



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia

**ESTUDO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DOS
SEDIMENTOS ORIUNDOS DO CAMPO DE DUNAS DO PERÓ, CABO FRIO,
RJ, NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO E SIMULAÇÃO EM
TÚNEL DE VENTO**

Vanessa dos Santos Peçanha

Rio de Janeiro

2019



VANESSA DOS SANTOS PEÇANHA

**ESTUDO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DOS
SEDIMENTOS ORIUNDOS DO CAMPO DE DUNAS DO PERÓ, CABO FRIO,
RJ, NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO E SIMULAÇÃO EM
TÚNEL DE VENTO**

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

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Rio de Janeiro

2019

**ESTUDO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DOS
SEDIMENTOS ORIUNDOS DO CAMPO DE DUNAS DO PERÓ, CABO FRIO,
RJ, NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO E SIMULAÇÃO EM
TÚNEL DE VENTO**

Vanessa dos Santos Peçanha

Orientadora
Andrea Ferreira Borges

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

Aprovada em: ___/___/___

Por:

Presidente: Prof. Dra. Andrea Ferreira Borges

Prof. Dra. Kátia Leite Mansur

Dr. René Sena García

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Diana Cristina e Anselmo, por todo suporte e incentivo que me deram durante o processo de graduação, em especial nos últimos períodos quando sempre se fizeram disponíveis a me apoiar.

Às minhas irmãs Daniella e Marina pela amizade e confiança que sempre me passaram por toda minha vida.

À minha orientadora Prof. Dra. Andrea Borges pela oportunidade de participar deste projeto, pelos ensinamentos que me trouxe e por toda ajuda que me ofereceu durante este trabalho.

RESUMO

ESTUDO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DOS SEDIMENTOS ORIUNDOS DO CAMPO DE DUNAS DO PERÓ, CABO FRIO, RJ, NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO E SIMULAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO

Vanessa dos Santos Peçanha

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Campos de dunas costeiras, além de comporem um ecossistema com fauna e flora únicos, são fundamentais para a manutenção da dinâmica de um sistema costeiro, servindo não só como reservatório de sedimentos arenosos para o ambiente praiado, mas também como proteção dos ambientes posteriores contra processos erosivos eólicos e efeitos da névoa da salina. Dada sua importância, a preservação de tais ambientes se faz muito necessária. Para que os esforços de preservação sejam efetivos é preciso compreender como fenômenos naturais e antrópicos podem influenciar no desenvolvimento e migração de dunas costeiras. Este estudo pretende compor com diversos outros projetos já realizados sobre caracterização, análise e avaliação das condições de erodibilidade das Dunas do Peró (Cabo Frio, RJ). O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da variação dos parâmetros de umidade e velocidade do vento sobre a erodibilidade das dunas do Peró. Tendo em vista que a resistência a erosão é condicionada pela coesão dos grãos, uma maneira de aferi-la é por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento. Para tanto, foram realizados ensaios de cisalhamento direto sem carregamento normal. Sabemos que em materiais arenosos, como é o caso das amostras deste estudo, a resistência ao cisalhamento sem atuação da tensão normal depende da coesão aparente dos grãos, resultante da pressão capilar da água e da sucção osmótica, que se dá de acordo com teores de umidade e salinidade de um solo úmido. A fim de avaliar a mobilidade dos sedimentos arenosos, também foram realizados ensaios em escala reduzida em um túnel de vento subsônico utilizando a amostra com teor natural de sais.

Palavras-chave: Dunas costeiras, Dunas do Peró, resistência ao cisalhamento, salinidade, sucção osmótica, coesão aparente.

ABSTRACT

STUDY ON THE EFFECTS OF WATER CONTENT VARIATION OF SEDIMENTS FROM PERÓ COASTAL DUNES, CABO FRIO, RJ, ON DIRECT SHEAR STRENGTH AND WIND TUNNEL SIMULATION

Vanessa dos Santos Peçanha

Academic Advisor: Andrea Ferreira Borges

Coastal dune fields, in addition to composing an ecosystem with unique fauna and flora, they are fundamental for maintaining the dynamics of a coastal system, serving not only as a sediment reservoir for the shorezone, but also as protection for rear environments against processes of Wind erosion and salty spray effects. Given their importance, preserving such environments is very necessary. For the preservation efforts to be effective, it is needed to comprehend how natural and anthropic phenomenons can influence the development and migration of coastal dunes. This study intends to compose with several other projects already carried out about characterization, analysis and evaluation of the erodibility conditions of the Peró Dunes (Cabo Frio, RJ). The objective of this work is to evaluate the influence of wind speed and water content parameters on the erodibility of Peró Dunes. Since erosion resistance is conditioned by grain cohesion, one way to measure it is by its shear strength. For this, direct shear tests were performed without adding normal load. It is known that in sandy materials, as are the samples from this study, shear strength without normal stress depends on the apparent cohesion of grains, resulting from capillary water pressure and osmotic suction, which occurs according to the water content and salinity levels of a moist soil. In order to evaluate the mobility of sandy sediments, a small scale subsonic wind tunnel test using samples with natural salt content was also performed.

Keywords: Coastal dunes, Peró Dunes, shear strength, salinity, osmotic suction, apparent cohesion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Soterramento de via e casas por duna em loteamento em Cabo Frio (RJ)	11
Figura 2 – Duna avançando sobre empreendimento residencial em Cabo Frio (RJ)	11
Figura 3 – Localização do Campo de Dunas do Perú, Cabo Frio (RJ)	13
Figura 4 – Campo de Dunas do Perú.....	14
Figura 5 – Mapa tectônico do Sudeste do Brasil. Destaque para os domínios tectônicos Terreno Oriental e Cabo Frio.....	15
Figura 6 – Diagrama esquemático do sistema praial.....	16
Figura 7 – Processos de transporte eólico por suspensão, saltação e arraste.....	17
Figura 8 – Processo de migração de duna.....	17
Figura 9 – Tipos morfológicos de dunas.....	18
Figura 10 – Classificação de dunas.....	19
Figura 11 – Peculiaridades geológicas, geomorfológicas, oceanográficas e climáticas de Cabo Frio.....	20
Figura 12 – Mapa geomorfológico da planície costeira do Perú.....	21
Figura 13 – Zoneamento APA Pau-Brasil.....	22
Figura 14 – Representação do empreendimento Costa do Perú, com destaque para porção já licenciada pelo INEA.....	23
Figura 15 – Localização de Perú 1, Perú 2 e Perú 12.....	24
Figura 16 – Da esquerda para direita: dispersor, proveta e densímetro (usados no ensaio de sedimentação), conjunto de peneiras no agitador utilizados para o peneiramento.....	26
Figura 17 – Determinação a massa de água deslocada.....	27
Figura 18 – Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.....	28
Figura 19 – Prensa de cisalhamento Contenco conectada ao <i>software</i> Pavitest Cisalhamento.....	29
Figura 20 – Gráfico típico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal. Onde, τ_{\max} equivale a tensão de ruptura, e τ_{res} a tensão residual.....	29
Figura 21 – Túnel de vento construído por GARCÍA (2015)	32
Figura 22 – Estágio inicial (à esquerda) e final (à direita) do modelo.....	33
Figura 23 – Anemômetro utilizado.....	33
Figura 24 – Curva granulométrica de Perú 1.....	34
Figura 25 – Curva granulométrica de Perú 2.....	35
Figura 26 – Curva granulométrica de Perú 12.....	35
Figura 27 – Gráficos de distribuição granulométrica de Perú 1, Perú 2 e Perú 12.....	36

Figura 28 – Gráfico de tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal de Perú 1.....	37
Figura 29 – Gráfico de tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal de Perú 2.....	37
Figura 30 – Gráfico de tensão cisalhante vs. teor de umidade de Perú 1.....	38
Figura 31 – Gráfico de tensão cisalhante vs. teor de umidade de Perú 2.....	39
Figura 32 – Gráfico de tensão cisalhante vs. teor de umidade de Perú 2 com dados obtidos neste estudo juntamente com os de OLIVEIRA (2018)	40
Figura 33 – Gráfico de tensão cisalhante vs. potencial osmótico de Perú 1, com informação do teor de umidade.....	43
Figura 34 – Gráfico de tensão cisalhante vs. potencial osmótico de Perú 2, com informação do teor de umidade.....	43
Figura 35 – Túnel de Vento: Ensaio 1: Evolução de 72 horas.....	45
Figura 36 – Túnel de Vento: Ensaio 2: Resultado 2 minutos.....	46
Figura 37 – Túnel de vento: Ensaio 3. Momento inicial.....	47
Figura 38 – Túnel de Vento: Ensaio 3: Evolução de 0 a 8 horas.....	48
Figura 39 – Túnel de Vento: Ensaio 3: Evolução de 9 a 17 horas.....	49
Figura 40 – Túnel de Vento: Ensaio 3: Evolução de 17 a 25 horas.....	50
Figura 41 – Ensaio Túnel de Vento. Barlavento, sotavento e face de avalanche.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas dos pontos amostrados.....	25
Tabela 2 – Período de evaporação dos corpos de prova de Però 1.....	30
Tabela 3 – Período de evaporação dos corpos de prova de Però 2.....	31
Tabela 4 – Massa específica das amostras Però 1, Però 2 e Però 12.....	36
Tabela 5 – Porosidade, teor de umidade e tensão cisalhante máxima de Però 1.....	38
Tabela 6 – Porosidade, teor de umidade e tensão cisalhante máxima de Però 2.....	39
Tabela 7 – Porosidade, teor de umidade e tensão cisalhante máxima de Però 2. Corpos de prova identificados com a letra <i>O</i> correspondem aos de OLIVEIRA (2018)	40
Tabela 8 – Valores de condutividade e salinidade de Però 1, Però 2 e Però 12.....	41
Tabela 9 – Valores de porosidade, teor de umidade, salinidade, tensão cisalhante e potencial osmótico para Però 1.....	42
Tabela 10 – Valores de porosidade, teor de umidade, salinidade, tensão cisalhante e potencial osmótico para Però 2. Os corpos de prova identificados com a letra <i>O</i> correspondem àqueles de OLIVEIRA (2018)	42

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS.....	12
3. ÁREA DE ESTUDO.....	13
3.1. LOCALIZAÇÃO.....	13
3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	14
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1. DUNAS COSTEIRAS.....	16
4.2. CAMPO DE DUNAS DO PERÓ.....	19
5. METODOLOGIA	23
6. ENSAIOS	25
6.1. CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	25
6.2. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS.....	27
6.3. CISALHAMENTO DIRETO.....	28
6.4. TÚNEL DE VENTO.....	31
7. RESULTADOS	34
7.1. GRANULOMETRIA.....	34
7.2. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS.....	36
7.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO.....	37
7.4. TÚNEL DE VENTO.....	44
7.4.1. ENSAIO I.....	44
7.4.2. ENSAIO II.....	45
7.4.3. ENSAIO III.....	47
8. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

A humanidade consistentemente privilegia habitar regiões próximas a corpos d'água, como rios, lagos e, notadamente, o mar. A abundância de recursos essenciais à sobrevivência foi o principal motivador da tendência histórica da ocupação das zonas costeiras. No decorrer das últimas décadas, no entanto, vem crescendo a mudança dessa perspectiva para uma ótica de apreciação cultural e reconhecimento do litoral como área de lazer e recreação. Dessa maneira, o significativo aumento da atividade turística para essas regiões induziu a expansão do mercado imobiliário e hoteleiro, com a construção de condomínios, loteamentos, hotéis e *resorts*.

