



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA MATEMÁTICA E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SAIS NA  
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRAS  
DE AREIA DAS DUNAS DO PERÓ, CABO FRIO, RJ**

**Ana Cristina de Jesus da Silva**

**Trabalho Final de Curso  
(Geologia)**

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2017



**Ana Cristina de Jesus da Silva**

**EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SAIS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE  
AMOSTRAS DE AREIA DAS DUNAS DO PERÓ, CABO FRIO, RJ**

Trabalho Final de Curso de Graduação em  
Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ,  
apresentado como requisito necessário para  
obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

Andrea Ferreira Borges  
Pedro Henrique Calçada de Medeiros

Rio de Janeiro  
Fevereiro, 2017

Silva, Ana Cristina de Jesus

Efeito da concentração de sais na resistência ao cisalhamento de amostras de areia das Dunas do Perú, Cabo Frio, RJ. – Ana Cristina de Jesus da Silva - Rio de Janeiro: UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2017. 38p.

Orientadores: Andrea Ferreira Borges  
Pedro Henrique Calçada de Medeiros

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia.

1. Resistência ao cisalhamento. 2. Dunas Costeiras. 3. Dunas do Perú. 4. Influência salina.

**EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SAIS NA RESISTÊNCIA AO  
CISALHAMENTO DE AMOSTRAS DE AREIA DAS DUNAS DO PERÓ,  
CABO FRIO, RJ**

Ana Cristina de Jesus da Silva

Orientadores:  
Andrea Ferreira Borges  
Pedro Henrique Calçada de Medeiros

Trabalho de conclusão de curso submetido  
ao departamento de graduação em  
Geologia, Instituto de Geociências, da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro –  
UFRJ, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do grau de Geólogo.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Por:

---

Presidente: Prof. Dr<sup>a</sup>. Andrea Ferreira Borges  
(Orientadora)

---

Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso (UFRJ)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Kátia Leite Mansur (UFRJ)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me permitiu chegar até esse momento e me deu força nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais, Maria da Luz (*in memorian*) e José Rui, por cada ensinamento, incentivo e amor dedicado durante todos esses anos incansável e incessantemente. Mãe, tudo é por você.

Aos meus orientadores e amigos, prof. Dr<sup>a</sup> Andrea Borges e Geólogo Pedro Henrique Calçada pela ajuda, paciência e apoio durante a realização do atual trabalho.

À técnica e amiga Fátima pelo auxílio e ensinamentos prestados durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos de turma que me acompanharam nessa caminhada acadêmica desde o começo, me apoiando, incentivando e auxiliando nos momentos que mais precisei.

Aos amigos da vida, que no momento mais complicado que vivi, estiveram comigo, não permitindo que eu desanimasse e me motivando a concluir essa fase.

## RESUMO

SILVA, Ana Cristina de Jesus. Efeito da concentração de sais na resistência ao cisalhamento de amostras de areia das Dunas do Perú, Cabo Frio, RJ. 38 p. Trabalho Final de Curso, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

Dunas são importantes ecossistemas com fauna e flora típicos. Entretanto, a ação antrópica, através da remoção da vegetação e construções urbanas, pode interferir no processo natural de migração de dunas. Parâmetros como umidade, velocidade do vento e exposição à névoa salina interferem nesse processo. Este projeto tem como objetivo avaliar o efeito da presença de sais trazidos pela névoa salina na estabilidade de dunas costeiras. O local escolhido para o estudo foi as Dunas do Perú, município de Cabo Frio, RJ. Foram realizados experimentos para a caracterização da areia, através da determinação da densidade dos grãos e da análise granulométrica por peneiramento. O comportamento mecânico da areia também foi observado neste projeto, através da medida da resistência ao cisalhamento, que é função do atrito e da coesão entre os grãos. Areias podem apresentar coesão aparente, em função do teor de umidade e da presença de sais, devido à sucção. Em geral, a sucção total dos solos é dividida em duas parcelas, sucção osmótica e sucção matricial. Enquanto a primeira está relacionada à concentração de sais na água dos poros, a segunda está relacionada ao teor de umidade, à matriz do solo, às dimensões dos poros, ao tipo de partícula e ao seu arranjo estrutural. Variações na sucção osmótica, como por exemplo, a diluição do sal nos poros devido a um evento pluviométrico, têm efeito no comportamento mecânico do solo; quanto maior a concentração de sais nos poros, maior é a sucção osmótica e, portanto, maior a resistência ao cisalhamento do solo. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto *in natura* e com solução salina 35 ‰ a fim de comprovar o efeito do sal na coesão entre as partículas.

**Palavras chave:** Resistência ao cisalhamento, dunas costeiras, Dunas do Perú, influência salina.

## ABSTRACT

SILVA, Ana Cristina de Jesus. Effects of salt concentrations on the shear strength of sand samples from Però Dunes, Cabo Frio, RJ. 38 p. Trabalho Final de Curso, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

Dunes are important ecosystems with typical fauna and flora. However, anthropic action, through the vegetation removal and urban constructions, can interfere in the dune migration process. Parameters such as humidity, wind speed and exposure to salty spray interfere in this process. The objective of this project is to evaluate the effect of the presence of salts from the salty spray on the stability of coastal dunes. The area chosen for the study was the Però Dunes, Cabo Frio, RJ, Brazil. Experiments were made to characterize the sand by determining the grain density and the grain size analysis by sieving. The mechanical behavior of the sand was also observed in this project, through the measurement of the shear strength, which is a function of the friction and the cohesion between the grains. Sands may exhibit apparent cohesion, depending on the moisture content and the presence of salts, due to the suction. Generally, total soil suction is divided into two: osmotic suction and matrix suction. While the first one is related to the concentration of salts in the water of the pores, the second one is related to the moisture content, the soil matrix, the pore size, the particle type and its structural arrangement. Variations in the osmotic suction, such as the salt dilution in the pores due to a rainfall event, have an effect on the mechanical behavior of the soil; the higher the salts concentration in the pores, the greater the osmotic suction and, therefore, the greater the shear strength of the soil. Direct shear tests *in natura* and with saline solution 35‰ were performed in order to prove the effect of the salt on the cohesion between the particles.

**Key Words:** shear strength, coastal dunes, Però Dunes, salty spray.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Avanço das dunas sobre construções ao fundo (Foto da autora, Novembro 2016).....	1
<b>Figura 2:</b> Localização do município de Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro. Destaque para o Campo de Dunas do Perú em imagem de satélite. Fonte da imagem de satélite: Google Earth.....	4
<b>Figura 3:</b> Mapa tectônico do sudeste brasileiro, com destaque para os Terrenos Oriental e Domínio Tectônico Cabo Frio. Modificado de Schmitt et al (2016).....	6
<b>Figura 4:</b> Linha de paleopraia traçada através da interpretação de dados de sondagens. (Dias et al., 2009).....	7
<b>Figura 5:</b> Diagrama esquemático do sistema praial. Disponível em <a href="http://www.geocaching.com">www.geocaching.com</a> (Acessado em 14 de janeiro de 2017 às 17h).....	8
<b>Figura 6:</b> Tipos de dunas. (Medeiros, 2015).....	10
<b>Figura 7:</b> Peculiaridades geológicas, geomorfológicas, oceanográficas e climáticas da região de Cabo Frio. (Coe & Carvalho, 2010).....	11
<b>Figura 8:</b> Mapa geomorfológico da Planície do Perú. Modificado de Fernandez & Rocha (2015).....	12
<b>Figura 9:</b> Mapa geomorfológico detalhado da planície costeira do Perú. Traduzido de Fernandez <i>et al.</i> 2009.....	13
<b>Figura 10:</b> Campo de Dunas do Perú. Acima: área do empreendimento Resort Perú e o zoneamento da APA do Pau Brasil, onde está inserido. Abaixo: representação do empreendimento como um todo, ressaltando em amarelo a localização do Club Med que é a porção que já possui LI – Licença de Instalação. Fonte das imagens: EIA-RIMA – Estudo de Impacto Ambiental – Relatório de Impacto ao Meio Ambiente do Resort Perú. (Mansur, 2010).....	14
<b>Figura 11:</b> Localização dos pontos Perú-1 e Perú-2 no campo dunar do Perú. (Machado, 2010).....	15
<b>Figura 12:</b> Localização do ponto Perú-3 no campo dunar do Perú. Fonte: Google Earth. (Acessado em 23 de janeiro de 2017 às 14:40).....	15
<b>Figura 13:</b> Esquema de determinação da massa específica dos grãos. (Pinto, 2006).....	18
<b>Figura 14:</b> Representação do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os três círculos representam o estado de tensão na ruptura em três ensaios. $\tau$ = tensão cisalhante; $\sigma$ = tensão normal.....	20

<b>Figura 15:</b> Equipamento de cisalhamento direto Pavitest Cisalhamento. À esquerda: detalhe demonstrando o corpo de prova e o ensaio pronto para ser realizado. Fonte: Fotos da autora.....	21
<b>Figura 16:</b> Processo de medição do ângulo de repouso da areia. (García, 2015).....	22
<b>Figura 17:</b> Modelo para determinação experimental do ângulo de repouso.....	23
<b>Figura 18:</b> Curvas granulométricas resultantes da caracterização das amostras Perú-1, Perú-2 e Perú-3.....	24
<b>Figura 19:</b> Distribuição granulométrica para as amostras Perú-1, Perú-2 e Perú-3.....	24
<b>Figura 20:</b> Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Perú-1 com e sem a presença de sal.....	26
<b>Figura 21:</b> Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Perú-2 com e sem a presença de sal.....	27
<b>Figura 22:</b> Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Perú-3 com e sem a presença de sal.....	29
<b>Figura 23:</b> Ângulo de repouso para Perú-1, medido com o auxílio de um transferidor, no valor de 33° ...	31
<b>Figura 24:</b> Ângulo de repouso para Perú-2, medido com o auxílio de um transferidor, no valor de 32° ...	32
<b>Figura 25:</b> Ângulo de repouso para Perú-3, medido com o auxílio de um transferidor, no valor de 33° ...	32

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Coordenadas dos pontos amostrados no campo dunar do Perú.....	16
<b>Tabela 2:</b> Valores para o coeficiente de uniformidade e o coeficiente de curvatura.....	25
<b>Tabela 3:</b> Valores de massa específica real dos grãos.....	25
<b>Tabela 4:</b> Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-1 <i>in natura</i> .....	26
<b>Tabela 5:</b> Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-1 com sal.....	27
<b>Tabela 6:</b> Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-2 <i>in natura</i> .....	28
<b>Tabela 7:</b> Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-2 com sal.....	28
<b>Tabela 8:</b> Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-3 <i>in natura</i> .....	29
<b>Tabela 9:</b> Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-3 com sal.....	29
<b>Tabela 10:</b> Valores do ângulo de atrito com e sem influência de solução salina e da coesão <i>in natura</i> e com sal.....	30
<b>Tabela 11:</b> Ângulos de repouso calculados para as amostras.....	32
<b>Tabela 12:</b> Ângulos de repouso medidos com o transferidor para as amostras.....	32
<b>Tabela 13:</b> Valores de volume e porosidade das amostras.....	33

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>v</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>x</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>2</b>
<b>3. ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>3</b>
3.1. Localização .....	3
3.2. Geologia Regional .....	4
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>8</b>
4.1. Dunas Costeiras .....	8
4.2. Campo de Dunas do Perú.....	10
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	<b>15</b>
5.1. Ensaios de Caracterização – Granulometria.....	16
5.2. Massa específica Real dos Grãos .....	18
5.3. Resistência ao cisalhamento direto.....	19
5.4. Determinação do ângulo de repouso.....	21
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>23</b>
6.1. Granulometria.....	23
6.2. Massa específica Real dos Grãos.....	25
6.3. Resistência ao cisalhamento direto.....	25
6.4. Determinação do ângulo de repouso.....	31
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	<b>33</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>35</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Consideradas Áreas de Proteção Permanente (APPs), dunas costeiras são importantes ecossistemas com fauna e flora típicos e específicos. São formadas por processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos causados pelo vento sobre a areia das praias. Podem variar desde cinturões estreitos próximos à linha de costa a um campo dunar com extensão de muitos quilômetros (Hesp, 2000).

