



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA NÉVOA SALINA  
NA MIGRAÇÃO DE DUNAS COSTEIRAS DAS  
REGIÕES DO PERÓ E DOS LENÇÓIS  
MARANHENSES**

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  
requisito necessário à obtenção do grau  
de Geólogo.

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Rio de Janeiro  
Julho de 2015

# ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA NÉVOA SALINA NA MIGRAÇÃO DE DUNAS COSTEIRAS DAS REGIÕES DO PERÓ E LENÇÓIS MARANHENSES

Pedro Henrique Calçada de Medeiros

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

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.

Aprovada por:

---

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

---

Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso

---

Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho

Rio de Janeiro  
Julho de 2015

“Abaixo de toda a crosta terrestre  
ondulada, de todo o solo deslizante e  
suave.

Distante, mais profunda que o oceano,  
mais além da rocha que contra a rocha  
lamuria-se na desdita,

Lá, na mais profunda escuridão e na  
visceral luxúria do globo grave,  
Pode você ouvir o açoite murmurante  
do magma quando se eleva e se agita?”

*Robert Penn Warren*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Simone e Marco Aurélio, por todo apoio, carinho e orientações durante minha formação acadêmica, e à minha irmã Martha, incentivadores na busca do meu sonho geológico.

Aos meus avós Deysa e Cleuber (*in memoriam*), pela sabedoria e amor incondicional transmitidos a mim.

Aos meus padrinhos Natália e Laerti, que desempenharam com maestria seus papéis de segundos pais, símbolos de afeto e companheirismo.

Aos amigos René e Fátima, por todo o conhecimento transmitido e pela ajuda incansável prestada no desenvolvimento desse trabalho.

À professora Andrea Borges pela orientação, ajuda e paciência para sanar dúvidas persistentes e por confiar em mim a responsabilidade de dar continuidade ao presente projeto.

À minha grande amiga de infância Juliana Rappaport, que me acompanhou no dia da minha matrícula na UFRJ e testemunhou minha caminhada passo a passo, incentivando-me com entusiasmo durante todos esses anos.

Ao querido amigo Luiz Carlos por todo o incentivo dado durante minha graduação e por ter caminhado ao meu lado quando mais precisei.

Aos queridos amigos de curso Diego Vieira, Paula Pinel, Beatriz Sabino e Fernanda Pessanha por todos esses anos de amizade e convivência agradável.

Ao meu querido Thiago Teles, por toda a ajuda, incentivo, carinho, paciência e compreensão nos meus momentos de ausência durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida para o desenvolvimento desse projeto.

Por fim agradeço a todos os demais amigos e pessoas que, de alguma forma, participaram dessa caminhada geológica junto a mim e proporcionaram o sucesso dessa trajetória.

## RESUMO

### ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA NÉVOA SALINA NA MIGRAÇÃO DE DUNAS COSTEIRAS DAS REGIÕES DO PERÓ E LENÇÓIS MARANHENSES

Pedro Henrique Calçada de Medeiros

Orientadora: Andréa Ferreira Borges

Resumo do trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Geólogo.

A migração de dunas é um fenômeno natural, sendo o produto dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos pelo vento. Sua erodibilidade está relacionada com o seu processo migratório e pode ser influenciada por variações em parâmetros físicos, ao variarem as suas condições de umidade, salinidade, temperatura, pluviosidade e exposição à névoa salina. Apesar de natural, o fenômeno da erosão eólica pode ser deflagrado ou acentuado por intervenções antrópicas nos ambientes dunares, como por exemplo a remoção da vegetação nativa local ou a presença de construções rígidas com o objetivo de desviar ou conter o seu avanço. Além disso, quando a migração atinge construções, vias e corpos d'água, ocasionando soterramento e/ou assoreamento e levando à perda de patrimônio, é considerada um desastre ambiental. A sucção osmótica é uma parcela da sucção total no solo e, juntamente com a sucção mátrica, resulta da presença de sais no fluido dos poros. Em ambientes costeiros, quando os sais trazidos pela névoa salina presentes nos poros do material arenoso são dissolvidos após um evento pluviométrico na região, há uma variação na sucção osmótica, o que possui efeito no comportamento mecânico da areia. Para esse trabalho, foram analisados três materiais arenosos provenientes de campos dunares de dois distintos locais do território brasileiro: o campo de dunas do Peró, município de Cabo Frio/RJ e a região dos Pequenos Lençóis, no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM)/MA. Visando contribuir com os estudos brasileiros sobre migração dunar, foram simulados diferentes ambientes sob a ação da névoa salina com intensidades distintas, através do borrifamento de solução de NaCl nas concentrações 18% e 35% sobre os sedimentos. A fim de investigar o efeito da presença dos sais no comportamento mecânico da areia e na evaporação da água presente em seus poros, as amostras foram analisadas por ensaios de caracterização granulométrica, resistência ao cisalhamento direto, evaporação, salinidade, sucção osmótica, além de testes em um túnel de vento subsônico de pequenas dimensões. Comparando os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados com e sem a presença de solução salina, verificou-se influência significativa do sal no que diz respeito à erodibilidade dos sedimentos em relação aos testes realizados apenas sob influência de água destilada.

**Palavras-chave:** Dunas costeiras, névoa salina, erosão eólica, salinidade

## ABSTRACT

### STUDY OF SALTY SPRAY INFLUENCE ON THE MIGRATION OF PERÓ AND LENÇÓIS MARANHENSES COASTAL DUNES

Pedro Henrique Calçada de Medeiros

Academic advisor: Andrea Ferreira Borges

Final course assignment abstract submitted to the Geology Department of Rio de Janeiro Federal University – UFRJ, Geosciences Institute, as part of the requirements for obtaining the geologist degree

Dune migration is a natural phenomenon, being the product of erosion, transport and sedimentation processes by the wind. Its erodibility is related to the migration process and can be influenced by changes on physics parameters, varying the humidity, salinity, temperature, rainfall rates and exposure to the salty spray conditions. Though it is a natural process, the wind erosion phenomenon can be started or raised by human modifications on dune areas, like the removing of native vegetation and the presence of rigid constructions to aiming at deviate the dune migration or restrain its movement. Furthermore, when the migration phenomenon hits constructions, roads or water bodies, silting and burying it, it can be considered an environmental disaster. The osmotic suction is a portion of the total suction on a soil and together with matric suction, it is the result of the salt presence in the fluid contained in the pores of the soil. On coastal areas, when the salts carried by salty spray in the pores are dissolved by a pluviometric event, there is a change on the osmotic suction, generating an effect on the mechanical behavior of sand. For this work, three sandy materials from different areas of Brazilian territory were analyzed: the Peró dune field, Cabo Frio/RJ, and the region of Pequenos Lençóis, on the Lençóis Maranhenses National Park (PNLM)/MA. Aiming contributing to the Brazilian researches about dune migration, some ambients under salty spray influence with different intensities were simulated through spraying NaCl solution with the concentrations 18% and 35% on the grains. In order to investigate the salt effect on the mechanical behavior of sand and the evaporation of the water contained in his pores, the samples were analyzed by tests of granulometric characterization, direct shear resistance, evaporation, salinity and conductivity, and tests in a subsonic wind tunnel with small dimensions. Comparing the results obtained on the tests with and without the salty solution, it was found the significant influence of the salt on the sediments erodibility if it is compared to the tests only under the distilled water influence.

**Key words:** coastal dunes, salty spray, wind erosion, salinity

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Efeito da erosão eólica na região dos Lençóis Maranhenses. (Foto do autor. Agosto de 2014) .....	14
<b>Figura 2.</b> Castelo de areia na praia de Copacabana, Rio de Janeiro – RJ. (Disponível em <a href="http://www.panoramio.com">www.panoramio.com</a> . Acessado às 17h de 21 de março de 2015) .....	15
<b>Figura 3.</b> Região do Perú, município de Cabo Frio – RJ. Disponível no Google Earth. Acessado às 19h de 23 de março de 2015. ....	16
<b>Figura 4.</b> Campo de dunas do Perú em 1958 (esq.) e sua conformação atual (dir.). Modificado de Mansur e Carvalho (2011). ....	17
<b>Figura 5.</b> Localização geográfica do PNLM. Disponível no Google Earth. Acessado às 00:00 de 24 de março de 2015.....	18
<b>Figura 6.</b> Mapa tectônico da porção sul do Cráton São Francisco e seus cinturões associados (Adaptado de Schmitt, 2004).....	19
<b>Figura 7.</b> Mapa geológico do domínio tectônico Cabo Frio e uma seção geológica de orientação SW – NE (Schmitt, 2004). ....	20
<b>Figura 8.</b> Mapa geológico da porção NE da costa maranhense. (Modificado de Vasconcelos <i>et al.</i> (2004). ....	21
<b>Figura 9.</b> Gradiente vertical de velocidade do vento (Moura, 2011).....	22
<b>Figura 10.</b> Distribuição das populações sedimentares numa duna. Os sedimentos mais pesados são transportados por saltação e distribuem-se na base da duna, enquanto que, no topo se distribuem as partículas mais finas transportadas em suspensão (Arens <i>et al.</i> , 2002). ....	23
<b>Figura 11.</b> Transporte sedimentar eólico por suspensão (Sígolo, 2000) .....	23
<b>Figura 12.</b> Transporte sedimentar eólico por saltação (Sígolo, 2000).....	24
<b>Figura 13.</b> Transporte eólico sedimentar por arraste (Sígolo, 2000) .....	24
<b>Figura 14.</b> Dunas Barcanas, barcanóides, parabólicas, transversais, longitudinais e em estrela. Adaptado do disponível em <a href="http://www.geologia.ufpr.br">www.geologia.ufpr.br</a> . (Acessado às 23h do dia 8 de julho de 2015).....	25
<b>Figura 15.</b> Representações gráficas inicial e final do modelo criado por Herrmann e Sauermann (2000) .....	25
<b>Figura 16.</b> Modelo do empreendimento a ser construído em meio ao campo dunar em questão. A linha amarela mostra a porção já licenciada para construção. Mansur e Carvalho (2011). ....	27
<b>Figura 17.</b> Precipitação mensal na região dos Lençóis Maranhenses. Modificado de Hermann <i>et al.</i> (2006).....	28
<b>Figura 18.</b> Ponto amostrado no PNLM. Coordenadas 757072 E e 9706914 S. Fonte: Google Earth. Acessado às 22:00 do dia 19 de junho de 2015. ....	29

<b>Figura 19.</b> Ponto amostrado no campo dunar do Perú. Fonte: Google Earth. Acessado às 22:30 do dia 19 de junho de 2015. ....	29
<b>Figura 20.</b> Agitador (esq.) e provetas com o material imediatamente antes de ser agitado manualmente para sedimentação (dir.). Foto do autor.....	30
<b>Figura 21.</b> Agitador de peneiras utilizado. Foto do autor.....	31
<b>Figura 22.</b> Picnômetros com o material e água destilada sendo aquecidos. Foto do autor. ....	31
<b>Figura 23.</b> Esquema para de determinação da densidade real dos grãos (Nunes, 2014). ....	32
<b>Figura 24.</b> Ensaio de cisalhamento direto: representação de resultado típico do ensaio (Pinto, 2006). ....	33
<b>Figura 25.</b> Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb (Pinto, 2006) .....	33
<b>Figura 26.</b> Prensa de cisalhamento direto utilizada (esq.). Detalhe: caixa bipartida já posicionada com a carga vertical aplicada (dir.) (Foto do autor) .....	34
<b>Figura 27.</b> Grãos de areia sem ação coesiva do sal (esq.) e coesos devido a presença do sal (dir.). Observa-se que na imagem da esquerda, os sedimentos desmoronaram ao se retirar a parte de cima da caixa bipartida, ao passo que na imagem da direita permaneceram coesos. (Foto do autor).....	34
<b>Figura 28.</b> Modelo para determinação experimental do ângulo de repouso. O ângulo de repouso está demarcado na cor vermelha ao fim do modelo.....	35
<b>Figura 29.</b> Amostras preparadas para o ensaio de evaporação. Observa-se a saturação máxima no início do ensaio. ....	36
<b>Figura 30.</b> Condutivímetro utilizado nos ensaios. Foto do autor. ....	37
<b>Figura 31.</b> Croqui do túnel de vento utilizado durante os ensaios. Vista em planta. (Modificado de García, 2015) .....	38
<b>Figura 32.</b> Túnel de vento utilizado para os ensaios. Vista lateral (Foto do autor).....	39
<b>Figura 33.</b> Túnel de vento utilizado para os ensaios. Vista interna (Foto do autor).....	39
<b>Figura 34.</b> Amostras preparadas para o primeiro teste no túnel de vento. Areia com sal à direita e areia sem sal à esquerda. (Foto do autor).....	39
<b>Figura 35.</b> Cone de areia disposto para a realização do segundo teste no túnel de vento. (Foto do autor).....	40
<b>Figura 36.</b> Preparo dos cones de areia para o teste no túnel de vento (Foto do autor)..	40
<b>Figura 37.</b> Curva granulométrica gerada para a amostra dos Lençóis Maranhenses ....	41
<b>Figura 38.</b> Curva granulométrica gerada para a amostra Perú 1 .....	41
<b>Figura 39.</b> Curva granulométrica gerada para a amostra Perú 2 .....	42
<b>Figura 40.</b> Distribuição granulométrica para amostra dos Lençóis Maranhenses.....	42



<b>Figura 41.</b> Distribuição granulométrica para amostra Però-1 .....	43
<b>Figura 42.</b> Distribuição granulométrica para amostra Però-2 .....	43
<b>Figura 43.</b> Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra dos Lençóis Maranhenses com e sem a presença de sal .....	45
<b>Figura 44.</b> Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Però-1 com e sem a presença de sal.....	45
<b>Figura 45.</b> Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Però-2 com e sem a presença de sal.....	46
<b>Figura 46.</b> Ângulo de repouso para os Lençóis Maranhenses medido com o auxílio de um transferidor .....	47
<b>Figura 47.</b> Ângulo de repouso para Però-1 medido com o auxílio de um transferidor .	47
<b>Figura 48.</b> Ângulo de repouso para Però-2 medido com o auxílio de um transferidor .	48
<b>Figura 49.</b> Registro da temperatura e a média de seus valores durante cada dia do ensaio.....	49
<b>Figura 50.</b> Registro da umidade relativa do ar e a média de seus valores durante cada dia do ensaio .....	49
<b>Figura 51.</b> Massa de água evaporada/área x Tempo para Però-1 .....	50
<b>Figura 52.</b> Teor de umidade x Tempo para Però-1.....	50
<b>Figura 53.</b> Saturação x Tempo para Però-1 .....	51
<b>Figura 54.</b> Massa de água evaporada/área x Tempo para Però-2.....	51
<b>Figura 55.</b> Teor de umidade x Tempo para Però-2.....	51
<b>Figura 56.</b> Saturação x Tempo para Però-2 .....	52
<b>Figura 57.</b> Massa de água evaporada x Tempo para Lençóis.....	52
<b>Figura 58.</b> Teor de umidade x Tempo para Lençóis.....	52
<b>Figura 59.</b> Saturação x Tempo para Lençóis .....	53
<b>Figura 60.</b> Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para Però-1 .....	54
<b>Figura 61.</b> Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para Però-1 .....	54
<b>Figura 62.</b> Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para os Lençóis.....	55
<b>Figura 63.</b> Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para água destilada .....	55
<b>Figura 64.</b> Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para solução salina 18% .....	55
<b>Figura 65.</b> Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para solução salina 35% .....	56
<b>Figura 66.</b> Conformação inicial do sistema durante o primeiro teste.....	57

<b>Figura 67.</b> Conformação após uma hora de experimento sob velocidade do vento de 2,8 m/s .....	57
<b>Figura 68.</b> Conformação após 3 horas de experimento sob velocidade do vento de 2,8 m/s .....	57
<b>Figura 69.</b> Conformação após 6 horas de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5,5 m/s. ....	58
<b>Figura 70.</b> Conformação após 6 horas e 15 minutos de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5 m/s. ....	58
<b>Figura 71.</b> Conformação após 6 horas e 50 minutos de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5 m/s .....	58
<b>Figura 72.</b> Conformação após 7 horas e 20 minutos de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5 m/s .....	59
<b>Figura 73.</b> Conformação após 8 horas e 30 minutos de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5 m/s .....	59
<b>Figura 74.</b> Estágio final do ensaio .....	59
<b>Figura 75.</b> Configuração inicial do segundo teste realizado no túnel de vento. Amostra: Però-1 .....	60
<b>Figura 76.</b> Configuração do segundo teste após 67 horas e 10 minutos de experimento. Amostra Però-1 .....	60
<b>Figura 77.</b> Configuração inicial do segundo teste realizado no túnel de vento. Amostra: Lençóis .....	60
<b>Figura 78.</b> Configuração do segundo teste realizado no túnel de vento após 12h. Amostra: Lençóis.....	61
<b>Figura 79.</b> Preparação dos cones de areia e borrifamento de solução salina em um deles para o terceiro ensaio realizado no túnel de vento.....	61
<b>Figura 80.</b> Conformação inicial do terceiro ensaio realizado no túnel de vento. O cone da esquerda está sob influência do sal .....	61
<b>Figura 81.</b> Conformação após 42h de ensaio com velocidade de 3,4 m/s.....	62
<b>Figura 82.</b> Figura 82. Conformação após 62h de ensaio, sendo as últimas 20h com velocidade do vento aumentada para 4,7 m/s .....	62

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Valores de densidade dos grãos encontrados.....	44
<b>Tabela 2.</b> Valores de umidade das amostras.....	44
<b>Tabela 3.</b> Ângulo de atrito para as amostras com e sem sal.....	46
<b>Tabela 4.</b> Valores da coesão da areia com sal.....	46
<b>Tabela 5.</b> Ângulo de repouso obtido através de cálculo a partir da tangente.....	48
<b>Tabela 6.</b> Valores de porosidade para as diferentes concentrações em cada uma das amostras.....	53
<b>Tabela 7.</b> Valores de condutividade e salinidade calculados para as Amostras lavadas, além da condutividade para a água destilada.....	56
<b>Tabela 8.</b> Valores de condutividade e salinidade para as amostras ao natural.....	56

# SUMÁRIO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1. Problemática .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2. Localização .....</b>	<b>15</b>
1.2.1. Perú, Cabo Frio – RJ .....	15
1.2.2. Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses.....	17
<b>1.3. Contextos geológicos regionais.....</b>	<b>18</b>
1.3.1. Perú, Cabo Frio – RJ.....	18
1.3.2. Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses .....	20
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>21</b>
<b>3. Revisão bibliográfica .....</b>	<b>21</b>
3.1 Dunas costeiras .....	21
3.2 Sistema dunar do Perú .....	26
3.3 Sistema dunar dos lençóis maranhenses .....	27
<b>4. Metodologia .....</b>	<b>28</b>
<b>5. Ensaios.....</b>	<b>29</b>
<b>5.1. Caracterização.....</b>	<b>29</b>
5.1.1. Granulometria e umidade.....	30
5.1.2. Densidade dos grãos.....	31
<b>5.2. Resistência ao cisalhamento direto.....</b>	<b>32</b>
<b>5.3. Determinação do ângulo de repouso.....</b>	<b>35</b>
<b>5.4. Evaporação.....</b>	<b>35</b>
<b>5.5. Condutividade e salinidade.....</b>	<b>36</b>
<b>5.6. Túnel de vento.....</b>	<b>38</b>
<b>6. Resultados e discussão.....</b>	<b>41</b>
<b>6.1. Granulometria.....</b>	<b>41</b>
<b>6.2. Densidade dos grãos e umidade higroscópica.....</b>	<b>44</b>
<b>6.3. Resistência ao cisalhamento direto.....</b>	<b>44</b>
<b>6.4. Ângulo de repouso.....</b>	<b>47</b>
<b>6.5. Evaporação.....</b>	<b>48</b>
<b>6.6. Condutividade e salinidade.....</b>	<b>56</b>
<b>6.7. Túnel de vento.....</b>	<b>57</b>

<b>7. Conclusão.....</b>	<b>62</b>
<b>8. Sugestões.....</b>	<b>63</b>
<b>9. Referências bibliográficas.....</b>	<b>65</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Problemática

As dunas são feições formadas a partir dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos pelo vento (Tomazzelli, 1990). Apesar de natural, o fenômeno migratório, resultado da erosão eólica, pode ser desencadeado ou acentuado por modificações artificiais (ou antrópicas) no ambiente dunar, como por exemplo a remoção da vegetação nativa ou construções rígidas. Além disso, as dunas frequentemente avançam sobre áreas ocupadas, causando diversos transtornos e gerando desastres ambientais, tais como o soterramento de vias, corpos d'água, residências e demais construções, levando à perda de patrimônio (Silva, 2012), como mostra a Figura 1.



**Figura 1.** Efeito da erosão eólica na região dos Lençóis Maranhenses. (Foto do autor. Agosto de 2014)

Oliveira *et al* (2004) definiram como condicionantes no processo de vulnerabilidade dunar os fatores antrópicos e aqueles relacionados à dinâmica costeira atuante no local. Como exemplo de ações antrópicas pode-se citar o estado de danificação da vegetação presente no local, o trânsito de pessoas e veículos e as edificações sobre a linha de costa e na zona de acumulação praial. Por outro lado, a dinâmica costeira influencia o processo através da velocidade e direção dos ventos, da variação sazonal das chuvas, da umidade relativa do ar e temperatura, e da salinidade resultante da exposição à névoa salina. Estas condições influenciam na erodibilidade dos sedimentos - o aumento da umidade e da salinidade, por exemplo, promove maior agregação das partículas, dificultando a sua remoção.

Quando expostos à ação da névoa salina e de atividades pluviométricas, os poros de uma massa arenosa (que, no caso desse estudo, está representada pelas dunas costeiras), passam a conter fluidos com sais, o que resulta na sucção osmótica do solo. Marinho e Stuermer (2000) definiram a sucção como a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físicas e químicas, que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água dependendo das condições ambientais, levando a saturação a aumentar ou diminuir. Em geral, a sucção dos solos é dividida em duas parcelas (mátrica e osmótica) que, somadas, representam a sucção total. A componente mátrica diz respeito à matriz do solo, ou seja, ao tipo de partículas e seu arranjo estrutural, e está diretamente relacionada com a geometria dos poros e com a tensão superficial da água. A componente osmótica, por sua vez, está relacionada à composição química da água do solo. Ao variar-se a sucção osmótica, gera-se um reflexo no comportamento mecânico de um solo: uma variação na concentração de sais no fluido dos poros acarreta

uma variação de volume, alterando a resistência ao cisalhamento do solo (Fredlund e Rahardjo, 1993).

O efeito da sucção osmótica pode ser ilustrado na Figura 2, através de um castelo de areia, que não poderia ser construído sem a presença de sais nos poros da massa arenosa.



**Figura 2.** Castelo de areia na praia de Copacabana, Rio de Janeiro – RJ. (Disponível em [www.panoramio.com](http://www.panoramio.com). Acessado às 17h de 21 de março de 2015)

Os campos dunares costeiros maranhenses e fluminenses são bastante representativos no que tange à geodiversidade de ambos os estados devido às feições geomorfológicas neles presentes. Além disso, suas funções são de suma importância na composição da paisagem regional e sua vulnerabilidade frente ao processo de expansão da ocupação urbana requer uma atenção em especial. Sendo assim, determinar a velocidade de migração de dunas pode auxiliar no processo de ocupação do território, já que o monitoramento indica suas principais direções de deslocamento (Sauer mann *et al.*, 2003; Parteli *et al.*, 2006).

Segundo Pereira *et al* (2010) e Suguio *et al* (2005), em ambientes costeiros, os campos de dunas são feições físicas essenciais para a manutenção da dinâmica sedimentar litorânea, funcionando como um estoque sedimentar no caso de episódios erosivos severos na faixa de praia. Variações eustáticas, isostasia, suprimento sedimentar, interferências antrópicas, mudanças na circulação atmosférica são alguns dos fatores que podem influenciar na evolução da linha de costa, bastante susceptível às mudanças globais e locais. Visando a preservação dos ambientes costeiros, entre eles os campos de dunas, há diversos estudos no Brasil com essa temática.

## **1.2. Localização**

O estudo foi feito com amostras de areia provenientes de dois locais distintos no território nacional; a primeira foi coletada no estado do Maranhão, no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, região nordeste do Brasil. Já as duas outras são provenientes do Perú, município de Cabo Frio, estado do Rio de Janeiro, região sudeste do Brasil.