É importante compreender que zonas costeiras são regiões de grande dinamismo, e que, portanto, quando a ocupação e atividades antrópicas se dão de maneiras extensiva, elas exercem grande influência e podem acarretar acentuada degradação ambiental. Por isso, para que a ocupação e desenvolvimento econômico local ocorram de maneira segura e sustentável para o meio-ambiente e para a própria população, é necessário que sejam realizados diversos estudos de caracterização e de impacto ambiental em tais regiões.

Sabemos que Dunas costeiras são produto dos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos arenosos pelo vento (TOMAZZELLI, 1990) e que suas feições morfológicas e processo de migração são resultado de diversos fatores geológicos, geomorfológicos e meteorológicos, como regime de ventos (direção e velocidade), pluviosidade, umidade, temperatura, ação de névoa salina e suas respectivas variações sazonais. De acordo com CASTRO *et al.* (2006), o campo de dunas do Perú é formado, primordialmente, pela ação dos ventos de direção NE sobre a superfície da praia durante a maré baixa, erodindo os sedimentos arenosos secos depositando-os em dunas oblíquas de retaguarda.

Somando-se aos fenômenos naturais mencionados, a ação antrópica também exerce grande influência, principalmente, na acentuação dos processos erosivos, por meio da remoção da vegetação natural, edificações e pavimentações e, até mesmo trânsito intenso de pessoas e veículos. Além da degradação ambiental que tais fatores acarretam, a ocupação desordenada e projetos urbanísticos sem planejamento adequado também podem causar transtornos para a população e perdas patrimoniais (Figuras 1 e 2). SILVA (2012) cita como principal causa de tais problemas a migração de dunas, quando estas avançam sobre áreas ocupadas, soterrando residências, vias e corpos d'água.



Figura 1 – Soterramento de via e casas por duna em loteamento em Cabo Frio (RJ).

Fonte: SILVA, 2012.

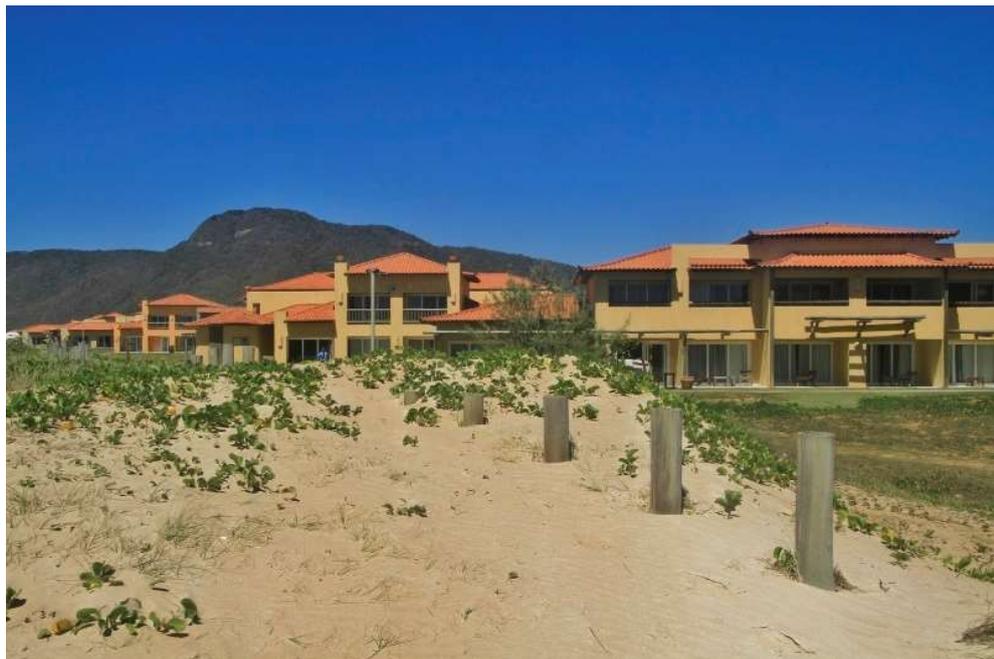


Figura 2 – Duna avançando sobre empreendimento residencial em Cabo Frio (RJ).

Fonte: MARTINEZ, 2017.

O sistema de dunas costeiras é essencial para a manutenção da dinâmica sedimentar litorânea, servindo de estoque sedimentar durante eventos erosivo de alta intensidade na faixa de praia (PEREIRA *et al.*, 2010; SUGUIO *et al.*, 2005). Portanto, sua conservação implica na conservação do sistema costeiro como um todo – em contrapartida, sua degradação inevitavelmente levará à deterioração do sistema em geral.

Desta forma, é de suma importância compreender como a migração de dunas pode ser influenciada por diversos fatores físicos e químicos, como variações no regime de ventos, aumento da concentração de sais pela névoa salina e teor de umidade devido a pluviosidade. Os dois últimos fatores determinantes para definir a resistência desses corpos arenosos à erosão. Tendo em vista que a resistência a erosão é condicionada pela coesão dos grãos, uma maneira de aferi-la é por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento. No caso deste estudo, com amostras arenosas de dunas costeiras, não há coesão real entre os grãos, apenas coesão aparente, definida por PINTO (2006) como uma parcela da resistência ao cisalhamento em solos úmidos, não saturados, sendo resultante da pressão capilar da água. Esta pressão capilar compõe a sucção mátrica, definida por MARINHO & STRUERMER (2000) como aquela relacionada à matriz do solo, diretamente relacionada com tipo de partícula, geometria dos poros e tensão superficial da água. A outra parcela que compõe a sucção total é a sucção osmótica, que está relacionada a composição química da água no solo, i.e., a concentração de sais.

2. OBJETIVOS

Este estudo pretende compor com outros diversos projetos – em andamento e já realizados – sobre a caracterização, análise e avaliação das condições de erodibilidade das Dunas do Perú (município de Cabo Frio, Rio de Janeiro). O objetivo deste trabalho é avaliar qual a influência da variação dos parâmetros de umidade e velocidade do vento sobre a erodibilidade das dunas do Perú, através de ensaios de cisalhamento direto e testes em túnel de vento.

Para tanto, após serem realizados ensaios de caracterização granulométrica e de massa específica dos grãos de três materiais arenosos de granulometrias diversas (previamente coletados em distintos pontos do campo de dunas), foram feitos ensaios de cisalhamento direto sem carregamento normal a fim de determinar resistência pela coesão dos grãos, e como esses resultados variam de acordo com teores de umidade diversos. Outros parâmetros a serem usados na análise comparativa são condutividade, salinidade, porosidade e potencial osmótico.

A fim de simular o processo de formação e migração de dunas foram realizados ensaios em escala reduzida um túnel de vento subsônico utilizando uma amostra de sedimentos provenientes do Campo de Dunas do Perú com teor natural de sais.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO

Situado no município de Cabo Frio, Região dos Lagos do estado do Rio de Janeiro, o Campo de Dunas do Perú (figuras 3 e 4) possui uma extensão de aproximadamente 3 km no sentido N-S e cerca de 1 km de largura no sentido E-W, apresentando uma área em torno de 2,3 km² (CPRM, 2012; RAMOS *et al.*, 2003).

A região como um todo vem apresentando nas últimas décadas um crescimento demográfico vertiginoso. Em especial, Cabo Frio, que há 70 anos possuía cerca de 8.800 habitantes, e nos censos demográficos de 1991 e de 2010 apresentava, respectivamente, 84.915 e 186.227 de residentes, e os valores de estimados para 2019 são de 222.528 habitantes (IBGE). O modo como densidade demográfica vem aumentando aceleradamente, levou a intensificação dos impactos ambientais causados pelas atividades antrópicas, em especial a remoção da vegetação natural e processo de urbanização que avançam sobre os campos de dunas.



Figura 3 – Localização do Campo de Dunas do Perú, Cabo Frio (RJ).

Fonte: Google Earth, 2019



Figura 4 – Campo de Dunas do Peró

Fonte: Google Earth, 2019.

3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo se encontra inserida no domínio tectônico Cabo Frio, que compõe juntamente com Terreno Ocidental, Klippe Paraíba do Sul e Terreno Oriental, os quatro domínios tectônicos definidos por HEILBRON & MACHADO (2003) que formam a parte central da Faixa Ribeira, orientados em uma seção NW-SE, em direção ao Cráton do São Francisco.

O Terreno Ocidental é composto por rochas retrabalhadas do Cráton São Francisco, de idade pré-cambriana, e metassedimentos de margem passiva deformados, de idade meso-neoproterozoica. Sobreposto ao Terreno Ocidental, a Klippe Paraíba do Sul é constituída por uma lasca de granulitos para- e orto-derivados de idade neoproterozoica. Por sua vez, o Terreno Oriental é composto por intrusões magmáticas e sucessões vulcanossedimentares neoproterozoicas a ordovicianas. Por último, sobrepondo-se ao Terreno Oriental, o domínio Cabo Frio é formado por ortognaisses paleoproterozoicos, que formam o embasamento de sucessões vulcanossedimentares deformada de alto grau (Grupo Búzio e Palmital) de idade cambriana (SCHMITT *et al.*, 2016).

