamma$ ) até atingir um valor máximo, que corresponde à tensão cisalhante no plano horizontal na ruptura ( $\tau_f$ ). Conforme dito acima, a ruptura é assumida ocorrer quando o valor máximo de  $\tau$  é atingido, e a distorção na ruptura é denotada por  $\gamma_f$ . A partir da ruptura o valor de  $\tau$  mantém-se aproximadamente constante. Os valores de  $\tau_f$  e  $\gamma_f$  de todos os ensaios são apresentados no Quadro 2. De um modo geral, para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, observa-se que, para qualquer valor de  $\gamma$ , quanto maior o valor de  $\sigma_0$ , maior o valor de  $\tau$ . Portanto, quanto maior o valor de  $\sigma_0$ , maior o valor de  $\tau_f$ . Não se observa um padrão de influência do valor de  $\sigma_0$  no valor de  $\gamma_f$ . Embora, para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, não se observe um padrão claro de influência do valor de  $\sigma_0$  na amplitude do fenômeno *stick-slip* nas curvas  $\tau \times \gamma$ , os resultados levam a suspeita de que a amplitude tende a ser tanto maior quanto menor o valor de  $\sigma_0$ .

As curvas  $\tau \times \gamma$  agrupadas por valor de  $\sigma_0$  Figuras 13b e 14b mostram que, para um dado valor de  $\sigma_0$  fixado, quanto menor o valor de  $e_{pc}$ , maior tende ser o valor de  $\tau$  para qualquer valor de  $\gamma$ , e consequentemente maior tende a ser o valor da tensão cisalhante na ruptura ( $\tau_f$ ). A distorção na ruptura ( $\gamma_f$ ) tende a ser tanto maior quanto menor o valor de  $e_{pc}$ . Além disso, a comparação entre as curvas das Figuras 13b e 14b mostra que o fenômeno *stick-slip* manifesta-se com maior intensidade quanto menor o valor de  $\sigma_0$ . Todavia, dentro de cada grupo de  $\sigma_0$ , não se observa uma tendência para a influência do valor de  $e_{pc}$  na amplitude do fenômeno nas curvas  $\tau \times \gamma$ .

Das curvas  $\tau/\sigma \times \gamma$  Figuras 9d, 10d, 11d e 12d, observa-se que, para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, a mobilização do ângulo de atrito ( $\phi'_{h\text{ mob}}$ ), dado por  $\arctg(\tau/\sigma)$ , ocorre com uma taxa em relação à distorção ( $\gamma$ ) tanto maior quanto menor o valor de  $\sigma_0$ . Com exceção de alguns ensaios que apresentaram pico na curva  $\tau/\sigma \times \gamma$  (por razões discutidas adiante), uma vez atingido o valor máximo

de  $\tau/\sigma$ , denotado por  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$ , este valor mantém-se praticamente constante à medida das distorções. Para o cálculo de  $\phi'_{\text{h máx}}$ , considera-se o valor de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  atingido após a estabilização da curva  $\tau/\sigma$  x  $\gamma$ , isto é, desconsiderando o pico que alguns ensaios apresentaram. Assim, o valor da distorção ( $\gamma$ ) no qual o valor de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e  $\phi'_{\text{h máx}}$ ) é atingido, denotada por  $\gamma_{\phi'_{\text{h máx}}}$ , tende a ser tanto maior quanto maior o valor de  $\sigma_0$ . Os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$ ,  $\phi'_{\text{h máx}}$  e  $\gamma_{\phi'_{\text{h máx}}}$  são apresentados no Quadro 2. Observa-se que, para todos os ensaios, a mobilização total do atrito ocorreu antes da ruptura, isto é,  $\gamma_{\phi'_{\text{h máx}}} < \gamma_f$ .