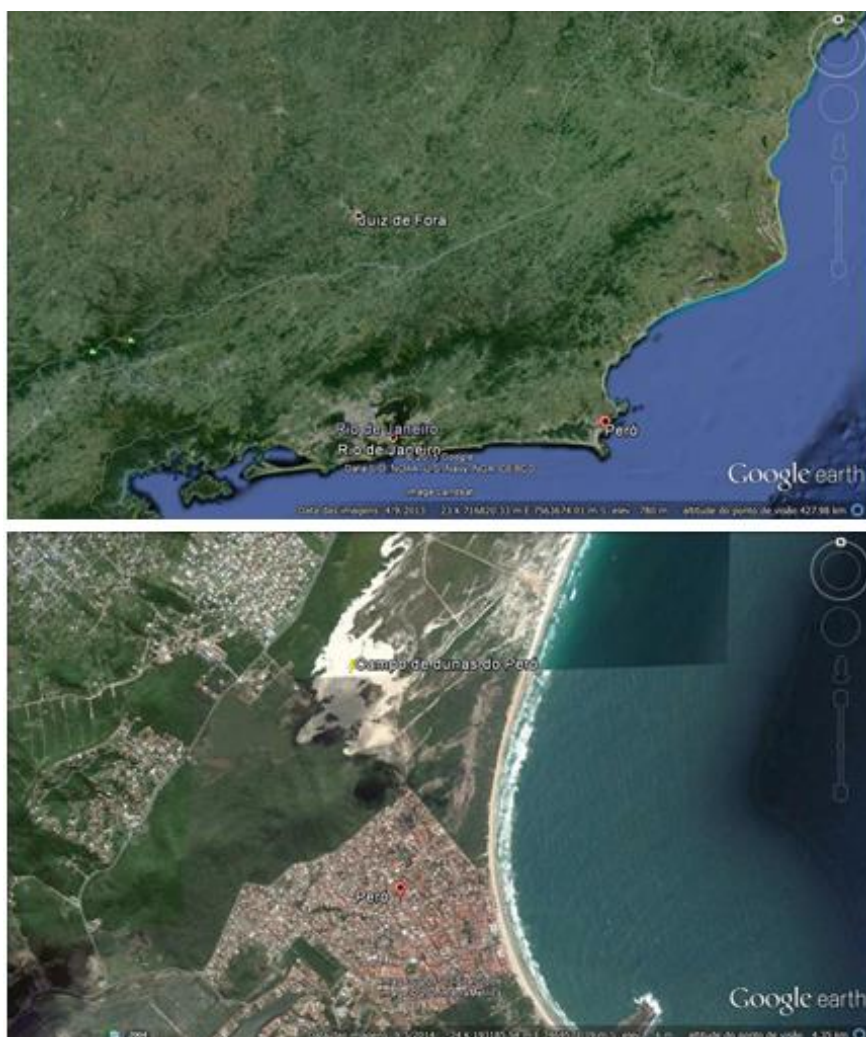
### **1.2.1. Perú, Cabo Frio – RJ**

A região do Perú está localizada no município de Cabo Frio, estado do Rio de Janeiro e é constituída por um cordão arenoso, contendo largura máxima de 1.300 metros e um arco de praia com 4.800 metros (Ambiental, 2015). A área apresenta uma faixa de aproximadamente 600 metros entre a crista de praia e a área de dunas, onde há notória movimentação eólica.

A cidade em questão encontra-se na região dos lagos, costa central do estado do Rio de Janeiro (a leste de sua capital) e, segundo o Portal da Região dos Lagos, seu território divide-se em treze municípios. Devido ao vasto potencial eólico lá encontrado, boa parte das cidades teve nas salinas uma importante atividade econômica no passado, perdurando até os dias atuais em algumas localidades. Entretanto, atualmente, o turismo perfaz, sua principal atividade econômica.

O município de Cabo Frio experimentou um acelerado crescimento populacional. Há 70 anos, a região contava com 8.816 habitantes. De acordo com o censo demográfico realizado em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), até esse ano a região possuía 186.222 habitantes. Essa grande explosão demográfica pôde ser melhor observada a partir da década de 70 e manteve até o presente momento uma média de crescimento de 59,12% a cada dez anos. Tal fato contribuiu para os diversos impactos ambientais causados pela erosão eólica na região, já que algumas áreas urbanas avançaram sobre os campos dunares, como é possível observar em algumas porções da Figura 3 e 4.

O sistema sedimentar, visto na Figura 3, estendia-se para sul do Morro da Piaçava (Dunas da Ogiva) até a Praia das Conchas. Entretanto uma grande porção desse campo de dunas foi ocupada por loteamentos e posteriormente urbanizada, hoje em dia constituindo os bairros do Perú, Conchas, Ogiva e Cajueiro (Ramos *et al*, 2003), como é possível observar na Figura 4.



**Figura 3.** Região do Perú, município de Cabo Frio – RJ. Disponível no Google Earth. Acessado às 19h de 23 de março de 2015.





**Figura 4.** Campo de dunas do Peró em 1958 (esq.) e sua conformação atual (dir.). Modificado de Mansur e Carvalho (2011).

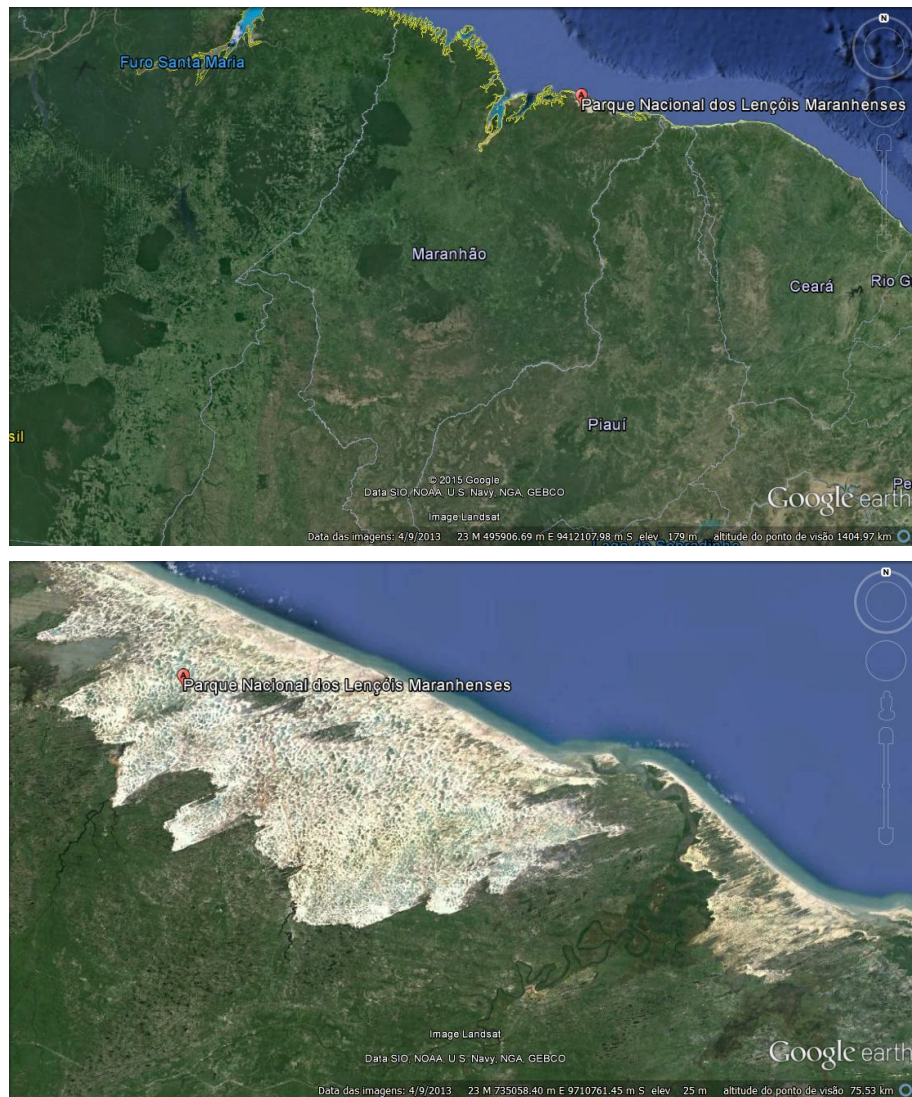
### 1.2.2. Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM)

A região, definida como um Parque Nacional em 1981 através do Decreto Federal número 86.060, está localizada no litoral oriental do estado do Maranhão, região nordeste do Brasil e possui uma área de 155mil hectares com 50km de costa. Abrange os municípios de Santo Amaro, Primeira Cruz e Barreirinhas, que juntos reúnem uma população de aproximadamente 60mil habitantes.

O PNLM é composto por um extenso campo de dunas com lagoas temporárias e perenes, apresentando morfodinâmica bastante diferente de outros locais da costa brasileira (Herrmann *et al.*, 2006; Ibama, 2003). A Figura 5 mostra a localização geográfica do Parque.

O nome do parque se deve à paisagem gerada pelo vasto campo de dunas barcanas e transversais que se movimentam através da erosão eólica. Em épocas chuvosas as dunas (essencialmente compostas por areia quartzosa e de coloração branca) são separadas por lagoas temporárias, assemelhando-se a lençóis retorcidos (Ibama, 2003).

Os três municípios abrangidos pelo PNLM têm sua economia galgada basicamente em atividades agrícolas e pecuárias, tendo a pesca e produção de sal mineral em paralelo como atividade secundária (Ibama, 2003). No caso do município de Barreirinhas, a atividade econômica é ainda complementada pelo turismo cada vez mais crescente devido à cidade ser o principal portão de entrada para o parque.



**Figura 5.** Localização geográfica do PNLM. Disponível no Google Earth. Acessado às 00:00 de 24 de março de 2015.

### 1.3. Contextos geológicos regionais

#### 1.3.1. Però, Cabo Frio – RJ

Do ponto de vista tectono-geológico, a região correspondente ao município de Cabo Frio está inserida na Faixa Ribeira, borda sudeste do Cráton de São Francisco, ao longo da margem atlântica brasileira (Schmitt *et al*, 2008). Heilbron e Machado (2003) definiram a parte central da Faixa Ribeira, localizada na região SE do Brasil, como sendo constituída por quatro domínios tectônicos.

O primeiro domínio tectônico, correspondente ao Terreno ocidental, é composto por lascas retrabalhadas do embasamento pré cambriano do Cráton São Francisco intercaladas com rochas metassedimentares da margem passiva deformadas de idade meso-neoproterozóica.

O segundo domínio corresponde à Klippe Paraíba do Sul, uma lasca tectônica neoproterozóica de rochas da fácies granulito que se sobrepõem ao Terreno Ocidental.

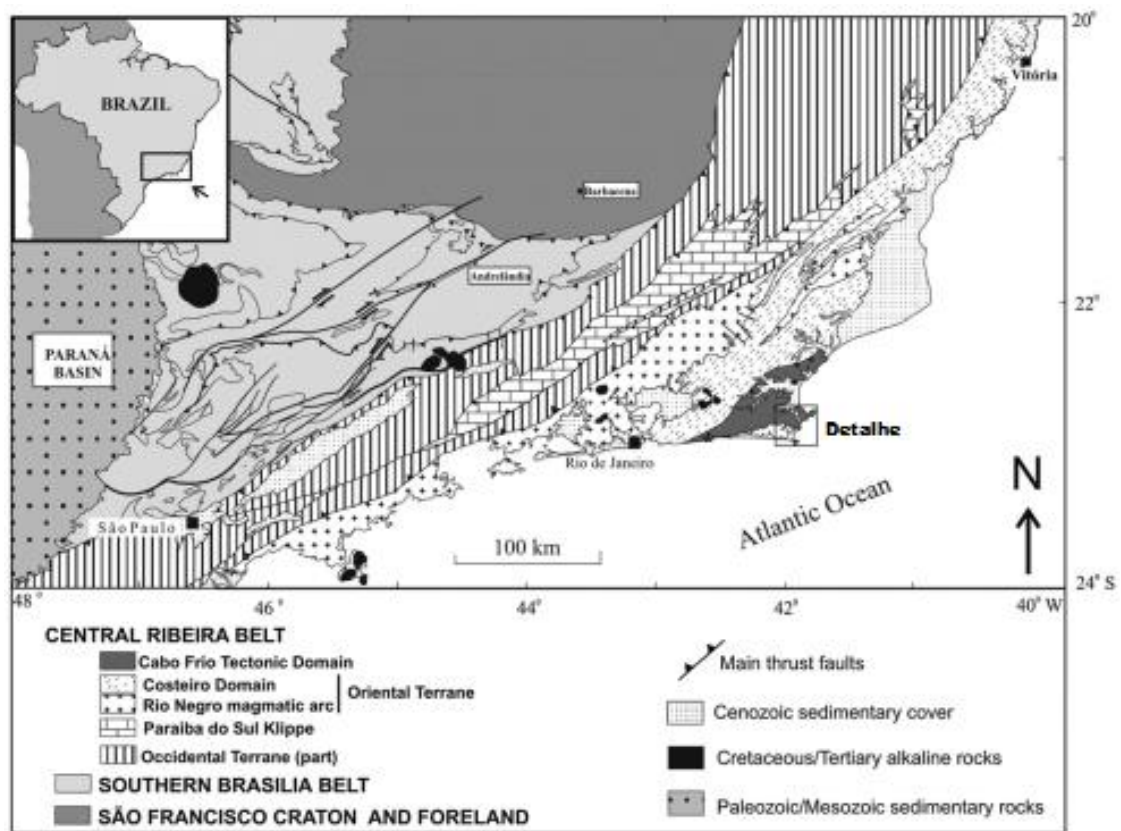
O terceiro domínio é representado pelo Terreno Oriental, composto de paragneisses intrudidos pelo arco magmático Rio Negro com idades entre 780-720 Ma.

O último domínio corresponde ao domínio tectônico Cabo Frio, onde uma das áreas de estudo do presente trabalho está inserida. Essa porção é formada

principalmente pelo embasamento paleoproterozóico afetado pelo evento termo tectônico Cambriano intercalado com rochas metavulcânicas e metassedimentares de alto grau. O domínio tectônico Cabo Frio se sobrepõe ao Terreno Oriental através de uma falha geológica com mergulho predominante de 35° para SE.

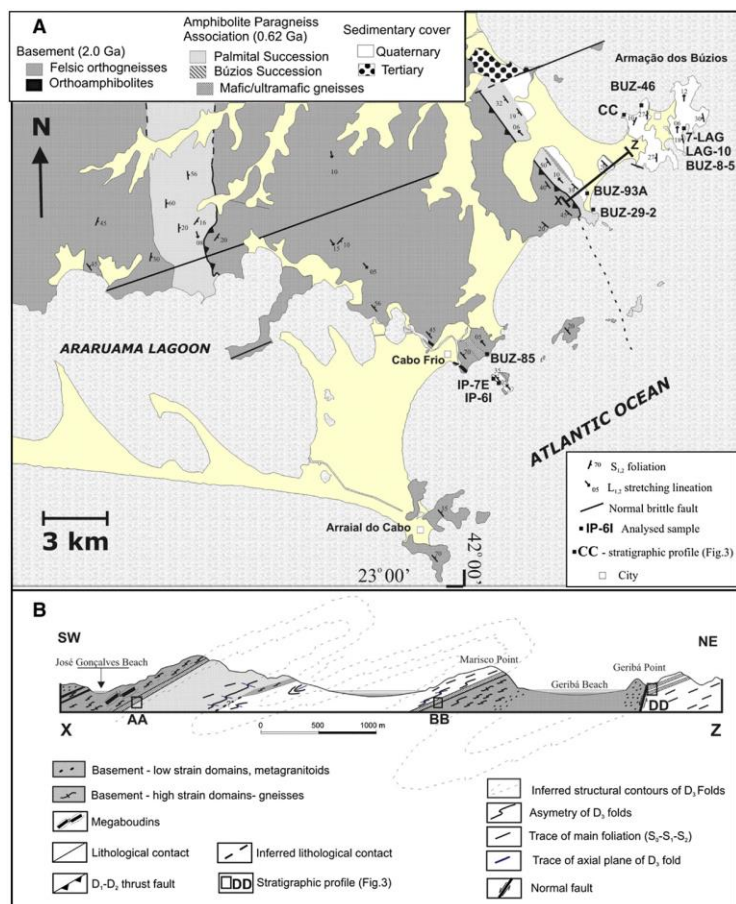
Segundo Schmitt (2004), o domínio tectônico Cabo Frio constitui principalmente duas unidades litoestratigráficas: um anfibolito de idade neoproterozóica com associação paragnáissica e um embasamento paleoproterozóico. O embasamento é predominantemente constituído de ortognaisses félsicos, que variam desde tonalitos a sienogranitos, recebendo o nome de complexo Região dos Lagos. O anfibolito neoproterozóico possui espessura de, no mínimo, 500 m e possui 4 grupos composicionais: metapelitos aluminosos com cianita e sillimanita, rochas calcicilicáticas, rochas quartzo-feldspáticas e metabasitos.

As figura 6 e 7 mostram, respectivamente, o mapa tectônico da porção sul do Cráton São Francisco com seus cinturões tectônicos associados e domínio tectônico Cabo Frio em detalhe.



**Figura 6.** Mapa tectônico da porção sul do Cráton São Francisco e seus cinturões associados (Adaptado de Schmitt, 2004)

Do ponto de vista estrutural, o domínio tectônico Cabo Frio apresenta feições deformacionais que podem ser interpretadas como produto de pelo menos quatro fases deformacionais relacionadas à orogenia Búzios. Durante as fases deformacionais, as unidades mostraram comportamento dúctil e dúctil-rúptil, associado a um metamorfismo regional de alto grau. As primeiras três fases deformacionais (D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub>) geraram lineações e foliações minerais. A fase D<sub>4</sub> é relacionada ao mesmo evento regional compressivo, produzindo zonas de cisalhamento transpressionais de alto ângulo associadas a lineações de orientações variadas.



**Figura 7.** Mapa geológico do domínio tectônico Cabo Frio e uma seção geológica de orientação SW – NE (Schmitt, 2004).

### 1.3.2. Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses

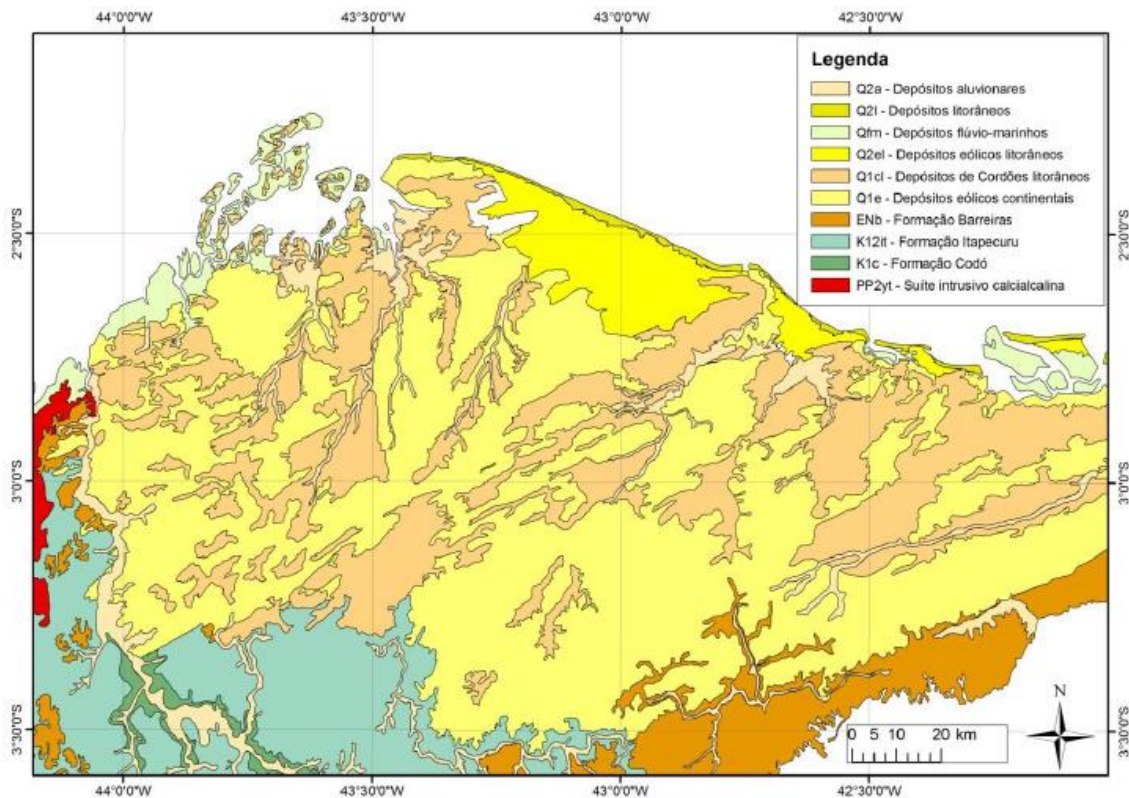
Segundo Hasui *et al.* (2012), os depósitos de areia dos Lençóis Maranhenses se encontram no âmbito da bacia sedimentar Barreirinhas, de idade cretácea e em uma região de domínio de dois compartimentos geológicos principais com características geocronológicas, tectônicas e sedimentares distintas. Os dois domínios em questão tratam-se da bacia intracratônica do Parnaíba (ao sul) e de bacias mesozoicas do tipo rifte, representadas pelo gráben de ilha nova e pela bacia de Barreirinhas. A área imersa da bacia Barreirinhas é calculada em 15.000km<sup>2</sup>, medindo cerca de 250km de comprimento e 60km de largura. Já o seu embasamento cristalino é constituído por gnaíse, granitos e quartzomica xisto de idade Pré-cambriana. Sobrepoem-se a estas rochas o pacote sedimentar cretáceo, formado pelo Grupo Canárias e Caju. O Grupo Canárias compreende as Formações Arpoador, Bom Gosto, Tutóia e Barro Duro (Pamplona, 1969).

No que diz respeito à tectônica, a bacia Barreirinhas é constituída por três megassequências que correspondem às fases pré-rifte, sin-rifte e pós rifte. A bacia em questão engloba rochas vulcânicas e sedimentares paleozoicas, sedimentos clásticos e carbonáticos cretáceos, além de carbonatos de idades que variam do mioceno até os dias atuais. Falhas normais lítricas com direção WNW e ENE afetam a parte emersa da bacia, definindo um sistema distensivo cortado por falhas transcorrentes mais novas orientadas segundo NE – SW.

A fonte da areia das dunas litorâneas corresponde, principalmente, ao estoque fornecido por sistemas fluviais, além de praias, com aporte de areia pelo mar. Somado a

isso, no caso dos Lençóis Maranhenses, assim como em todo o nordeste brasileiro, há grande contribuição dos sedimentos do grupo Barreiras, principalmente durante os períodos de recuo do nível do mar, correspondentes às épocas glaciais, com clima mais árido e consequentemente maior exposição das plataformas continentais, deixando-as a mercê de ventos fortes.

O mapa geológico da porção NE da costa maranhense pode ser visto na Figura 8.



**Figura 8.** Mapa geológico da porção NE da costa maranhense. (Modificado de Vasconcelos *et al.* (2004).

## 2. OBJETIVOS

O trabalho tem por objetivo uma avaliação do potencial de transporte eólico dos sedimentos presentes nos campos de dunas das regiões do Peró e Lençóis Maranhenses com e sem influência da névoa salina, comparando ambos os casos.

Pretende-se estudar a influência da presença do sal no comportamento mecânico da areia, bem como sua influência na evaporação da solução salina sob diferentes concentrações presente em seus poros. Além disso, através da correlação com a caracterização granulométrica, almeja-se o estabelecimento de uma relação entre tamanho de grão, grau de salinidade e sua posição geográfica em relação à linha de costa.

Além disso, através de simulação em escala reduzida feita em um túnel de vento, pretende-se reproduzir modelos numéricos e avaliar a mobilidade dos grãos arenosos quando borrifados por solução de NaCl.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Dunas costeiras

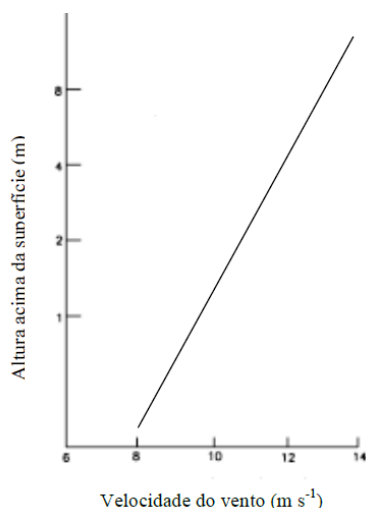
As dunas aparecem muito comumente ao longo de regiões de costa, sendo constituídas por grãos de areia provenientes do oceano. A formação dos campos dunares se dá a partir do momento em que a areia do mar é depositada na praia. Uma vez sob exposição subaérea,

os grãos secam e podem ser carregados pelo vento através de diversos processos de transporte sedimentar, influenciados por uma série de fatores (Gonçalves *et al.*, 2003). Hesp (2002) definiu esses fatores como sendo: tipo dos sedimentos, fluxo de areia, presença de vegetação, topografia da área, dinâmica de ondas da região e, em uma maior escala, o nível do mar).

Com dimensões que variam de poucos metros a mais de 30 metros, as dunas representam não só atrações turísticas em zonas costeiras, mas também atuam como barreiras contra ondas, reservatório de areia para as praias, além de serem um escudo contra a erosão e maresia nas regiões posteriores a elas. Porém, também podem gerar impactos ambientais significativos quando edificações avançam em seu campo migratório. Sendo assim, o entendimento da dinâmica sedimentar das dunas costeiras é de suma importância para os governos locais, a fim de controlar e preservar ambientalmente seus campos e as áreas em seu entorno (Ibama, 2003).

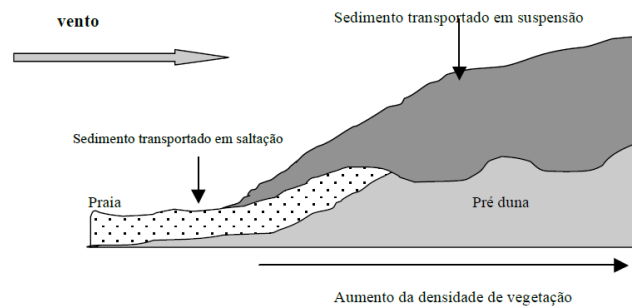
A morfologia das dunas depende fundamentalmente da combinação entre a direção do vento e o aporte de areia durante o transporte sedimentar (Wasson e Hyde, 1983). Ao passo que dunas longitudinais e em formato de estrela se formam sob regimes de vento unidimensionais e bidimensionais respectivamente, os tipos mais comuns de dunas se formam sob regime unidimensional. As barcanas são as dunas mais conhecidas e estudadas, formando-se em regime de vento unidirecional e de baixo aporte sedimentar. Esse tipo de duna, em formato de arco, possui duas pontas onde a areia é transportada e depositada pelo vento e uma face de deslizamento, onde suaves deslizamentos de grãos mantêm sua estabilidade e movimento. Já as dunas transversais se formam quando o aporte sedimentar é maior e também se propagam na direção do vento (Partelli *et al.*, 2006).