O domínio tectônico Cabo Frio somente foi colado ao orógeno no Cambriano, enquanto os demais foram amalgamados previamente, entre 605 e 580 Ma (SCHMITT *et al.*, 2016; TUPINAMBÁ *et al.*, 2007; HEILBRON *et al.*, 2000; TROUW *et al.*, 2000; HEILBRON e

MACHADO, 2003; SCHMITT *et al.*, 2004; Moraes, 2009). SCHMITT *et al.* (2004), identifica o evento colisional ocorrido entre 520-490 Ma, o último a ocorrer na Faixa Ribeira, como Orogenia Búzios. Este evento tectono-metamórfico provavelmente está relacionado às feições deformacionais presentes no Domínio Tectônico Cabo Frio de pelo menos quatro fases de deformação e possivelmente representa eventos orogênicos do final da amalgamação de Gondwana. Na figura 5 está representado o mapa tectônico do Sudeste brasileiro com destaque para os domínios e tectônicos de Cabo Frio e Terreno Oriental.

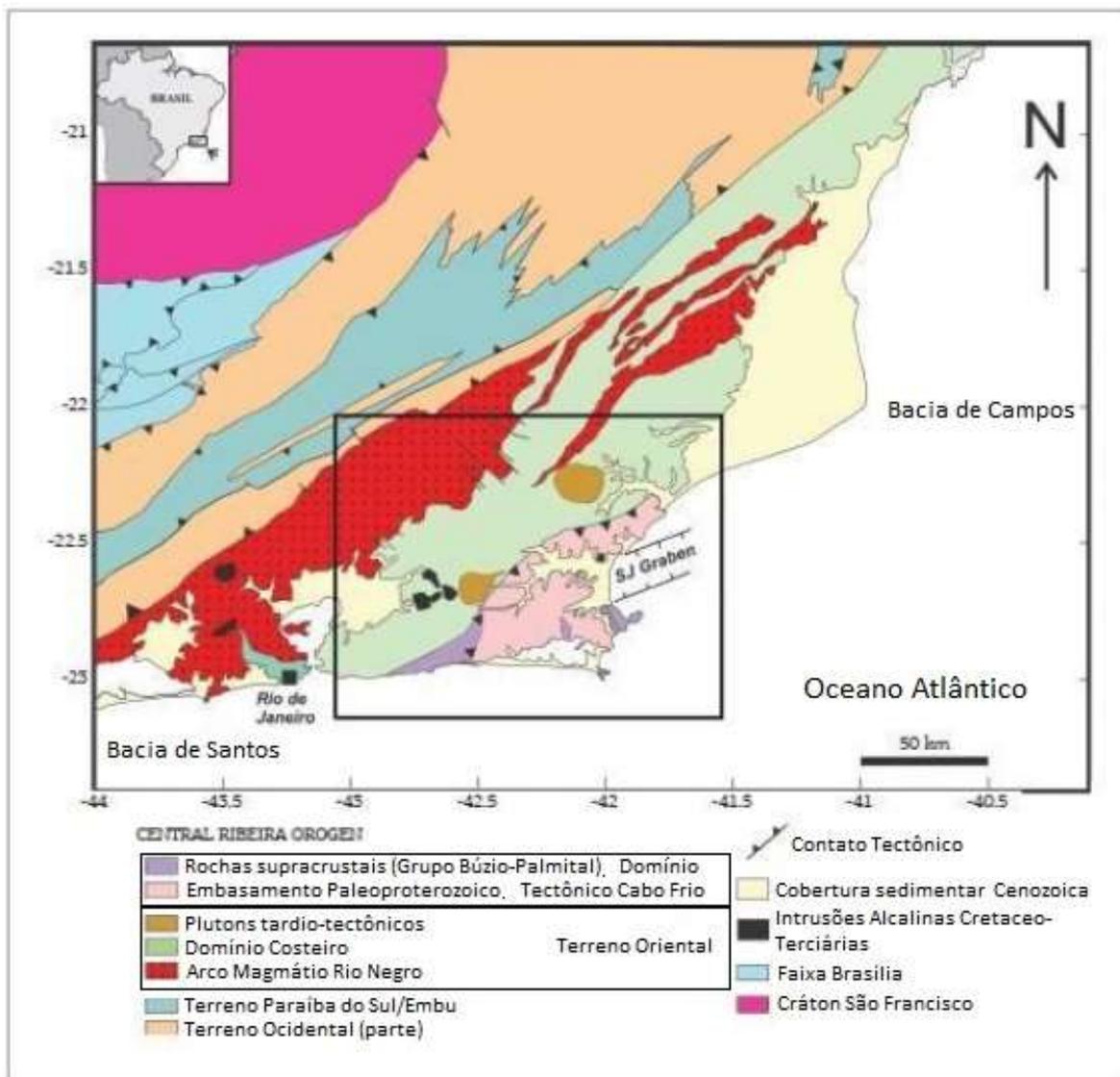


Figura 5 – Mapa tectônico do Sudeste do Brasil. Destaque para os domínios tectônicos Terreno Oriental e Cabo Frio.

Fonte: SCHMITT *et al.*, 2016 (Traduzido).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. DUNAS COSTEIRAS

Campos de dunas são feições morfológicas comuns em sistemas costeiros. Quando presentes, as dunas desempenham um papel fundamental na dinâmica entre os diversos ambientes que compõem o sistema, funcionando não só como reservatório de sedimentos arenosos para o ambiente praiial – principalmente após eventos erosivos intensos –, mas também como barreira física para os ambientes posteriores a elas, protegendo-os da ação de ondas de tempestade e atenuando os efeitos da névoa salina e erosão eólica (IBAMA, 2003; SUGUIO *et al.*, 2005). Na figura 6, está demonstrado de maneira esquemática o sistema praiial.

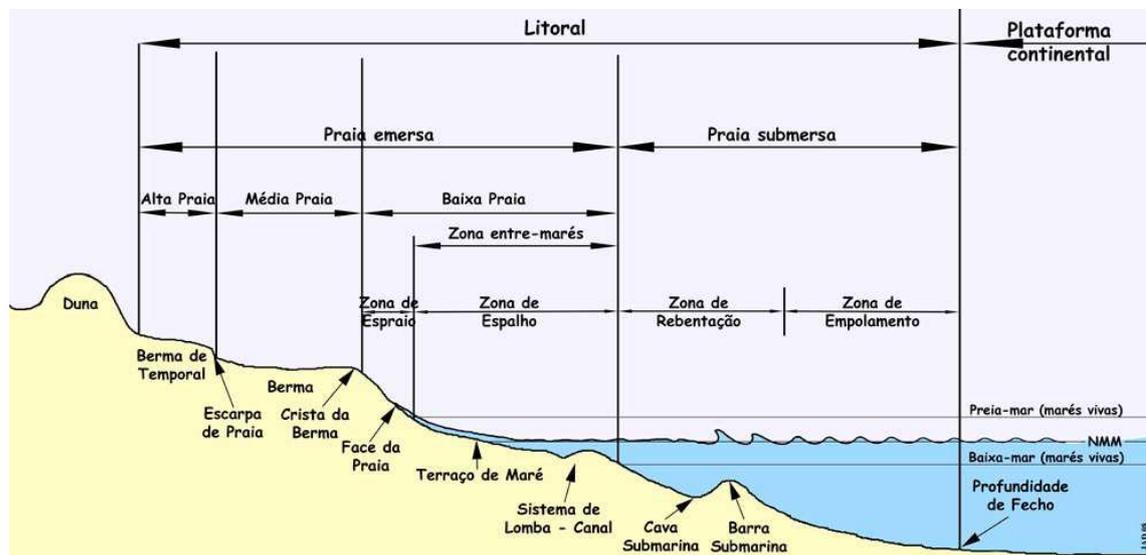


Figura 6 – Diagrama esquemático do sistema praiial.

Fonte: Dias, 2007.

As dunas costeiras são constituídas a partir dos sedimentos arenosos oriundos das praias, que, quando expostos ao ar, secam e são mais facilmente mobilizados pela ação do vento. Dessa maneira, quando condições de velocidade mínima do vento e suprimento de areia são alcançadas, os grãos de areia são transportados até que ocorra a dissipação da energia dos ventos ou que se deparem com algum obstáculo físico, onde ocorrerá a deposição dos grãos. Além da eficácia do vento, outros fatores também são essenciais para formação de dunas costeiras, como tipo de sedimento e seu suprimento, a densidade de vegetação, a topografia, clima, dinâmica de ondas, em escala regional, e o nível do mar, em maior escala (SUGUIO, 2003; HESP, 2002).

O transporte eólico dos sedimentos é o processo essencial para a formação de um campo de dunas. Ele se dá por três modos, suspensão, saltação e arraste (figura 7). Por possuir uma viscosidade muito baixa, é pouco frequente que partículas de tamanho areia sejam transportados

por suspensão – salvo em caso de ventos muito intensos –, de maneira geral, as partículas de tamanho inferior a 0,125mm (silte e argila) são transportadas por longas distâncias e se depositam além do campo de dunas. Por sua vez, o transporte eólico por arraste é capaz de mobilizar grãos maiores, de diâmetro superior a 0,5mm. A saltação é principal tipo de transporte eólico atuante na formação e migração de dunas. Ela se dá quando grãos de areia são movidos pela força do vento de modo a serem suspensos brevemente no ar, dando saltos, cujo impacto após a queda transfere energia para os grãos atingidos o que induz a saltos progressivamente mais altos.

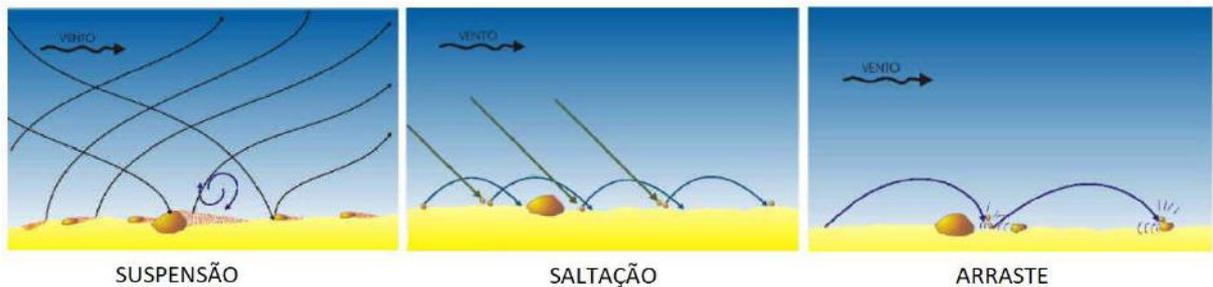


Figura 7 – Processos de transporte eólico por suspensão, saltação e arraste.

Fonte: SÍGOLO, 2000. Adaptado.