A ação antrópica, através da remoção da vegetação e construções urbanas, pode interferir no processo natural de migração de dunas. Oliveira Filho (2011) afirma que no litoral do estado do Rio de Janeiro, atividades econômicas tem se desenvolvido e a busca por ambientes propícios para o turismo, construção de portos, exploração de petróleo tem aumentado. Para tal avanço e desenvolvimento, muitas vezes a dinâmica dessas áreas costeiras não é estudada profundamente e, como consequência, desastres ambientais, além de perdas materiais podem ocorrer. Um exemplo no qual um empreendimento foi destruído por dinâmicas costeiras é o Superclubs Breezes Búzios Resort que foi ocupado pelas dunas de Tucuns no município de Búzios, RJ. Na figura 1 podem-se observar loteamentos que possivelmente serão atingidos com o avanço do campo de dunas no bairro do Perú, Cabo Frio, RJ.



**Figura 1:** Avanço das dunas sobre construções ao fundo (Foto da autora, Novembro 2016).

De acordo com Martins *et al* (2004), as zonas costeiras são regiões dinâmicas, apresentando uma constante variação a partir de certos fatores como características básicas do ambiente em questão, sendo elas geológicas, físico-químicas ou geográficas; e forças exteriores astronômicas, meteorológicas, além da influência humana. Cada ambiente apresenta suas próprias particularidades e variáveis como

velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura, pluviosidade e exposição à névoa salina interferem no processo de migração de dunas costeiras.

O efeito da presença de sais trazidos pela névoa salina, assim como alterações na pluviosidade, constitui em uma variação nas características do sedimento, como, por exemplo, a permeabilidade e a resistência ao cisalhamento. Esta é proporcional ao atrito entre as partículas, pois não há coesão real entre os grãos. De outro modo, a coesão aparente, que é uma parcela da resistência ao cisalhamento em solos úmidos, não saturados, contribui para a resistência ao cisalhamento, sendo resultante da pressão capilar da água (Pinto, 2006).

A relação entre a erodibilidade e a resistência ao cisalhamento de sedimentos na superfície do terreno (tensão confinante nula) é confirmada nos estudos da erosão de canais com leitos argilosos. Nesses casos, a erodibilidade é diretamente relacionada à coesão. Outros autores afirmam que as tensões críticas (limite para o desprendimento dos grãos) se aproximam da resistência à tração (Bastos, 1999).

Estudos sobre a resistência de solos não saturados mostram que a resistência à tração é diretamente relacionada à coesão, sendo ambas influenciadas pelo grau de saturação ou teor de umidade e concentração de sais na água dos poros, que resultam em coesão aparente, além de características químicas, mineralógicas e estruturais, que são responsáveis pela coesão real. A coesão aparente é muitas vezes considerada correspondente à resistência à tração do solo não saturado, mas em outros trabalhos, como em Soares (2005), é considerada uma relação de proporcionalidade entre as duas propriedades de resistência.

## **2. OBJETIVOS**

O presente trabalho tem por objetivo a análise da resistência ao cisalhamento de amostras de diferentes composições granulométricas retiradas na região do Perú em duas situações: *in natura* e com influência salina. E então realizar uma comparação dos resultados obtidos em cada caso.

Foi realizada a caracterização das amostras, consistindo de análise granulométrica e determinação da densidade real dos grãos, para correlacionar com os

resultados dos ensaios mecânicos e para utilização em cálculos como a porosidade das amostras nesses ensaios.

No que diz respeito à análise geomecânica das amostras em questão, o objetivo consiste em correlacionar a resistência ao cisalhamento direto com a erodibilidade dunar, já que o arrasto dos grãos pelo vento está relacionado à resistência mecânica da areia.

### **3. ÁREA DE ESTUDO**

#### **3.1. Localização**

A região das Dunas do Peró está inserida no município de Cabo Frio, Região dos Lagos do estado do Rio de Janeiro. Ocupa uma ampla faixa de terra entre a ponta do bairro Peró, na divisa com o Município de Búzios até a praia das Conchas, sendo que a maior parte desse campo de dunas foi ocupada por loteamentos, que constituem os bairros do Peró, Conchas, Ogiva e Cajueiro. O Campo de Dunas do Peró possui uma extensão em torno de 3 km no sentido N-S, e largura aproximada de 1 km no sentido E-W, apresentando área de, aproximadamente, 2,3 km<sup>2</sup> (Mansur *et al.*, 2012; Ramos *et al.*, 2003). A localização do município de Cabo Frio está representada na figura 2.

A 155 km de distância da capital do estado, Cabo Frio possui população estimada em 2016, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de 212.289 habitantes. Comparando com o censo demográfico de 1991, quando a população era de 84.915 habitantes, pode-se notar uma evolução populacional significativa em apenas 25 anos, apesar dessa evolução ser observada nos últimos 50 anos. Essa situação contribuiu para os impactos observados na região, entre eles a remoção de vegetação e construções urbanas onde estão localizadas as dunas.



**Figura 2:** Localização do município de Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro. Destaque para o Campo de Dunas do Peró em imagem de satélite. Fonte da imagem de satélite: Google Earth.

### 3.2 Geologia Regional

A região de Cabo Frio tem uma caracterização geológica compreendida na porção central da Faixa Móvel Ribeira, que, juntamente com a Faixa Araçuaí, compõe a Província Mantiqueira, uma província estrutural formada durante o Ciclo Brasileiro. Esse ciclo tectônico teve início aproximadamente há 1000 milhões de anos, após o final do Mesoproterozoico, e foram gerados três pulsos orogênicos, Brasileiro I, II e III (Hasui, 2012).

Foi proposta por Heilbron *et al.* (2000) uma compartimentação tectônica para a Faixa Ribeira, compreende quatro terrenos tectono-estratigráficos orientados em uma seção NW-SE, em direção ao Cráton do São Francisco:

- a) Terreno Ocidental – rochas do embasamento retrabalhadas e metassedimentos de margem passiva deformados;
- b) Klippe Paraíba do Sul – unidades de granulito para- e orto-derivados sobrepostas ao Terreno Ocidental;

c) Terreno Oriental – intrusões magmáticas e sucessões vulcano-sedimentares, ambos de idade Neoproterozoica, que foram deformadas em alto grau após 580 Ma;

d) Terreno Cabo Frio – composto por ortognaisses de idade Paleoproterozoica que formam o embasamento e sucessões vulcano-sedimentares (Palmital e Búzios).

Enquanto este último foi colado ao orógeno somente no Cambriano, os três primeiros foram amalgamados previamente, entre 605 e 580 Ma (Schmitt *et al.*, 2016; Tupinambá *et al.*, 2007; Heilbron *et al.*, 2000; Trouw *et al.*, 2000; Heilbron & Machado, 2003; Schmitt *et al.*, 2004; Moraes, 2009).

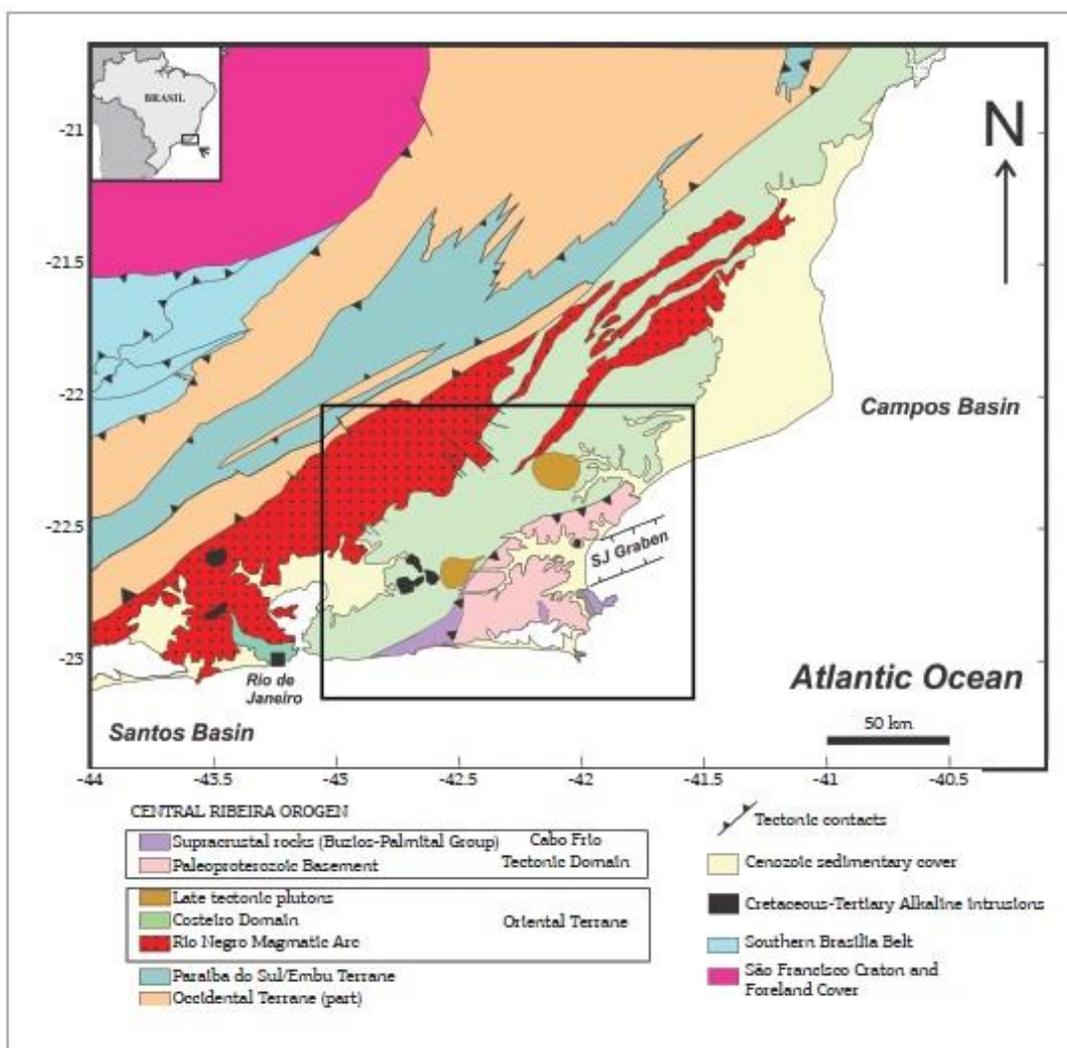
A área das Dunas do Perú está inserida geologicamente no Domínio Tectônico Cabo Frio, o qual será abordado em detalhe a seguir.

De acordo com Schmitt *et al.* (2008), o Domínio Tectônico Cabo Frio é limitado ao Terreno Oriental por uma zona de falhas normais orientadas NE-SW, com mergulho de 35° para SE, muito bem definida na porção norte, sendo inferida na porção SW, já que foi afetada pela zona de falha. Na porção leste o domínio se limita sob o Oceano Atlântico, como pode ser visto na figura 3.

As rochas do embasamento do Domínio Tectônico Cabo Frio datam do Paleoproterozoico e consistem em ortognaisses félsicos – anfibólitos, graníticos e monzograníticos a granodioríticos – que compõem a Unidade Região dos Lagos. Enquanto as assembleias suprajacentes constituem a Bacia Búzios-Palmital, que foi depositada do final do Neoproterozoico ao início do Cambriano.

Foram definidas duas sucessões para esta bacia, baseado em suas litologias: sucessões Búzios e Palmital. A Sucessão Búzios é primordialmente composta de paragnaisses pelíticos com ocorrência de metabasitos como camadas centimétricas a métricas, intercaladas com rochas calcissilicáticas e metassedimentares aluminosas, e é interpretada como depósito de ambiente hemipelágico. Já a Sucessão Palmital consiste em pagnaisses com intercalações de camadas de quartzito e de camadas espessas de calcissilicatos, não apresentando rochas máficas vulcânicas ou plutônicas e sendo interpretada como turbiditos imaturos de leque submarino em talude continental (Schmitt *et al.* 2016).

O período entre 520-490 Ma é determinado por Schmitt *et al.*, 2004 como um novo período colisional denominado Orogenia Búzios. O Domínio Tectônico Cabo Frio contém conjuntos de rochas de alta temperatura e média a alta pressão, divergindo das encontradas no Terreno Oriental. A Orogenia Búzios é o evento tectonometamórfico mais jovem identificado na Faixa Ribeira e representa provavelmente um dos eventos orogênicos do final da amalgamação do Gondwana.