A velocidade e a direção do vento vão determinar a quantidade de areia transportada. Em média, dependendo do tamanho do grão, o transporte ocorre quando o vento atinge velocidades superiores a 4 m/s aproximadamente um metro acima da superfície arenosa (Bagnold, 1954). A vegetação e a rugosidade da superfície reduzem a velocidade do vento e por isso o transporte eficiente do sedimento. A figura 9 mostra o gradiente vertical de velocidade do vento.



**Figura 9.** Gradiente vertical de velocidade do vento (Moura, 2011)

Devido ao gradiente vertical da velocidade do vento, a distribuição vertical do tamanho das partículas sedimentares pode também ser observada numa duna, como mostra a Figura 10.



**Figura 10.** Distribuição das populações sedimentares numa duna. Os sedimentos mais pesados são transportados por saltação e distribuem-se na base da duna, enquanto que, no topo se distribuem as partículas mais finas transportadas em suspensão (Arens *et al.*, 2002).

Segundo Guimarães (2005), os principais processos de transporte que influenciam na dinâmica dos ambientes costeiros são suspensão, saltação e arraste, discutidos abaixo.

### Suspensão

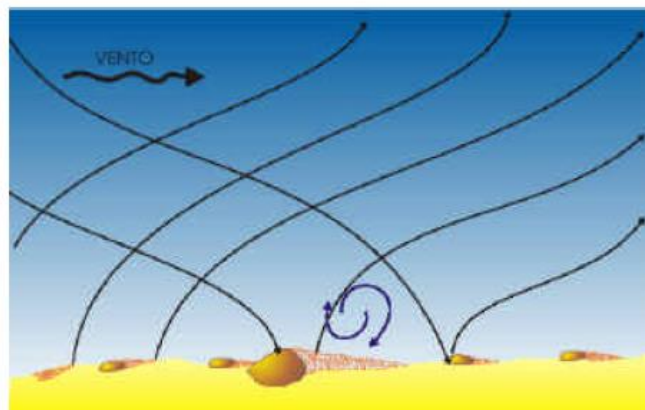
Partículas menores que 0,125mm de diâmetro compreendem as frações granulométricas areia muito fina, silte e argila (segundo a classificação de Wentworth). E são essas frações finas que perfazem o maior volume sedimentar transportado pelo vento. Devido ao fluxo eólico turbulento, as partículas podem permanecer em suspensão por períodos de tempo consideráveis e, assim, são transportadas por longas distâncias, como mostra a Figura 11. Quanto maior for o tamanho da partícula, maior será a sua resistência ao vento e, por consequência, se depositará primeiro, gerando obstáculos que favorecem a deposição de novas partículas.

### Saltação

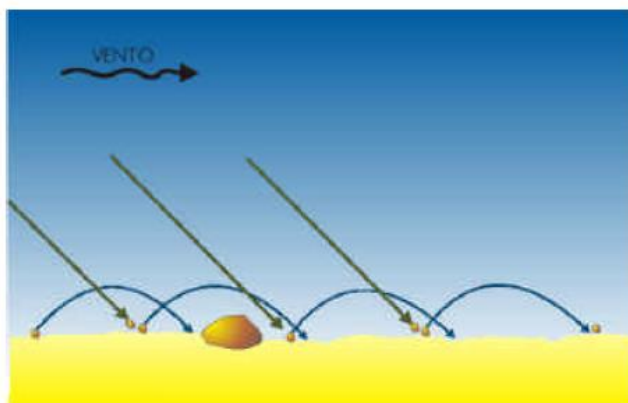
A colisão com os sedimentos que já estão na superfície faz com que o deslocamento se dê através de pequenos saltos como mostra a Figura 12. Isso acontece com as partículas que possuem diâmetro compreendido entre 0,125mm e 2mm (areia fina a muito grossa).

### Arraste

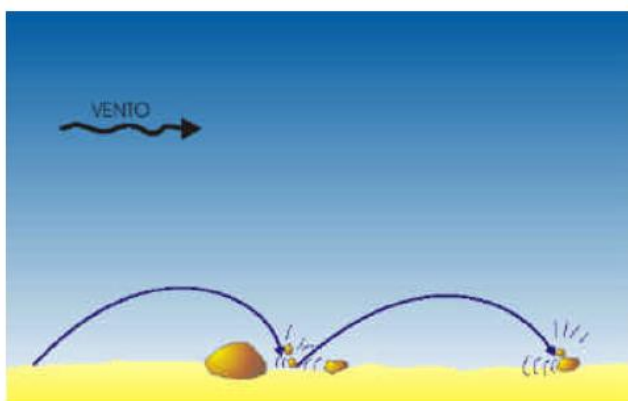
Se comparado com a saltação e a suspensão, trata-se de um processo mais restrito e pouco significativo devido ao tamanho e peso das partículas por ele carregadas (diâmetro superior a 0,5mm). A colisão entre partículas em deslocamento, além de causar fragmentação e desgaste, pode induzir o movimento de partículas encontradas na superfície, como mostra a Figura 13.



**Figura 11.** Transporte sedimentar eólico por suspensão (Sígolo, 2000)



**Figura 12.** Transporte sedimentar eólico por saltação (Sígolo, 2000)



**Figura 13.** Transporte eólico sedimentar por arraste (Sígolo, 2000)

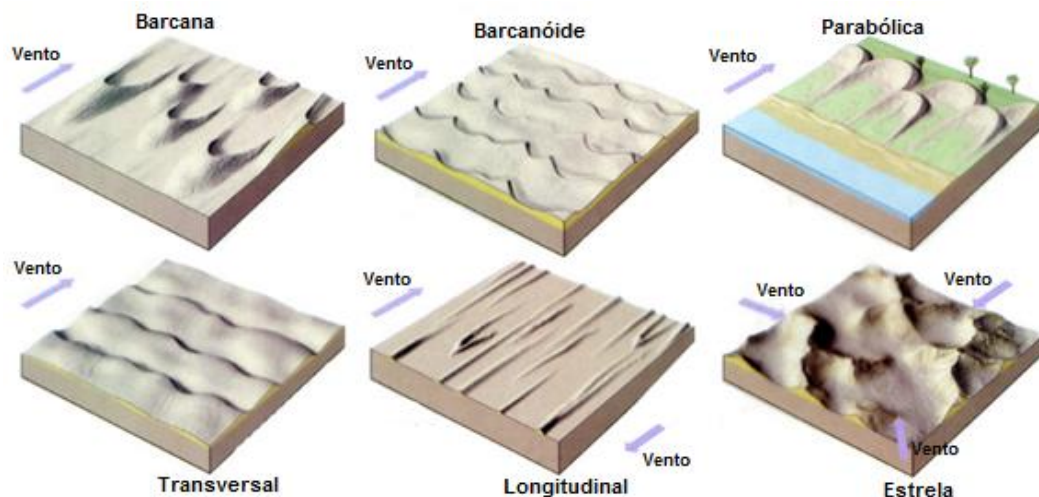
Juntamente com o regime de vento, outros fatores são determinantes na mobilidade dos sedimentos costeiros. Segundo Gonçalves *et al.* (2003), também influenciam a temperatura local, precipitação e umidade da superfície, umidade relativa e radiação solar. Em um ambiente com temperaturas mais elevadas, o ar torna-se menos denso e, conseqüentemente, consegue atingir maiores velocidades. No que diz respeito à precipitação e umidade, um evento pluviométrico dissolve os sais presentes em meio aos sedimentos, dificultando o seu transporte devido a sucção osmótica. Além disso, também pode ocorrer o transporte sedimentar por esguichos de chuva, chamado de *rain splash*. A umidade relativa influencia na mobilidade dos sedimentos. Umidades relativas altas em superfícies muito frias durante a noite, por exemplo, podem aumentar a umidade contida nos grãos de areia através do orvalho, enquanto que a umidade relativa baixa pode aumentar a taxa de secagem, potencializando o transporte.

As dunas são características de climas áridos, mas também podem ser formadas em climas temperados e mesmo em áreas úmidas, quando podem interagir com a vegetação, que tornam as dunas fixas ou estáveis e, neste caso, a estabilização favorece o crescimento vertical.

Quanto ao movimento, há dois tipos de classificação: dunas estacionárias e dunas migratórias. As Dunas estacionárias assim permanecem em função da umidade, obstáculos internos (blocos ou troncos) ou desenvolvimento de vegetação. Na evolução do processo, os grãos de areia vão sendo depositados conforme o sentido dos ventos, formando acumulações geralmente assimétricas. No barlavento, frente voltada para o vento, a inclinação pode variar de 5° a 15°, enquanto no sotavento, a face oposta da duna, a inclinação pode variar entre 20° e 30°. Essa assimetria é resultado da ação da gravidade sobre os grãos secos de areia, sem coesão e com ângulo de atrito variável com a granulometria.

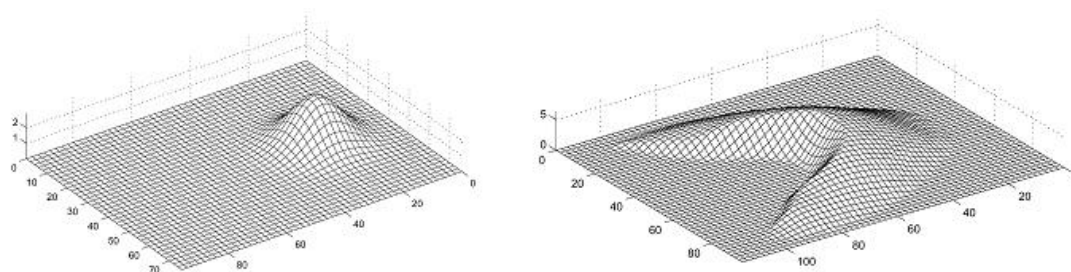


As dunas podem ser classificadas de diversas formas de acordo com a morfologia gerada pelo regime de ventos. Um regime de ventos unidirecional pode gerar dunas transversais (com crista reta ou sinuosa), barcanas, barcanóides e parabólicas. Quando o regime é bidirecional, os produtos gerados são as dunas longitudinais. Já em regimes polidirecionais, são formadas as dunas em estrela ou piramidais. A ilustração com os tipos de dunas pode ser vista na Figura 14.



**Figura 14.** Dunas Barcanas, barcanóides, parabólicas, transversais, longitudinais e em estrela. Adaptado do disponível em [www.geologia.ufpr.br](http://www.geologia.ufpr.br). (Acessado às 23h do dia 8 de julho de 2015)

Segundo Herrmann e Sauermann (2000), o tipo mais bem conhecido e simples de duna é a barcana. Elas costumam ocorrer com alturas entre 1 e 1,5m e podem chegar a 150m de comprimento. Apesar de haver diversos estudos geológicos acerca da forma, altura e distribuição geográfica (dentre outros parâmetros) das dunas, pouco modelos numéricos que controlam seu movimento foram desenvolvidos até o presente momento, além de serem restritos. Como exemplo, pode-se citar o modelo desenvolvido por Grasseli *et. al* (2000), onde são considerados a evolução da superfície arenosa e o movimento individual de cada partícula de areia de acordo com sua velocidade. Como o fluxo de areia em uma duna no campo não ocorre de maneira individual, mas sim em camadas, esse modelo numérico para apenas uma partícula não pode ser aplicado. Para tentar ajustar melhor os modelos já criados com a realidade, Herrmann e Sauermann (2000) desenvolveram uma combinação que considera um conjunto finito de partículas móveis e suas velocidades de acordo com a energia do vento. As configurações inicial e final (após interações vento-partículas) para o modelo podem ser vistas na Figura 15.



**Figura 15.** Representações gráficas inicial e final do modelo criado por Herrmann e Sauermann (2000)

### 3.2. Sistema Dunar do Peró

O campo de dunas do Peró situa-se no Município de Cabo Frio, estado do Rio de Janeiro, tratando-se de um conjunto de formas eólicas com morfologias variadas e extensão atual de 2,6 km<sup>2</sup>, o que mostra uma redução de mais de 25%, se compararmos sua área de hoje com a de 1978 (3,5km<sup>2</sup>). Do ponto de vista morfológico, o campo de dunas da praia do Peró é constituído por feições móveis oblíquas com características escalonares (*climbing dunes*).

De acordo com o relatório do plano de manejo da APA Pau Brasil, (utilizando as informações da estação meteorológica Cabo Frio), em média 65% dos ventos no período de 1970 a 1987 vem do quadrante N-NE-E, sendo que 40% do total dos ventos são provenientes da direção NE. A média anual dos ventos é de 5,6 m/s, podendo chegar atingindo 10 m/s. Nos meses de agosto a novembro a média mensal supera 6,0 m/s atingindo o máximo de 6,7 m/s em setembro. A incidência desses ventos constantes sobre a zona de alimentação do sistema eólico, no caso a praia, forma um ângulo de 20°, resultando no desenvolvimento do campo de dunas. O campo possui forte tendência de movimentação sobre áreas rurais e urbanas, devido ao acelerado aumento populacional do município, levando a expansão urbana a avançar, muitas vezes, sobre o campo de dunas, interrompendo sua mobilidade e evolução.

A média anual de chuvas na estação Arraial do Cabo, a mais próxima do campo, é de 770,9 mm/ano e a taxa de evaporação nesta estação é de 928,4 mm/ano, classificando a região como semiárida. O período com maior índice pluviométrico se situa entre os meses de outubro e janeiro, com um pequeno aumento em abril e maio. Já as precipitações mais baixas ocorrem no trimestre de junho a agosto, gerando um deficiente hídrico entre os sedimentos nesse período. A combinação de uma estação seca bem marcada com regimes de ventos praticamente unidirecionais, com o aporte sedimentar proveniente dos maciços costeiros e da plataforma continental, cria as condições necessárias para a existência desses depósitos eólicos (Castro e Rangel, 2005).

A Região, conhecida como Costa do Sol, é o principal alvo dos urbanistas fora da região metropolitana do Rio de Janeiro, sendo marcada por problemas ambientais como desmatamento e loteamento ilegal, por exemplo. Juntamente com Angra dos Reis e Paraty, a Costa do Sol é um dos centros nacional e internacionalmente mais procurado por turistas no estado do Rio de Janeiro.

Desde o ano de 2006, está sendo discutido no estado do Rio de Janeiro a construção de uma rede hoteleira na região em questão. O projeto recebeu um aval preliminar do INEA (Instituto Estadual do Ambiente), contemplando zonas comerciais, casas noturnas, áreas de recreação e aproximadamente 1000 casas (Mansur e Carvalho, 2011), como pode ser visto na Figura 16.

Castro e Rangel (2005) dividiram o Sistema sedimentar do Peró em cinco compartimentos geomorfológicos: praia, antedunas, planície de deflação, dunas oblíquas e *climbing dunes*. De acordo com os autores, o campo de dunas do Peró é um dos três campos brasileiros que apresentam *climbing dunes*, além de dunas barcanas, transversas e barcanóides.

Campos de dunas são mais comuns na região NE do Brasil devido à combinação de aporte sedimentar e fatores climáticos, particularmente climas quentes e semi-áridos. Entretanto, a região do Peró está inserida no SE brasileiro, onde domina o clima tropical com abundantes chuvas de verão. Apesar dessas características não serem favoráveis ao desenvolvimento de campos dunares, a porção da Costa do Sol possui esse clima quente e semi-árido com déficit de chuvas e uma estação seca no inverno (Freitas, 2006), favorável à formação das dunas. A fraca precipitação observada neste trecho do litoral fluminense está associada, em primeiro lugar, à maior distância da Serra do Mar em relação ao litoral: ao passo que na região de Mangaratiba, Angra dos Reis e Parati, a Serra do Mar está localizada

junto ao oceano, na Região dos Lagos, a mesma encontra-se a cerca de 60 km da costa, suavizando os efeitos das chuvas orográficas. Além disso, há contribuição do fenômeno de ressurgência nas costas de Arraial do Cabo e Cabo Frio, onde a corrente de água fria sobe até a superfície do mar, diminuindo a evaporação e, conseqüentemente, a precipitação (CUNHA, 1995).



**Figura 16.** Modelo do empreendimento a ser construído em meio ao campo dunar em questão. A linha amarela mostra a porção já licenciada para construção. Mansur e Carvalho (2011).

### 3.3.Sistema Dunar dos Lençóis Maranhenses

A Planície Costeira do Estado do Maranhão, onde se situam os Lençóis Maranhenses, possui o maior registro de sedimentação eólica do Quaternário da América do Sul, correspondendo a campos de dunas livres e fixas que juntos alcançam larguras de até 50 km. (Gonçalves *et al*, 2003).

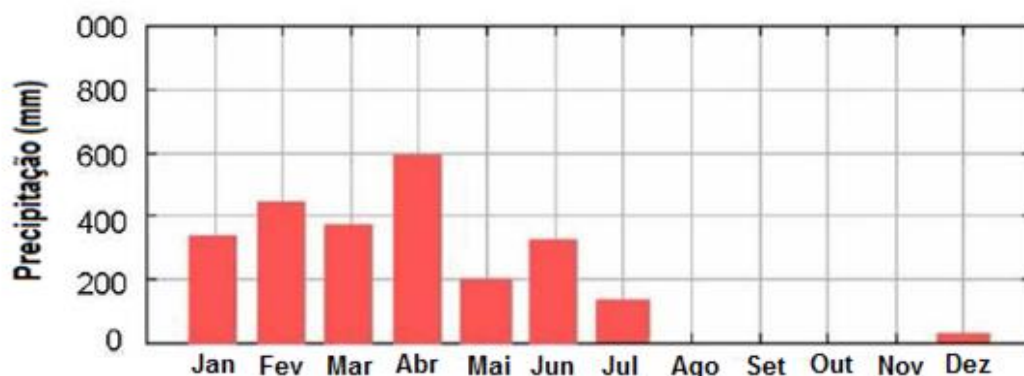
O PNLN, situado no litoral nordeste brasileiro, está inserido no macrocompartimento denominado costa semi-árida norte, cujo limite vai da Ponta dos Mangues Secos à Ponta do Itapagé. Neste trecho litorâneo, dominam os depósitos sedimentares do Grupo Barreiras, através dos quais desenvolveram-se campos de dunas, alimentados pelos sedimentos oriundos da plataforma continental interna (Muehe, 1998). Especula-se que a formação das dunas nos Lençóis Maranhenses se iniciou há aproximadamente 10000 anos (Floriani *et al.*, 2004).

Apesar de corresponder a um deserto, com grandes dunas movendo-se em direção ao continente sob ação de fortes ventos que, em casos extremos podem atingir 70 km/h, a região apresenta algumas características particulares. O PNLN possui rios e lagoas temporárias, além de um registro pluviométrico anual médio entre 1500 – 2000 mm, extremamente diferente da média para áreas desérticas, de aproximadamente 250mm por ano (Herrmann *et al*, 2006). Essa alta umidade local, de até 68% (IBAMA, 2003) proporciona um ambiente ideal para o desenvolvimento de uma grande diversidade da fauna e flora locais (Magalhães, 2000).

De acordo com Herrmann *et al.* (2006), a velocidade do vento na região dos Lençóis Maranhenses atinge uma média de 8,3 m/s em épocas secas, ao passo que diminui para uma média de 6,1 m/s em períodos mais úmidos. Soprando, frequentemente,

ventos dos quadrantes norte e leste oriundos da Zona de Convergência Intertropical e das altas pressões semi-estacionárias do Atlântico Sul, respectivamente.

A temperatura média durante o ano gira em torno dos 28,5°C, atingindo 31°C em épocas secas. A Figura 17 mostra a as precipitações mensais durante o ano.



**Figura 17.** Precipitação mensal na região dos Lençóis Maranhenses. Modificado de Hermann *et al.* (2006).

A precipitação na região é bastante concentrada, como é possível ver na Figura 16. De janeiro a julho, a alta precipitação torna o transporte sedimentar mais difícil, devido à dissolução dos sais presentes entre os poros dos sedimentos, o que confere uma maior coesão entre eles. Tal fato implica em uma baixa mobilidade dunar, se comparada com os meses de agosto a dezembro.

O clima no leste maranhense é fortemente influenciado pela zona de convergência intertropical (ZCIT), principal feição atmosférica que controla a distribuição espacial e temporal da precipitação e do vento na região. A ZCIT é definida como um conjunto de variáveis meteorológicas que atuam sobre os oceanos, como a convergência dos ventos alísios de nordeste e de sudeste e área de máxima temperatura da superfície do mar (Cavalcanti *et al.*, 2009).

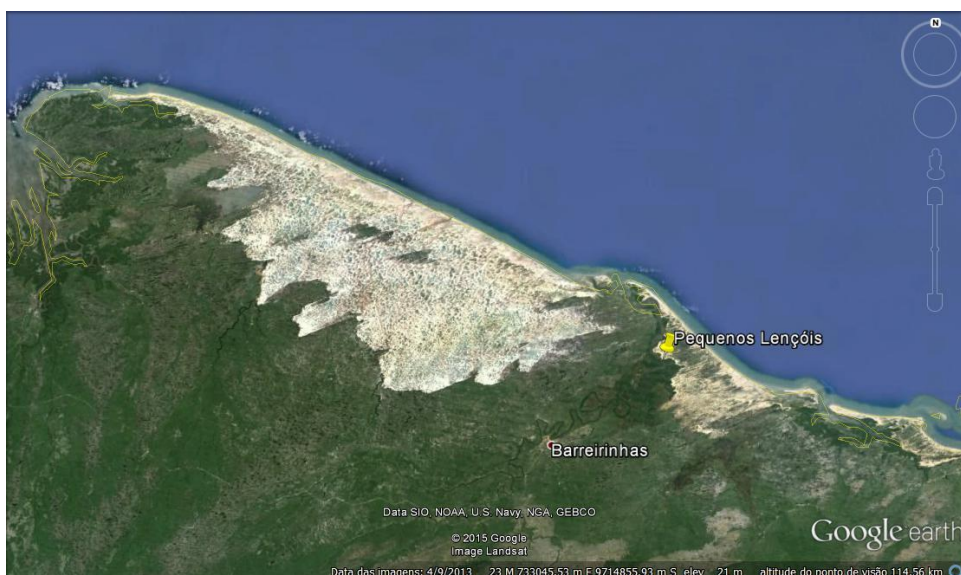
#### 4. Metodologia

Para a realização do trabalho, foram realizadas etapas de campo, gabinete e laboratório.

A etapa de campo consistiu na amostragem dos sedimentos nos dois campos de dunas. Para os Lençóis Maranhenses, foi amostrada uma quantidade de areia de aproximadamente 5 kg na região dos Pequenos Lençóis no mês de setembro de 2014. O ponto de amostragem pode ser visto na Figura 18.

A amostragem feita no campo de dunas do Perú foi realizada em agosto de 2007 em dois pontos distintos, um localizado na duna de transição entre a área erosional e a relativamente estável, denominada como Perú-1 e a outra na pós-berma de assentamento, denominada Perú-2 (García, 2015). Os pontos de amostragem para a região podem ser vistos na Figura 19.

A etapa de gabinete consistiu no levantamento das inúmeras publicações referentes aos dois campos de dunas estudados (Lençóis Maranhenses e Perú), a fim de reunir dados acerca das condicionantes naturais e informações da geologia regional de ambas as regiões. Para isso, foram consultadas dissertações, teses, páginas eletrônicas, relatórios, livros, além de normas técnicas sobre a preparação e execução dos inúmeros ensaios realizados durante o trabalho. Por fim, analisou-se os dados obtidos em laboratório, através da geração de gráficos e tabelas, imprescindíveis para se chegar a uma conclusão dos resultados finais.



**Figura 18.** Ponto amostrado no PNLM. Coordenadas 757072 E e 9706914 S. Fonte: Google Earth. Acessado às 22:00 do dia 19 de junho de 2015.



**Figura 19.** Ponto amostrado no campo dunar do Peró. Fonte: Google Earth. Acessado às 22:30 do dia 19 de junho de 2015.

Na etapa de laboratório foram realizados todos os ensaios necessários para a conclusão do projeto de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. A caracterização dos sedimentos estudados envolveu a determinação de sua densidade e granulometria. Também fazem parte da etapa de laboratório os ensaios de resistência ao cisalhamento direto, determinação do ângulo de repouso, ensaio de evaporação, sucção osmótica e, por fim, os testes no túnel de vento construído por García (2015) para a sua tese de doutorado.

## 5. Ensaio

### 5.1. Caracterização

Como o material é constituído de partículas com diversos tamanhos, se faz necessária uma análise granulométrica do mesmo, através da realização de ensaios de

peneiramento fino, grosso e sedimentação, de acordo com os procedimentos abaixo descritos pela norma NBR 7181 (ABNT, 1984).

### 5.1.1. Granulometria e umidade

Para a determinação da curva granulométrica, fez-se necessária a realização dos ensaios de peneiramento e sedimentação das amostras. O peneiramento é usado para a determinação da granulometria da parcela mais grossa do solo, ou seja, superior a peneira de abertura igual a 0,074mm (n° 200). Esse ensaio determina a porcentagem do material que fica retido em cada peneira do conjunto, de forma decrescente, possibilitando ao mesmo tempo a determinação das parcelas de solo que passam e ficam retidas nas peneiras. Dessa forma é possível representar graficamente, em escala logarítmica, a “porcentagem passante *versus* abertura da peneira”. Já o ensaio de sedimentação possibilita a determinação da quantidade de finos em suspensão na solução através das leituras realizadas com um densímetro. Apesar de se dividir em dois estágios (peneiramento grosso e peneiramento fino), para esse trabalho não foi necessária a realização da primeira etapa, já que ambas as amostras possuem sedimentos com o diâmetro menor do que a peneira de abertura igual a 2mm (n° 10).