Do Quadro 2 observa-se que, para a maioria dos ensaios, o valor da distorção na ruptura ( $\gamma_f$ ) é muito próximo ou, em alguns casos, praticamente igual ao valor da distorção correspondente a  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$  ( $\gamma_{\Delta\sigma_{\text{máx}}}$ ). O fato de  $\gamma_{\phi'_{\text{h máx}}} < \gamma_f$  e  $\gamma_f \cong \gamma_{\Delta\sigma_{\text{máx}}}$  indica que, após a mobilização total do atrito no plano horizontal (quando  $\tau/\sigma$  atingiu o seu valor máximo e a partir de então permaneceu constante), a tensão cisalhante no plano horizontal ( $\tau$ ) continuou aumentando devido ao aumento da tensão vertical ( $\sigma$ ) necessário para impedir a dilatação. Quando  $\sigma$  atingiu o seu valor máximo, então  $\tau$  atingiu o seu valor máximo, chegando à ruptura.

Para a classificação de  $CR_0$  fofo Figura 9d e Quadro 2, os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{\text{h máx}}$ ) apresentam-se dispersos dentre os ensaios sob  $\sigma_0 \leq 100$  kPa, sendo tanto maior quanto menor o valor de  $\sigma_0$ . Esses valores são maiores do que os obtidos nos ensaios sob  $\sigma_0 \geq 150$  kPa, os quais são muito próximos entre si.

Para a classificação de  $CR_0$  médio Figura 10b e Quadro 2, os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{\text{h máx}}$ ) medidos nos ensaios sob  $\sigma_0 \leq 150$  kPa são um pouco maiores do que os valores medidos nos ensaios sob  $\sigma_0 \geq 300$  kPa, porém menos dispersos quando comparados com os valores dos ensaios de  $CR_0$  fofo sob  $\sigma_0 \leq 100$  kPa. Nota-se o pico acentuado de  $\tau/\sigma$  no ensaio sob  $\sigma_0 = 25$  kPa, bem como, de forma mais sutil, nos ensaios sob  $\sigma_0 = 50$  kPa,  $\sigma_0 = 100$  kPa e  $\sigma_0 = 150$  kPa.

Para a classificação de  $CR_0$  compacto Figura 11b e Quadro 2, os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{\text{h máx}}$ ) medidos em todos os ensaios são muito próximos entre si. Ressalta-se o pico de  $\tau/\sigma$  nos ensaios sob  $\sigma_0 \leq 100$  kPa, sendo destacadamente mais agudo para  $\sigma_0 = 25$  kPa.

Para a classificação de  $CR_0$  muito compacto Figura 12b e Quadro 2, os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{\text{h máx}}$ ) medidos nos ensaios sob  $\sigma_0 \leq 150$  kPa são, de um modo geral, maiores do que os valores medidos nos ensaios sob  $\sigma_0 \geq 300$  kPa. As curvas  $\tau/\sigma$  x  $\gamma$  dos ensaios sob  $\sigma_0 \leq 150$  kPa apresentam pico, sendo mais acentuado para  $\sigma_0 = 25$  kPa.

Quando agrupadas por valor de  $\sigma_0$ , as curvas  $\tau/\sigma$  x  $\gamma$  Figuras 13c e 14c mostram uma sutil tendência da taxa de aumento de  $\tau/\sigma$  (e de mobilização de  $\phi'_{\text{h mob}}$ ) em relação à distorção ( $\gamma$ ) ser tanto maior quanto menor o valor de  $e_{pc}$ , para um dado valor de  $\sigma_0$  fixado. A dispersão entre os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{\text{h máx}}$ ) dos ensaios com diferentes valores de  $e_{pc}$  agrupados por valor de  $\sigma_0$  diminui à medida que  $\sigma_0$  aumenta, sendo que no grupo sob  $\sigma_0 = 750$  kPa os valores são muito similares entre si Figura 14c.