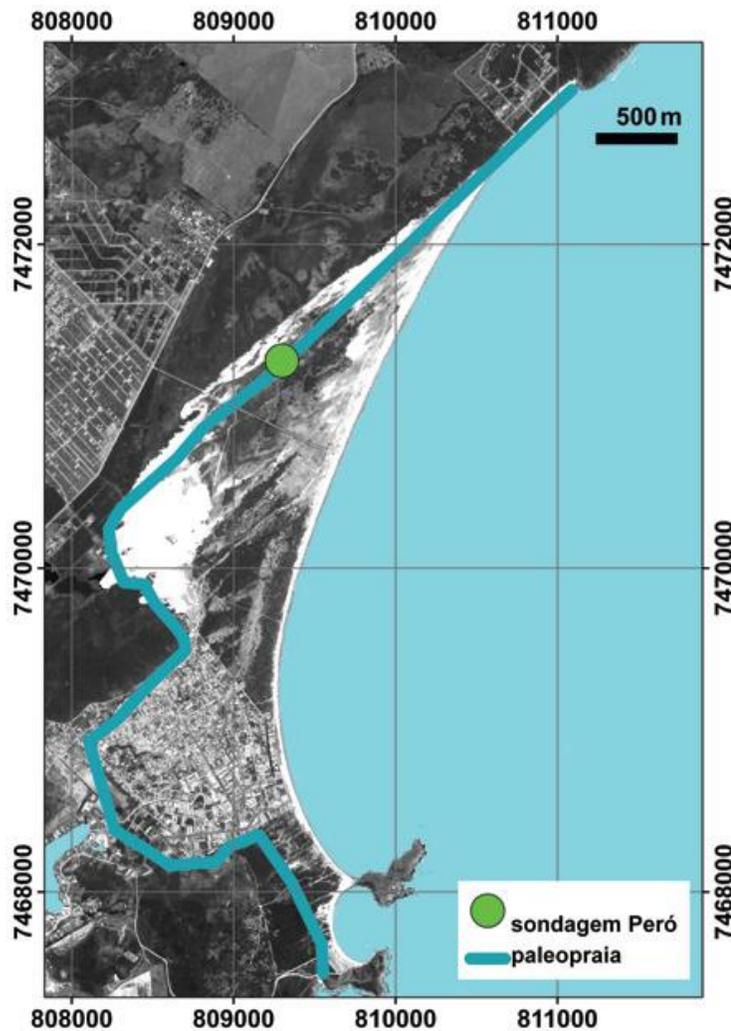


**Figura 3:** Mapa tectônico do sudeste brasileiro, com destaque para os Terrenos Oriental e Domínio Tectônico Cabo Frio. Modificado de Schmitt *et al* (2016).

Localmente, de acordo com Dias *et al.* (2007), a formação dos ambientes de sedimentação costeira, como as Dunas do Perú, deve-se a uma sucessão de eventos

geológicos significativos durante o período Quaternário, principalmente os relacionados às variações do nível do mar durante o Holoceno.

O transporte de sedimentos a partir da geração de ondas resulta na fuga de grãos da faixa de praia para o campo de dunas causou uma retrogradação da linha de costa e expansão do campo de dunas do Perú. O retrabalhamento dos sedimentos ocorre pelo vento de direção Nordeste que predomina na região (Dias *et al.*, 2007; Castro, 2006). Dias *et al.* (2009) realizaram datações pelo método  $^{14}\text{C}$  em material orgânico encontrado em testemunho de sondagem para relacionar a dinâmica sedimentar pretérita e atual da praia do Perú e a figura 4 apresenta o resultado desse estudo na forma da linha de paleopraia através da interpretação de dados.



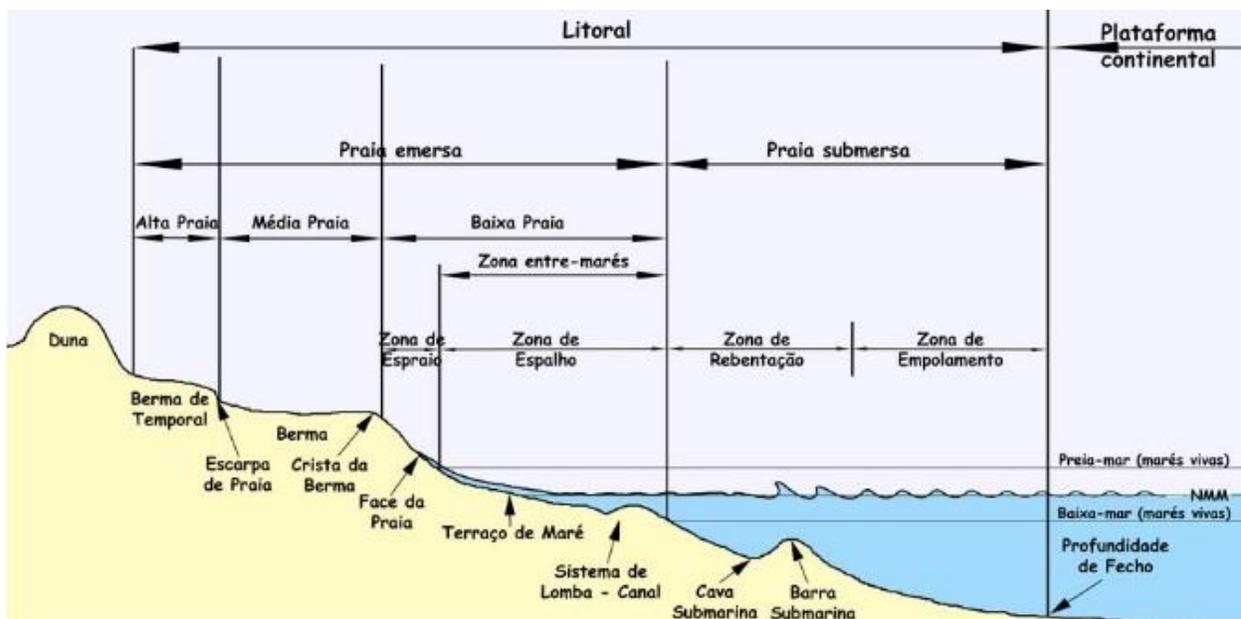
**Figura 4:** Linha de paleopraia traçada através da interpretação de dados de sondagens. (Dias *et al.*, 2009)

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Dunas Costeiras

As praias compõem o ambiente frontal do sistema costeiro, tornando-se altamente dinâmica, sendo modificadas pela ação de ondas e marés e pelos sedimentos que as compõem. Dunas se desenvolvem em direção ao continente, a partir da praia, quando as condições de abastecimento de grãos de areia e velocidade mínima do vento são atingidas. Os grãos são direcionados até que o vento se dissipe ou até que encontrem uma barreira física, como vegetação, e então se depositam. A figura 5 representa o sistema praiial, com as dunas na porção mais próxima ao continente.

A velocidade e direção do vento, a energia da onda e a forma da praia determinam a quantidade de sedimentos a ser transportado. O transporte eólico é o responsável pela dispersão de sedimentos em ambiente dunar. O ar possui baixa viscosidade e densidade, sendo raro o transporte de sedimentos tamanho seixo, ou maiores, pelo vento. Porém no caso das dunas, que são formadas primordialmente por partículas arenosas, o transporte eólico é o mais eficaz e predominante.



**Figura 5:** Diagrama esquemático do sistema praiial. Disponível em [www.geocaching.com](http://www.geocaching.com) (Acessado em 14 de janeiro de 2017 às 17h)

Momentaneamente as partículas são carregadas por suspensão, na corrente do vento, no caso de uma brisa são carregadas as mais finas, tamanho argila e silte.

Brisas moderadas podem rolar, deslizar e arrastar grãos tamanho areia ao longo de uma base arenosa, mas para que sejam suspensos no fluxo do ar, somente ventos fortes conseguem realizar esse transporte. Os sedimentos de areia são depositados nas dunas após terem percorrido algumas centenas de quilômetros, principalmente por saltação próxima ao solo (Dickinson, 2006).

De acordo com Sígolo (2000), as dunas podem ser classificadas usando-se dois parâmetros: estrutura interna e morfologia. A classificação baseada na estrutura interna reconhece dunas estacionárias e dunas migratórias, levando em consideração a dinâmica de formação da duna. Durante esse processo de construção os grãos de areia são depositados seguindo a direção preferencial do vento, sendo chamada de barlavento a face que recebe o vento e a outra face, protegida do vento e mais íngreme, chamada de sotavento.

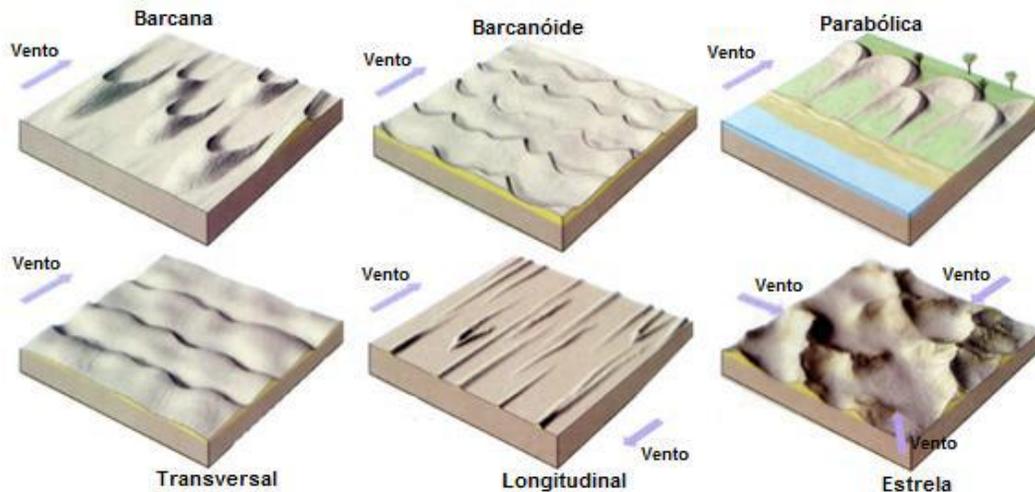
Nas dunas estacionárias a areia é depositada em camadas paralelas ao perfil das dunas, sendo os grãos de areia mantidos agregados aos estratos em formação, impedindo o movimento da duna. Ocorre uma estruturação interna estratificada com os grãos seguindo do barlavento em direção ao sotavento. Alguns fatores responsáveis pela imobilidade da duna são aumento de umidade – aglutinando os grãos pela tensão superficial da água –, obstáculos internos – como blocos de rochas ou troncos – e a presença de vegetação relacionada à duna.

Já nas dunas migratórias, ocorre um deslocamento dos grãos do barlavento até o sotavento pelo perfil da duna, gerando então uma estrutura interna de leitos com mergulho próximo ao da inclinação do sotavento. Portanto deslocando todo o campo de dunas a partir dessa migração contínua.

Com relação à classificação morfológica, três parâmetros são considerados: velocidade e variação do vento predominante; características da superfície percorrida pelas areias transportadas pelo vento e; a quantidade de areia disponível para a formação das dunas. E a partir dessa classificação as dunas podem ser: barcana, barcanóide, parabólica, transversal, longitudinal e estrela. Os tipos de dunas podem ser vistos na figura 6.

As dunas barcanas não formam campos contínuos e tendem a ser pequenas, possuem a forma de meia lua e se desenvolvem em ambientes de ventos moderados e

fornecimento limitado de areia. Quando o fornecimento de areia é limitado pela vegetação, são formadas cadeias unidas, chamadas barcanóides. As dunas parabólicas são formadas em regiões de ventos fortes e constantes, com suprimento maior de sedimentos, quando comparadas às do tipo barcana, possuem as extremidades voltadas para o sentido oposto ao do vento, e possuem curvatura fechada, semelhante à letra U.



**Figura 6:** Tipos de dunas. Fonte: Disponível em [www.geologia.ufpr.br](http://www.geologia.ufpr.br). (Acessado às 23h do dia 8 de julho de 2015). Adaptado por Medeiros, 2015.

Dunas transversais ocorrem em condições de ventos fortes e com constante direcionamento, assim como frequente e considerável fornecimento de grãos. Possui orientação perpendicular ao sentido preferencial do vento. Com características semelhantes às dunas transversais, as dunas longitudinais podem atingir dezenas de centenas de quilômetros e produzem morfologia semelhante a cordões de areia, com orientação paralela ao sentido preferencial do vento. Já as dunas estrela possuem ampla quantidade de areia disponível e fortes ventos, de semelhante intensidade e velocidade, porém com direções distintas, formando então cristas.

#### **4.2 Campo de Dunas do Perú**

A área da Praia do Perú, onde o campo de dunas está localizado, possui, de acordo com Souza *et al.* 2016, 600 metros de extensão entre a crista da praia e a área

de duna com vegetação rasteira. A largura da praia é de 1300 metros e possui um arco de praia com 4800 metros de comprimento e orientação NE-SW.