Para o ensaio de sedimentação, retirou-se uma pequena quantidade de 120g de cada material, imergindo-o após agitação manual em 125ml de solução de hexametáfosfato de sódio 45,7% para desagregação das partículas, durante um período de 12 horas. Após esse período, o conteúdo foi transferido para um aparelho dispersor, onde permaneceu sob sua ação durante 15 minutos. Com o auxílio de jatos de água destilada, colocou-se o produto gerado em uma proveta graduada até atingir a marca de 1L, onde a solução foi manualmente agitada durante 1 minuto por movimentos verticais constantes, a fim de que todo o material permanecesse em suspensão. O aparelho dispersor e a proveta graduada podem ser vistos na Figura 20.



**Figura 20.** Agitador (esq.) e provetas com o material imediatamente antes de ser agitado manualmente para sedimentação (dir.). Foto do autor.

Imediatamente após terminada a agitação, começou-se a fazer as leituras com o auxílio de um densímetro cuidadosamente mergulhado na dispersão momentos antes dos intervalos estabelecidos pela NBR 7181 (ABNT, 1984). Após a última leitura, os sedimentos foram lavados com água destilada e secos, a fim de sofrerem o peneiramento.

A porção de material já seca, foi levada ao peneiramento fino em um conjunto de peneiras de diferentes aberturas presas a um agitador responsável por promover a vibração do conjunto durante 15 minutos, como mostra a Figura 21. Foram usadas as peneiras de

número 200, 100, 60, 40, 30 e 20 e a parcela de material retido em cada peneira foi pesada e os valores anotados para posterior tabulação dos dados e análise gráfica.

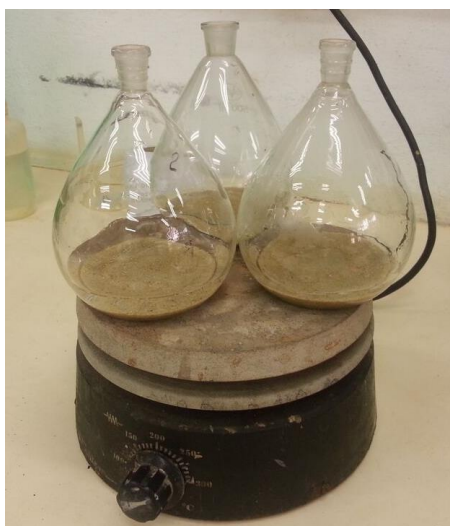
Paralelamente ao processo acima descrito, uma quantidade de 100g foi separada em três cápsulas, pesadas, secas em estufa a 100°C por 24h, e pesadas novamente, a fim de se determinar a umidade higroscópica do material.



**Figura 21.** Agitador de peneiras utilizado. Foto do autor.

### 5.1.2. Densidade dos grãos

Com o auxílio de três picnômetros de vidro com capacidade de 500ml, determinou-se a massa específica do material, como pode ser visto na Figura 22.



**Figura 22.** Picnômetros com o material e água destilada sendo aquecidos. Foto do autor.

A densidade real dos grãos ( $G$ ) é a relação entre as partículas sólidas e seu volume, dada pela equação abaixo:

$$G = (W_s/V_s)/\rho_w$$

Onde,

$W_s$  = peso dos sólidos

$V_s$  = volume dos sólidos

$\rho_w$  = massa específica da água

Para o cálculo desta razão, o peso dos sólidos  $W_s$  é aferido com o auxílio de uma balança. A aferição do volume dos sólidos  $V_s$  é feita medindo-se, além do peso da amostra de solo seco, o peso de um picnômetro totalmente preenchido com água destilada e do mesmo picnômetro com a amostra de solo e cheio de água. O peso do picnômetro cheio de água somado com o peso dos sólidos e subtraído do peso do picnômetro cheio d'água e com os sólidos corresponde ao peso da água  $W_w'$ . A razão entre esse peso  $W_w'$  e o peso específico da água na temperatura do sistema corresponde ao volume ocupado pelas partículas sólidas. Um esquema para melhor entendimento do problema pode ser visto na Figura 23.

O volume de solo utilizado é igual ao volume de água deslocado calculado pela razão entre o peso da água deslocado ( $W_w'$ ) e sua densidade na temperatura do sistema, dado pelas equações a seguir:

$$V_s = V_w'$$

$$V_w' = \mu_w T / W_w'$$

Onde,

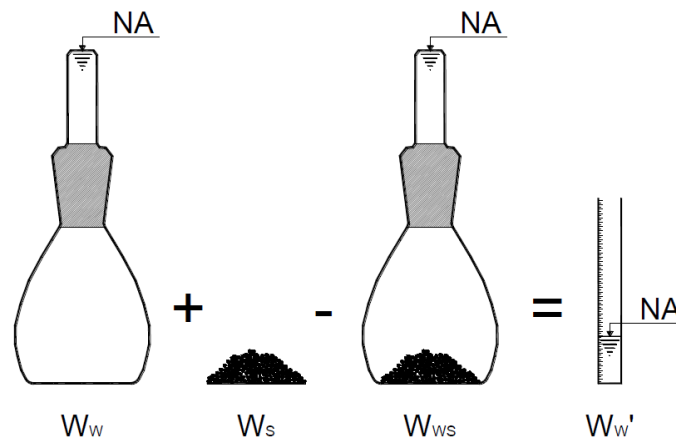
$V_s$  = volume do solo

$V_w'$  = volume da água deslocada

$W_w'$  = peso da água deslocada

$\mu_w T$  = peso específico da água na temperatura do sistema ensaiado

(ABNT, 1984)



**Figura 23.** Esquema para de determinação da densidade real dos grãos (Nunes, 2014).

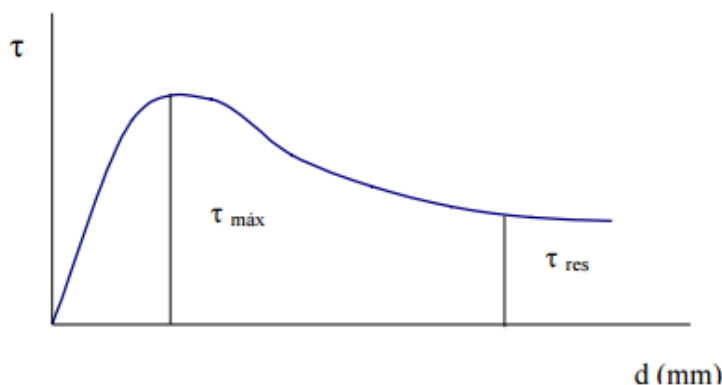
## 5.2. Resistência ao cisalhamento direto

A resistência ao cisalhamento das areias pode ser determinada tanto em ensaios de cisalhamento direto como em ensaios de compressão triaxial (Pinto, 2006). O ensaio de cisalhamento direto é um ensaio rápido, relativamente simples e de baixo custo (Heidemann, 2011). Como o interesse do trabalho é determinar a resistência ao cisalhamento da areia a tensões muito baixas, na direção paralela à superfície, foi utilizada a primeira forma de determinação.

A resistência ao cisalhamento de um determinado material pode ser definida pela máxima tensão de cisalhamento que o material pode resistir antes da ruptura, ou a tensão de cisalhamento no plano em que estiver ocorrendo a ruptura. O cisalhamento ocorre devido ao deslizamento entre corpos sólidos ou entre partículas que o compõem. Os principais



fenômenos que permitem menor ou maior deslizamento são o atrito e a coesão (Pinto, 2006). Através da Figura 24 podem ser identificadas as tensões de ruptura,  $\tau_{\text{máx}}$ , e a tensão residual,  $\tau_{\text{res}}$ , a que o solo resiste após a ruptura.



**Figura 24.** Ensaio de cisalhamento direto: representação de resultado típico do ensaio (Pinto, 2006).

De acordo com Machado (1997), o ângulo de atrito do solo está associado ao contato entre as partículas que o compõem. A resistência por atrito entre as partículas depende do coeficiente de atrito, por sua vez definido como a força tangencial necessária para ocorrer o deslizamento de um plano em outro paralelamente a este. O ângulo de atrito é o ângulo formado entre a força normal e a resultante das forças tangencial e normal, sendo o máximo ângulo que a força cisalhante pode ter sem que haja deslizamento (Pinto, 2006).

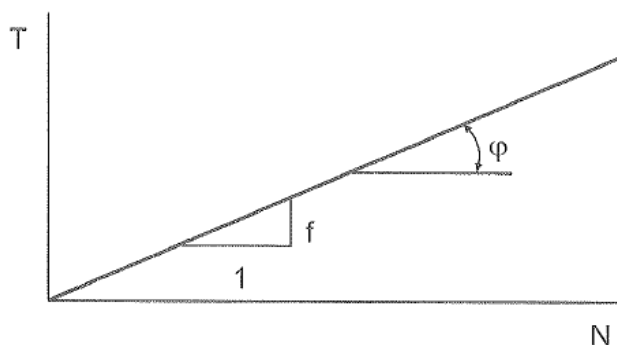
Ainda segundo Machado (1997), a coesão é a resistência que existe independente de quaisquer tensões porventura aplicadas, a partir da qual o material não se fragmenta. Várias fontes podem conferir coesão aos materiais. Como por exemplo, pode-se citar a cimentação por carbonatos, sílica e óxidos de ferro. Além disso o teor de água no solo e a presença de sais influenciam fortemente sua coesão, amplamente visto durante a realização dos ensaios no presente projeto.

A resistência ao cisalhamento de materiais é normalmente dada pelo Critério de Mohr-Coulomb, de acordo com a equação abaixo:

$$\tau = c + \sigma \tan \Phi$$

Onde:  $\tau$  = resistência ao cisalhamento  
 $c$  = coesão  
 $\sigma$  = tensão normal no plano de ruptura  
 $\Phi$  = ângulo de atrito interno

A representação gráfica da equação acima pode ser vista na Figura 25.



**Figura 25.** Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb (Pinto, 2006)

Para a realização do ensaio, utilizou-se uma prensa de cisalhamento direto do tipo convencional pertencente ao Laboratório de Solos do setor de Geologia de Engenharia e Ambiental na Universidade Federal do Rio de Janeiro, mostrada na Figura 26. Neste ensaio o corpo de prova é disposto no centro de uma caixa bipartida e sobre sua face superior aplica-se a tensão normal desejada. Através da imposição de um deslocamento horizontal de uma das partes da caixa em relação à outra (com velocidade constante), são medidos os parâmetros mecânicos já descritos.



**Figura 26.** Prensa de cisalhamento direto utilizada (esq.). Detalhe: caixa bipartida já posicionada com a carga vertical aplicada (dir.) (Foto do autor)

Este ensaio foi feito em duas etapas. A primeira etapa consistiu em realizá-lo para cada uma das três amostras arenosas disponíveis (Peró-1, Peró-2 e Lençóis) com os sedimentos lavados com água destilada, onde não houve presença de sais e, conseqüentemente, coesão entre os grãos. Na segunda etapa, o material foi imerso em solução de NaCl 18%. Para isso, adicionou-se silicone entre as duas partes da caixa a fim de vedá-la e impedir que a solução salina escapasse. A partir de uma altura constante e de forma homogênea, a areia foi disposta dentro da caixa com a solução de cloreto de sódio, sendo lançada a uma altura constante de aproximadamente 1cm acima da superfície da solução e, então, colocada em descanso até que todo o líquido evaporasse. A ação coesiva da solução de NaCl ao fim do experimento pode ser vista na figura 27.



**Figura 27.** Grãos de areia sem ação coesiva do sal (esq.) e coesos devido a presença do sal (dir.). Observa-se que na imagem da esquerda, os sedimentos desmoronaram

ao se retirar a parte de cima da caixa bipartida, ao passo que na imagem da direita permaneceram coesos. (Foto do autor)

### 5.3. Determinação do ângulo de repouso

O ângulo de repouso é aquele formado entre a superfície da massa de partículas e o plano horizontal, quando descarregados numa superfície plana (Elias, 2008). Dentre os fatores que afetam o ângulo de repouso aparecem tamanho e forma das partículas, a orientação das partículas e, principalmente, sua angulosidade (Mohsenin, 1974). Ou seja, se lançarmos grãos de areia de uma altura constante, e as partículas não encontrarem obstáculos nas redondezas da superfície plana, ao final da queda terão o formato de um cone. O ângulo formado pela reta de revolução deste cone e o plano horizontal de projeção da base é chamado de ângulo de repouso. Esse ângulo é menor do que o ângulo de atrito interno da areia, que vem a ser uma média entre todos os grãos da pilha (Nunes, 2014).

Para a determinação do ângulo de repouso das três amostras de areia, utilizou-se uma caixa de acrílico com tampa removível que permite a troca do material ensaiado a cada término do experimento. Para melhor visualização e cálculo do ângulo, utilizou-se uma malha quadriculada presa na caixa. Trata-se de um ensaio simples, o qual sua execução se dá pelo posicionamento cuidadoso da caixa com a base na posição horizontal, até que o material tome a forma de um retângulo. A seguir vira-se lentamente a caixa para a direita ou esquerda até que os grãos de areia assumam o formato da seção transversal do flanco de um cone, ou seja, um triângulo. O processo pode ser ilustrado pela Figura 28.



**Figura 28.** Modelo para determinação experimental do ângulo de repouso. O ângulo de repouso está demarcado na cor vermelha ao fim do modelo.

Abaixo, mostra-se a equação para determinação do ângulo de repouso a partir do ensaio descrito acima:

$$\Phi = \tan^{-1} \Delta h/L$$

Onde,

$\Phi$  = ângulo de atrito no repouso

$\Delta h$  = diferença entre as alturas entre dois pontos medidos

L = comprimento da base horizontal entre dois pontos medidos

(Nunes, 2014)

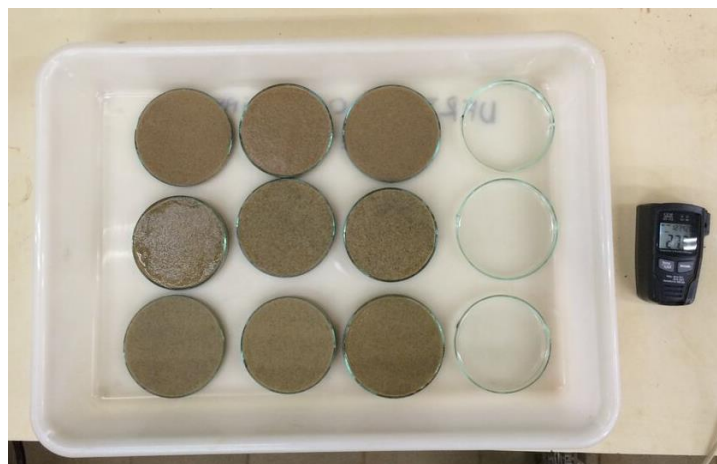
### 5.4. Ensaio de evaporação

A evaporação é a principal forma de perda de umidade em um solo, especialmente em zonas tropicais, como é o caso do Brasil (Gava *et al.*, 2013). O vento tem grande influência na uniformidade de distribuição, e juntamente com os outros fatores climáticos, aumentam ainda mais as perdas de água por evaporação (Martin *et al.*, 2007).

No que se refere aos parâmetros do material que interferem na evaporação, pode-se citar sua estrutura, densidade, porosidade e condutividade hidráulica não saturada (Yang e Yanful, 2002). Tais parâmetros afetam o teor de umidade do material.

Para a realização do ensaio de evaporação, em cada amostra de areia, foram utilizadas três soluções com diferentes concentrações de sal. Uma contendo apenas água destilada, e as outras duas com soluções de NaCl nas concentrações 35% e 18%, simulando diferentes ambientes influenciados pela ação da névoa salina, a primeira representando a concentração da água do mar e a segunda uma concentração mais diluída. Além disso, analisou-se a evaporação de cada uma das soluções separadamente. A Figura 29 mostra as amostras preparadas para o ensaio.

As amostras de areia foram previamente lavadas com água destilada e cuidadosamente dispostas em placas de petri com o volume conhecido, contendo as soluções previamente preparadas, de modo que ficassem saturadas ao fim da preparação. Procurou-se dispor os grãos a partir de uma mesma altura para todas as amostras, a fim de reduzir a diferença da porosidade entre elas. Além disso, os valores de temperatura e umidade relativa do ar durante o experimento foram registrados através de um termo-higrômetro e os pesos de cada placa após os intervalos de tempo foram aferidos com o auxílio de uma balança digital de precisão, com o propósito de se saber massa de água evaporada em função do tempo decorrido.



**Figura 29.** Amostras preparadas para o ensaio de evaporação. Observa-se a saturação máxima no início do ensaio.

### 5.5. Condutividade e salinidade

Forch, Knudsen e Scrensen (1902) definiram a salinidade como sendo a quantidade, em gramas, de materiais sólidos em um quilograma de água do mar quando todo o carbonato tiver sido convertido em óxido. O grau de salinidade influi na capacidade de dissolução do gás oxigênio na água, ou seja quanto maior a salinidade, menor é a quantidade de oxigênio dissolvido e retido na água; influi também na diversidade vegetal e animal do sistema, vez que atua direta e indiretamente sobre os processos vitais (metabolismo) dos organismos.

Uma definição mais moderna para a mensuração da salinidade leva em conta sua condutividade elétrica, temperatura e pressão. Assim, através da condutividade elétrica, Lewis e Perkin (1978) definiram de forma indireta uma maneira para o cálculo da salinidade da água através de medidas de sua condutividade, definida como sendo a quantidade de corrente elétrica que pode passar através da água e pode ser aferido facilmente através de um dispositivo de mão chamado condutivímetro, mostrado na Figura

30. Essa forma indireta de cálculo da salinidade através da condutividade é chamada de *practical salinity scale*.



**Figura 30.** Condutímetro utilizado nos ensaios. Foto do autor.

Os principais fatores que controlam o grau de salinidade nos sedimentos superficiais das dunas costeiras são o balanço entre evaporação e precipitação que se dá diretamente sobre a superfície dunar, que implica no aumento e diminuição da concentração de sais através de sua dissolução. Os sais presentes nas dunas vêm do spray salino em função dos ventos para logo serem depositados, permitindo assim a posterior lavagem com a água das precipitações. A distribuição superficial da salinidade também é zonal conforme a latitude, porém não tão claramente definido como a distribuição da temperatura.

A definição formal para obter a salinidade a partir do valor da condutividade medida em laboratório, é usada a seguinte fórmula empírica, onde os valores de salinidade prática são relacionados aos valores da razão  $K_{15}$  pela seguinte expressão (Lewis e Perkin, 1981):

$$S=0,0080-0,1692(K_{15})^{1/2}+25,3851(K_{15})+14,0941(K_{15})^{3/2}-7,0261(K_{15})^2+2,7081(K_{15})^{5/2},$$

onde  $S$  é a salinidade prática, adimensional, e seu valor equivale numericamente à concentração em partes por mil (‰).

A razão  $K_{15}$  está dada pela relação entre a condutividade da amostra de água do mar dividido pela condutividade da solução padrão de KCl (fração em massa igual a  $32,4356 \times 10^{-3}$ ), ambas medidas a  $15^\circ\text{C}$  e à pressão atmosférica. Quando a salinidade da água do mar é igual a 35,  $K_{15} = 1$ . Quando a temperatura é diferente de  $15^\circ\text{C}$ , a razão  $K_{15}$  na equação é substituída na equação por  $R_t$ , que é a razão entre a condutividade da amostra de água do mar e a condutividade de a solução padrão de KCl na mesma temperatura. Devido à pequena diferença entre  $R_t$  e  $K_{15}$ , é acrescentada à equação uma correção  $\Delta S$ . Assim obtém-se:

$$S=0,0080-0,1692(R_t)^{1/2}+25,3851(R_t)+14,0941(R_t)^{3/2}-7,0261(R_t)^2+2,7081(R_t)^{5/2}+\Delta S$$

$$\Delta S=(t-15)/[1+k(t-15)] \times [0,0005-0,0056(R_t)^{1/2}-0,0066(R_t)-0,0375(R_t)^{3/2}+0,0636(R_t)^2-0,0144(R_t)^{5/2}],$$

onde  $t$  é a temperatura em que foi medida a condutividade e  $k = 0.0162$ .

Para o cálculo da razão de condutividade  $R_t$ , a condutividade da água do mar foi considerada igual a  $56.000\mu\text{S}/\text{cm}$  a  $25^\circ\text{C}$ .

## 5.6. Túnel de vento

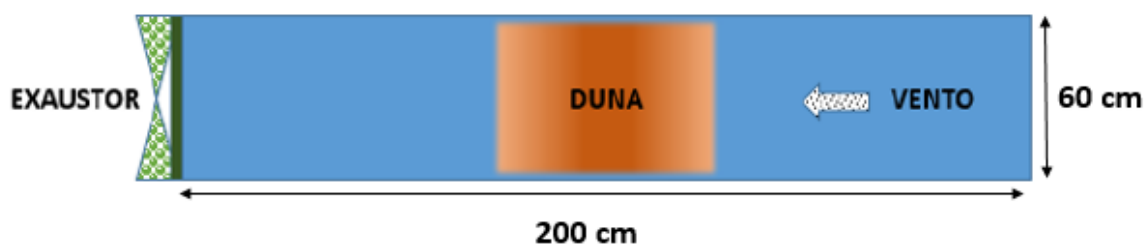
Túneis de vento são construídos com muitas formas, dimensões e para diferentes propósitos. Os tipos de túneis podem ser classificados segundo o valor da velocidade do ar que ocorre durante os testes, suas condições de temperatura ou o caminho percorrido pelo ar. Segundo o valor da velocidade, são considerados subsônicos quando o valor da velocidade do ar é menor do que a velocidade do som, e supersônicos quando é maior (Buscariolo, 2009).

De acordo com Hucho (1998), existem dois tipos de túnel de vento de acordo com o caminho percorrido pelo ar. Um túnel de circuito aberto é aquele em que o ar é retirado do ambiente externo, passa por sua estrutura e é devolvido ao ambiente (também chamado de Túnel Eiffel). Num túnel de circuito fechado, ou Túnel Göttingen, o ar é recirculado dentro da estrutura, não havendo perdas para o ambiente. Enquanto que o primeiro tipo possui a vantagem do baixo custo de construção, o segundo possui a vantagem de menor demanda energética para o seu funcionamento.

Segundo Blessman (1978), túneis de vento foram criados devido à necessidade de um equipamento que permitisse a simulação de condições do vento natural que age sobre edificações e interessa à construção civil. Mais tarde, os túneis ganharam outras aplicações, como por exemplo, no caso do presente trabalho, a simulação de dunas costeiras sob a ação da erosão eólica.

Estudos de erosão eólica utilizando túneis de vento são descritos em diversos trabalhos na literatura internacional (Bagnold, 1954; Nickling e Ecclestone, 1981; Nickling, 1984; Raupach e Leys, 1990; Leys e Raupach, 1991; Shao, 2000, Hagen, 2001). Dentre estes, Nickling e Ecclestone (1981) e Nickling (1984) avaliam a influência de sais na velocidade limite do vento para iniciar o arrasto.

O túnel de vento usado para esse trabalho, construído por García (2015), encontra-se no Setor de Geologia de Engenharia e Ambiental do Departamento de Geologia na UFRJ. Esse túnel possui pequenas dimensões (60 cm de largura, 60 cm de altura e 200 cm de extensão) e, de acordo com as classificações, pode ser considerado como um túnel subsônico aberto. A Figura 31 mostra um croqui do túnel utilizado



**Figura 31.** Croqui do túnel de vento utilizado durante os ensaios. Vista em planta. (Modificado de García, 2015)

O exaustor acoplado ao túnel é do tipo axial com 50 cm de diâmetro e 6 pás móveis, o que garante um regime de vento estável para a faixa de velocidade utilizada. O exaustor succiona o ar de dentro do túnel, deslocando o material através de uma superfície rugosa (García, 2015). As velocidades de deslocamento do ar durante os ensaios foram aferidas com o auxílio de um anemômetro. Fotos do túnel podem ser vistas nas Figura 32 e 33.