Do Quadro 2 observa-se que, para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{\text{h máx}}$ ) tendem a diminuir com o aumento de  $\sigma_0$ , atingindo valores de  $\phi'_{\text{h máx}}$  entre 25,5° e 26,1° sob  $\sigma_0 = 750$  kPa. Com o aumento de  $CR_0$ , os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{\text{h máx}}$ ) obtidos sob diferentes valores  $\sigma_0$  tendem a ficar menos dispersos, sendo que para  $CR_0$  compacto os valores ficam muito próximos entre si, variando entre 25,9° e 27,2° Figuras 9c, 10c, 11c e 12c. A dispersão entre os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{\text{h máx}}$ ) dos ensaios com diferentes classificações de  $CR_0$  agrupados por valor de  $\sigma_0$  diminui à medida que  $\sigma_0$  aumenta, sendo que sob  $\sigma_0 = 750$  kPa os valores ficam mais próximos entre si Figuras 13c e 14c. Desconsiderando os ensaios de  $CR_0$  fofo sob  $\sigma_0 = 25$  kPa e  $\sigma_0 = 50$  kPa (A e B), o ensaio de  $CR_0$  médio sob  $\sigma_0 = 100$  kPa e o ensaio de  $CR_0$  muito compacto sob  $\sigma_0 = 50$  kPa, todos os demais 25 ensaios apresentam valores de  $\phi'_{\text{h máx}}$  situados entre 25,5° e 27,9° (média de 26,6°).

Das curvas  $\tau$  x  $\sigma$  Figuras 9e, 10e, 11e e 12e observa-se que o trecho final de todos os ensaios aproxima-se de uma reta, indicando que a relação  $\tau/\sigma$  passa a ser aproximadamente constante, conforme já havia sido constatado nas curvas  $\tau/\sigma$  x  $\gamma$ , sendo que tal relação corresponde a  $\text{tg}(\phi'_{h \text{ máx}})$ . À título de ilustração, em cada uma das Figuras 9e, 10e, 11e e 12e, foi traçada uma reta que parte da origem com inclinação igual à média dos valores de  $\phi'_{h \text{ máx}}$  obtidos para cada classificação de  $CR_0$  apresentados no Quadro 2, excluindo os ensaios mencionados no parágrafo anterior. Para  $CR_0$  fofo a reta tem inclinação  $\phi'_{h \text{ máx}} = 26,1^\circ$  Figura 9e, para  $CR_0$  médio a reta tem inclinação  $\phi'_{h \text{ máx}} = 26,7^\circ$  Figura 10e, para  $CR_0$  compacto a reta tem inclinação  $\phi'_{h \text{ máx}} = 26,9^\circ$  Figura 11e, e para  $CR_0$  muito compacto a reta tem inclinação  $\phi'_{h \text{ máx}} = 26,9^\circ$  Figura 12e.

Do Quadro 2, observa-se que os valores de  $G_{25}$  variam de 1257 kPa a 9677 kPa, ao passo que os valores de  $G_{50}$  variam de 787 kPa a 8931 kPa. Para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, os valores de  $G_{25}$  e de  $G_{50}$  tendem a ser tanto maiores quanto maior o valor de  $\sigma_0$ . Para um dado valor de  $\sigma_0$  fixado ( $\leq 150$  kPa), quanto menor o valor de  $e_{pc}$ , maiores tendem a ser os valores de  $G_{25}$  e  $G_{50}$ . Por outro lado, para  $\sigma_0 \geq 300$  kPa, não se observa uma tendência clara de influência do valor de  $e_{pc}$  nos valores de  $G_{25}$  e  $G_{50}$  para um dado valor de  $\sigma_0$  fixado.