Geologicamente, Castro (2002) afirma que gnaisses, anfibolitos e diabásios aflorantes em área adjacente dão origem aos sedimentos que constituem o campo de dunas do Perú. Sendo esse material predominantemente quartzo e mais restritamente de ilmenita, zircão, granada e hornblenda.

A região de Cabo Frio apresenta peculiaridades climáticas, geológicas e ecológicas que foram esquematizadas na figura 7. O clima da área é mais seco que o restante do litoral fluminense, relacionado à presença de uma ressurgência costeira local, na qual as águas frias e ricas em nutrientes, da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), afloram na plataforma continental. Essa característica oceanográfica se dá devido à mudança brusca de orientação da costa, que alterna de uma direção N-S a uma E-W; ao deslocamento sazonal do eixo da Corrente do Brasil (CB), que é desviado ao largo no verão; e, sobretudo, ao regime de ventos da região (Barbosa, 2003).

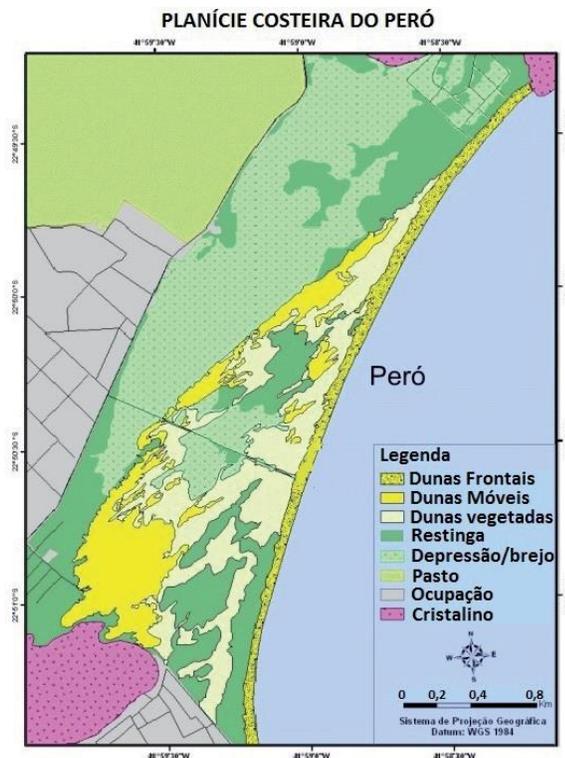


**Figura 7:** Peculiaridades geológicas, geomorfológicas, oceanográficas e climáticas da região de Cabo Frio. (Coe & Carvalho, 2010)

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) determinou que os ventos na estação “Cabo Frio (Alcalis)” apresentam uma direção predominante NE e a

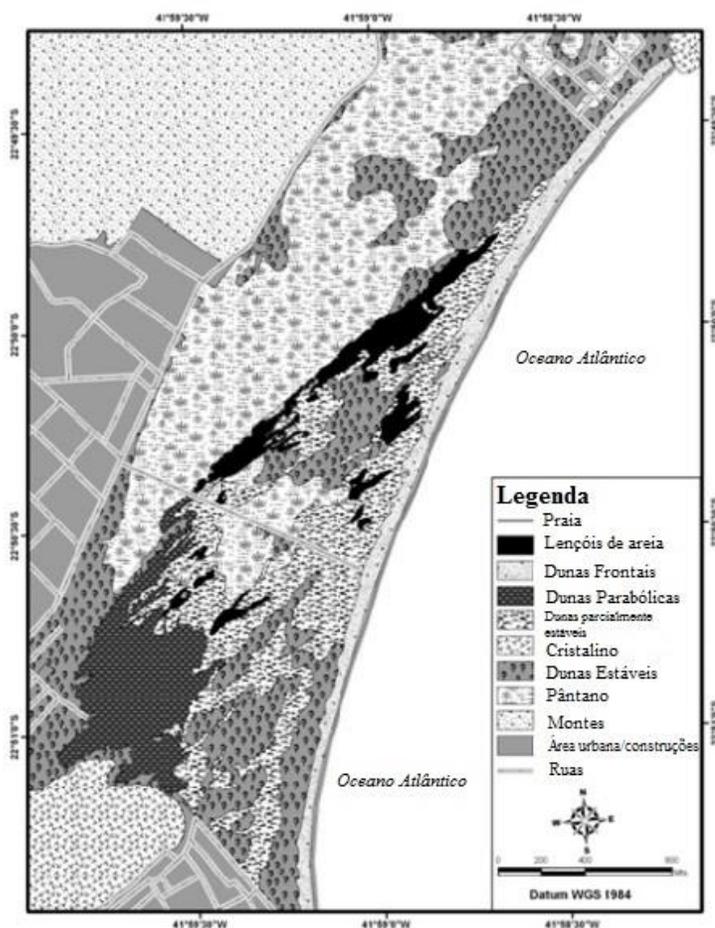
intensidade dos ventos medida para essa mesma estação teve uma medida de 4,12 m/s por ano no período entre 1961 e 1990. De acordo com Castro *et al.* (2006) a velocidade média do vento na região das dunas oblíquas é de aproximadamente 6 m/s e o regime pluviométrico caracteriza-se por chuvas de verão, (70% a 80% dos totais anuais) e chuvas irregulares no inverno. O período de verão é caracterizado por apresentar menor volume transportado, uma vez que os sedimentos após uma precipitação pluviométrica de 40 mm levam cinco dias para secar e entrar em trânsito novamente (Castro, 2001; Castro, 2002). Essas características contribuíram para a formação do campo de Dunas da região do Perú e seu avanço em direção à cidade.

Fernandez & Rocha (2015) desenvolveram um mapa geomorfológico da planície costeira do Perú, identificando dunas frontais, campos de dunas móveis e vegetadas no interior da planície (Figura 8). Dentre as dunas no interior da planície, Fernandez *et al.* (2009) caracterizaram especificamente o campo de dunas do Perú com relação à morfologia, e determinaram que na parte central são encontradas dunas do tipo parabólicas e, durante o verão, na porção norte da praia do Perú, são identificadas dunas transversais.



**Figura 8:** Mapa geomorfológico da Planície do Perú. Modificado de Fernandez & Rocha (2015).

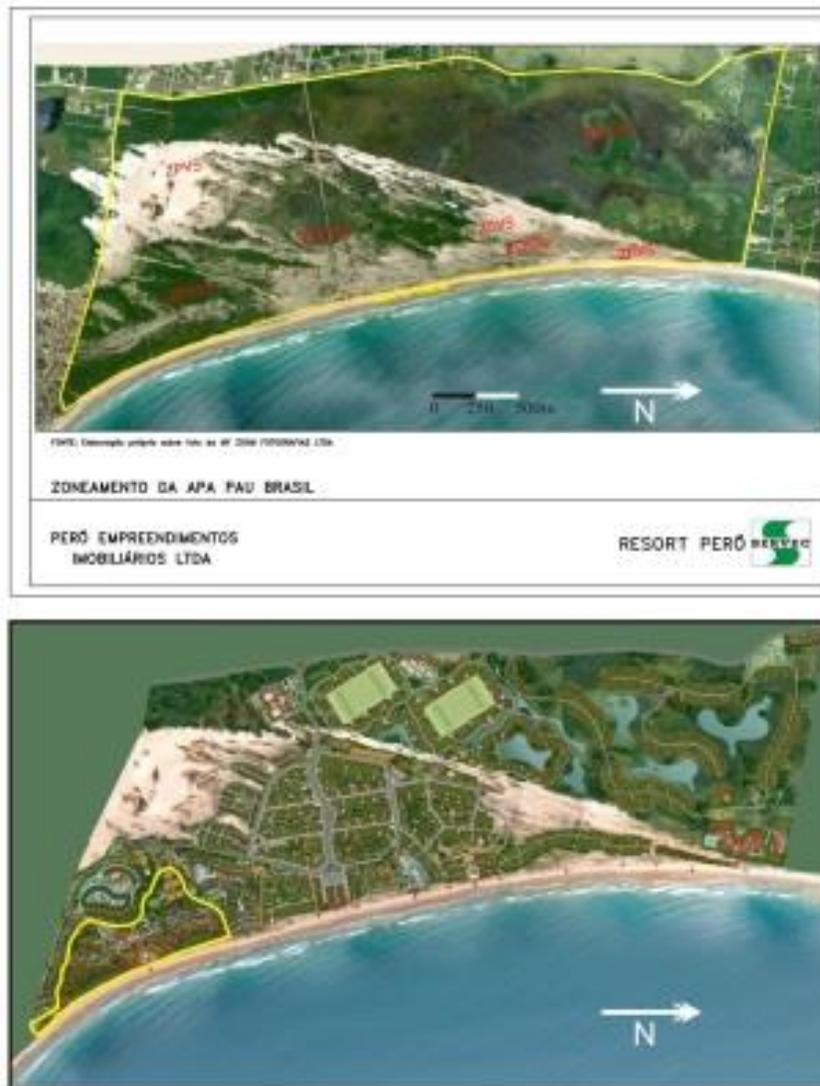
Apesar de Fernandez *et al.* (2009) afirmarem que dunas do tipo barcanas são ausentes no campo de dunas do Perú, Castro *et al.* (2006) afirmam que ocorrem formas barcanóides na zona intermediária e que à medida que a vegetação de restinga se propaga, registra-se a ocorrência de formas parabólicas no período chuvoso e barcanas no período seco. Confirmando a teoria de Castro *et al.* (2006), foram vistas em campo dunas do tipo barcana, no local considerado por Fernandez *et al.* (2009) como lençóis de areia. A figura 9 representa um mapa com as dunas na planície costeira do Perú.



**Figura 9:** Mapa geomorfológico detalhado da planície costeira do Perú. Traduzido de Fernandez *et al.* 2009.

A região denominada Costa do Sol tem sofrido um aumento na ocupação populacional. O turismo nessa localidade, na qual está inserida a área em estudo, vem sendo explorado e exacerbado, sendo necessária uma limitação e preservação de áreas a fim de garantir um suporte econômico do turismo para o futuro (Mansur, 2010).

Para essa mudança de paradigma foi criada a Área de Proteção Ambiental do Pau Brasil, cujo zoneamento está demonstrado na figura 10. Na mesma localidade da APA ocorre um projeto de construção de um resort – Costa do Perú –, com áreas de recreação, lotes residenciais e empreendimentos hoteleiros. As obras foram paralisadas por ordem do Ministério Público Federal, apesar de licenças iniciais já terem sido liberadas pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA).



**Figura 10:** Campo de Dunas do Perú. Acima: área do empreendimento Resort Perú e o zoneamento da APA do Pau Brasil, onde está inserido. Abaixo: representação do empreendimento como um todo, ressaltando em amarelo a localização do Club Med que é a porção que já possui LI – Licença de Instalação. Fonte das imagens: EIA-RIMA – Estudo de Impacto Ambiental – Relatório de Impacto ao Meio Ambiente do Resort Perú. (Mansur, 2010)

## 5. METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado em três etapas: de campo, gabinete e laboratório. A primeira consistiu na obtenção de amostras superficiais de sedimentos no Campo de Dunas do Perú em três pontos distintos, localizados nas figuras 11 (pontos Perú-1 e Perú-2, imagem de 2007) e 12 (Peró-3, imagem de 2016).



**Figura 11:** Localização dos pontos Perú-1 e Perú-2 no campo dunar do Perú. Modificado de Machado (2010)



**Figura 12:** Localização do ponto Perú-3 no campo dunar do Perú. Fonte: Google Earth. (Acessado em 23 de janeiro de 2017 às 14:40).

Os dois primeiros foram amostrados por Machado (2010) em agosto de 2007: Perú-1, que é localizado na duna de transição entre a área erosional e a relativamente estável e Perú-2, na pós-berma de assentamento. Já o ponto denominado Perú-3 foi amostrado em trabalho de campo realizado em novembro de 2016 em uma região plana com proximidade da vegetação. A amostragem buscou obter amostras com

distribuições granulométricas diferentes. A tabela 1 apresenta as coordenadas dos pontos amostrados.

**Tabela 1:** Coordenadas dos pontos amostrados no campo dunar do Perú.

<b>Peró-1</b>	<b>Peró-2</b>	<b>Peró-3</b>
24k	24k	24k
192811 E	192439 E	192921 E
7470221 N	7470080 N	7470108 N

A etapa de gabinete consistiu no levantamento de publicações referentes à área do campo de dunas do Perú para obter-se informações geológicas, geomorfológicas e ecológicas da área. Para isso, foram consultados artigos, teses, relatórios e livros. Na etapa de laboratório, foram seguidas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas para preparação e execução dos ensaios. Os sedimentos foram caracterizados por ensaios que determinaram sua densidade e granulometria. Também, como parte da etapa de laboratório, ensaios de determinação do ângulo de repouso e de resistência ao cisalhamento direto foram realizados.