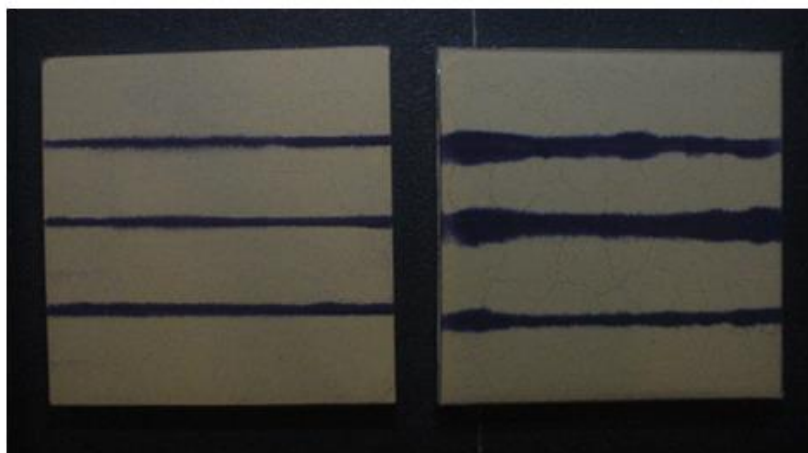


**Figura 32.** Túnel de vento utilizado para os ensaios. Vista lateral (Foto do autor)



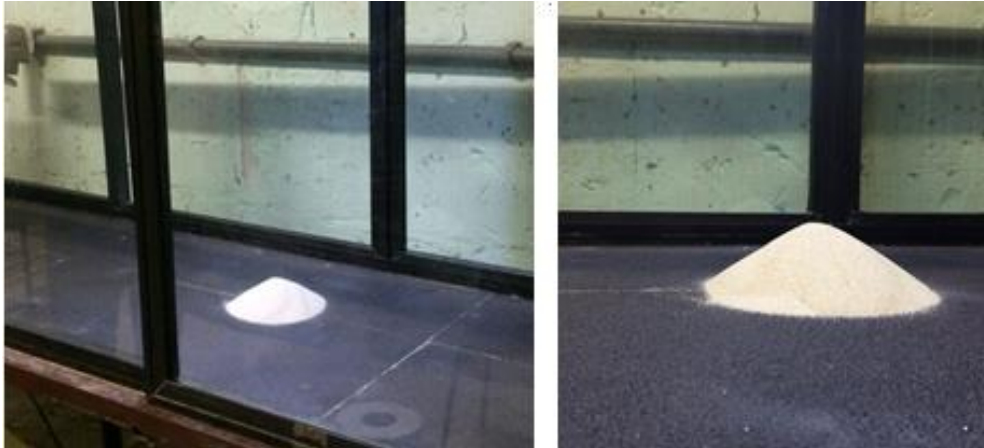
**Figura 33.** Túnel de vento utilizado para os ensaios. Vista interna (Foto do autor)

Primeiramente, a fim de avaliar a influência da coesão salina no transporte eólico, foram dispostas duas caixas de acrílico contendo o material proveniente dos Lençóis Maranhenses, sendo uma borrifada com 5g de solução salina evaporada durante, no mínimo, 48h antes de se iniciar o ensaio. Para melhor visualização do movimento, foram dispostas linhas paralelas do material tingido por permanganato de potássio. Variou-se a velocidade do vento durante o experimento. A Figura 34 mostra as amostras preparadas.



**Figura 34.** Amostras preparadas para o primeiro teste no túnel de vento. Areia com sal à direita e areia sem sal à esquerda. (Foto do autor)

O segundo teste feito no túnel de vento consistiu na representação prática do modelo numérico descrito por Hermann e Sauermann (2000). Nele foi disposto um cone contendo a amostra de areia Però-1, seguido da amostra dos Lençóis, com altura e diâmetro de, respectivamente, 12 e 15 cm cada um, mostrado na Figura 35. O teste com a amostra Però-1 teve a duração de 57h, com velocidade do vento de aproximadamente de 5 m/s. Já a amostra dos Lençóis Maranhenses permaneceu no túnel por 12h com velocidade do vento de aproximadamente 8 m/s.



**Figura 35.** Cone de areia disposto para a realização do segundo teste no túnel de vento. (Foto do autor)

O terceiro teste realizado no túnel de vento consistiu na disposição de dois cones arenosos de 15 cm de diâmetro, sendo um deles sob ação da névoa salina. Para isso, borrifou-se aproximadamente 70g de solução de NaCl 18% sobre os grãos e, após total evaporação da solução, ligou-se o exaustor por um período de 57h. Vale ressaltar que os grãos de ambos os cones foram dispostos a partir de uma altura constante de 11 cm e de um mesmo ponto, a fim de uniformizar o formato, as dimensões e a porosidade das amostras. A Figura 36 mostra o processo de preparo do experimento.



**Figura 36.** Preparo dos cones de areia para o teste no túnel de vento (Foto do autor)



## 6. Resultados e discussão

### 6.1. Granulometria

As Figuras 37, 38 e 39 mostram as curvas granulométricas para as três amostras de areia estudadas, respectivamente Lençóis Maranhenses, Però-1 e Però-2.

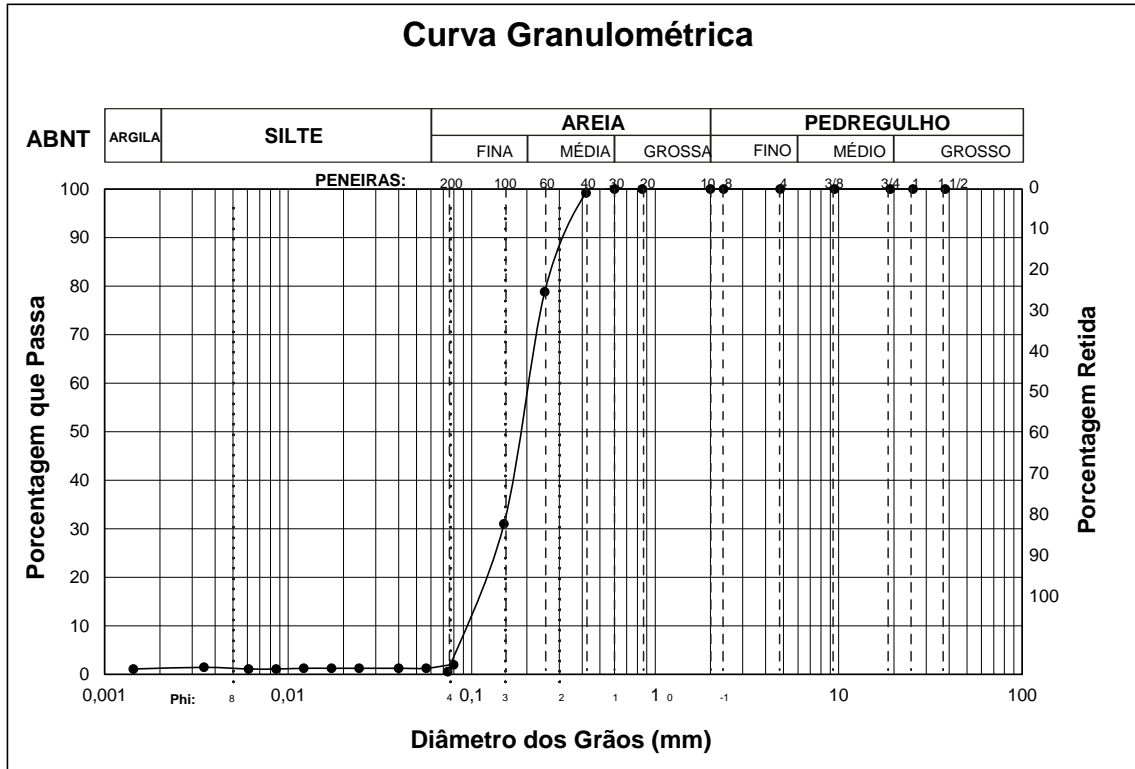


Figura 37. Curva granulométrica gerada para a amostra dos Lençóis Maranhenses

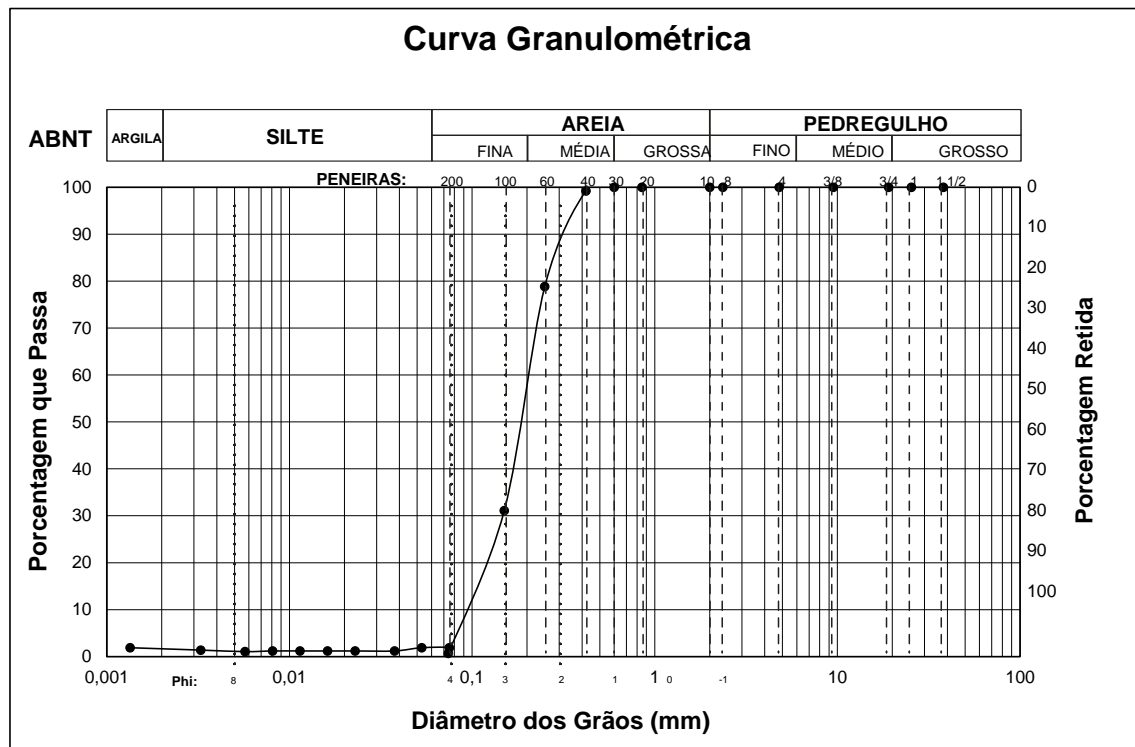
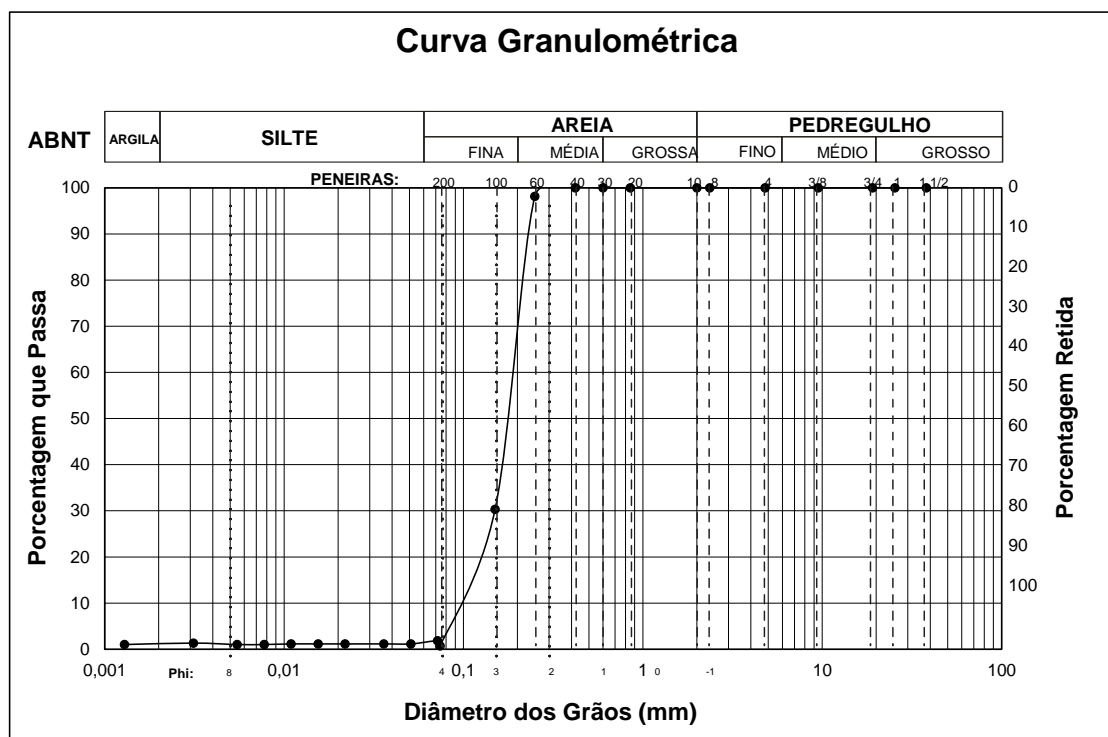


Figura 38. Curva granulométrica gerada para a amostra Però 1

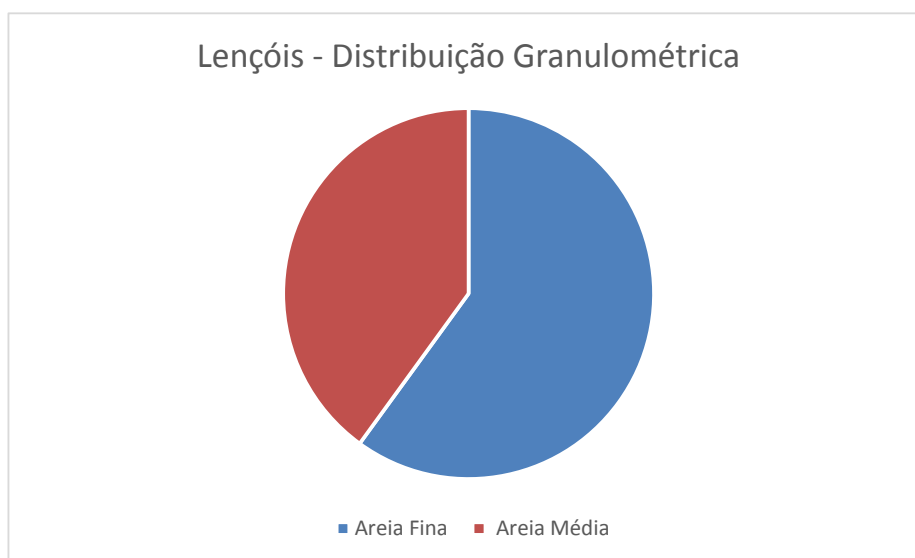


**Figura 39.** Curva granulométrica gerada para a amostra Peró 2

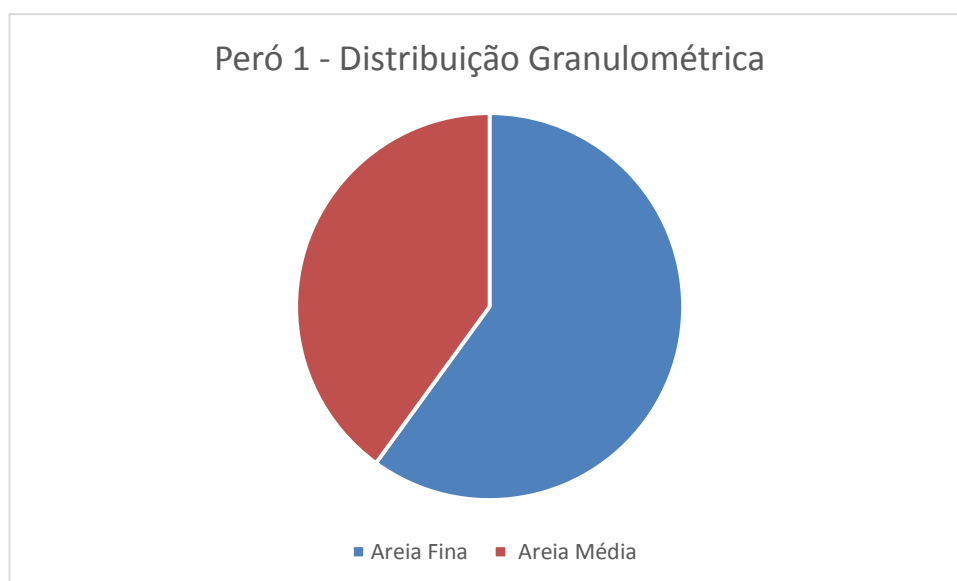
A partir das curvas granulométricas, gerou-se gráficos de distribuição das partículas, mostrados pelas Figuras 40, 41 e 42.

Segundo Pinto (2006), solos ou materiais arenosos são aqueles que possuem as porcentagens de finos abaixo de 15% e de areia maior do que 75%, o que está de acordo com as três curvas analisadas, já que granulometrias menores do que areia fina se aproximam de zero em todos os casos. Além disso, não havia material para o peneiramento grosso.

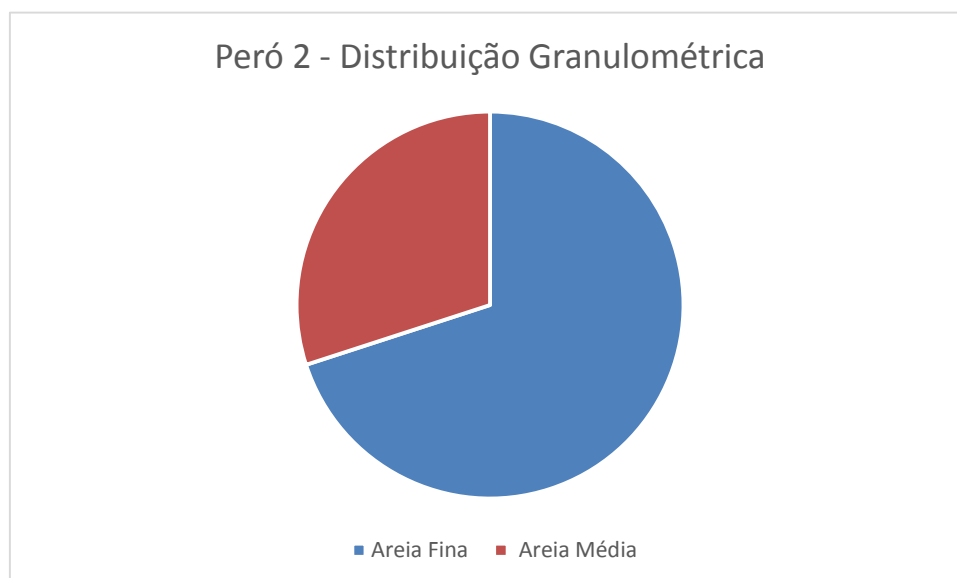
De acordo com ICMBIO (2015) e García (2015), as areias dos Lençóis Maranhenses, Peró-1 e Peró-2, caracterizam-se por apresentar diâmetro médio da partícula de ocorrência mais frequente compreendido, predominantemente, entre as granulometrias areia fina e média, o que está de acordo com as curvas geradas e com o fato de os materiais serem provenientes de áreas onde predomina o transporte eólico.



**Figura 40.** Distribuição granulométrica para amostra dos Lençóis Maranhenses



**Figura 41.** Distribuição granulométrica para amostra Peró-1



**Figura 42.** Distribuição granulométrica para amostra Peró-2

De acordo com os gráficos e curvas apresentados, observou-se que a amostra Peró-2 possui a maior quantidade de material com granulometria mais fina. Além disso, as amostras de Lençóis e Peró-1 apresentaram a mesma distribuição.

Se considerarmos apenas as amostras da região do Peró, ou seja Peró-1 e Peró-2, pode-se explicar a maior porcentagem de areia fina no segundo material devido a sua posição mais afastada em relação à direção em que sopra o vento no local se comparada com a primeira, evidenciando o potencial da erosão eólica.

## 6.2. Densidade dos grãos e umidade higroscópica

A Tabela 1 mostra os valores de densidade dos grãos calculados para as três amostras de areia.

**Tabela 1.** Valores de densidade dos grãos encontrados

<b>Amostra</b>	<b>Densidade dos grãos</b>
Lençóis	2,64
Peró-1	2,52
Peró-2	2,66

Todos os valores de densidade encontrados estão coerentes, já que se aproximam do descrito por Dana (1978) para o quartzo, de 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

A tabela 2 mostra os valores encontrados de umidade para as três amostras de areia secas ao ar.

**Tabela 2.** Valores de umidade das amostras

<b>Amostra</b>	<b>Umidade (%)</b>
Lençóis	0,14
Peró-1	0,09
Peró-2	0,02

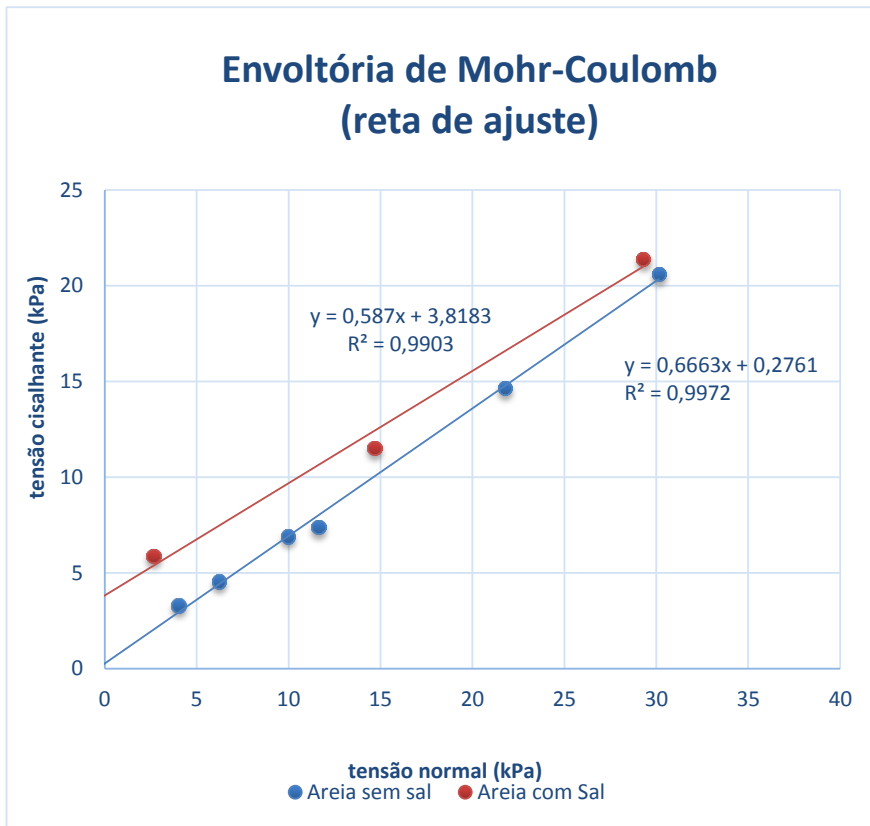
Todas as três amostras apresentaram valores muito baixo de umidade, característica de materiais arenosos.

## 6.3. Resistência ao cisalhamento direto

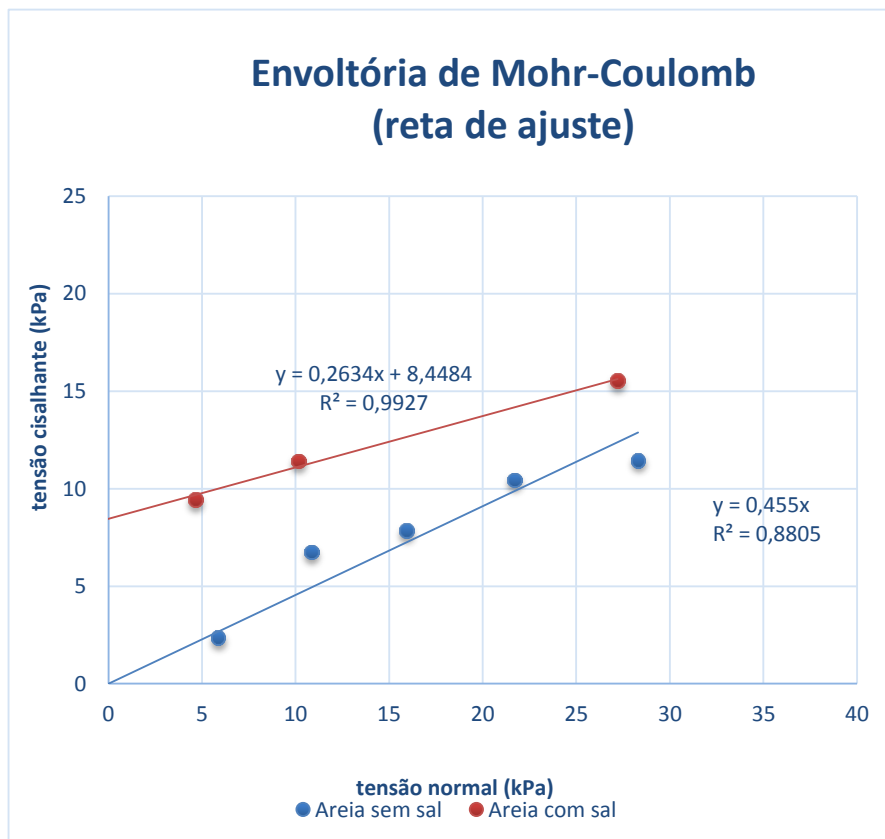
As Figuras 43, 44 e 45 mostram as envoltórias de Mohr-Coulomb geradas após o ensaio de resistência ao cisalhamento direto com e sem a presença de sal para as amostras dos Lençóis Maranhenses, Peró-1 e Peró-2, respectivamente.

Em todos os três casos, observa-se que a envoltória para a areia com sal se posicionou acima da envoltória para areia sem sal devido a uma maior coesão evidenciada pela interseção da envoltória com o eixo das ordenadas. Tal fato está de acordo com as observações feitas por García (2015) e com a teoria de Fredlund e Rahardjo (1993).