O processo gradativo de saltação dos grãos produz ondulações na superfície do leito arenoso. Tais ondulações ocorrem perpendiculares à direção do vento e, à medida que este aumenta, elas vão se tornando cada vez maiores. Os sedimentos em movimento, ao encontrarem uma barreira que pode ser alguma partícula mais pesada, vegetação ou até um monte de areia pode iniciar o processo de construção de uma duna. À medida que esta se desenvolve, ela inicia seu processo de migração na direção do vento. Como demonstrado na figura 8, o vento carrega os grãos por meio da saltação pelo lado menos íngreme da duna, conhecido como barlavento, levando-os até o topo de onde pendem para o lado mais inclinado, denominado sotavento, que é a face mais instável da duna – onde periodicamente ocorrem deslizamentos na face de avalanche da duna.

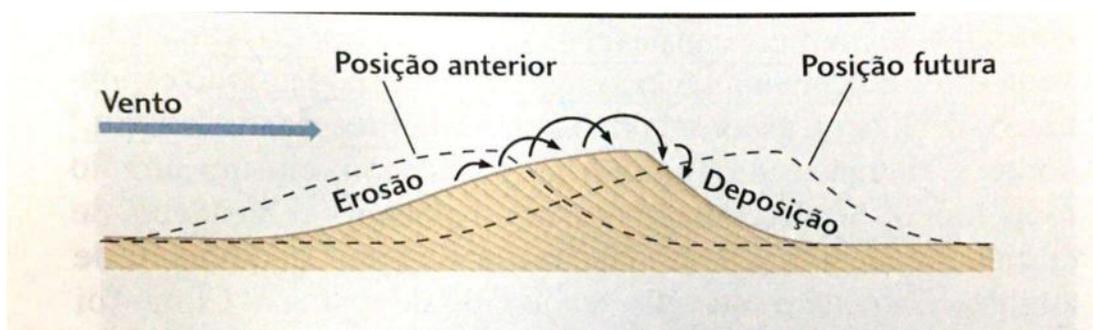


Figura 8 – Processo de migração de duna.

Fonte: PRESS *et al.*, 2006.

Segundo SÍGOLO (2000), as dunas podem ser classificadas de duas formas, usando parâmetros de estrutura interna ou de morfologia. Quanto à estrutura interna, distinguem-se as dunas estacionárias e as dunas migratórias. As primeiras têm suas camadas depositadas paralelamente ao perfil das dunas – isso se dá devido aos grãos de areia estarem agregados aos estratos em formação. A permanência desse tipo de duna pode ser causada por diversos fatores como aumento da umidade – aumentando a tensão superficial da água, aglutinando os grãos –, obstáculos internos e desenvolvimento de cobertura vegetal. Por sua vez, as dunas migratórias têm suas camadas depositadas com mergulho próximo ao da inclinação do sotavento. Tais feições se dão pelo deslocamento dos grãos do barlavento em direção ao sotavento no processo de migração contínua da duna.

A classificação morfológica diferencia as dunas em barcanas, barcanóides, parabólicas, transversais, longitudinais e estrela. O tipo de duna ser formada depende de três parâmetros: velocidade e variação do vento; características da superfície percorrida e; quantidade de areia disponível (SÍGOLO, 2000).

Como pode ser observado na figura 9, quando há o predomínio de ventos em uma única direção, podem se formar dunas transversais, parabólicas, barcanas e barcanóides, enquanto em regime de ventos bidirecional formam-se dunas longitudinais, e, quando não há predominância de nenhuma direção, formam-se dunas estrela.

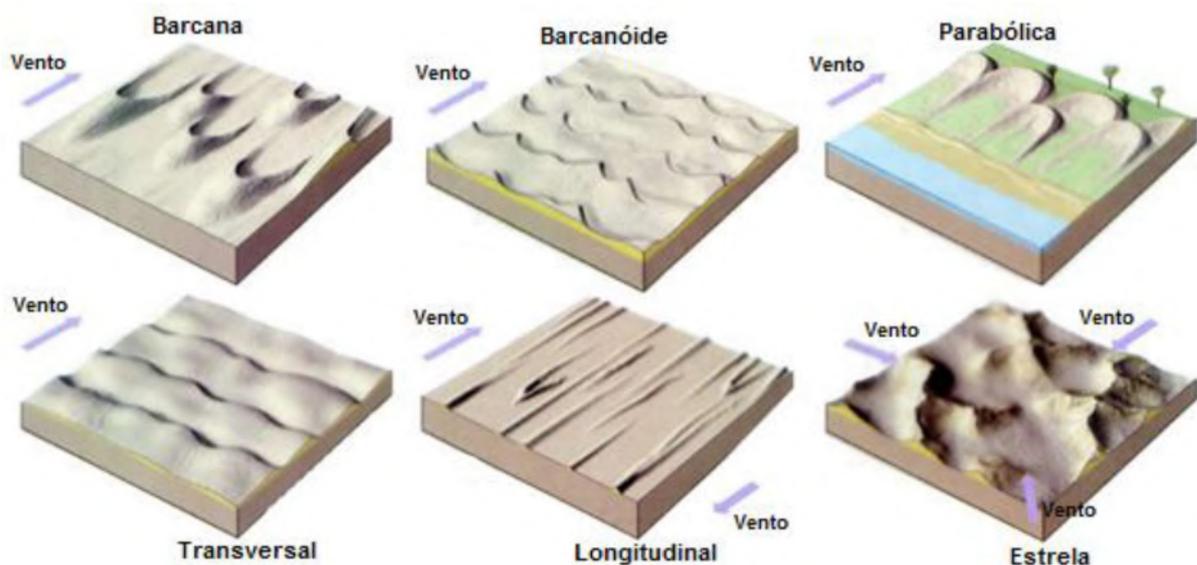


Figura 9 – Tipos morfológicos de dunas

Fonte: BROOKFIELD, 2011. Adaptado.

De acordo com SÍGOLO (2000), dunas barcanas costumam ser pequenas e não constituem campos contínuos. Já as dunas barcanóides formam cadeias unidas. Quando o

regime de ventos é mais intenso e constante em comparação com aqueles formam dunas barcanas e barcanoides, e possuem maior fornecimento de sedimentos, formam-se as dunas parabólicas. Em caso de ventos mais fortes e de grande constância, além de grande suprimento de sedimentos arenosos, as dunas estruturam-se com orientação perpendicular à direção do vento, formando dunas transversais. Por sua vez, as dunas longitudinais ocorrem orientadas paralelamente à direção preferencial do vento, em regime de ventos bidirecionais. Dunas estrela ocorrem em regime de ventos multidirecional e quando há bastante disponibilidade de sedimentos arenosos.

SUGUIO (2003) apresenta um diagrama ternário, reproduzido na figura 10, que relaciona as variáveis eficácia do vento, cobertura vegetal e suprimento de areia para determinar o tipo de duna a ser formado.

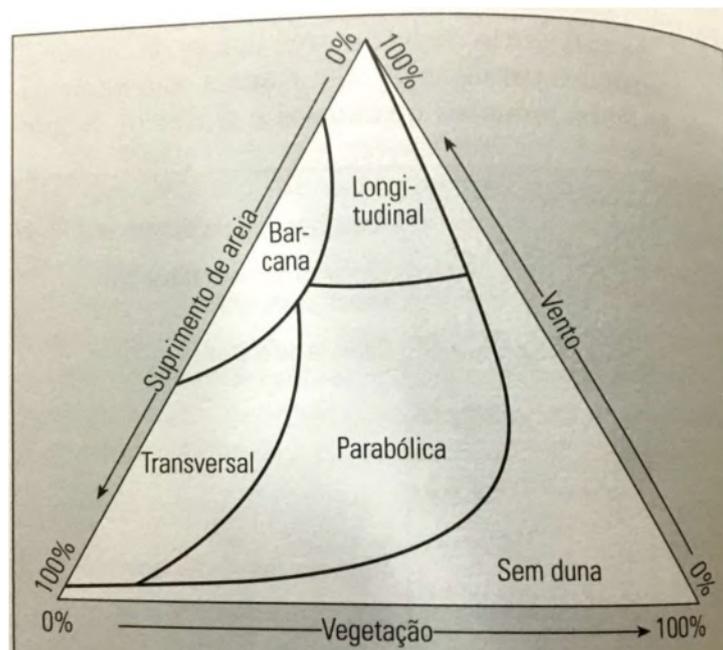


Figura 10 – Classificação de dunas

Fonte: SUGUIO, 2003.

4.2. CAMPO DE DUNAS DO PERÓ

O Campo de Dunas do Peró se desenvolveu devido à combinação de diversas características presentes na região, dentre eles aspectos geológicos, geomorfológicos, oceanográficos e climáticos – como podem ser observados na figura 11. No que diz respeito à geologia, os gnaisses e pegmatitos que afloram nas adjacências do campo de dunas dão origem aos sedimentos que constituem as dunas da região (CASTRO, 2002). A mineralogia desses

sedimentos é predominantemente quartzosa, mas também ocorrem de maneira restrita grãos de ilmenita, zircão, granada e hornblenda.

De maneira geral, o Sudeste brasileiro não apresenta os quesitos climáticos ideais para o desenvolvimento de dunas, no entanto, a região de Cabo Frio possui algumas singularidades que tornam o clima mais árido e possibilitam o seu surgimento de dunas. Diferentemente de outros trechos do litoral fluminense, na região estudada, a Serra do Mar está a uma distância relativamente grande da costa, a aproximadamente 60 km, o que conseqüentemente atenua os efeitos da chuva orográfica. Outro fator que contribui com os baixos índices pluviométricos na área é a fenômeno de ressurgência costeira que ocorre em Cabo Frio e Arraial do Cabo, onde uma corrente de águas frias e ricas em nutrientes (Água Central do Atlântico Sul, ACAS) sobe a superfície do mar na plataforma continental, o que causa diminuição nos índices de evaporação e, conseqüentemente, da precipitação (CUNHA, 1995). BARBOSA (2003) lista como causas da ressurgência a brusca alteração de orientação a costa de N-S para E-W; o deslocamento sazonal da Corrente do Brasil (CB); e ao regime de ventos da região.



Figura 11 – Peculiaridades geológicas, geomorfológicas, oceanográficas e climáticas de Cabo Frio (CB = Corrente do Brasil).