E então, a partir dos dados obtidos em laboratório, com a realização de gráficos e tabelas, foi possível se chegar a uma conclusão dos resultados finais.

### **5.1 Ensaios de Caracterização – Granulometria**

O material derivado da amostragem apresenta partículas de tamanhos variados, sendo necessária uma análise granulométrica, com realização de ensaios de peneiramento fino e sedimentação, baseados na norma NBR 7181 (ABNT, 2016).

No peneiramento é determinada a granulometria da porção mais grossa do sedimento, aquela que fica retida na peneira de abertura 0,074 mm (nº 200), e de forma decrescente possibilita determinar a porcentagem de material retida em cada peneira do conjunto. Com o resultado do peneiramento é determinada uma parcela da curva granulométrica, a outra é obtida através do ensaio de sedimentação, que revela a quantidade de sedimentos finos em suspensão. Para o atual trabalho não houve necessidade de realizar o peneiramento grosso, pois as amostras não apresentam grãos com diâmetro maior que 2 mm, relativo a peneira nº 10.

O primeiro ensaio realizado foi o de sedimentação, que é baseado na equação 1:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18 \cdot \mu} \cdot D^2 \quad (1)$$

Onde:

$v$  = velocidade de queda das partículas

$\gamma_s$  = peso específico do material das partículas

$\gamma_w$  = peso específico do fluido

$\mu$  = viscosidade do fluido

$D$  = diâmetro da esfera

O ensaio consistiu em separar 120g de sedimento e imergir 125 ml de solução de hexametáfosfato de sódio 45,7%, agitando manualmente, para deflocular as partículas. Após um período de pelo menos 24h de descanso, o conteúdo foi levado até um aparelho agitador, que agiu durante 15 minutos. O material foi então transferido para uma proveta graduada até atingir a marca de 1L, sendo completada com água destilada, foi então agitado durante 1 minuto com movimentos verticais constantes, para que todo o material permanecesse em suspensão. Foram realizadas leituras com o auxílio de um densímetro nos intervalos definidos pela NBR 7181 (ABNT, 2016) contados a partir do fim da agitação manual.

Após a última leitura, o material resultante foi lavado com água destilada, após seco, foi encaminhado para se realizar o ensaio do peneiramento fino. O conjunto de peneiras utilizado foram as de número: 20, 30, 40, 60, 100 e 200 Mesh; sendo então fixadas a um agitador automático que vibrou esse conjunto durante 15 minutos. Cada parcela retida em cada peneira foi pesada e anotada para então se gerar a curva granulométrica.

Após a geração da curva granulométrica, foram calculados o coeficiente de curvatura ( $C_C$ ) e também o coeficiente de uniformidade ( $C_U$ ) através das equações 2 e 3, respectivamente.

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2)$$

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

Em relação ao coeficiente de uniformidade, quanto maior for o valor de  $C_U$  mais bem graduado é o sedimento. Sedimentos que apresentam  $C_U = 1$  são considerados sedimentos mal graduados. Já em relação ao coeficiente de curvatura, sedimentos bem graduados apresentarão  $C_C$  entre 1 e 3. Se o valor de  $C_C$  for menor que 1, a curva será descontínua com ausência de grãos. Dificilmente ocorrem areias com valores de  $C_C$  fora do intervalo de 1 a 3.

## 5.2 Massa específica Real dos Grãos

A massa específica real dos grãos ( $\rho_s$ ) é a relação entre a massa dos sedimentos sólidos e seu volume e é calculada pela equação 4:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (4)$$

Onde,

$M_s$  = massa dos sólidos

$V_s$  = volume dos sólidos

De acordo com a norma NBR 6508 (ABNT, 2016), para se determinar a massa dos sólidos  $M_s$  é utilizada uma balança. Já a medida do volume dos sólidos  $V_s$  é feita a partir da massa do sedimento seco, da massa de um picnômetro totalmente preenchido com água destilada e do mesmo picnômetro com a amostra de sedimento e cheio de água. Um esquema de determinação da massa específica dos grãos é apresentado na figura 13.

O volume de sedimento utilizado é igual ao volume de água deslocado calculado pela razão entre a massa da água deslocado ( $M_w$ ) e sua massa específica na temperatura do sistema, dado pelas equações 5 e 6:

$$V_s = V_w' \quad (5)$$

$$V_w' = M_w' / \rho_{wT} \quad (6)$$

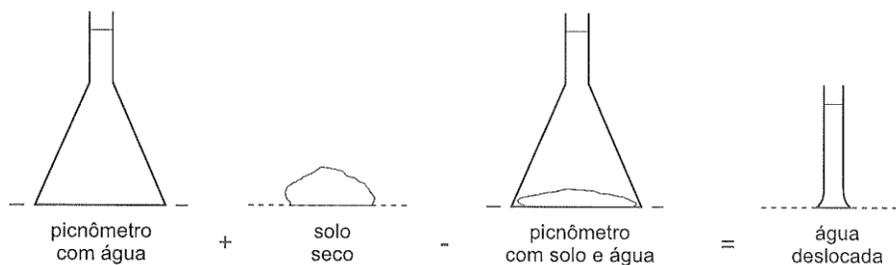
Onde,

$V_s$  = volume do sedimento

$V_w'$  = volume da água deslocada

$M_w'$  = massa da água deslocada

$\rho_{wT}$  = massa específica da água na temperatura do sistema ensaiado



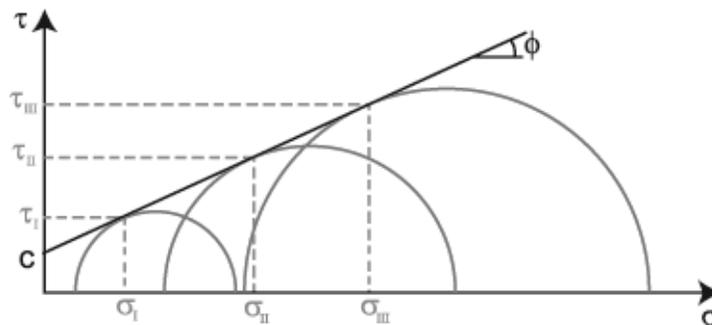
**Figura 13:** Esquema de determinação da massa específica dos grãos. (Pinto, 2006)

### 5.3 Resistência ao cisalhamento direto

A resistência ao cisalhamento de um determinado solo é tida como a máxima tensão de cisalhamento que o mesmo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão cisalhante no plano em que a ruptura ocorrer para uma dada tensão normal a esse plano. De acordo com o modelo de Mohr-Coulomb, os principais fatores que influenciam diretamente essa resistência são o atrito e a coesão entre os grãos. O ângulo de atrito corresponde ao ângulo máximo que a força transpassada pelo corpo à superfície pode fazer com a normal ao plano de contato até o limite em que não há deslizamento (Pinto, 2006). Já a coesão entre os grãos equivale a uma liga, uma cola que mantém os grãos unidos, pode ser coesão real, correspondente ao cimento, ou coesão aparente, apresentada por areias e solos não saturados, em função do teor de umidade e da presença de sais, devido à sucção.

Para se determinar a resistência ao cisalhamento de um determinado solo ou sedimento utiliza-se, entre outros métodos, o ensaio de cisalhamento direto. Esse consiste em se aplicar uma tensão normal num plano a fim de verificar-se a tensão cisalhante necessária para provocar a ruptura. A interpretação desse ensaio resulta na

determinação da envoltória de resistência, que é a relação entre a tensão normal ( $\sigma$ ) e a tensão cisalhante ( $\tau$ ) no plano de ruptura (envoltória de resistência), que pode ser obtida representando os resultados de cada ensaio em um gráfico “tensão normal x tensão cisalhante”. Se os pontos apresentam uma correlação linear, obtém-se a envoltória de Mohr-Coulomb, como representados na figura 14, onde  $c$  é a coesão e  $\phi$  é o ângulo de atrito.



**Figura 14:** Representação do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os três círculos representam o estado de tensão na ruptura em três ensaios.  $\tau$  = tensão cisalhante;  $\sigma$  = tensão normal.

Para o trabalho em questão, os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com o auxílio de uma prensa de cisalhamento direto fabricada pela Contenco, modelo Pavitest Cisalhamento, mostrado na figura 15. Esse equipamento é propriedade do Laboratório de Solos, setor de Geologia de Engenharia e Ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O ensaio consiste em dispor o corpo de prova em uma caixa bipartida na qual a parte superior sofre ação de uma tensão normal, determinada previamente, e então ocorre deslocamento horizontal em relação à parte inferior. O *software* Pavitest Cisalhamento, conectado ao equipamento, registra a tensão cisalhante em intervalos determinados e gera um gráfico da tensão cisalhante com o deslocamento horizontal relativo da parte superior da caixa.

Para o ensaio de cisalhamento direto utilizou-se amostras de Perú-1, Perú-2 e Perú-3 *in natura*, ou seja, do mesmo modo que foram amostradas em campo, secas ao ar, sem nenhum procedimento prévio ao ensaio. E, a fim de analisar a influência da presença de sais nos poros dos sedimentos, amostras foram acrescidas de solução com concentração de NaCl a 35%. Foi utilizada uma concentração alta, próxima à concentração de sais na água do mar, para avaliar se a coesão aparente é significativa.

As amostras *in natura* foram preparadas lançando a areia na caixa de cisalhamento de uma altura constante, e posteriormente compactando por vibração para atingir um estado de compacidade médio. As amostras com solução salina foram preparadas sendo a areia lançada de uma altura constante em uma quantidade pré-determinada de solução, até atingir uma altura de aproximadamente 2cm dentro da caixa de cisalhamento, depois foi aplicado o mesmo número de golpes à caixa e as amostras foram deixadas para secar ao ar por dois dias, a fim de se obterem amostras com porosidade e teor de umidade próximos. A porosidade foi calculada a partir da massa de solução e de areia utilizadas e do volume da amostra, e o teor de umidade foi determinado após cada ensaio, com uma porção da amostra retirada da superfície de ruptura.

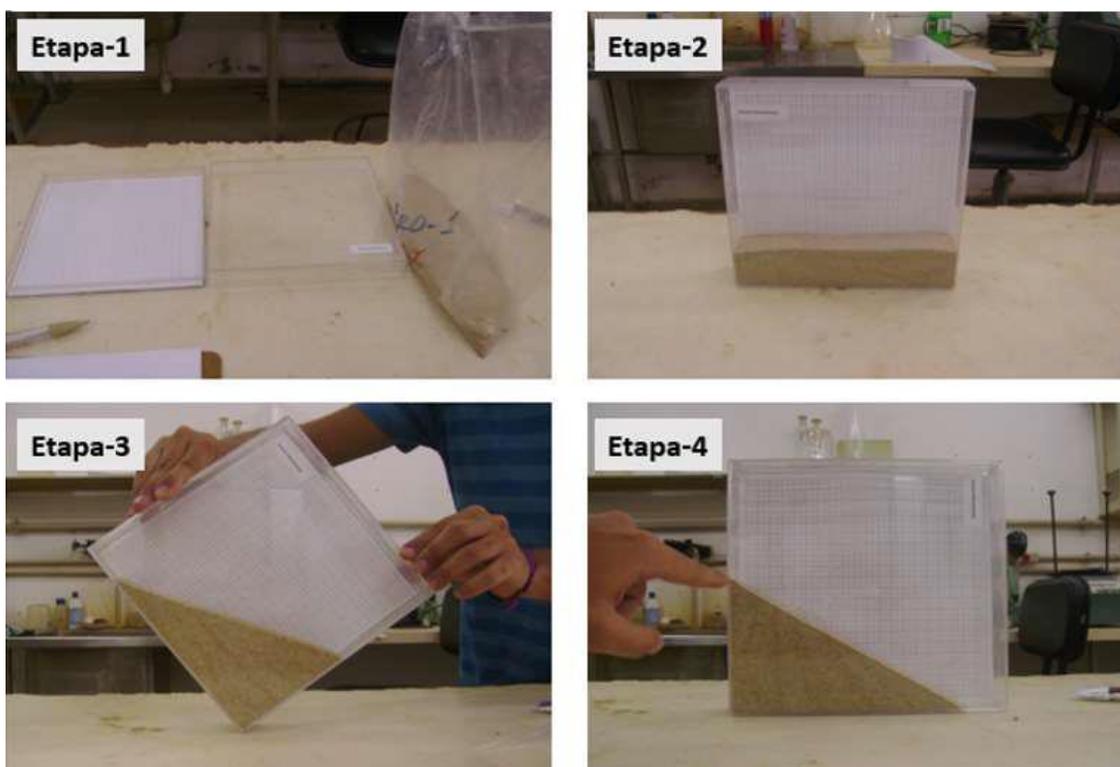


**Figura 15:** Equipamento de cisalhamento direto Pavitest Cisalhamento. À esquerda: detalhe demonstrando o corpo de prova e o ensaio pronto para ser realizado. Fonte: Fotos da autora.