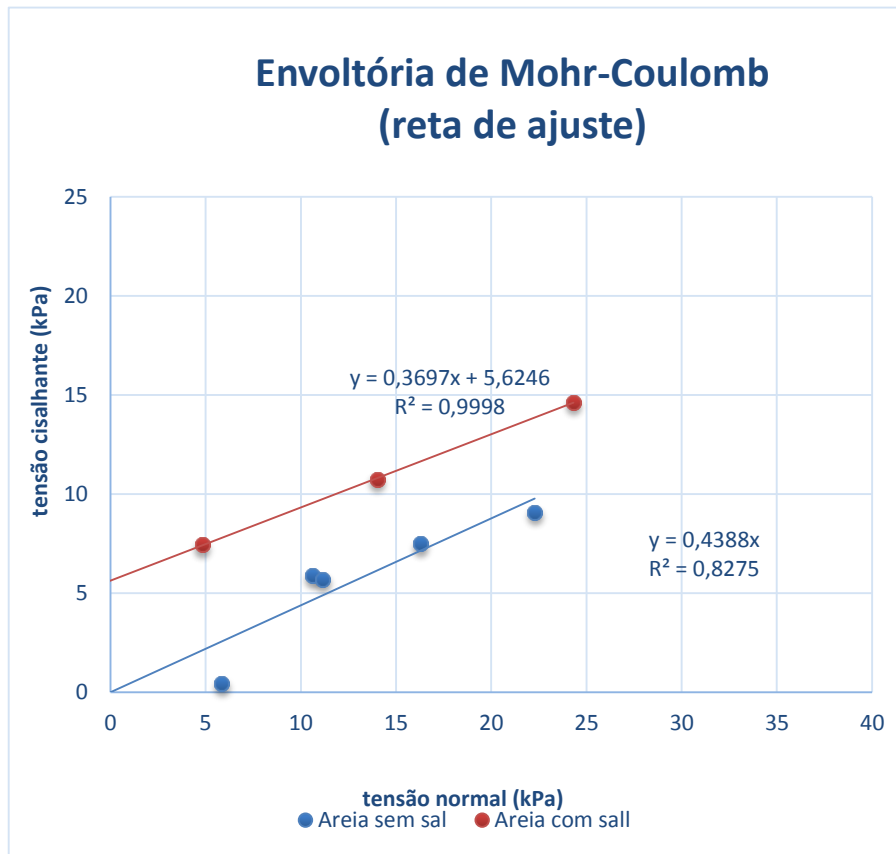
Os ângulos de atrito  $\Phi$  encontrados são mostrados na Tabela 3. A Tabela 4 mostra os valores de coesão para as amostras com solução salina.



**Figura 43.** Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra dos Lençóis Maranhenses com e sem a presença de sal



**Figura 44.** Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Perú-1 com e sem a presença de sal



**Figura 45.** Envoltórias de Mohr-Coulomb para a amostra Perú-2 com e sem a presença de sal

**Tabela 3.** Ângulo de atrito para as amostras com e sem sal

Amostra	Ângulo de atrito s/sal (graus)	Ângulo de atrito c/ sal (graus)
Lençóis	33,7	30,4
Peró-1	21,1	14,6
Peró-2	25,4	20,3

**Tabela 4.** Valores da coesão da areia com sal

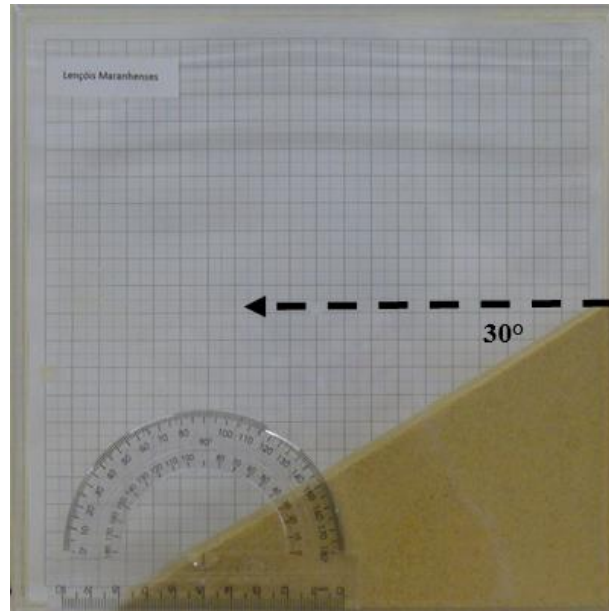
Amostra	Coesão com sal (KPa)
Lençóis	3,81
Peró-1	8,44
Peró-2	5,62

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), o ângulo de atrito para os ensaios com sal não deve variar se comparado com o sem sal, gerando duas envoltórias paralelas. Entretanto, através da análise das envoltórias, observa-se que houve essa variação, ocasionando uma aproximação entre elas. Uma hipótese para tal fato seria a quebra acidental da coesão em alguns pontos da amostra preparada no momento do

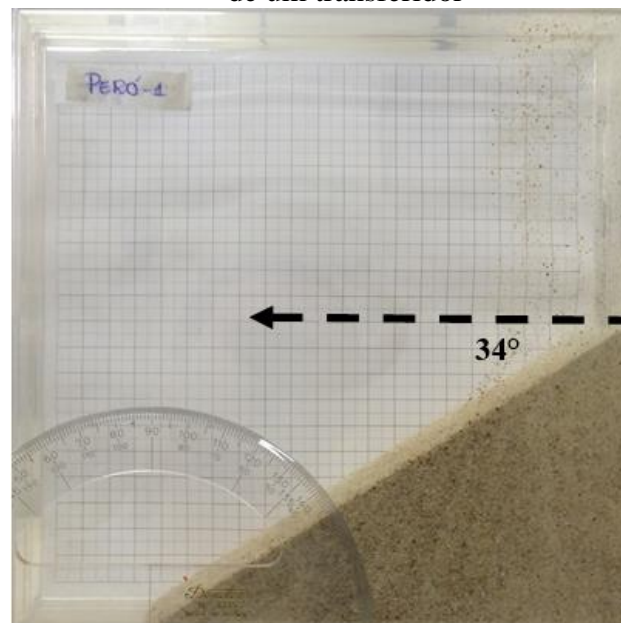
posicionamento das cargas verticais, fazendo com que a tensão de cisalhamento na ruptura tenha sido menor.

#### 6.4. Determinação do ângulo de repouso

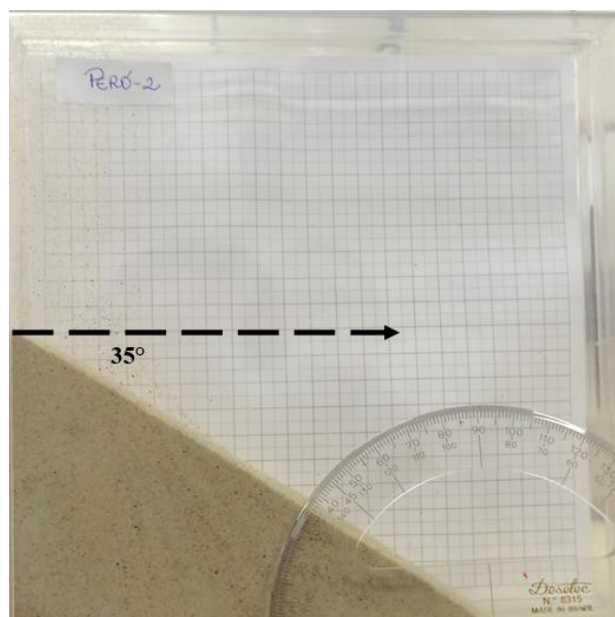
As Figuras 46, 47 e 48 mostram os resultados obtidos na determinação do ângulo de repouso. Os resultados para Lençóis, Però-1 e Però-2 foram  $30^\circ$ ,  $34^\circ$  e  $35^\circ$  respectivamente.



**Figura 46.** Ângulo de repouso para os Lençóis Maranhenses medido com o auxílio de um transferidor



**Figura 47.** Ângulo de repouso para Però-1 medido com o auxílio de um transferidor



**Figura 48.** Ângulo de repouso para Però-2 medido com o auxílio de um transferidor

A Tabela 5 mostra os ângulos de repouso obtidos através de seu cálculo a partir da tangente.

**Tabela 5.** Ângulo de repouso obtido através de cálculo

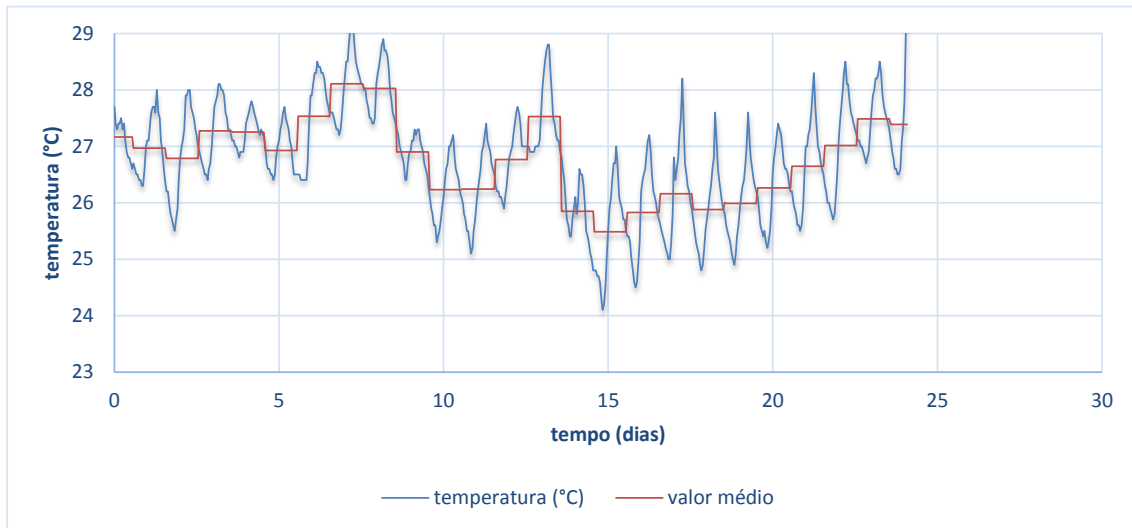
Amostra	Ângulo de repouso
Lençóis	31°
Peró-1	34°
Peró-2	31,5°

Os resultados obtidos através do cálculo se aproximam bastante com os aferidos com o auxílio do transferidor. Entretanto, observa-se uma diferença significativa se comparados com o ângulo de atrito interno obtido através da envoltória de Mohr-Coulomb.

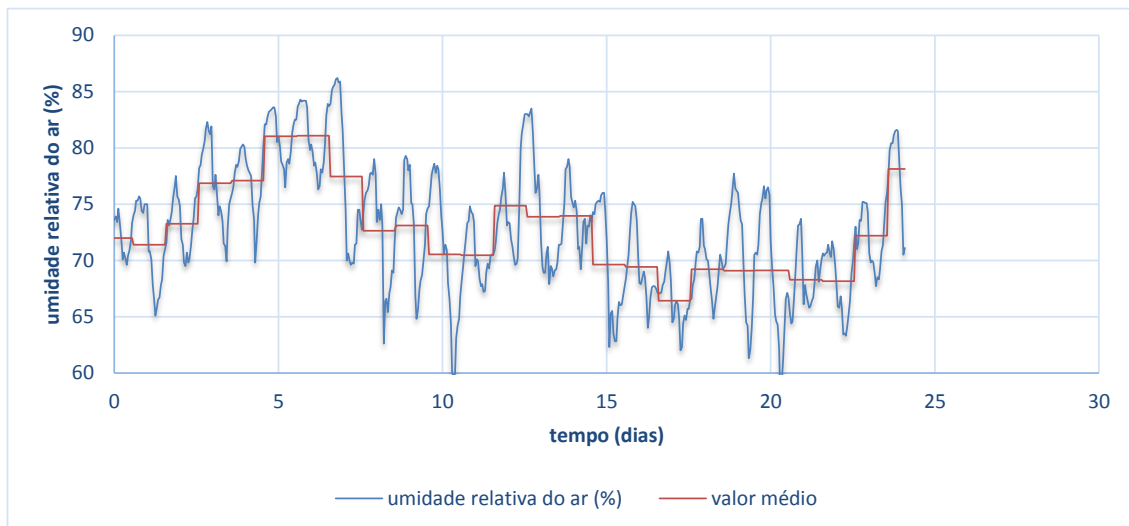
### 6.5. Ensaio de evaporação

As Figuras 49 e 50 mostram a variação da temperatura e umidade durante o ensaio, acompanhado de seus valores médios para cada dia de registro no termohigrômetro. A linha azul foi traçada entre as medidas registradas a cada intervalo de 1 hora e a linha vermelha é a média calculada para cada intervalo entre as pesagens das amostras.





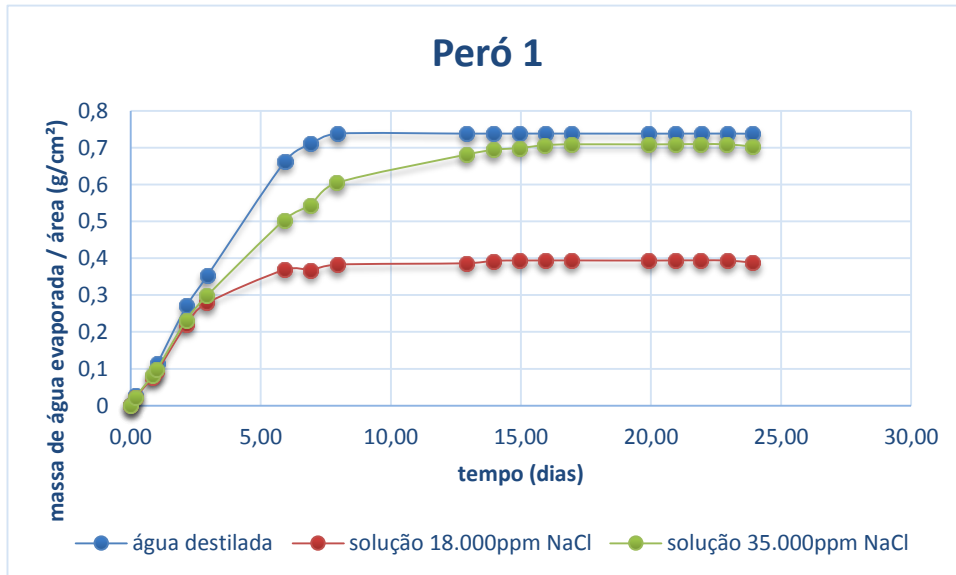
**Figura 49.** Registro da temperatura e a média de seus valores durante cada dia do ensaio



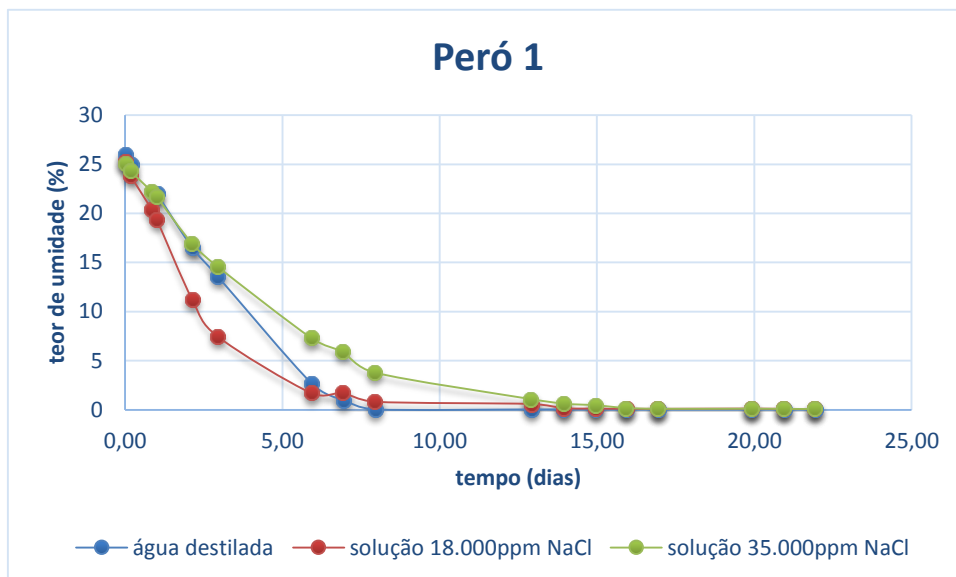
**Figura 50.** Registro da umidade relativa do ar e a média de seus valores durante cada dia do ensaio

De acordo com os dois gráficos apresentados, os valores de umidade relativa do ar e temperatura apresentaram grande variação durante o ensaio. Observou-se uma amplitude térmica de 5°C e uma variação máxima de 27% na umidade relativa do ar, com valores mínimos e máximos absolutos de 60% e 87% respectivamente.

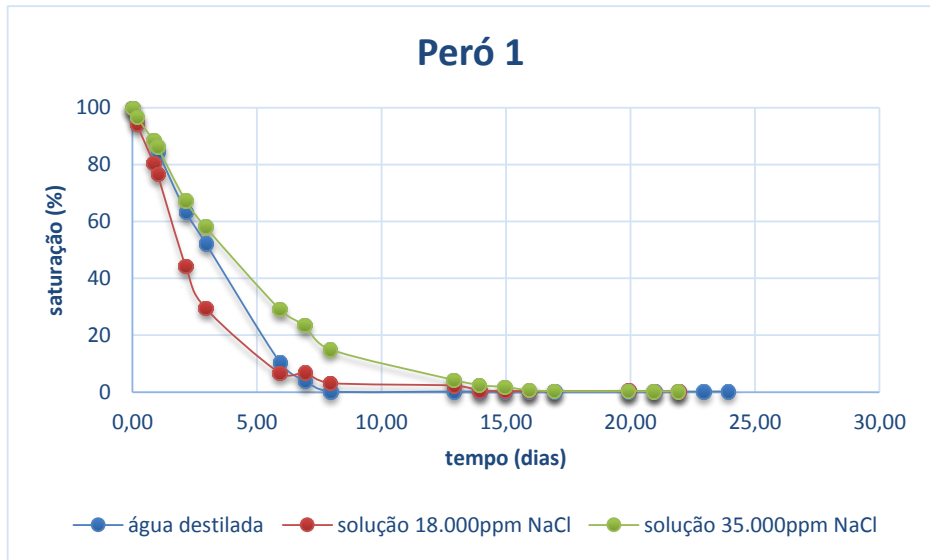
Nas Figuras 51 a 59 são mostrados os gráficos obtidos a partir dos cálculos dos valores de massa de água evaporada, teor de umidade e saturação em função do tempo para cada uma das amostras.



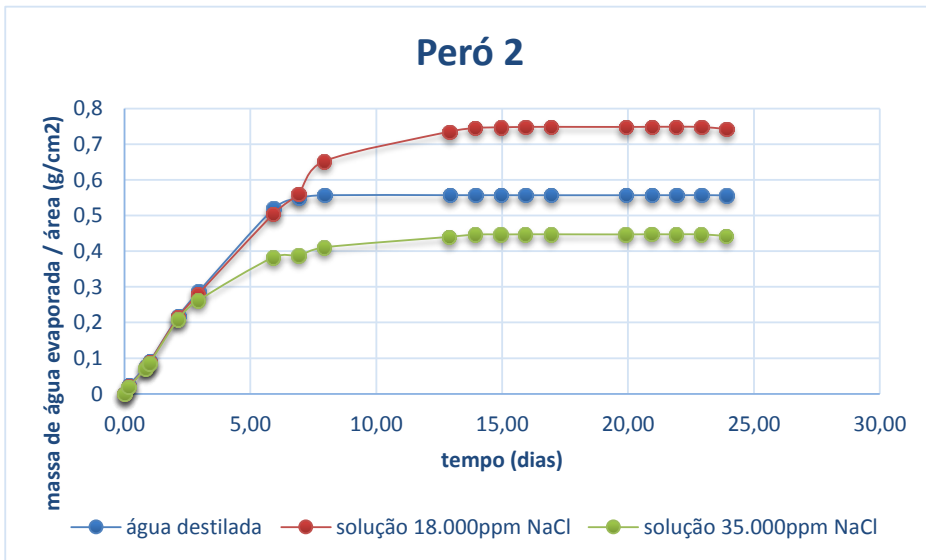
**Figura 51.** Massa de água evaporada/área x Tempo para Peró-1



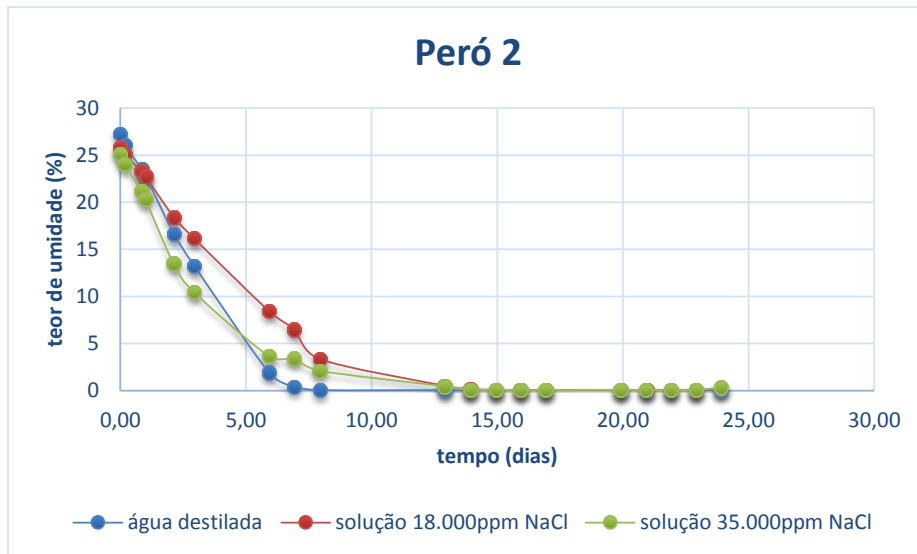
**Figura 52.** Teor de umidade x Tempo para Peró-1



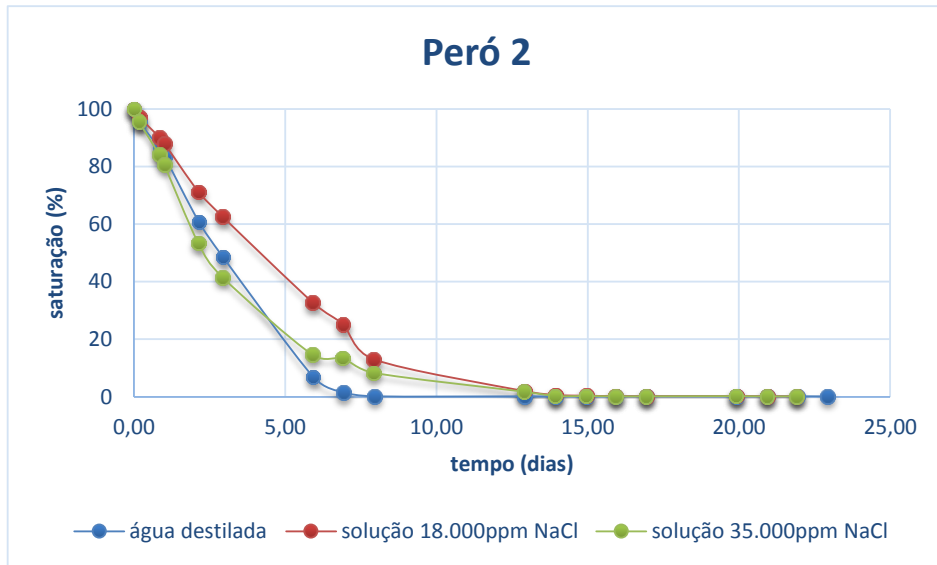
**Figura 53.** Saturação x Tempo para Peró-1



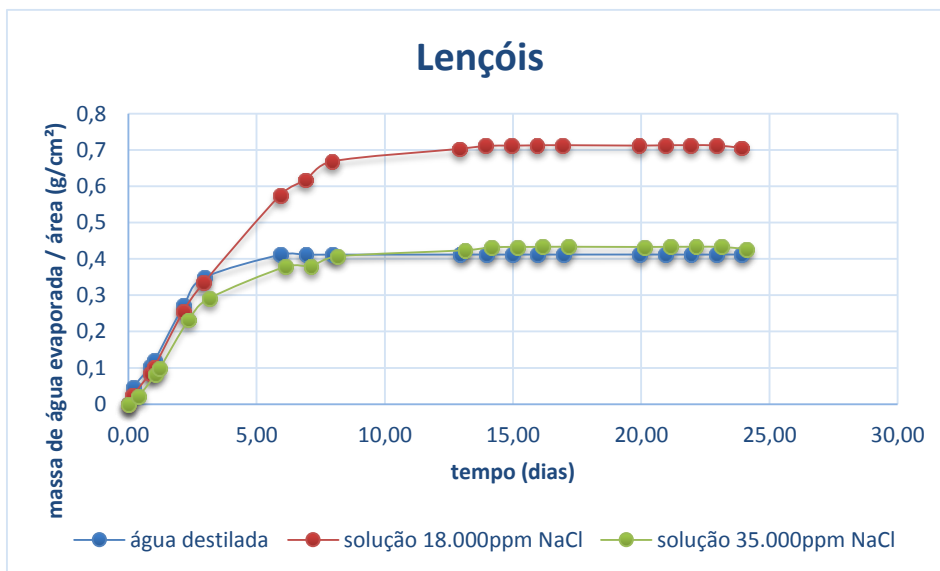
**Figura 54.** Massa de água evaporada/área x Tempo para Peró-2



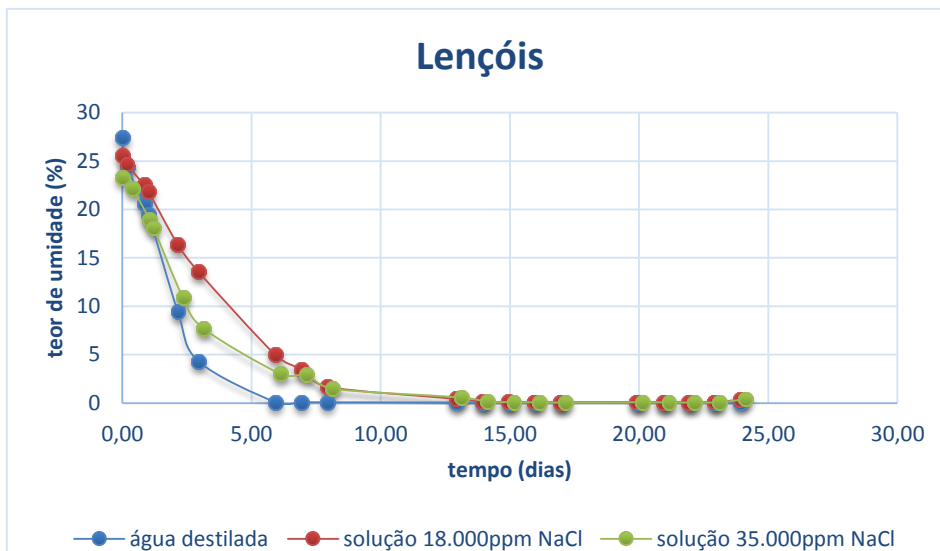
**Figura 55.** Teor de umidade x Tempo para Peró-2



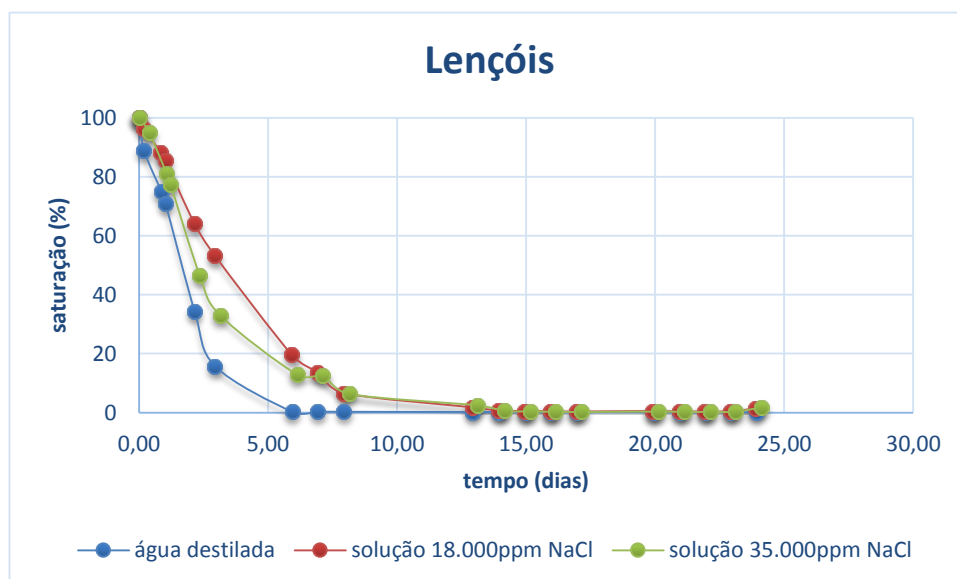
**Figura 56.** Saturação x Tempo para Peró-2



**Figura 57.** Massa de água evaporada x Tempo para Lençóis



**Figura 58.** Teor de umidade x Tempo para Lençóis



**Figura 59.** Saturação x Tempo para Lençóis

A quantidade de massa de solução evaporada em função do tempo dar-se-ia na ordem crescente: água destilada > solução salina 18% > solução salina 35%. Já para o teor de umidade e saturação, esperava-se o oposto, ou seja, solução salina 35% > solução salina 18% > água destilada. Entretanto, através das análises dos gráficos apresentados, foi observado que a grande maioria apresentou um padrão diferente do esperado, exceto se considerarmos apenas a parte final dos gráficos mostrados pelas figuras 52 e 53.