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou e analisou os resultados obtidos de uma campanha de ensaios de DSS realizados em uma amostra da areia da Praia de Ipanema, RJ, Brasil, caracterizada como areia fina (60%) e média (40%), mal graduada, uniforme, formada por grãos subangulares a subarredondados. Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos, secos, cisalhados a volume constante, sob carregamento monótono de deformação controlada. Os corpos de prova foram moldados em classificações de compacidade relativa ( $CR_0$ ) fofo, médio, compacto e muito compacto, segundo Lambe & Whitman (1969), e cisalhados a partir de valores de tensão vertical inicial ( $\sigma_0$ ) de 25, 50, 100, 150, 300, 500 e 750 kPa. Da campanha de ensaios de DSS destacam-se as seguintes considerações:

- (1) A grande maioria dos corpos de prova apresentou a tendência de contrair no início do cisalhamento, revelada pelo sinal negativo de  $\Delta\sigma$ , que atingiu um ponto de mínimo global (ou local) nas curvas  $\Delta\sigma$  x  $\gamma$ . Para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, o valor do módulo de  $\Delta\sigma$  neste ponto de mínimo tendeu a ser tanto maior quanto maior o valor de  $\sigma_0$ , o que indica maior tendência de contração inicial do corpo de prova quanto maior o valor de  $\sigma_0$ .
- (2) Após o ponto de mínimo,  $\Delta\sigma$  aumentou, assumindo valores positivos e atingindo um valor máximo ( $\Delta\sigma_{\text{máx}}$ ), a partir do qual se tornou praticamente constante na grande maioria dos ensaios. Assim, a tensão vertical ( $\sigma$ ) foi incrementada para além de  $\sigma_0$  a fim de impedir a dilatação do corpo de prova. Os resultados mostraram alguns indícios de que, para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, quanto maior o valor de  $\sigma_0$ , menor o valor de  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$ , isto é, menor a tendência de o corpo de prova dilatar após a tendência de contração inicial. Ao normalizar os valores de  $\Delta\sigma$  em relação a  $\sigma_0$ , os resultados mostraram claramente que, para uma dada classificação de  $CR_0$ , quanto maior o valor de  $\sigma_0$ , menor o valor de  $\Delta\sigma_{\text{máx}}/\sigma_0$ .
- (3) Para um dado valor de  $\sigma_0$  fixado, para qualquer valor de distorção ( $\gamma$ ) após o ponto de mínimo (no início) da curva  $\sigma$  x  $\gamma$ , quanto menor o índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_{pc}$ ), maior tende a ser o valor de  $\sigma$ , o que indicou maior a tendência de o corpo de prova dilatar.
- (4) Todas as curvas  $\tau$  x  $\gamma$  apresentaram o mesmo padrão, com a tensão cisalhante ( $\tau$ ) crescendo monotonamente à medida das distorções ( $\gamma$ ) até atingir um valor máximo, a partir do qual se manteve praticamente constante. Assumiu-se que a ruptura ocorreu quando o valor máximo de  $\tau$  foi atingido, que corresponde à tensão cisalhante no plano horizontal na ruptura ( $\tau_f$ ). Para

- uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, para qualquer  $\gamma$ , quanto maior o valor de  $\sigma_0$ , maior tendeu a ser o valor de  $\tau$ . Para um dado valor de  $\sigma_0$  fixado, quanto menor o índice de vazios pré-cisalhamento ( $e_{pc}$ ), maior tendeu a ser o valor de  $\tau$ , para qualquer valor de  $\gamma$ .
- (5) Para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, a mobilização do ângulo de atrito no plano horizontal ( $\phi'_{h\text{ mob}}$ ), calculado como  $\arctg(\tau/\sigma)$ , ocorreu com uma taxa em relação à distorção ( $\gamma$ ) tanto maior quanto menor o valor de  $\sigma_0$ . Exceto em alguns ensaios que apresentaram pico na curva  $\tau/\sigma \times \gamma$ , uma vez atingido o valor máximo de  $\tau/\sigma$  (e de  $\phi'_{h\text{ mob}}$ ), este valor manteve-se praticamente constante à medida das distorções. Para o cálculo de  $\phi'_{h\text{ máx}}$ , considerou-se o valor de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  atingido após a estabilização da curva  $\tau/\sigma \times \gamma$ , isto é, desconsiderando o pico que alguns ensaios apresentaram. Assim, os valores calculados de  $\phi'_{h\text{ máx}}$  foram interpretados como ângulo de atrito “a volume constante” máximo mobilizado no plano horizontal.
- (6) Em todos os ensaios, a mobilização total do atrito ocorreu antes da ruptura, isto é,  $\gamma_{\phi'_{\text{máx}}} < \gamma_f$ , onde  $\gamma_{\phi'_{\text{máx}}}$  é a distorção quando  $(\tau/\sigma)$  atinge o valor máximo e  $\gamma_f$  é a distorção na ruptura (quando  $\tau$  atinge o valor máximo). Ademais, para a maioria dos ensaios, o valor de  $\gamma_f$  é muito próximo ou, em alguns casos, praticamente igual ao valor da distorção correspondente a  $\Delta\sigma_{\text{máx}}$  ( $\gamma_{\Delta\sigma\text{ máx}}$ ). O fato de  $\gamma_{\phi'_{\text{máx}}} < \gamma_f$  e  $\gamma_f \cong \gamma_{\Delta\sigma\text{ máx}}$  indica que, após a mobilização total do atrito no plano horizontal (quando  $\tau/\sigma$  atingiu o seu valor máximo e a partir de então permaneceu constante), a tensão cisalhante no plano horizontal ( $\tau$ ) continuou aumentando devido ao aumento da tensão vertical ( $\sigma$ ) necessário para impedir a dilatação do corpo de prova. Quando  $\sigma$  atingiu o seu valor máximo, então  $\tau$  atingiu o seu valor máximo, chegando à ruptura.
- (7) Para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{h\text{ máx}}$ ) tenderam a diminuir com o aumento de  $\sigma_0$ , atingindo valores de  $\phi'_{h\text{ máx}}$  entre  $25,5^\circ$  e  $26,1^\circ$  para  $\sigma_0 = 750$  kPa. Os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{h\text{ máx}}$ ) obtidos para diferentes valores  $\sigma_0$  agrupados por classificação de  $CR_0$  tenderam a ficar menos dispersos com o aumento de  $CR_0$ . A dispersão entre os valores de  $(\tau/\sigma)_{\text{máx}}$  (e de  $\phi'_{h\text{ máx}}$ ) dos ensaios com diferentes classificações de  $CR_0$  agrupados por valor de  $\sigma_0$  diminuiu à medida que  $\sigma_0$  aumentou. Desconsiderando os ensaios de  $CR_0$  fofo sob  $\sigma_0 = 25$  kPa e  $\sigma_0 = 50$  kPa (A e B), o ensaio de  $CR_0$  médio sob  $\sigma_0 = 100$  kPa e o ensaio de  $CR_0$  muito compacto sob  $\sigma_0 = 50$  kPa, todos os demais 25 ensaios apresentaram valores de  $\phi'_{h\text{ máx}}$  situados entre  $25,5^\circ$  e  $27,9^\circ$  (média de  $26,6^\circ$ ).
- (8) Alguns ensaios de  $CR_0$  médio, compacto e muito compacto sob  $\sigma_0 \leq 150$  kPa apresentaram pico nas curvas  $\tau/\sigma \times \gamma$ , sendo o pico tanto mais acentuado quanto menor o valor de  $\sigma_0$ , sendo destacadamente mais acentuado para  $\sigma_0 = 25$  kPa.
- (9) Os valores de  $G_{25}$  variaram de 1257 kPa a 9677 kPa, ao passo que os valores de  $G_{50}$  variaram de 787 kPa a 8931 kPa. Para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada, os valores de  $G_{25}$  e de  $G_{50}$  tenderam a ser tanto maiores quanto maior o valor de  $\sigma_0$ . Para um dado valor de  $\sigma_0$  fixado (dentre aqueles  $\leq 150$  kPa), quanto menor o valor de  $e_{pc}$ , maiores tenderam a ser os valores de  $G_{25}$  e  $G_{50}$ .
- (10) As curvas  $\sigma \times \gamma$ ,  $\Delta\sigma \times \gamma$ ,  $\Delta\sigma/\sigma_0 \times \gamma$ ,  $\tau \times \gamma$  e  $\tau/\sigma \times \gamma$  de alguns ensaios mostraram oscilações periódicas que devem ter sido decorrentes do fenômeno conhecido como *stick-slip*. Para uma dada classificação de  $CR_0$  fixada o fenômeno pareceu mais acentuado quanto menor o valor de  $\sigma_0$ .