#### **5.4 Determinação do ângulo de repouso**

O ângulo de repouso é o ângulo que se forma entre a superfície da massa de grãos e o plano horizontal, quando despejados em uma superfície plana. O ângulo de repouso teoricamente é igual ao ângulo de atrito medido com tensão normal nula, ou seja, no trecho inicial da envoltória de resistência ao cisalhamento. No presente trabalho o método para medição desse ângulo utilizou-se de uma caixa de plástico transparente, de dimensões 21,1 cm x 21,1 cm x 3,5 cm, para possibilitar a visualização do teste, na qual foi depositada uma amostra de sedimento. A figura 16

demonstra as etapas, descritas por García (2015), para se determinar o ângulo de repouso.



**Figura 16:** Processo de medição do ângulo de repouso da areia. (García, 2015)

A Etapa-1 consiste em se pesar e separar uma quantidade de aproximadamente 500g de material que é depositado na caixa plástica, como mostrado na Etapa-2. Nesta etapa é colocada a areia e nivelada paralelo à base da caixa. A caixa deve ser lentamente inclinada, Etapa-3, a uma taxa de giro constante e baixa. Quando a caixa gira  $90^\circ$  e o material desliza formando uma superfície inclinada, então o ângulo de inclinação é medido com o auxílio de um transferidor ou calculado a partir das medidas da base e altura do triângulo formado, como ilustrado na Etapa-4.

Um modelo para determinação experimental do ângulo de repouso está representado na figura 17. Como pode ser visto, dependendo do peso da amostra utilizada, o resultado após a caixa ser inclinada pode ser um triângulo ou trapézio. Os resultados obtidos aqui foram em função do cálculo para o triângulo, já que a quantidade de sedimento utilizado foi, aproximadamente, a mesma em todos os casos.

Para cada amostra foram realizadas pelo menos três medidas, até que a diferença entre o menor e maior valor não fosse maior que  $2^\circ$ . Foram medidas também

as dimensões do triângulo resultante, para se calcular o volume total de areia na caixa. Além da medida com ângulo de repouso foi calculada também a porosidade da amostra no ensaio através da equação 7:

$$\eta = 1 - \frac{M_s}{\rho_s \cdot V_t} \quad (7)$$

Onde

$\eta$  = porosidade

$M_s$  = massa de grãos de areia

$\rho_s$  = massa específica dos grãos

$V_t$  = volume total da areia na caixa após atingir a superfície de equilíbrio.

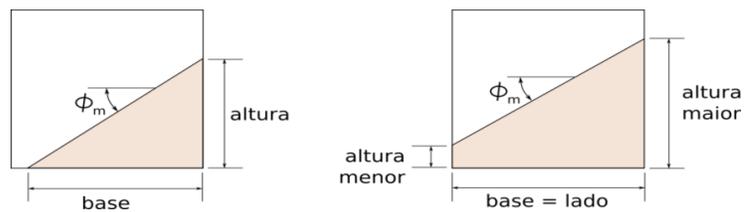


Figura 17: Modelo para determinação experimental do ângulo de repouso.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Granulometria

O resultado da caracterização granulométrica das amostras Perú-1, Perú-2 e Perú-3 estão representadas nas curvas granulométricas a seguir que foram agrupadas em um mesmo gráfico correspondente a figura 18

A partir da curva granulométrica, calculou-se a porcentagem aproximada da distribuição granulométrica para cada amostra e foi gerado o gráfico representado na figura 19.

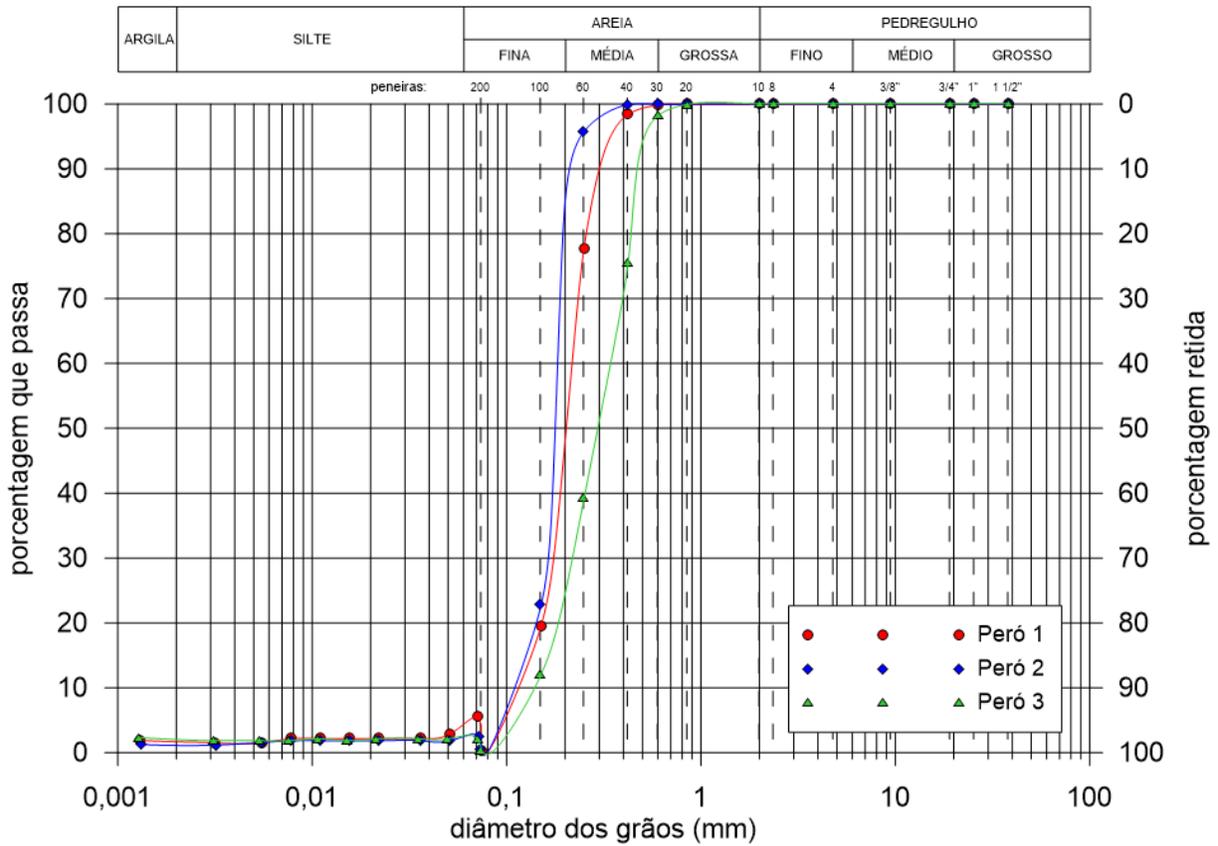


Figura 18: Curvas granulométricas resultantes da caracterização das amostras Peró-1, Peró-2 e Peró-3.

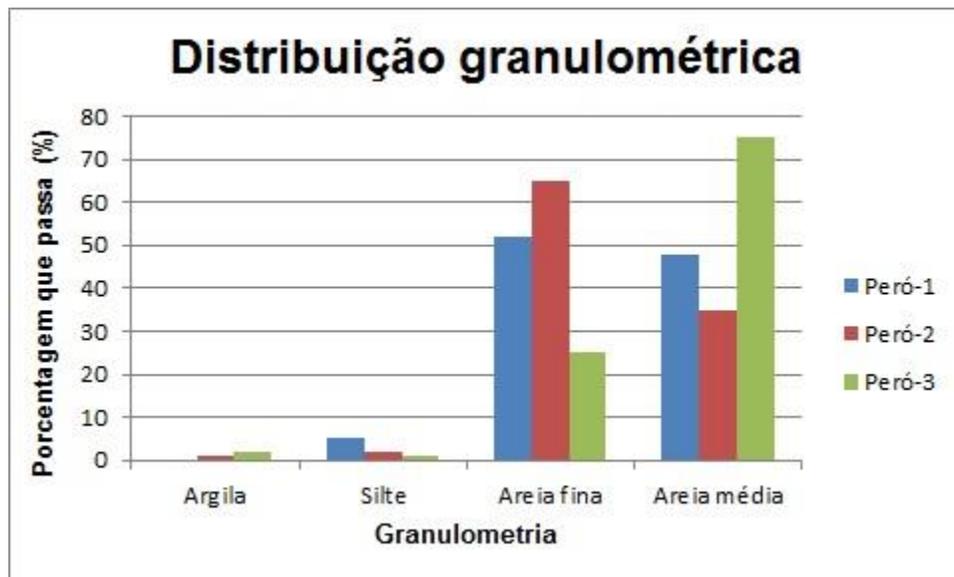


Figura 19: Distribuição granulométrica para as amostras Peró-1, Peró-2 e Peró-3.

Os valores obtidos para os parâmetros  $C_U$  e  $C_C$  encontram-se na tabela 2.

**Tabela 2:** Valores para o coeficiente de uniformidade e o coeficiente de curvatura.

Amostra	$C_U$	$C_C$
Peró-1	1,68	1,10
Peró-2	1,67	1,07
Peró-3	2,33	0,92

## 6.2 Massa Específica Real dos Grãos

Os valores de massa específica real calculados para as amostras estão representados na tabela 3.

**Tabela 3:** Valores de massa específica real dos grãos.

Amostra	Massa específica real dos grãos ( $\text{g/cm}^3$ )
Peró-1	2,68
Peró-2	2,61
Peró-3	2,70

Esses valores se assemelham à massa específica do quartzo que foi descrita por Dana (1978) como  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . O único um pouco mais discrepante foi o relativo à amostra Peró-3, que apresenta alguns sedimentos orgânicos como conchas.

## 6.3 Resistência ao cisalhamento direto

O resultado dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto foi apresentado na forma de envoltórias de Mohr-Coulomb representadas nas figuras 24, 25 e 26 para as amostras Peró-1, Peró-2 e Peró-3, respectivamente. Cada figura inclui tanto a envoltória com a influência salina quanto *in natura*.

Para tentar explicar o motivo de alguns pontos terem ficado fora das envoltórias, destoando do resultado desejado, foram medidos os parâmetros de umidade e porosidade para os corpos de prova. Foi desenvolvida então uma tabela com os valores das tensões – normal e cisalhante –, umidade e porosidade dos corpos de provas de cada amostra com e sem sal.

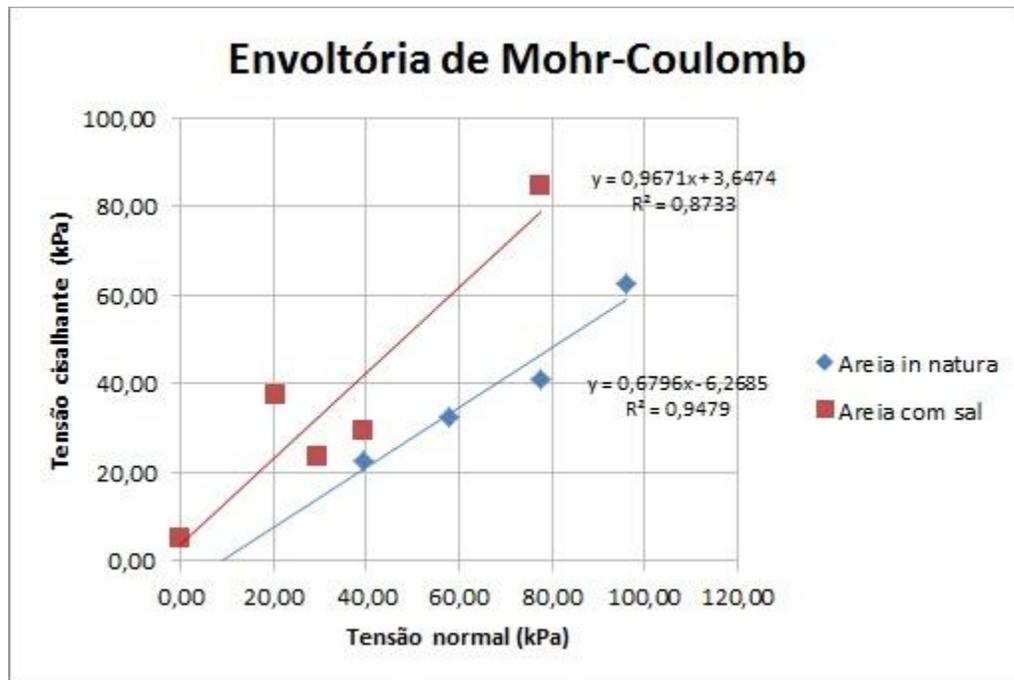
As medidas de porosidade basearam-se na altura do corpo de prova e na massa dos grãos nela ensaiados e procurou-se manter aproximadamente os mesmos valores para esses fatores. Já as medidas de umidade dependeram da massa dos grãos após os ensaios, então não se conseguiu manter um padrão. Além disso, a umidade das

amostras só foi medida a partir dos ensaios com as amostras de Però-2, pois até esse momento essa relação não tinha sido realizada.