A fim de se analisar a influência da porosidade nos resultados gerados, os valores de porosidade para cada uma das placas preparadas foram calculados e encontram-se apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6.** Valores de porosidade para as diferentes concentrações em cada uma das amostras

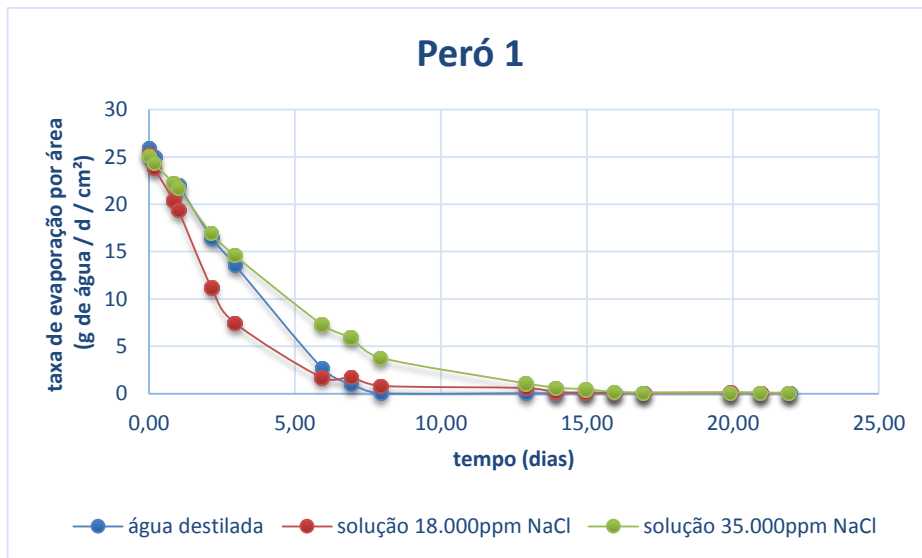
	$\eta$ Perú-1 (%)	$\eta$ Perú-2 (%)	$\eta$ Lençóis (%)
<b>Água destilada</b>	41,82	21,92	40,51
<b>18000 ppm NaCl</b>	31,53	41,66	21,18
<b>35000 ppm NaCl</b>	23,17	39,88	20,99

Observa-se que houve uma variação significativa entre os valores de porosidade para cada uma das amostras preparadas, possivelmente devido a pequenas tensões acidentais aplicadas ao sistema ou a variações na altura de queda das partículas durante a preparação dos materiais.

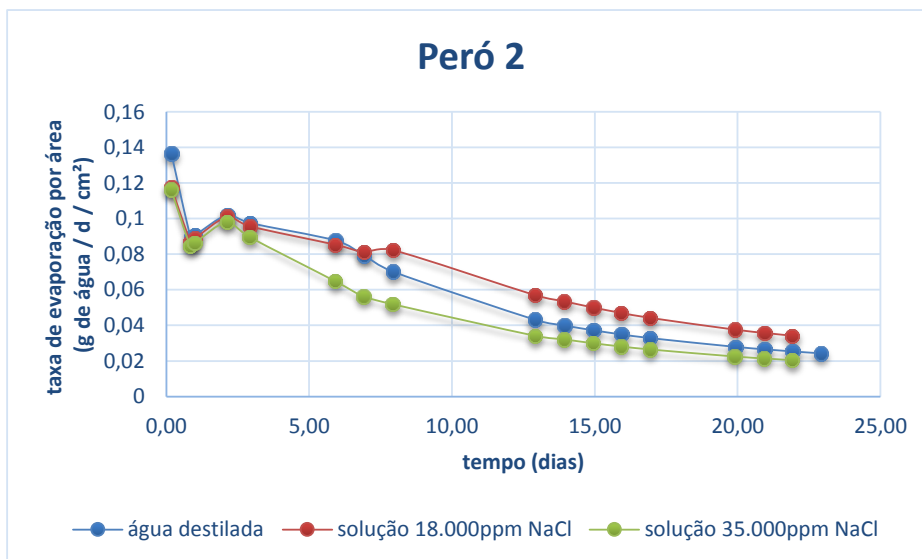
As Figuras 60 a 65 mostram os gráficos taxa de evaporação por área em função do tempo para as três amostras, com dois enfoques diferentes: na amostra utilizada e no tipo de solução.

Através da correlação entre a Tabela 6 e as Figuras 60 a 65, observou-se maior influência da porosidade das amostras em relação à concentração das soluções salinas a que foram submetidas, já que haveria uma maior quantidade de líquido disponível nos poros para evaporação, ou seja, há uma relação diretamente proporcional entre os dois parâmetros. Amostras com valores de porosidade maiores apresentaram maior taxa de evaporação, no caso Perú-1 com água destilada e Perú-2 com solução a 18%, ao passo que as com menor porosidade possuíam taxa menor (Lençóis 18% e Perú-1 35%). Além disso, fica evidente

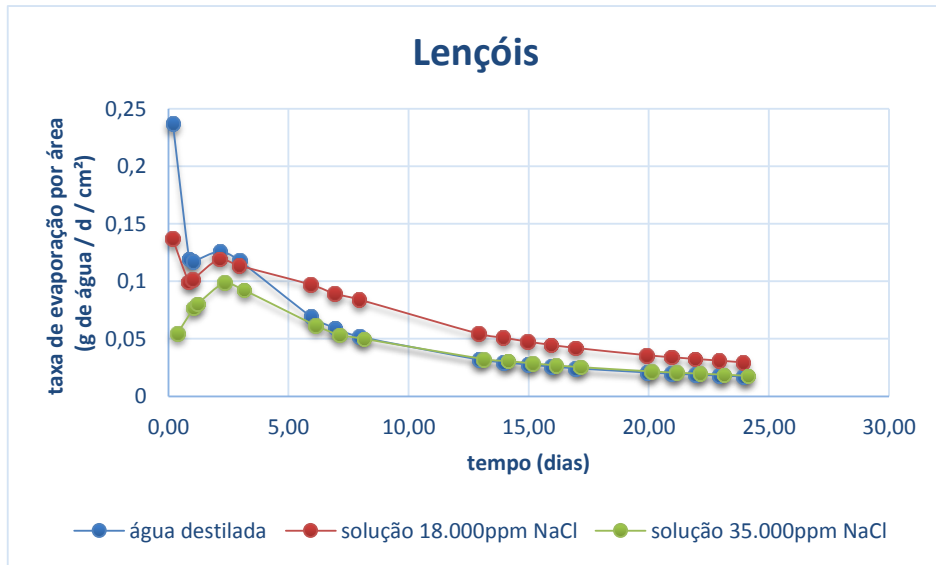
que durante os primeiros 10 dias do ensaio as taxas de evaporação apresentaram valores muito maiores comparados ao período subsequente, sendo também observado por Garcia (2015). Isso se explica pela maior saturação inicial do material e pelas condições de temperatura e umidade do ar registradas pelo termo higrômetro.



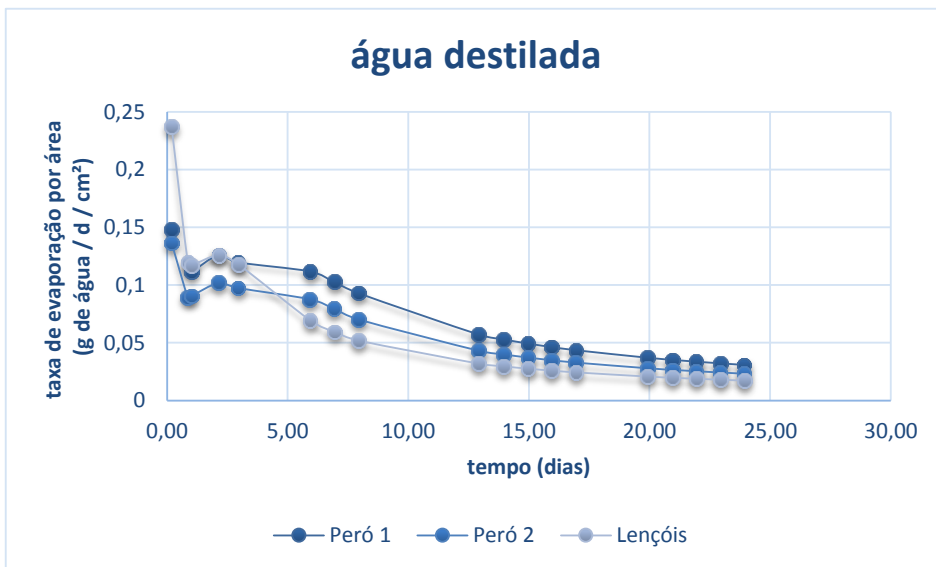
**Figura 60.** Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para Peró-1



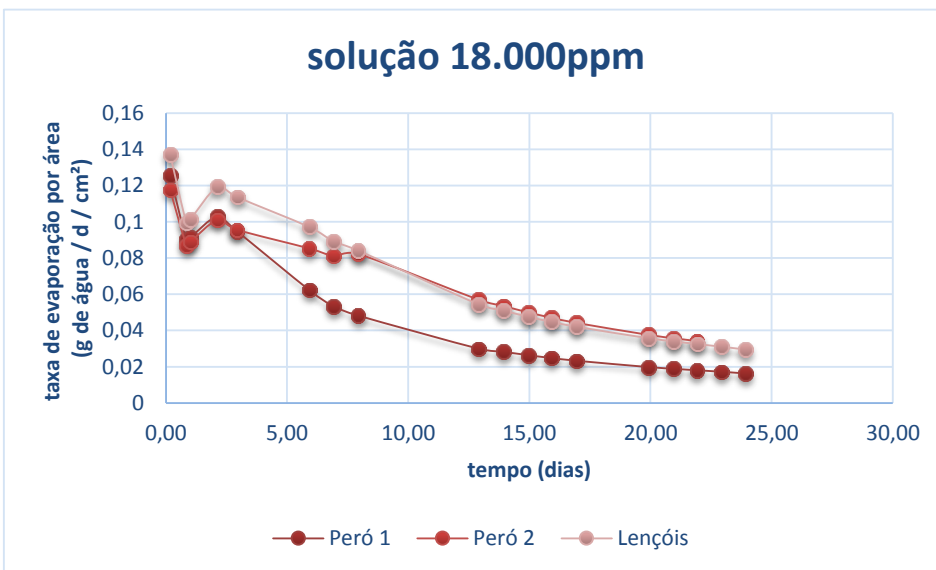
**Figura 61.** Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para Peró-1



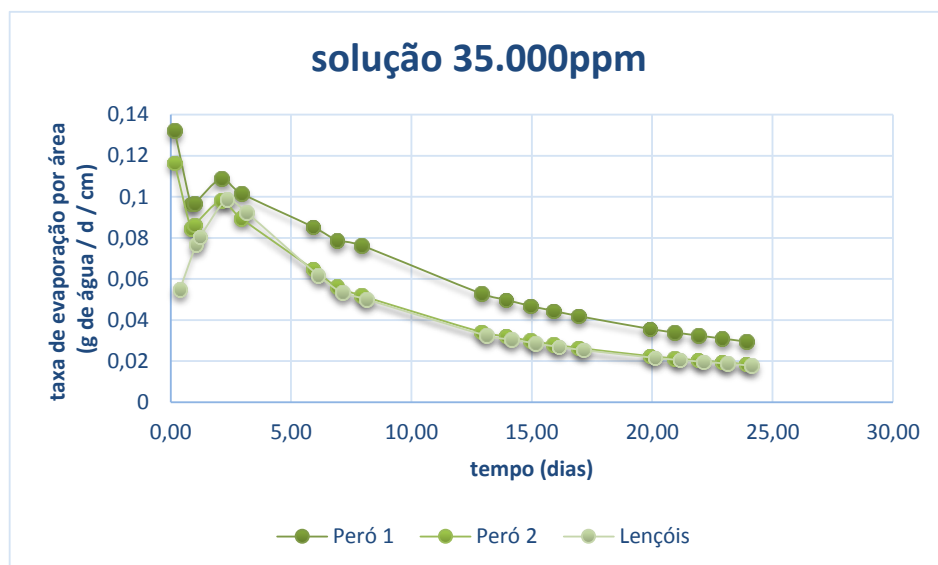
**Figura 62.** Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para os Lençóis



**Figura 63.** Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para água destilada



**Figura 64.** Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para solução salina 18%



**Figura 65.** Gráfico taxa de evaporação por área x tempo para solução salina 35%

### 6.6. Condutividade e salinidade

As Tabelas 7 e 8 mostram, os valores de salinidade calculados a partir das medições de condutividade dos sedimentos para as amostras lavadas com água destilada e ao natural, respectivamente.

**Tabela 7.** Valores de condutividade e salinidade calculados para as amostras lavadas, além da condutividade para a água destilada

Amostras	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Salinidade (‰)	Salinidade ( $M_{\text{sal}}/M_{\text{areia}}$ ) (g/kg)
Peró-1	25	0,019	21,79
Peró-2	16	0,016	23,9
Lençóis	18	0,013	20,6
Água Destilada	6	-	-

**Tabela 8.** Valores de condutividade e salinidade calculados para as amostras ao natural

Amostras	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Salinidade (‰)	Salinidade ( $M_{\text{sal}}/M_{\text{areia}}$ ) (g/kg)
Peró-1	87	0,044	34
Peró-2	80	0,041	25
Lençóis	19,2	0,017	23

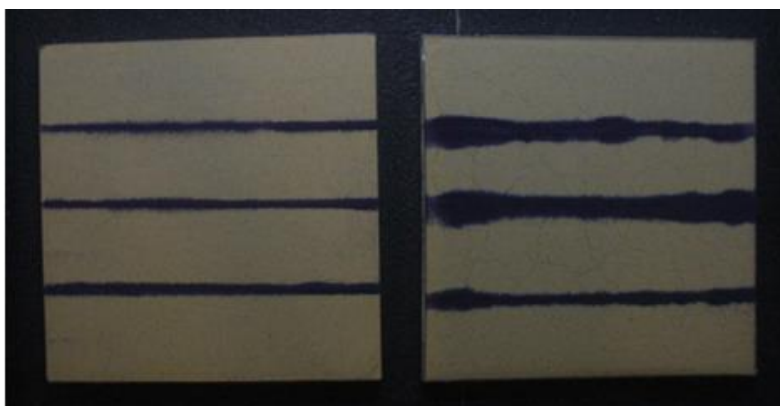
Comparando-se as tabelas 7 e 8, nota-se efeito significativo da lavagem dos sedimentos com água destilada na medição da condutividade, já que duas das amostras (Peró 1 e 2) ao natural analisadas apresentaram valores até quatro vezes maiores em relação àquelas lavadas, similares aos encontrados por García (2015). Além disso, para as amostras lavadas, encontraram-se valores maiores do que o medido para água destilada somente, o que evidencia a presença de sais mesmo após a lavagem.



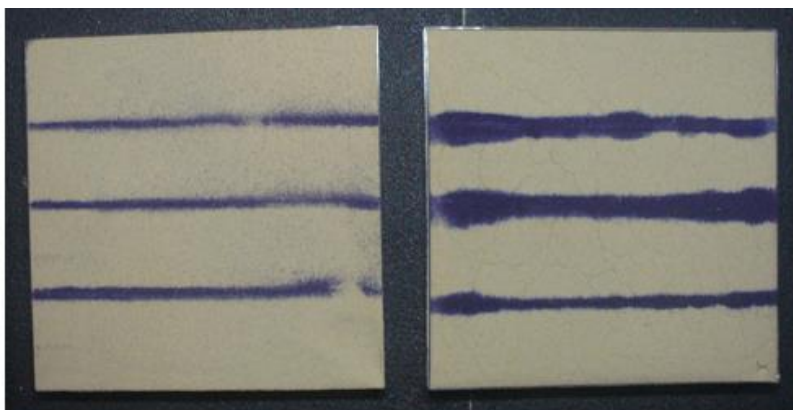
Dentre os três materiais, a amostra proveniente dos Lençóis Maranhenses foi a que apresentou valores de condutividade e salinidade menores. Tal fato pode ser associado a sua maior distância do ponto de amostragem em relação à linha de costa, reduzindo o efeito dos sais trazidos pela névoa salina.

### 6.7. Túnel de vento

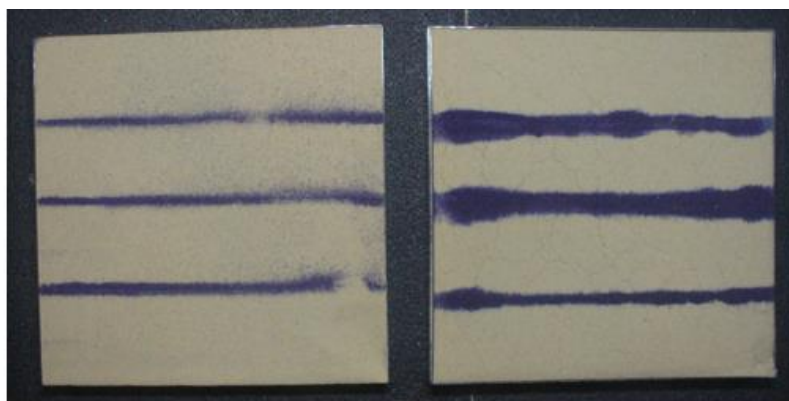
As figuras 66 a 72 mostram as configurações do sistema montado durante o decorrer do primeiro teste realizado com a amostra de Lençóis Maranhenses, onde a caixa da esquerda e da direita se encontram sem e com a influência do sal, respectivamente, mantendo-se a velocidade do vento em 2,8 m/s para os Lençóis Maranhenses. O experimento ocorreu durante 8h e 30 minutos ininterruptas.



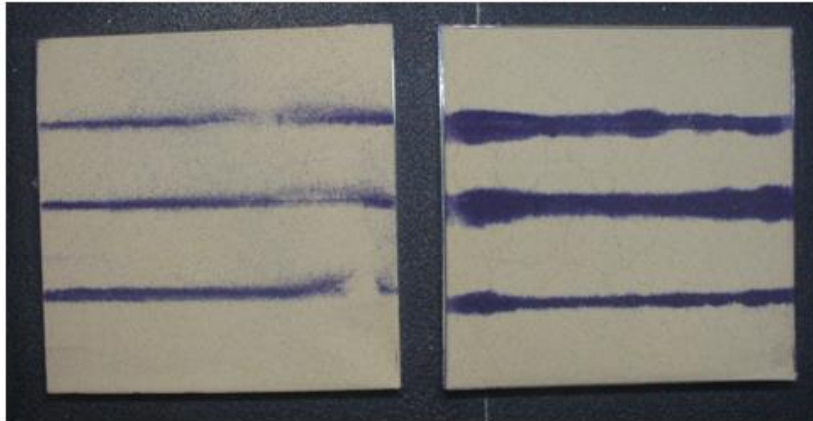
**Figura 66.** Conformação inicial do sistema durante o primeiro teste



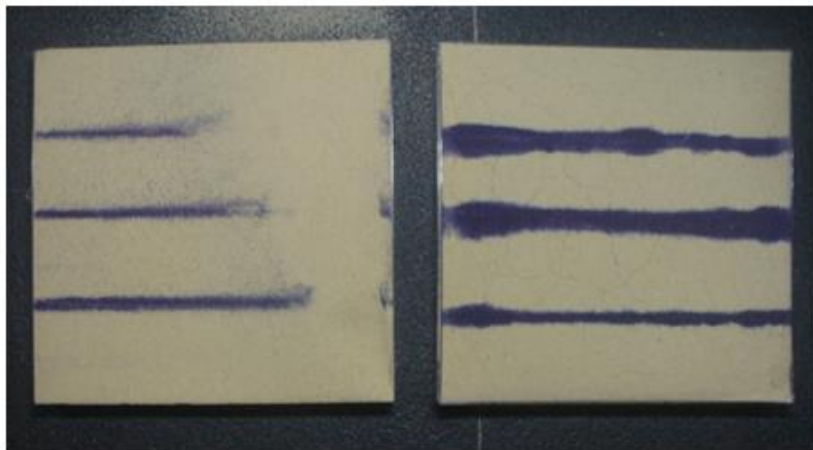
**Figura 67.** Conformação após uma hora de experimento sob velocidade do vento de 2,8 m/s



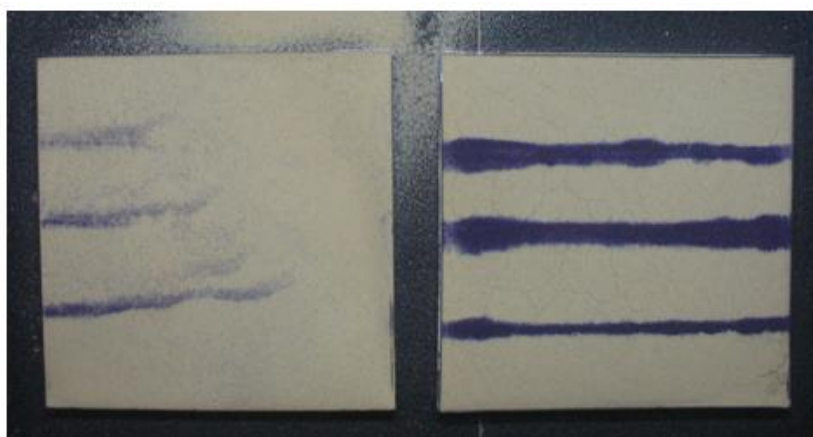
**Figura 68.** Conformação após 3 horas de experimento sob velocidade do vento de 2,8 m/s



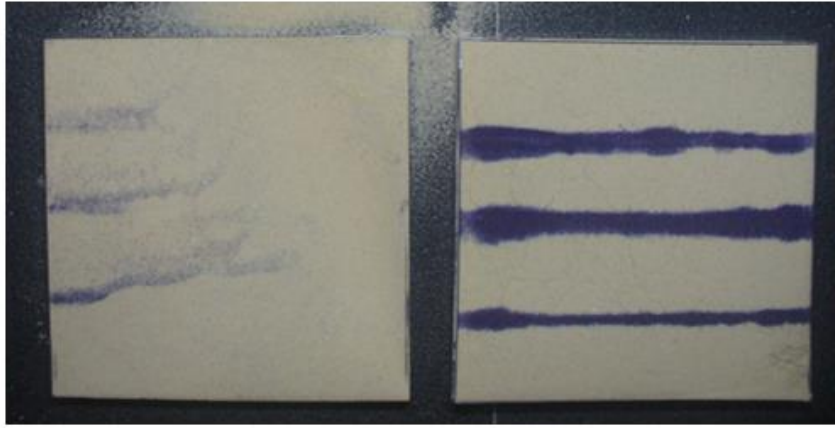
**Figura 69.** Conformação após 6 horas de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5,5 m/s.