Fonte: COE & CARVALHO, 2010

Por esses motivos, de acordo com dados da estação meteorológica de Arraial do Cabo (a mais próxima do campo de dunas) o índice pluviométrico médio é de 770,9 mm/ano e a taxa de evaporação média de 928,4 mm/ano. Segundo CASTRO *et al.* (2006) o regime pluviométrico da área é caracterizado por chuvas de verão, que concentram de 70-80% dos totais anuais e chuvas esporádicas no inverno. CASTRO & RANGEL (2005) afirmam que as condições para o desenvolvimento do campo de dunas é resultado da associação entre estação seca bem marcada, regime de ventos unidirecionais e o aporte sedimentar oriundos da plataforma continental e dos maciços costeiros.

Consta no Plano de Manejo da APA Pau-Brasil, que no período de 1970 a 1987 65% dos ventos advém do quadrante N-NE-E, sendo ventos de direção NE 40% do total. A velocidade média anual dos ventos é de 5,6 m/s, podendo atingir 10 m/s. Por sua vez, o Instituto Nacional de Meteorologia determinou para o período de 1961 a 1990 a intensidade média dos ventos em 4,12 m/s e predominância da direção NE.

O sistema sedimentar do Perú foi dividido morfologicamente por CASTRO & RANGEL (2005) em praia, antedunas, planície de deflação, dunas oblíquas e escalonares (*climbing dunes*). No mapa geomorfológico da planície do Perú – figura 12 – desenvolvido por FERNANDEZ & ROCHA (2015) estão representadas dunas frontais, campos de dunas móveis e vegetadas no interior da planície.

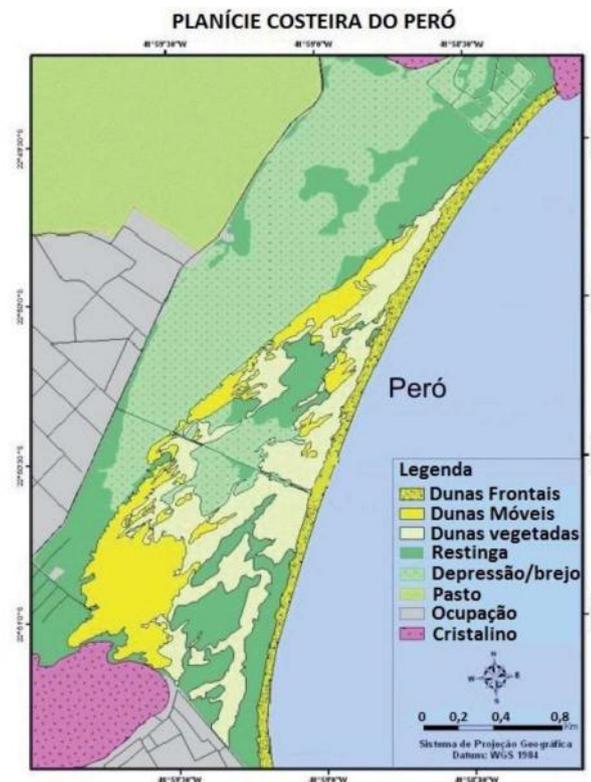


Figura 12 – Mapa geomorfológico da planície costeira do Perú

Fonte: FERNANDEZ & ROCHA, 2015.

Quanto à morfologia das dunas, CASTRO & RANGEL (2005) afirmam serem encontradas no Campo de Dunas do Peró, dunas escalonares, barcanas, transversas e barcanoides. FERNADEZ *et al.* (2009) identificam dunas parabólicas na porção central do campo, e dunas transversais ao norte da praia do Peró durante estação de verão.

O Campo de Dunas do Peró está inserido na Área de Proteção Ambiental do Pau-Brasil, criada em 2002. Esta APA, cujo zoneamento pode ser visto na figura 13, se estende por parte dos municípios de Armação dos Búzios e Cabo Frio, entre a Praia dos Tucuns, no município de Búzios, incluindo também fundo do mar, a lâmina d'água e a superfície, compreendendo as Ilhas Comprida, Redonda, do Papagaio, Dois Irmãos, Capões e Emerências. A APA do Pau-Brasil tem como objetivo de proteger os ambientes remanescentes de Mata Atlântica, manguezais, restingas, ilhas e dunas.

A despeito disso, o empreendimento conhecido como Costa do Peró (representado na figura 14), que pretende construir na região um *resort*, contemplando zonas comerciais, casas noturnas, áreas de recreação e cerca de 1000 casas (MANSUR & CARVALHO, 2011), recebeu um aval preliminar do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) em 2006.

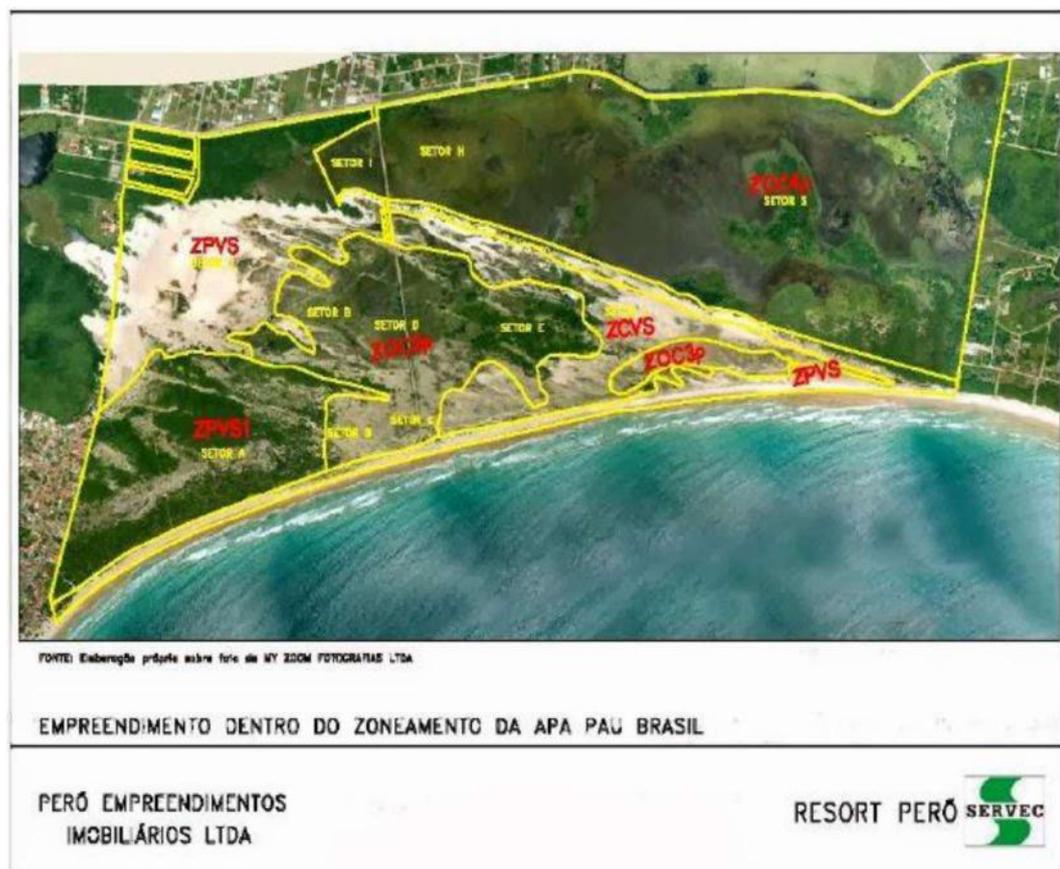


Figura 13 – Zoneamento APA Pau-Brasil

Fonte: MANSUR (2010)



Figura 14 – Representação do empreendimento Costa do Peró, com destaque para porção referente ao Club Med, licenciada pelo INEA.

Fonte: MANSUR & CARVALHO, 2011.

Apesar de o Ministério Público Federal ter conseguido uma liminar pela paralisação das obras em 2014, a possibilidade de continuidade do projeto ainda persiste. Em vista disso, outro esforço de preservação das dunas do Peró foi proposto no projeto de lei N° 3908/2018, de março de 2018, na Assembleia Legislativa do Rio de Janeiro, que pretende incluir nos limites do Parque Estadual da Costa do Sul o campo de Duns do Peró, entendendo que áreas de restinga, duna e brejo são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP) e, portanto, são proibidas edificações.

5. METODOLOGIA

A elaboração deste trabalho dividiu-se em duas etapas, de gabinete e laboratorial. A primeira consistiu na pesquisa e leitura de diversos artigos, teses, monografias, relatórios e livros cujos temas fossem a região do Campo de Dunas do Peró, ou que contivessem informações pertinentes a este. Dessa maneira pode-se formar uma melhor compreensão acerca dos aspectos geológicos, geomorfológicos, meteorológicos e demais condicionantes naturais que correspondem à área de estudo. Na etapa de laboratório, por sua vez, foram realizados

diversos ensaios seguindo as normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas em amostras previamente coletadas e que já foram usadas em outros projetos como MACHADO (2010), MEDEIROS (2015), SILVA (2017), OLIVEIRA (2018) e MEDEIROS (2019). As localizações dos pontos onde essas amostras foram coletadas podem ser verificadas na tabela 1 e na figura 15.

Tabela 1 – Coordenadas dos pontos amostrados

Peró 1	Peró 2	Peró 12
24k	24k	24k
192811E	192439E	192921E
7470221N	7470080N	7470108N



Figura 15 – Localização de Peró 1, Peró 2 e Peró 12.

Fonte: Google Earth, 2019.

Os ensaios realizados consistiram na caracterização granulométrica, massa específica dos grãos, ensaio de cisalhamento direto e testes em túnel de vento subsônico construído por GÁRCIA (2015) para sua tese de doutorado. Para determinação da salinidade das amostras, foram utilizados os valores de condutividade obtidos por OLIVEIRA (2018). Os ensaios de

cisalhamento direto foram feitos com corpos de provas com teores de umidade diversos – obtidos a partir da variação do período de secagem de uma amostra saturada preparada na própria caixa de cisalhamento direto. Dessa maneira pode-se observar como se comporta a tensão cisalhante ao variar-se umidade de cada amostra. A partir dos resultados adquiridos desses ensaios, então, foram elaborados gráficos e tabelas. Ademais, conjuntamente com esses dados, também foram analisados os resultados de cisalhamento direto feitos por OLIVEIRA (2018) para amostra Perú 2, que, ao aumentar a base de dados, permitiram uma análise mais abrangente e as consequentes conclusões elaborados ao fim deste trabalho.

6. ENSAIOS

6.1. CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para a determinação da granulometria das amostras utilizadas neste estudo, foram feitos ensaios de peneiramento e de sedimentação seguindo as normas NBR 7181 (ABNT, 1984) para determinação de curva granulométrica. Primeiramente, foi realizado o ensaio de sedimentação, responsável pela determinação da quantidade sedimentos finos (tamanhos silte e argila), baseado na Lei de Stokes (equação 1).