Além desses parâmetros, para os ensaios com sal, foi calculada a massa de sal em cada ensaio a partir da equação 8:

$$\frac{M_{sal}}{M_{areia}} = \frac{C}{1 + C} \frac{M_{solução}}{M_{areia}} \quad (8)$$

Sendo C = 0,035 g de sal/g de água



**Figura 20:** Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Però-1 *in natura* e com a presença de sal.

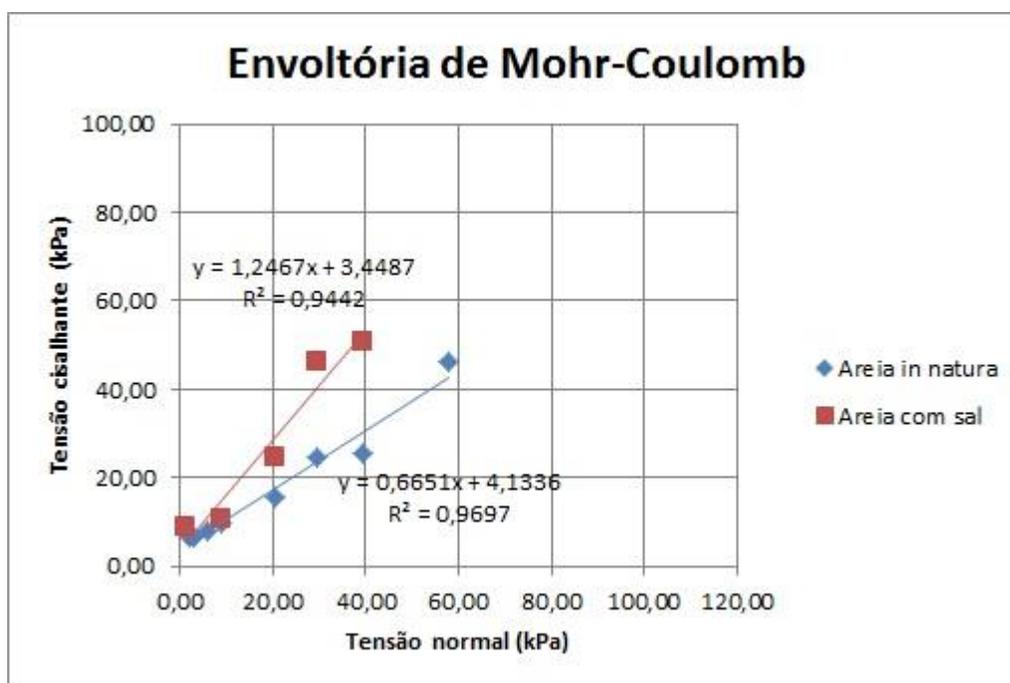
**Tabela 4:** Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Però-1 *in natura*.

Ensaio	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Porosidade (%)
1	39,2	22,6	38,1
2	57,9	32,4	37,8
3	77,5	41,2	38,5
4	96,1	62,8	35,1

**Tabela 5:** Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-1 com sal.

Ensaio	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Porosidade (%)	Massa de sal (g)
1	0,0	4,9	42,4	7,4
2	20,6	37,3	38,1	7,7
3	29,4	23,5	43,4	7,2
4	39,2	29,4	51,4	7,7
5	77,5	84,3	47,6	7,1

O ensaio 4 da amostra *in natura* apresentou uma menor porosidade e a resistência ficou acima da envoltória ajustada, mostrando coerência com o comportamento esperado da areia. O mesmo ocorreu nos ensaios realizados com sal. A compacidade dos ensaios está relacionada à resistência, quanto maior a compacidade, maior será a resistência de uma mesma amostra.



**Figura 21:** Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Perú-2 *in natura* e com a presença de sal.

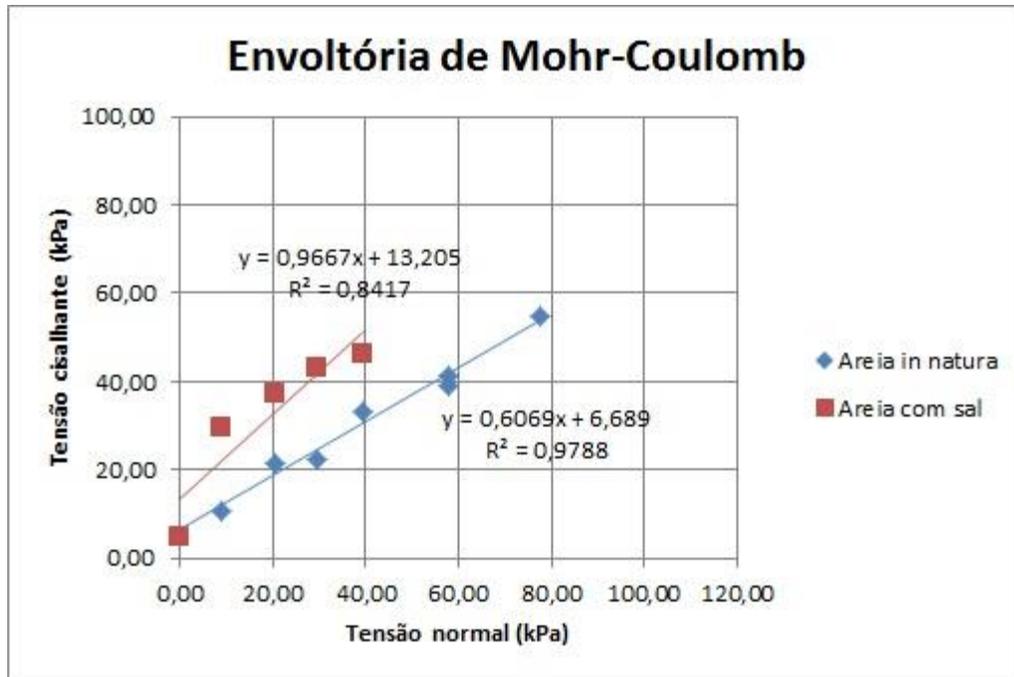
**Tabela 6:** Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-2 *in natura*.

Ensaio	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Porosidade (%)
1	2,0	6,9	33,6
2	2,9	6,9	33,6
3	2,9	6,9	38,2
4	5,9	7,9	38,2
5	8,8	9,8	38,2
6	20,6	15,7	38,2
7	29,4	24,5	37,7
8	39,2	25,5	37,8
9	57,9	46,1	37,6

**Tabela 7:** Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-2 com sal.

Ensaio	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Porosidade (%)	Umidade (%)	Massa de sal (g)
1	1,4	8,8	40,6	4,0	7,4
2	8,8	10,8	48,0	3,3	7,2
3	20,6	24,5	40,5	-	7,4
4	29,4	46,1	40,5	0,6	7,4
5	39,2	51,0	40,5	-	7,4

O coeficiente de determinação das duas curvas (*in natura* e com sal) foi alto, indicando baixa dispersão dos pontos. As porosidades dos corpos-de-prova foram consideravelmente uniformes e não foi determinada a umidade de todas as amostras, logo esses parâmetros não podem ser usados para explicar a dispersão dos resultados.



**Figura 22:** Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Perú-3 *in natura* e com a presença de sal.

**Tabela 8:** Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-3 *in natura*.

Ensaio	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Porosidade (%)
1	8,8	10,8	47,6
2	20,6	21,6	39,3
3	29,4	22,6	39,2
4	39,2	33,3	35,9
5	57,9	41,2	39,2
6	57,9	39,2	39,2
7	77,5	54,9	42,3

**Tabela 9:** Tabela com tensões e porosidade para o ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-3 com sal.

Ensaio	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Porosidade (%)	Umidade (%)	Massa de sal (g)
1	0,0	4,9	45,0	0,6	7,4
2	8,8	29,4	42,3	2,2	7,4
3	20,6	37,3	42,3	2,5	7,2
4	29,4	43,2	45,1	0,3	7,4
5	39,2	46,1	42,3	0,6	7,1

O coeficiente de determinação da envoltória da amostra *in natura* foi alto, indicando baixa dispersão dos pontos, assim como no ensaio da amostra Perú 2. Também não houve variação significativa nas porosidades. Na envoltória com sal, o ponto correspondente a tensão normal nula ficou discrepante em relação aos outros pontos, levando a um coeficiente de determinação mais baixo.

Devido à presença do sal, as envoltórias para esses ensaios se posicionaram acima dos casos sem sal, sendo justificado pela coesão nesses casos, observada na interseção da envoltória com o eixo das ordenadas (tensão cisalhante).

O ângulo de atrito foi encontrado a partir do cálculo da tangente de cada envoltória. A tabela 10 apresenta os valores dos ângulos de atrito para a presença e ausência da solução salina e também os valores de coesão nos casos com a solução, para cada amostra e também para os casos *in natura*, já que os mesmos, ao contrário do esperado, apresentaram um valor de coesão, sendo possível interpretar ou por umidade durante o processo do ensaio ou por sal que já estava presente.

**Tabela 10:** Valores do ângulo de atrito com e sem influência de solução salina e da coesão *in natura* e com sal.

<b>Amostra</b>	<b>Ângulo de atrito sem sal (graus)</b>	<b>Ângulo de atrito com sal (graus)</b>	<b>Coesão <i>in natura</i> (kPa)</b>	<b>Coesão com sal (kPa)</b>
Peró-1	34	35	-6,3	9,8
Peró-2	33	51	6,1	3,5
Peró-3	32	44	5,7	13,2

De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), o ângulo de atrito é independente da sucção, logo a coesão aparente influencia apenas na coesão. Porém, isso nem sempre é verdadeiro, conforme observado por diversos autores, cujos resultados experimentais mostram que a coesão sempre aumenta com a sucção, mas o ângulo de atrito pode aumentar ou diminuir (Boszcowski, 2008). Os resultados deste trabalho mostram que, além do aparecimento da parcela de coesão aparente, o ângulo de atrito também aumentou na presença do sal, possivelmente devido à agregação das partículas provocada pela sucção osmótica.

#### 6.4 Determinação do ângulo de repouso

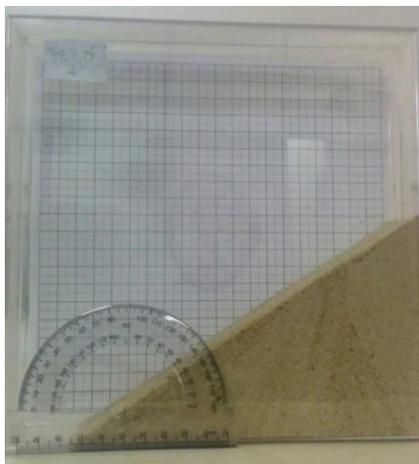
Para o ângulo de repouso foram utilizados dois métodos: cálculo a partir dos lados do triângulo e visualmente com o auxílio de um transferidor. As figuras 27, 28 e 29 representam os ângulos de repouso médios para Però-1, Però-2 e Però-3, respectivamente.

Na tabela 11 são descritos os ângulos de repouso, calculados através do método citado anteriormente utilizando os lados do triângulo, para as três medidas realizadas para cada amostra. Já a tabela 12 apresenta ângulos de repouso medidos com o transferidor para as amostras, também foram realizadas três medidas para cada amostra.

Os valores de porosidade das amostras usadas para medir o ângulo de repouso encontram-se na tabela 13.