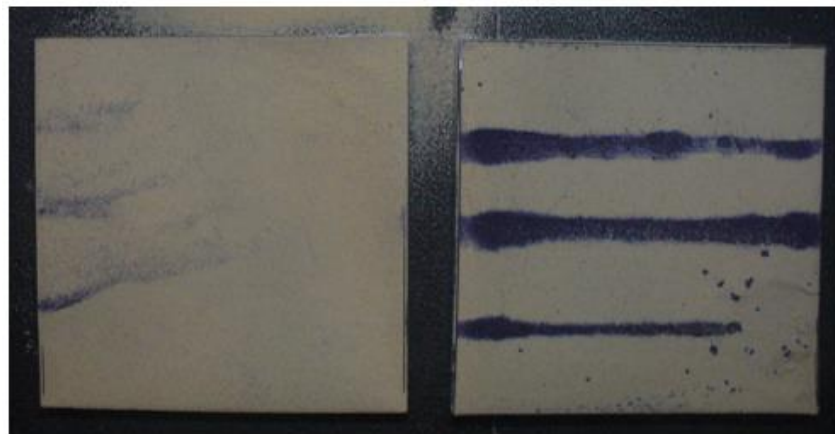
**Figura 70.** Conformação após 6 horas e 15 minutos de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5 m/s.



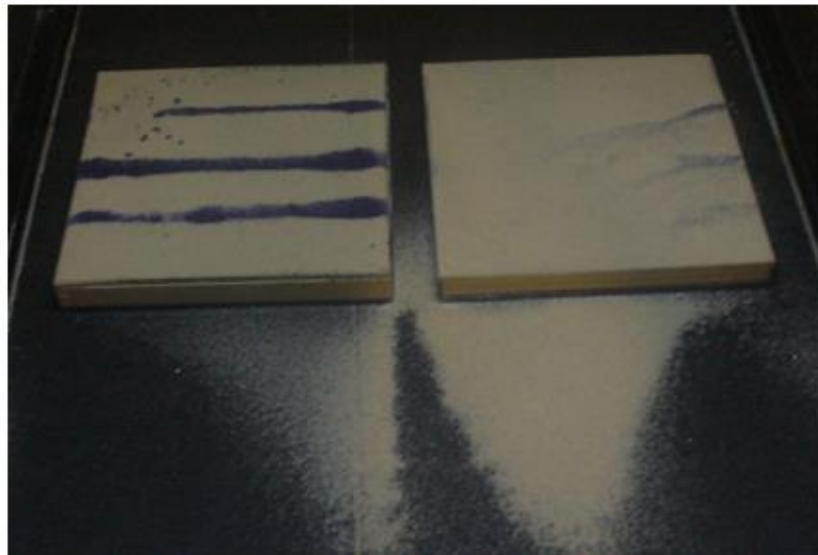
**Figura 71.** Conformação após 6 horas e 50 minutos de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5 m/s



**Figura 72.** Conformação após 7 horas e 20 minutos de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5 m/s



**Figura 73.** Conformação após 8 horas e 30 minutos de experimento, com velocidade do vento aumentada para 5 m/s

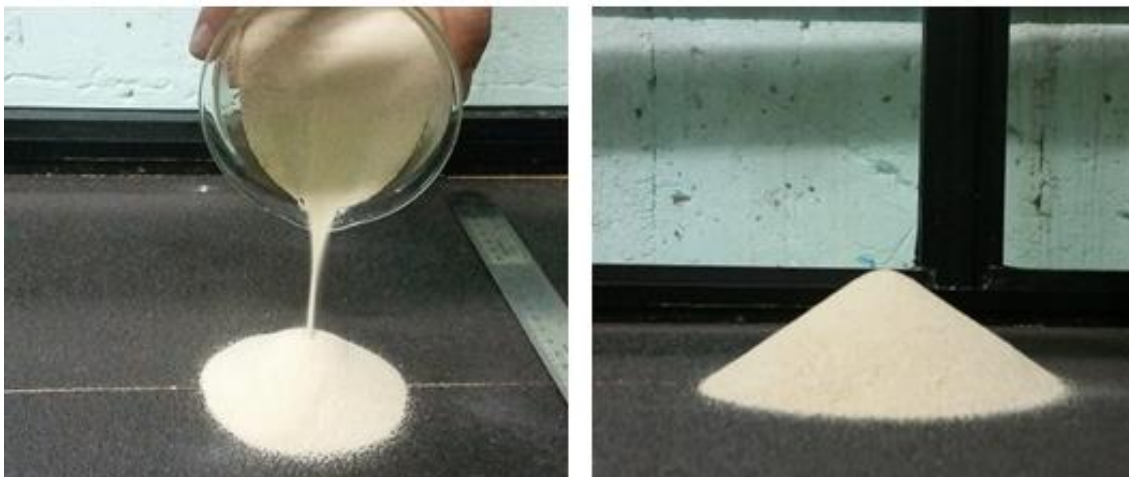


**Figura 74.** Estágio final do ensaio

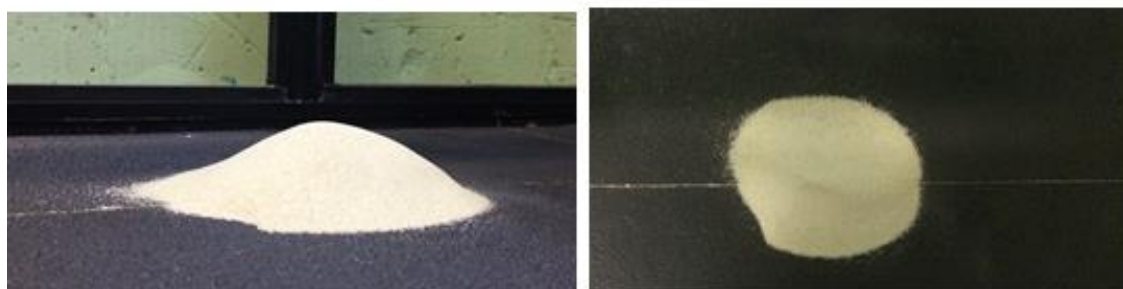
Através da análise dos resultados obtidos no túnel de vento, foi possível observar influência significativa da coesão salina no transporte dos sedimentos pela ação do vento. Observando-se as figuras acima, nota-se que o material da caixa da esquerda foi muito mais mobilizado do que o da direita. Apesar de o sal ter agido como elemento coesivo durante o

ensaio, houve o desprendimento superficial de parte do material da esquerda quando a velocidade do vento foi aumentada, provavelmente gerado por turbulência no centro do túnel. Tal fato levou a um maior transporte nesse ponto central do equipamento.

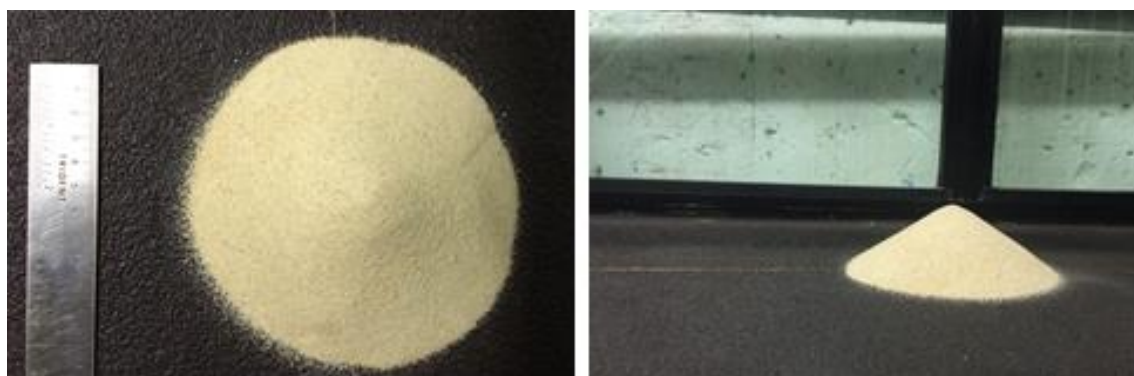
A seguir, nas figuras 75, 76, 77 e 78 são mostrados os resultados obtidos no segundo teste realizado no túnel de vento, com as amostras Perú-1 e Lençóis Maranhenses, a fim de demonstrar o modelo numérico de Hermann e Sauermann (2000). A Amostra do Perú-1 permaneceu sob ação do vento com velocidade constante de 5,5 m/s durante 67h e 10min. Já para o material de Lençóis, o experimento foi feito por 12h com velocidade constante de 8 m/s



**Figura 75.** Configuração inicial do segundo teste realizado no túnel de vento. Amostra: Perú-1



**Figura 76.** Configuração do segundo teste após 67 horas e 10 minutos de experimento. Amostra Perú-1



**Figura 77.** Configuração inicial do segundo teste realizado no túnel de vento. Amostra: Lençóis



**Figura 78.** Configuração do segundo teste realizado no túnel de vento após 12h. Amostra: Lençóis

Observou-se claramente a mudança na forma física do cone de areia que, com o decorrer do experimento, tomou a forma de uma duna. Ainda que incipiente, na amostra Perú-1, notou-se a tendência de formação das duas cristas laterais, características das dunas barcanas, através da migração lateral da areia.

A figura 79 mostra a preparação do terceiro e último ensaio realizado no túnel de vento para este trabalho. Os seus resultados são mostrados pelas Figuras 80 a 82.



**Figura 79.** Preparação dos cones de areia e borrifamento de solução salina em um deles para o terceiro ensaio realizado no túnel de vento



**Figura 80.** Conformação inicial do terceiro ensaio realizado no túnel de vento. O cone da esquerda está sob influência do sal

Após 42 horas de ensaio com velocidade do vento de 3,4 m/s, observou-se que apenas o cone da direita sofreu ação da erosão eólica, evidenciada pelos grãos de areia transportados, como mostra a Figura 82. Ao aumentar-se a velocidade para 4,7 m/s por mais 20h de ensaio, uma parcela maior do cone da direita sofreu o transporte. Já o material da esquerda permaneceu coeso, sem nenhuma movimentação, como mostra a Figura 83. Tal fato evidencia mais uma vez a ação do sal na mobilidade da areia, como foi visto no primeiro ensaio realizado. Entretanto, diferente deste último, não foi observado nenhum desprendimento superficial de areia, o que se deve a maior quantidade de solução salina borrifada sobre os sedimentos: 65g a mais do que o primeiro teste.



**Figura 81.** Conformação após 42h de ensaio com velocidade de 3,4 m/s



**Figura 82.** Figura 82. Conformação após 62h de ensaio, sendo as últimas 20h com velocidade do vento aumentada para 4,7 m/s

## 7. Conclusões

Comparando-se os resultados obtidos em todos os ensaios, foi possível verificar a influência significativa do sal na mobilidade dos sedimentos, dificultando sua remoção pelo vento em todas as amostras estudadas.

Os resultados obtidos a partir da determinação granulométrica mostram maior porcentagem de material fino para a amostra Perú-2, coerente com sua posição mais afastada em relação a direção em que sopra o vento (NE) naquela localidade.

O ensaio de evaporação mostrou influência maior da porosidade de cada amostra em relação a sua concentração salina. Se analisarmos duas amostras com a mesma

porosidade e concentrações distintas, a evaporação será mais lenta naquela que possuir maior concentração. Contudo, em função da diferença de porosidade gerada pela preparação e manuseio dos materiais, observou-se que, em alguns casos, amostras somente com água destilada ou concentração 18% evaporaram mais lentamente do que aquelas com solução de NaCl 35%. Ou seja, a medida que se aumenta a porosidade, a taxa de evaporação torna-se maior em função da maior disponibilidade de líquido nos poros, o que pode mascarar os efeitos da concentração de solução salina nos materiais.

A análise dos resultados obtidos a partir do ensaio de resistência ao cisalhamento direto mostra que as envoltórias de mohr-coulomb para os testes realizados com sal se posicionam acima daquelas para ensaios apenas com a areia lavada por água destilada. Tal fato evidenciou maior coesão conferida pela solução salina após sua evaporação. Entretanto, diferente do esperado, as envoltórias não se mostraram paralelas, aproximando-se entre si, provavelmente efeito de uma possível quebra da coesão em alguns pontos da amostra. Essa quebra pode ter ocorrido antes mesmo de se iniciar o ensaio, no momento de posicionamento das cargas verticais.

Dentre as três areias submetidas ao ensaio de condutividade e salinidade, observou-se que o material proveniente dos Lençóis Maranhenses apresentou menor valor. Pode-se atribuir o fato a posição geográfica do ponto em que foi coletada a amostra, próximo de um corpo fluvial da região, o rio Preguiças. Além disso, mesmo para as amostras lavadas com água destilada, encontrou-se valores (ainda que baixos) de condutividade e superiores ao padrão medido para a água deionizada somente, o que evidencia presença de sal após a lavagem.

Para o primeiro teste realizado no túnel de vento, foi observada uma movimentação muito maior do material sem o borrifamento de solução salina. A areia com sal, no entanto, sofreu um desprendimento superficial, o que levou ao transporte do material subjacente, provavelmente com pouca ou nenhuma concentração de sal. A tentativa de simulação do modelo numérico de Herrmann e Sauermann (2000) mostrou um resultado com tendências similares ao modelo. Ainda que o cone de areia não tenha adquirido a forma de uma duna barcana perfeita, observou-se o início da formação de suas duas pontas laterais, geradas pela migração maior dos sedimentos nesses pontos. Para o terceiro teste, não se observou nenhuma migração do material sob ação da névoa salina, evidenciando seu efeito sob ação da erosão eólica e, diferentemente do primeiro teste, não houve desprendimento superficial de areia, devido a maior quantidade de solução borrifada.

## **8. Sugestões**

Apesar de o trabalho ter revelado resultados satisfatórios com relação a influência do sal na mobilidade da areia, alguns problemas durante a execução dos ensaios e análise dos resultados foram encontrados.

O primeiro passo para aprimorar os resultados em trabalhos futuros seria o desenvolvimento de uma rotina de preparação de amostras que minimizasse a diferença de grande de porosidade entre um material e outro, já que esses valores mascararam os resultados esperados nos testes de evaporação.

Para os futuros ensaios de resistência ao cisalhamento direto, pretende-se realizar uma outra etapa de testes com soluções de concentrações salinas maiores do que 18%, a fim de avaliar seu efeito no comportamento mecânico do solo. Espera-se que as envoltórias se posicionem sempre acima uma da outra, a medida que a concentração de NaCl aumente.

O maior problema enfrentado durante a execução desse trabalho se deu com o ensaio de sucção da areia, onde os resultados obtidos não apresentaram nenhum padrão que pudesse ser interpretado e escrito. Não se sabe ao certo a que isso se deve, mas supõe-se que, por ser um ensaio longo, minucioso e com etapas passíveis de gerar erros

sensíveis de execução que alteram drasticamente os dados gerados, algum erro durante o manuseio do material poder ter sido cometido e passado despercebido. Para trabalhos futuros espera-se refazer esse ensaio e analisa-lo novamente.

Por fim, a próxima etapa do trabalho no túnel de vento poderia ser a elaboração de mais testes baseados em experimentos empíricos de transporte de sedimento em dunas costeiras. O objetivo destes seria calibrar os parâmetros do modelo numérico, de tal forma que as simulações reproduzam os experimentos reais, assim como tentou-se fazer no segundo teste deste trabalho.



## 9. Referências bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181 – Solo – análise granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro. 13p. 1984.

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. 1984.

AMBIENTAL Engenharia e Consultoria. **Plano de manejo da APA do Pau-Brasil**, Rio de Janeiro. 51p. 2015.

ARENS, S.M., VAN BOXEL, J.H., ABUODHA, J.O.Z. Changes in grain size of sand in transport over a foredune. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 27, p.1163-1175. 2002.

BAGNOLD, R. A. The physics of blown sand and desert dunes. **Dover Publications**, E.U.A. (republished in 2005). 265p. 1954

BUSCARIOLO, F.F. **Estudo de diferentes tipos de solo em túnel de vento através de simulação numérica**. 2009. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade de São Paulo. São Paulo/SP. 2009

CASTRO, J.W.A., RANGEL, F.E. Soterramento da estrada do Guriri na praia do Peró Cabo Frio/RJ, associado a dunas escalonares (Climbing Dunes) In: **Congresso da Associação Brasileira do Quaternário – ABEQUA**, Guarapari/ES, 10, 2005.

CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J., SILVA, M.G.A. J.; DIAS, M.A F.S. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2009. Cap. 2, p. 25-41.

CUNHA, S.B. **Impactos das obras de engenharia sobre o ambiente biofísico da Bacia do rio São João (Rio de Janeiro – Brasil)**. 1995. 415f. Tese (Doutoramento em Geografia Física) Universidade de Lisboa, Lisboa/ Portugal. 1995.

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

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

FLORIANI, D. C., FUKUDA, J. C., PINTO, E. F. Lençóis Maranhenses National Park: The Largest Coastal Dunes Area in South America. In: **Gerenciamento Costeiro, Unidades de Conservação**. IBAMA, Barreirinhas/MA. 2004.

FORCH, C., M. KNUDSEN, S.P. SCRENSSEN, Reports on the determination of the constants for compilation of hydrographic tables. **6 Raekke Naturridensk**. Copenhagen, vol. 12, p. 151. 1902

FREDLUND, D. G., RAHARDJO, H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. **John Wiley & Sons**, E.U.A. 544p. 1993

FREITAS, I.M. **Efeitos Ambientais de Barragens Subterrâneas na Microbacia do Córrego Fundo**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), 113f. Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ. 2006.

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.

GAVA, R., FREITAS, P.S.L., FARIA, R.T., REZENDE, R., FRIZZONE, J.A. Soil water evaporation under densities of coverage with vegetable residue. **Engenharia Agrícola**, v.33, p.89-98. Jaboticabal. 2013.

GONÇALVES, R.A., LEHUGEUR, L.G.O., CASTRO, J.W.A., PEDROTO, A.E.S., Classificação das Feições Eólicas dos Lençóis Maranhenses - Maranhão - Brasil. **Mercator – Revista de Geografia da UFC**, v.03 p.99–112. 2003.

GRASSELLI, Y., HERRMANN, H.J., ORON, G., STEFANO, Z. Effect of impact energy on the shape of granular heaps. **Granular matter**. v.2, p.97-100. 2000.

GUIMARÃES, L.S. **Morfodinâmica e migração das dunas eólicas na Reserva Ecológica do Taim, litoral sul do RS**. Dissertação (Mestrado em geociências). 119f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

HAGEN, L. J. Assessment of wind erosion parameters using wind tunnels. In: STOTT, D.E., MOHTAR, R. H., SEINHARDT, G. C. **Sustaining the Global Farm**, p. 742-746. 2001.

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

HEIDEMANN, M. **Caracterização geotécnica de um solo residual de granulito envolvido em uma ruptura de talude em Gaspar – SC**. 2011. 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS 2011.

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

HERRMANN, H.J., PARTELI, E.J.R., SCHWAMMLE, V., MONTEIRO, L.H.U., MAIA, L.P. The coastal dunes of the Lençóis Maranhenses. **Journal of Coastal Research**, special issue, 11f. 2006.

HERRMANN, H.J., SAUERMAN, G., The shape of dunes. **Physica A**. v.283. p.24-30. 2000.

HESP, P. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. **Geomorphology**, v.48, p.245–268. 2002.

HUCHO, W.H. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering, 4<sup>th</sup> edition, S.A.E. ISBN 0-7680-0029-7. 1998

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Plano de Manejo do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. 2003.

ICMBIO. Plano de Manejo do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. 242f. In: [www.icmbio.gov.br](http://www.icmbio.gov.br). 2015.

LEWIS E. L., R. G. PERK. Salinity: its definition and calculation. **Journal of Geophysical Research**, v.83, p.466- 478, 1978.

LEYS, J. F., RAUPACH, M. R. Soil flux measurements using a portable wind erosion tunnel. **Australian Journal of Soil Resistance.**, v.29, p. 533-552. 1991.

MACHADO, S.L., MACHADO, M.F. Apostila de Mecânica dos solos I: conceitos básicos. 121p. Universidade Federal da Bahia, Salvador. 1997.

MAGALHÃES, B. Um mergulho nos Lençóis Maranhenses. **Ciência Hoje.** v.27, p.52-53. 2000.

MANSUR, K.L.; CARVALHO, I.S. Characterization and valuation of the geological heritage identified in the Peró dune field, state of Rio de Janeiro, Brazil. **Geoheritage**, v.3, p.97–115. 2011.

MARINHO, F.A.M. E STUERMER, M.M. The influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil. **Geotechnical Special Publication**, v.99, p.125-141, 2000.

MARTIN, D. L., KINCAID. D. C., LYLE, W. M. Design and operation of sprinkler systems. In: HOFFMAN, G. J., EVANS, R. G., JENSEN, M. E., MARTIN, D. L., ELLIOTT, R. L. Design and operation of farm irrigation systems. **Saint Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2<sup>a</sup> ed. cap. 16, p. 557-631. 2007

MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal materials. 742p. **New York: Gordan and Breach**, 1974.

MUEHE, D. Geomorfologia Costeira. Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações. 356f. **Editora Bertrand Brasil**. 1998.

MOURA, D. Dunas do passado – Dunas do presente. **V Encontro de Professores de Geociências do Alentejo e Algarve**. 2011.

NICKLING, W. G., ECCLESTONE, M. The effects of soluble salts on the threshold shear velocity of fine sand. **Sedimentology**, v. 28, p. 505-510. 1981.

NICKLING, W. G. The stabilizing role of bonding agents on the entrainment of sediment by wind. **Sedimentology**, v. 31, p. 111 – 117. 1984.

NUNES, V.P. **Ensaio de caracterização geotécnica da areia da praia de Itaipuaçu**. Projeto final de graduação (Graduação em Engenharia Civil). 153f. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

OLIVEIRA, A.C.A., BARRETO, E.A.T., MELO & SOUZA, R. Análise da vulnerabilidade biofísica em ambientes dunares costeiros de Sergipe. In: **Congresso Brasileiro de Geógrafos**. Goiânia. 2004

PAMPLONA, H.R.P. Litoestratigrafia da Bacia Cretácea de Barreirinhas. **Boletim Técnico da Petrobrás**. Rio de Janeiro. V.12. p261-90. 172p.1969.

PEREIRA, T.G. de OLIVEIRA FILHO, S.R., CORRÊA, W.B., FERNANDEZ, G.B. Diversidade dunar entre cabo frio e o cabo búzios – RJ. In: **Simpósio Nacional de Geomorfologia**, 8, Recife/PE. 2010

PARTELI, E.J.R., SCHWÄMMLE, V., HERRMANN, H.J., MONTEIRO, L.H.U., MAIA, L.P. Profile measurement and simulation of a transverse dune field in the Lencois Maranhenses. **Geomorphology**, v.81, p.29–42. 2006.

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. Modelo evolutivo do campo de dunas do Peró (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. 2003.

RAUPACH, M. R. & LEYS, J. F. Aerodynamics of a portable wind erosion tunnel for measuring soil erodibility by wind. **Australian Journal of Soil Resistance**, vol. 28, p. 177-191. 1990.

SAUERMAN, G., ANDRADE Jr., J. S., MAIA, L. P., COSTAB, U. M. S., ARAÚJO, A.D., HERRMANN, H. J. Wind velocity and sand transport on a barchan dune. **Geomorphology**, v.54, p.245–255. 2003.

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.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.

SHAO, Y. Physics and Modelling of Wind Erosion. **Kluwer Academic Publishers**, Holanda. 393p. 2000.

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.

SUGUIO, K., ANGULO, R. J., CARVALHO, A. M., CORRÊA, I. C. S., TOMAZELLI, L. J. E VITAL, H. Paleoníveis do Mar e Paleolinhas de Costa. In: SUGUIO et al. Quaternário do Brasil. **Holos Editora**, p.114-129. 2005

TOMAZZELLI, L.J. **Contribuição ao estudo dos sistemas deposicionais holocênicos do nordeste da província costeira do Rio Grande do Sul, com ênfase no sistema eólico**. 270f. 1990. Tese (Doutoramento em Geociências) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre /RS. 1990.

UFPR – Sistemas eólicos. Material de estudos do curso de geologia da UFPR. Disponível em [www.geologia.ufpr.br](http://www.geologia.ufpr.br). Acessado em 10/07/2015.

VASCONCELOS, A.M., VEIGA JÚNIOR, J., COLARES, J.Q.S., RIBEIRO, J.A.P., GOMES, I.P., MEDEIROS, M.F., FORGIARINI, L.L. 2004. Folha SA.23-São Luís. In: SCHOBENHAUS, C., GONÇALVES, J.H., SANTOS, J.O.S., ABRAM, M.B., LEÃO NETO, R., MATOS, G.M.M., VIDOTTI, R.M., RAMOS, M.A.B., JESUS, J.D.A. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM.

WASSON, R.J., HYDE, R. Factors determining desert dune type. **Nature**, v.304, p. 337-339. 1983.

YANG, M.D., YANFUL, E.K. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water Table conditions. **Advances in Environmental Research**, v.6, p.505-521. 2002.