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

Onde,

v = velocidade de queda das partículas

γ_s = peso específico do material das partículas

γ_w = peso específico do fluido

μ = viscosidade do fluido

D = diâmetro das partículas

A realização desse ensaio consistiu na separação de 120g do material de cada amostra, em seguida cada porção foi imergida em 125ml de solução de hexametáfosfato de sódio a 45,7% e subsequente agitação manual para deflocular as partículas. Após o período de descanso de 24h, a mistura foi sujeita a agitação por meio de um aparelho dispersor (figura 16), durante 15 minutos. Posteriormente o material foi completamente transferido para uma proveta graduada e adicionado água destilada até atingir a marca de 1 litro, onde a solução foi agitada manualmente com movimentos verticais durante 60 segundos. Assim que finalizada a agitação,

iniciou-se o processo de leitura por meio de um densímetro cuidadosamente inserido na proveta. As leituras foram feitas nos intervalos definidos pela norma NBR 7181 (ABNT, 1984).

Finalizado o ensaio de sedimentação, o material foi lavado em água destilada e posto para secagem em estufa a 100°C durante 24 horas. Uma vez seco, foi encaminhado para o ensaio de peneiramento, onde se tem a obtenção da granulometria da parcela do material cujo tamanho das partículas é superior a 0,074mm. Para as amostras utilizadas nesse estudo, não se fez necessária a etapa de peneiramento grosso, uma vez que todo material possui diâmetro inferior a 2mm – i.e. passava por completo pela peneira nº 10. O peneiramento fino consiste na colocação da porção do material já seco no conjunto de peneiras com aberturas de 0,85 mm, 0,60 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,074 mm, dispostas de maneira decrescente de abertura, de cima para baixo, como pode ser visto à direita na figura 16. O conjunto, então, é fixado num agitador que, durante 15 minutos de funcionamento, promove o peneiramento completo. Ao término desse período, as porções retidas em cada uma das peneiras são pesadas para que se possa determinar a porcentagem de material que pertence a cada faixa de diâmetro das partículas, possibilitando, por fim, a obtenção da curva granulométrica de cada amostra.



Figura 16 – Da esquerda para direita: dispersor, proveta e densímetro (usados no ensaio de sedimentação), conjunto de peneiras no agitador utilizados para o peneiramento.

Fonte: Fotos do autor.

6.2. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Para a determinação da massa específica dos grãos foram seguidas as orientações da norma NBR 6508 (ABNT, 1984). Considerando no presente caso a massa específica como igual a densidade, podemos obtê-la utilizando a fórmula a seguir:

$$G = W_s / V_s \quad (2)$$

Onde,

G = massa específica

W_s = peso dos sólidos

V_s = volume dos sólidos

Enquanto peso dos sólidos é medido de maneira direta, por meio de uma balança, o volume dos sólidos requer um processo de medições mediante o uso de um picnômetro, como pode ser verificado na figura 17. É necessário a determinação do peso da amostra de solo seco, o peso do picnômetro contendo solo mais água destilada e o peso do picnômetro completamente preenchido por água destilada.

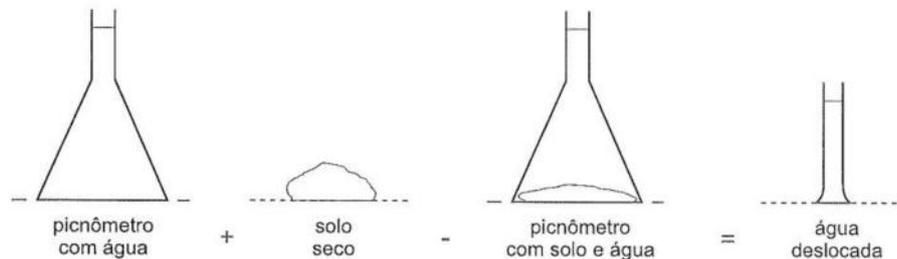


Figura 17 – Determinação a massa de água deslocada

Fonte: PINTO, 2006.

Para obtermos a massa de água deslocada (M_w'), soma-se os pesos do picnômetro preenchido por água com o dos sólidos, então subtrai-se o peso do picnômetro contendo água e solo. Como está expresso nas equações 3 e 4 abaixo, o volume dos sólidos (V_s) corresponde ao volume de água deslocado (V_w'), que é obtido a partir da razão entre a massa da água deslocada (M_w') e o peso específico da água na temperatura do sistema.

$$V_s = V_w' \quad (3)$$

$$V_w' = M_w' / \rho_w T \quad (4)$$

Onde,

V_s = volume do solo

V_w' = volume da água deslocada

M_w' = massa da água deslocada

$\rho_w T$ = massa específica da água na temperatura do sistema ensaiado

6.3. CISALHAMENTO DIRETO

De acordo com PINTO (2006), a resistência de um determinado material ao cisalhamento é definida pela tensão cisalhante máxima que ele é capaz de suportar sem sofrer ruptura, ou pela tensão cisalhante detectada no plano em que se dá a ruptura. Os principais atributos que influenciam essa resistência são o atrito e coesão entre as partículas que compõe o solo. Para o caso do tipo de solo deste trabalho, composto fundamentalmente por sedimentos arenosos, é relevante ressaltar o fenômeno da coesão aparente, que se dá em função do teor de umidade e da concentração de sais, responsável pela sucção osmótica.

Ainda segundo PINTO (2006), a resistência ao cisalhamento de solos arenosos pode ser obtida tanto por ensaios de compressão triaxial, quanto de cisalhamento direto. O último foi o escolhido para o presente estudo devido ao seu propósito de determinação da resistência ao cisalhamento de sedimentos arenosos.

O ensaio de cisalhamento direto é realizado mediante a aplicação de uma tensão normal num plano, fundamentado na teoria de Mohr-Coulomb, onde a obtenção da resistência (τ) é dada pela equação 5 abaixo, cuja representação gráfica está expressa na figura 18.

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \quad (5)$$

Onde,

τ = tensão cisalhante no ponto de ruptura

c = coesão

σ = tensão normal no plano de ruptura

ϕ = ângulo de atrito interno

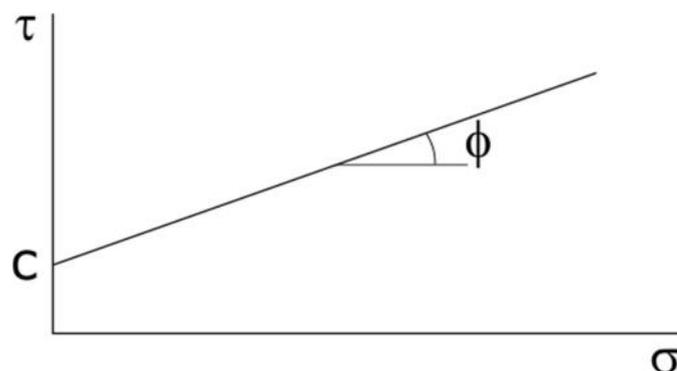


Figura 18 – Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb

Fonte: PINTO, 2006

O equipamento utilizado para realização desses ensaios foi uma prensa de cisalhamento direto – fabricado pela Contenco, modelo Pavitest – propriedade do Laboratório de Solos, setor de Geologia de Engenharia e Ambiental do Universidade Federal do Rio de Janeiro, interligado

ao *software* Pavitest Cisalhamento por meio de conexão USB. A prensa de cisalhamento, que pode ser vista na figura 19, é responsável por aplicar a tensão normal, previamente estabelecida, e por uma tensão horizontal, cisalhante, que impõe movimento da parte superior de uma caixa bipartida – onde o corpo de prova está disposto –, causando um deslocamento horizontal entre as partes superior e inferior da caixa. Simultaneamente a essa movimentação, o *software* Pavitest Cisalhamento registra as tensões de cisalhamento para cada intervalo de deslocamento horizontal, gerando, então, um gráfico desses dois parâmetros, onde é possível verificar a tensão máxima atingida (tensão de ruptura), exemplificado na figura 20.



Figura 19 – Prensa de cisalhamento Contenco conectada ao *software* Pavitest Cisalhamento.

Fonte: Foto do autor.

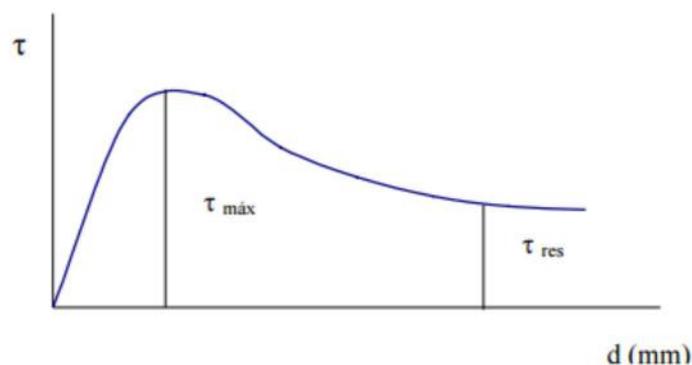


Figura 20 – Gráfico típico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal. Onde, $\tau_{\text{máx}}$ equivale a tensão de ruptura, e τ_{res} a tensão residual.

Fonte: PINTO, 2006

Uma vez que objetivo deste trabalho é analisar como a variação no teor de umidade influencia na coesão, a preparação dos corpos de prova consistiu nos procedimentos descritos a seguir. Com a caixa bipartida montada, presa por grampos e com adição de uma fina camada de silicone em pasta entre as partes para evitar o vazamento, dispõe-se cerca de 40ml de água destilada. Em seguida, são postos os sedimentos arenosos com salinidade natural, depositando-os de uma altura constante, a aproximadamente 1cm da caixa, a fim de se obter uma porosidade uniforme em todo corpo de prova. Em casos em que a água disposta inicialmente não foi capaz de saturar o corpo de prova, uma quantidade adicional foi colocada gentilmente com o uso de um pisquete. Terminada colocação da amostra saturada por água destilada na caixa bipartida, esta era submetida a um determinado período de evaporação no próprio laboratório à temperatura ambiente, para então ser realizado o ensaio de cisalhamento.