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil), ao Laboratório de Ensaios de Campo e Instrumentação Professor Márcio Miranda Soares da COPPE/UFRJ, e ao Laboratório de Geotécnica e Meio Ambiente da PUC-Rio, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho de investigação.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1995). NBR 6502 – *Rochas e solos. Terminologia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ABNT (2016). NBR 7181 – *Solo – Análise Granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 12 p.
- ABNT (2017). NBR 6458 – *Grãos de Pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ASTM D2487 (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, 10 p.
- ASTM D4254 (2016). Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM International, West Conshohocken, PA, 09 p.
- Adjémian, F.; Evesque, P. (2001). *Experimental Stick-Slip Behaviour in Triaxial Test on Granular Matter*. *Poudres & Grains*, 12 (7), 115-121
- Cho, G.C; Dodds, J; Santamarina, J.C. (2006). Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (5), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591))
- Costa, R.C. (2020). *Ensaio de Caracterização e de Permeabilidade na Areia da Praia de Ipanema, RJ*. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 258 p.
- Costa, R.C.; Simões, F.B.; Domingos, G.S.; Aguiar, V.; Martins, I. (2022). *Ensaio de Caracterização na Areia da Praia de Ipanema, RJ*. Anais do XX Cobramseg, Campinas.
- Coutinho, J.V.M. (2021). *Ensaio de cisalhamento direto na areia da Praia de Ipanema/RJ*. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 280 p.
- Doanh, T.; Hoang, M.T.; Roux, JN.; Dequeker, C. (2013). *Stick-slip behaviour of model granular materials in drained triaxial compression*. *Granular Matter* 15, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10035-012-0384-6>
- Domingos, G.S. (2022). *Estudo do Creep Não Drenado da Areia da Praia de Ipanema Sob Condição Hidrostática*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 423 p.
- Krumbein, W.; Sloss, L. (1963). *Stratigraphy and Sedimentation*. W.H Freeman and Co. San Francisco, 660 p.
- Lambe, T.W; Whitman, R.V. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley e Sons.
- Miura, S.; Toki, S. (1982). *A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand*. *Soils and Foundations* v.22, N.1, p. 61-77. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.22.61>

- Nunes, V.P. (2014). *Ensaio De Caracterização Geotécnica Da Areia Da Praia De Itaipuaçu*. Trabalho de conclusão de Curso de Eng. Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 153 p.
- Oliveira Filho, W. L. O (1987). *Considerações Sobre Ensaio Triaxiais em Areia*. Dissertação de mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 285 p
- Pettijohn, F.J. (1949). *Sedimentary Rocks*. Harper and Brothers, New York.
- Ratton, R. B. (1993). *Ensaio triaxiais em areia saturada*. 186 p. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 186 p.
- Schuck, T.E.S (2022). *Ensaio de Cisalhamento Simples na Areia da Praia de Ipanema*. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 185 p.
- Simões, F.B. (2015). *Caracterização geotécnica da areia da Praia de Ipanema*. Trabalho de conclusão de Curso de Eng. Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 148 p.
- Soares, B.R.; Aguiar, V.; Martins, I. (2022). *Ensaio de Permeabilidade em Laboratório na Areia da Praia de Ipanema e em Amostra de Microesferas de Vidro*. Anais do XX Cobramseg, Campinas.
- Xiao, Y.; Long, L.; Evans T.M.; Zhou, H.; Liu, H.; Stuedlein, A.W. (2019). *Effect of Particle Shape on Stress-Dilatancy Responses of Medium-Dense Sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 145 (2).  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001994](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001994)