**Figura 23:** Ângulo de repouso para Però-1, medido com o auxílio de um transferidor, no valor de 33°



**Figura 24:** Ângulo de repouso para Peró-2, medido com o auxílio de um transferidor, no valor de 32°.



**Figura 25:** Ângulo de repouso para Peró-3, medido com o auxílio de um transferidor, no valor de 33°.

**Tabela 11:** Ângulos de repouso calculados para as amostras.

Amostra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média
Peró-1	34°	33°	34°	34°
Peró-2	32°	33°	33°	33°
Peró-3	32°	34°	33°	33°

**Tabela 12:** Ângulos de repouso medidos com o transferidor para as amostras.

Amostra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média
Peró-1	33°	32°	34°	33°
Peró-2	33°	34°	33°	33°
Peró-3	33°	35°	33°	33°

**Tabela 13:** Valores de volume e porosidade das amostras.

<b>Amostra</b>	<b>Medida</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosidade (%)</b>
Peró-1	1	3,4	552,1	2,67	38,4
	2	3,4			38,6
	3	3,4			38,4
Peró-2	1	3,6	552,7	2,61	41,1
	2	3,5			38,9
	3	3,5			38,9
Peró-3	1	3,4	567,5	2,70	37,5
	2	3,4			38,5
	3	3,5			39,4

Os resultados mostram que a porosidade nas medidas do ângulo de repouso foi semelhante às porosidades nos ensaios de cisalhamento direto, permitindo uma comparação entre o ângulo de atrito da areia *in natura* com o ângulo de repouso. Observou-se uma diferença nos ângulos de repouso e de atrito nas três amostras, sendo a maior diferença obtida para a amostra Peró-2, com granulometria mais fina. O ângulo de atrito foi menor que o ângulo de repouso para a amostra Peró-1 e maior para as outras amostras. Esperava-se que o ângulo de repouso, que é medido na superfície da areia sem tensão normal aplicada, ficasse próximo do ângulo de atrito medido com tensões normais baixas, que corresponde ao trecho inicial da envoltória de resistência ao cisalhamento. Possíveis explicações para esta diferença podem ser a dispersão dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto ou a possibilidade de a envoltória não ser linear no intervalo de tensões dos ensaios.

## **7. CONCLUSÕES**

O procedimento de preparação dos corpos-de-prova foi eficiente a fim de que fossem obtidas porosidades aproximadamente uniformes, permitindo uma comparação entre os resultados dos diferentes corpos-de-prova de uma mesma amostra. O teor de umidade, por outro lado, variou entre os corpos-de-prova, pois este parâmetro depende da temperatura e da umidade relativa do ar durante o tempo de secagem ao ar, e é

medido somente após o cisalhamento, não sendo possível um controle eficaz deste parâmetro.

Apesar da dispersão encontrada em alguns pontos das envoltórias, pode-se considerar que os resultados foram satisfatórios. Notou-se que a influência do sal a proporções altas, como a utilizada aqui, 35 ‰, próximas à salinidade do mar, apresenta efeitos diretos com relação à resistência ao cisalhamento das amostras das Dunas do Perú, representados aqui pelas envoltórias com sal que foram projetadas acima das sem sal. Observa-se que a presença de sal, por meio da sucção osmótica, provocou o aparecimento de coesão aparente significativa nas amostras com a concentração utilizada. Os resultados mostram que o ângulo de atrito também foi influenciado pela presença de sal, possivelmente em consequência da agregação de partículas provocada pela sucção osmótica.

Os ensaios iniciais apresentaram mais problemas, devido à falta de conhecimento acerca do equipamento. Esse trabalho foi o primeiro no qual os ensaios de cisalhamento direto foram realizados no *Pavitest Cisalhamento*, então resultados não satisfatórios podem ser justificados pela falta de experiência com o aparelho.

As medidas do ângulo de repouso foram diferentes do ângulo de atrito, possivelmente devido à dispersão nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto e pela variação na tensão normal aplicada nestes ensaios, enquanto o ângulo de repouso é medido sem tensão normal.

Os resultados mostram que a presença do sal nos poros da areia úmida aumenta a coesão aparente entre os grãos dos sedimentos e diminui a erodibilidade desses sedimentos. Este efeito é variável, devido à variação da umidade com a precipitação pluviométrica e evaporação e pela intensidade do transporte do sal pela névoa salina. Resultados como os obtidos neste trabalho podem ser inseridos em modelos de erosão eólica e migração de dunas, contribuindo para a compreensão e previsão destes fenômenos.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 – Solo – análise granulométrica – método de ensaio.** Rio de Janeiro. 13p. 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508 – Solo – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica – Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 13p. 2016.

BARBOSA, D.S. **Sedimentação Orgânica na Lagoa Brejo do Espinho (Cabo Frio, RJ): Composição e Implicações Paleoclimáticas** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2003.

BASTOS, C. A., B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.** Tese de Doutorado, Engenharia Civil, UFRGS. 1999.

BOSZCZOWSKI, R. B. **Avaliação das propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio. 2008.

CASTRO, J.W.A. **Geomorfologia do Sistema Sedimentar Eólico de Paracuru - Ceará.** Rio de Janeiro / UFRJ. PPGG - Instituto de Geociências, 201 p. Tese (Doutorado). 2001.

CASTRO, J. W. A. **Dunas costeiras do litoral de Cabo Frio - RJ.** In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 5., São Luis. Resumos. Universidade Federal do Maranhão, 245 - 247 p. 2002.

CASTRO, J.W.A. **Dunas costeiras do Município de Cabo Frio/Estado do Rio de Janeiro-Brasil.** b. Disponível em [http://www.reservataua.com.br/Dunas\\_Costeiras.htm](http://www.reservataua.com.br/Dunas_Costeiras.htm). Acessado em 15/01/2017. 2006.

COE, H.H.G. & CARVALHO, C.N. **Seria Cabo Frio um enclave semiárido no litoral úmido do estado do Rio de Janeiro?** VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física. II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física. Universidade de Coimbra, Maio de 2010.

DANA, J. D. **Manual de mineralogia.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. LTC editora. 642p. 1978.

DICKINSON, E. **Ventos e Desertos.** Para Entender a Terra, Cap 15. São Paulo. Bookman. 2006.

ELIAS, M. C. **Manejo tecnológico da secagem e do armazenamento de grãos.** 1. ed. Pelotas: Editora Cópias Santa Cruz, 1ª ed., v. 1. 368p. 2008.

FERNANDEZ, G.B., PEREIRA, T.G., ROCHA, T.B. **Coastal Dunes along Rio de Janeiro Coast: Evolution and Management.** Journal of Coastal Research,

SI 56 (Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Coastal Symposium), 307-311. Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0258. 2009.

FERNANDEZ, G.B. & ROCHA, T.B. **Barreiras costeiras Holocênicas: geomorfologia e arquitetura deposicional no litoral do Rio de Janeiro.** Revista Brasileira de Geomorfologia 16 (2), 301-319. 2015.

FREDLUND, D. G., RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils.** John Wiley & Sons, Inc. 1993.

GARCÍA, R.S. **Análise das condicionantes naturais e propriedades mecânicas de solos arenosos e sua influência na caracterização físico e geológica das dunas costeiras de Cabo Frio e Natal.** Tese (Doutorado em Geociências). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 245f. 2015.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil.** Beca editora. São Paulo. 900p. 2012.

HEILBRON, M., MOHRIAK, W.U., VALERIANO, C.M., MILANI, E.J., ALMEIDA, J., TUPINAMBÁ, M. **From collision to extension: The roots of the southeastern continental margin of Brazil.** In: Mohriak W.U. & Talwani M. (eds). Atlantic Rifts and continental margins – Geophysical Monograph 115. American Geophysical Union. p. 1-32. 2000.

HEILBRON, M. & MACHADO, N. **Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic Eopaleozoic Ribeira belt SE Brazil.** Precambrian Research, v.125, p.87–112. 2003.

HESP, P. **Coastal sand dunes: form and function.** Coastal Dune Vegetation Network Technical Bulletin No. 4. New Zealand Forest Research Institute, Rotorua. 28p. 2000.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cabo Frio, RJ.** <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=330070>. Acessado em 22 de janeiro de 2017.

MACHADO, W.A. **A influência da salinidade na erodibilidade das dunas do Perú.** Monografia de Graduação, IGEO/UFRJ - Departamento de Geologia. 28 p, 2010.

MANSUR, K.L. **Diretrizes para Geoconservação do Patrimônio Geológico do Estado do Rio de Janeiro: o caso do Domínio Tectônico Cabo Frio.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

MANSUR, K.L.; GUEDES, E.; ALVES, M.G.; NASCIMENTO, V.; PRESSI, L.F.; COSTA JR., N.; PESSANHA, A.; NASCIMENTO, L.H.; VASCONCELOS, L.H. **Geoparque Costões e Lagunas do Rio de Janeiro (RJ).** In: Schobbenhaus, C.

& Silva, C.R. **Geoparques do Brasil: Propostas**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, Volume 1, p. 687-745, 2012.

MARTINS, L.R., TABAJARA, L.L., FERREIRA, E.R. **Linha de Costa: Problemas e Estudos**. Gravel, 2. ISSN 1678-5976 40-56. Porto Alegre. Outubro, 2004.

MEDEIROS, P.H.C. **Estudo da influência da névoa salina na migração de dunas costeiras das regiões do Perú e dos Lençóis Maranhenses**. 69 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

MORAES, J.M. **Geologia do Granito Silva Jardim (RJ) Implicações na evolução tectônica dos Terrenos Oriental e Cabo Frio**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

OLIVEIRA FILHO S.R. **Morfodinâmica Associada entre Duna, Praia e Zona Submarina como Subsídio a Adequada Ocupação do Espaço Costeiro na Praia do Perú – RJ**. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências e Tecnologia. Área: Análise Geoambiental e Ordenação de Territórios de Regiões Semiáridas e Litorâneas, Universidade Estadual do Ceará. 96p. 2011.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 359p. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RAMOS, R.R.C., CASSAR, J.C.M., GUSMÃO, L.A.B., 2003. **Modelo evolutivo do campo de dunas do Perú (município de Cabo Frio/RJ) e cálculo de transporte eólico**. In Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, 2. Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 9 e Congresso do Quaternário dos Países de Língua Ibéricas, 2. Recife.

SCHMITT, R.S.; TROUW, R.A.J.; SCHMUS, W.D.V.; PIMENTEL, M.M.. **Late amalgamation in the central part of West Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian collisional orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil)**. Precambrian Research, v.133, p.29–61, 33p. 2004.

SCHMITT, R.S., TROUW, R.A.J., MEDEIROS, S.R., DANTAS, E.L. **Age and geotectonic setting of Late Neoproterozoic juvenile mafic gneisses and associated paragneisses from the Ribeira belt (SE Brazil) based on geochemistry and Sm–Nd data — Implications on Gondwana assembly**. International Association for Gondwana Research, v.13, p502-515. 2008.

SCHMITT, R.S., TROUW, R., SCHMUS, W.R.V., ARMSTRONG, R., STANTON, N.S.G. **The tectonic significance of the Cabo Frio Tectonic Domain in the SE Brazilian margin: a Paleoproterozoic through Cretaceous saga of a reworked continental margin**. Brazilian Journal of Geology, 46(Suppl 1): 37-66, June 2016.

SÍGOLO, J.B. **Processos eólicos: a ação dos ventos**. Decifrando a Terra. Cap12. São Paulo. Oficina de textos. 2000.

SILVA, A.S. **Análise histórica da migração das dunas do Perú**. Geo UERJ, v.2, p.437-458. 2012.

SOARES, R. M. **Resistência ao cisalhamento de um solo coluvionar não saturado do Rio de Janeiro, RJ**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio. 2005.

SOUZA, T.C.S., CARVALHO, M.A., DIAS, F.F., BARRETO, C.F., FREITAS, A.S., CASTRO, J.V.A. **Analysis of particulate organic matter in Holocene sediments of coastal plain from Pero Beach, Cabo Frio, Rio de Janeiro, Brazil**. Journal of Sedimentary Environments, 1(2): 249-260. 2016.

TROUW, R.A.J., HEILBRON, M., RIBEIRO A., PACIULLO, F., VALERIANO, C., ALMEIDA, J.C.H., TUPINAMBÁ, M., ANDREIS, R.R. **The central segment of the Ribeira belt**. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz-Filho A., Campos D.A. (eds.). Tectonic Evolution of South America. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 287-310. 2000.

TUPINAMBÁ, M., HEILBRON, M., DUARTE, B.P., NOGUEIRA, J.R., VALLADARES, C., ALMEIDA, J., SILVA, L.G.E., MEDEIROS, S.R., ALMEIDA, C.G., MIRANDA, A., RAGATKY, C.D., MENDES, J., LUDKA, I. **Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: Estado da Arte e Conexões com a Faixa Araçuaí**. Geonomos 15(1):67-79, 2007.