Esse procedimento foi realizado em diversos corpos de prova das amostras Però 1 e Però 2, variando o tempo de evaporação entre cada corpo de prova. As tabelas 2 e 3 contém a informação dos períodos de evaporação de cada corpo de provas (denominados por C.P.). Dessa maneira, obteve-se teores de umidade distintos para cada tensão cisalhante máxima obtida nos ensaios executados. Os teores de umidade foram determinados a partir da pesagem de uma porção dos sedimentos úmidos retirados do corpo de prova após o ensaio, que então era levada para secagem em estufa a 100°C durante 24h, para depois ter-se uma segunda pesagem.

Tabela 2 – Período de evaporação dos corpos de prova de Però 1

Peró 1	
Corpo de Prova	Período de Evaporação
C.P.1.	15 dias
C.P.2	6 dias
C.P.3	28 dias
C.P.4	28 dias
C.P.5	14 dias
C.P.6	11 dias

Tabela 3 – Período de evaporação dos corpos de prova de Però 2

Peró 2	
Corpo de Prova	Período de Evaporação
C.P.1.	10 dias
C.P.2	21 dias
C.P.3	6 dias
C.P.4	20 dias
C.P.5	15 dias
C.P.6	4 dias

A porosidade de cada corpo de prova também foi determinada a fim substanciar credibilidade das comparações feitas entre os resultados adquiridos nos ensaios de resistência ao cisalhamento. Seu cálculo foi feito a partir da equação 6 abaixo:

$$n = 1 - M_S / \rho_s V_t \quad (6)$$

Onde,

n = porosidade

M_S = massa dos sólidos

ρ_s = massa específica dos sólidos

V_t = volume total da caixa

Neste trabalho, todos os ensaios foram realizados sem aplicação de tensão normal, para representar o cisalhamento na superfície da duna, onde ocorre o arrasto das partículas.

6.4. TÚNEL DE VENTO

Túneis de vento foram inicialmente desenvolvidos para simulações dos efeitos do vento sobre edificações (BLESSMAN, 1978), no entanto, com o passar do tempo eles passaram a ser utilizados também para simulações do desenvolvimento de dunas e ação da erosão eólica, como no trabalho de BAGNOLD (1941) e outros posteriores (MEDEIROS, 2015). Sua classificação pode ser feita segundo diversos atributos, um deles é a velocidade que o túnel é capaz de mobilizar o ar, sendo considerados subsônicos quando o valor da velocidade atingida é menor que a velocidade do som, e supersônico que é maior (BUSCARIOLO, 2009). Outra

classificação possível é quanto ao trajeto percorrido pelo ar, HUCHO (1998) diferencia os túneis de circuito aberto, correspondentes àqueles em que o ar é extraído do meio externo ao túnel, circula por ele e retornado ao exterior, dos túneis de circuito fechado, também conhecidos como Túneis Göttinger, onde o ar é continuamente circulado no interior do túnel.

Túnel de vento utilizado neste trabalho (Figura 21) está localizado no Setor de Geologia de Engenharia e Ambiental do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, e é classificado como túnel subsônico aberto. Construído por GARCÍA (2015), suas dimensões são 2 metros de comprimento por 60 cm de altura e 60 cm de largura, possui um exaustor de tipo axial com 50 cm de diâmetro e 6 hélices móveis, que puxa o ar dentro do túnel que mobiliza os sedimentos nele dispostos sobre uma superfície rugosa.



Figura 21 – Túnel de vento construído por GARCÍA (2015)

Fonte: MEDEIROS (2015)

HERMANN & SAUERMAN (2000) desenvolveram um modelo numérico de movimentação de dunas baseado no conceito de que o fluxo de areia num campo de dunas ocorre em camadas – diferentemente de outros modelos, como o elaborado por GRASSELLI *et al.* (2000), que se restringem ao movimento individual de cada partícula de acordo com a velocidade. O modelo de HERMANN & SAUERMAN (2000), cuja representação gráfica pode ser vista na figura 22, considera um conjunto finito de partículas e a velocidade que atingem devido a ação da energia do vento.

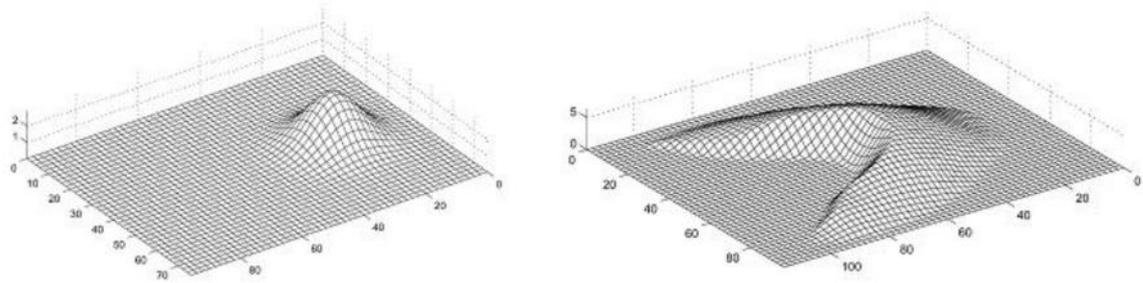


Figura 22 – Estágio inicial (à esquerda) e final (à direita) do modelo.

Fonte: HERMANN & SAUERMAN, 2000

A fim de reproduzir a representação prática do modelo numérico descrito, foram realizados três ensaios no túnel de vento utilizando a amostra de granulometria mais fina, Peró 2. Para cada ensaio, foi disposta uma fina de camada dos sedimentos arenosos sobre uma área retangular em cujo centro aproximado foi depositado um pequeno cone do mesmo material. A velocidade do vento sofreu variação entre os ensaios devido a colocação de diferentes materiais na tela que protege as pás do exaustor do impacto dos sedimentos mobilizados. Tais velocidades foram aferidas por meio de um anemômetro (figura 23).



Figura 23 – Anemômetro utilizado

Fonte: Foto do autor.

No primeiro ensaio foi utilizado tecido organza sintética conjuntamente com a tela de aço de malha 1 mm. Nesse caso, a velocidade de deslocamento do ar variou entre 2,55 m/s e 3,0 m/s. No segundo, optou-se por retirar o tecido e usar unicamente a tela de aço, aumentando a velocidade, que variou de 5,7 m/s a 6,5 m/s. Por último, o terceiro ensaio foi realizado utilizando sobre a tela de aço duas camadas de tecido microtule, o que conferiu velocidades de 3,5 m/s e 4 m/s.

7. RESULTADOS

7.1. GRANULOMETRIA

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização granulométrica das amostras Però 1, Però 2 e Però 12 podem ser observadas nas figuras 24, 25 e 26 onde estão representadas suas respectivas curvas granulométricas. Para melhor visualização da distribuição granulométrica, foram gerados os gráficos presentes na figura 27 com o cálculo aproximado das porcentagens a partir das curvas anteriormente citadas.

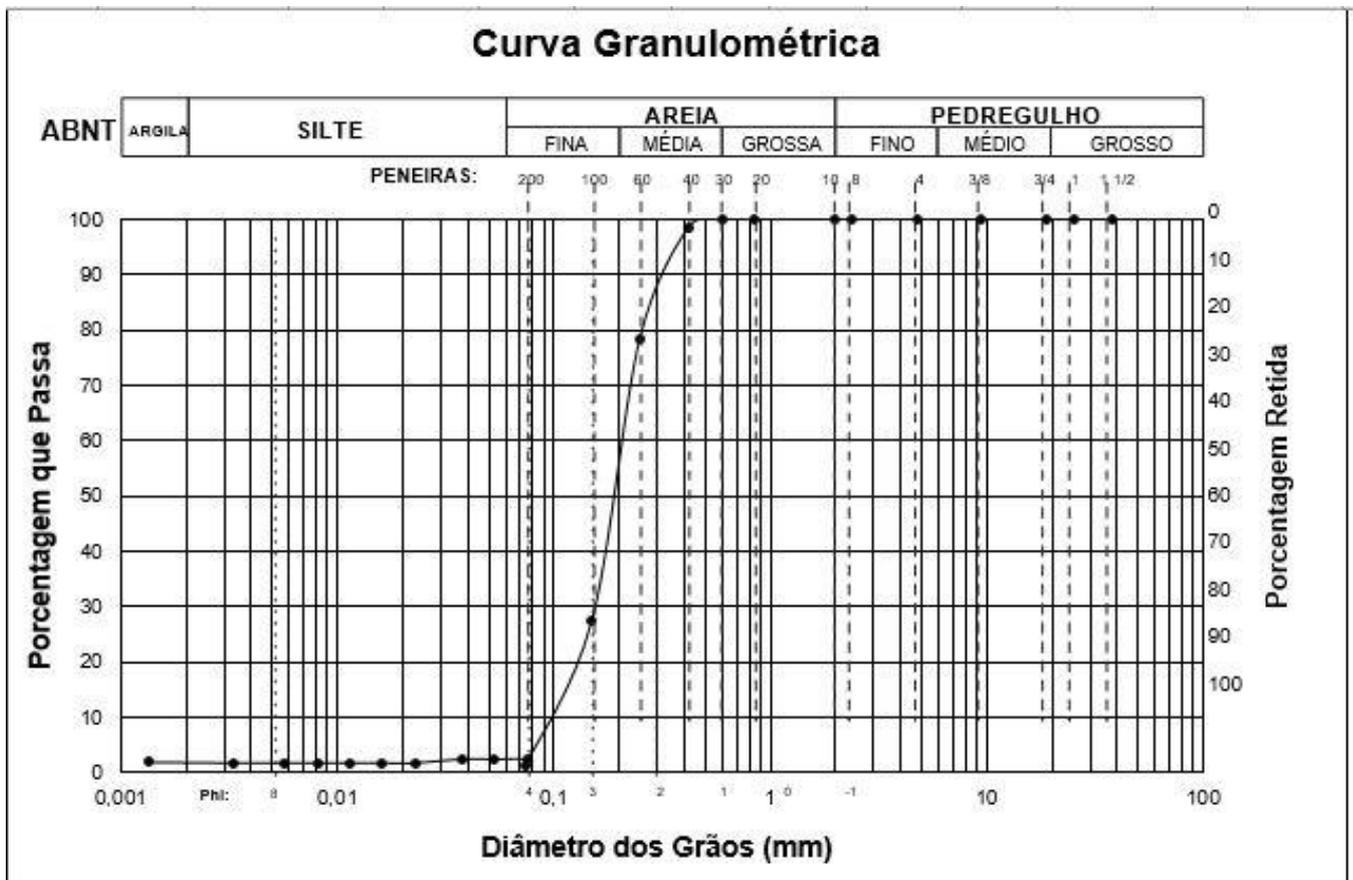


Figura 24 – Curva granulométrica de Però 1

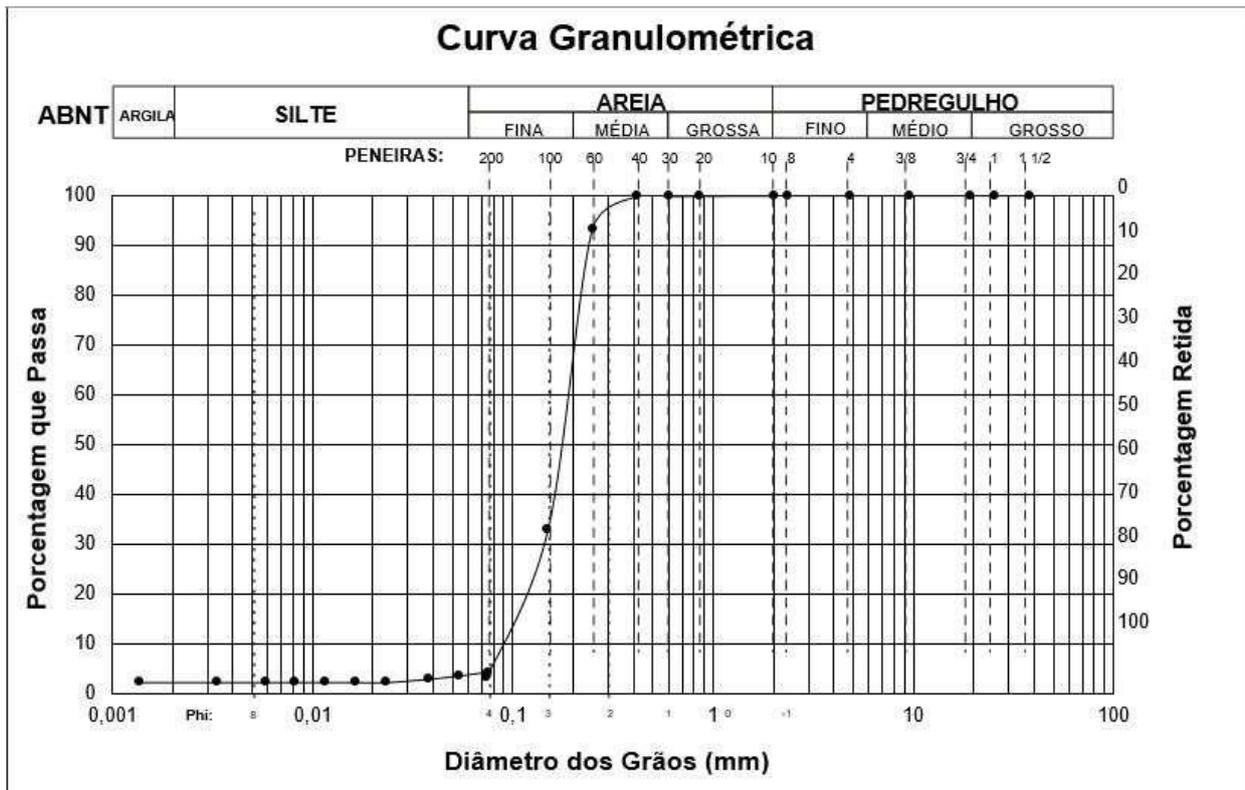


Figura 25 – Curva granulométrica de Peró 2

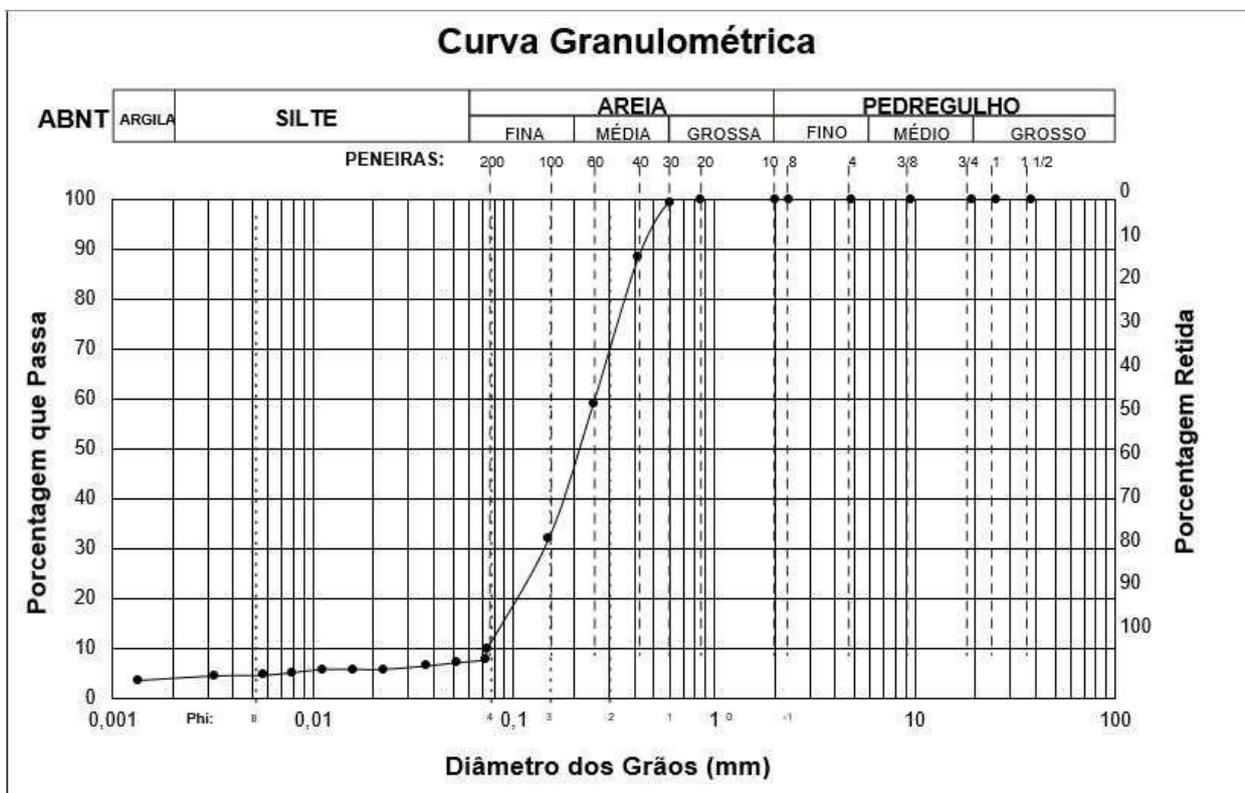


Figura 26 – Curva granulométrica de Peró 12

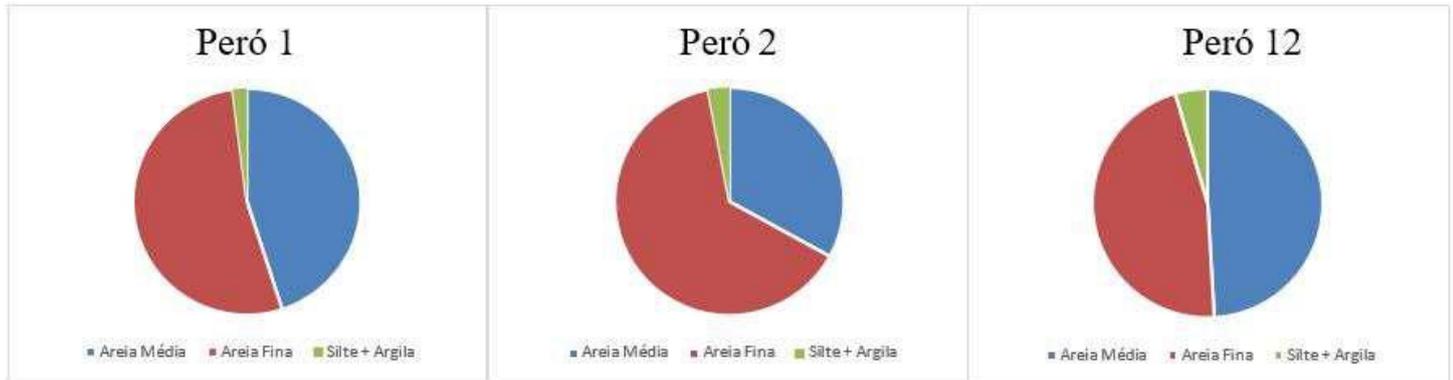


Figura 27 – Gráficos de distribuição granulométrica de Peró 1, Peró 2 e Peró 12

Apesar de amostra Peró 12 ter apresentado uma quantidade maior de sedimentos finos, que não pode ser desprezado, a amostra de caráter granulométrico mais fino é Peró 2, devido a à menor porcentagem de areia média. Os resultados são coerentes com a localização dos pontos amostrados, uma vez que as amostras granulometria mais fina estão mais longe da praia, de onde os sedimentos em questão são oriundos. Isso se explica pelo fato de o transporte eólico tender a carregar os sedimentos de menor diâmetro por maiores distâncias.

7.2. MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Na tabela 4 encontram-se os valores de massa específica calculados para as três amostras deste trabalho. Pode-se notar a proximidade desses valores com a massa específica do mineral quartzo, $2,65\text{g/cm}^3$ (DANA, 1978). Essa convergência já era esperada, visto que os sedimentos que compõem as amostras são predominantemente quartzosos.

Tabela 4 – Massa específica das amostras Peró 1, Peró 2 e Peró 12.

Amostra	Massa Específica (g/cm^3)
Peró 1	2,666
Peró 2	2,646
Peró 12	2,682

Uma provável razão para a amostra Peró 12 apresentar massa específica ligeiramente mais elevada, é a composição mineralógica das partículas finas, que são notadamente mais escuras que o restante do material (quartzoso), sendo possivelmente compostos por minerais pesados como ilmenita e zircão.

7.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

Como já descrito anteriormente, a preparação dos corpos de prova deste ensaio consistiu em saturar com água destilada os sedimentos provenientes das amostras Perú 1 e Perú 2 e deixá-los secar à temperatura ambiente durante variados períodos de evaporação. A ordem escolhida de dispor inicialmente a água na caixa bipartida, para então pôr-se material arenoso, tem como objetivo minimizar as heterogeneidades na distribuição dos sedimentos que poderiam ocorrer se a ordem de deposição fosse inversa. Nas figuras 28 e 29 estão representados os gráficos de tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal para os diversos corpos de prova, denominados por C.P., das amostras Perú 1 e Perú 2, respectivamente.

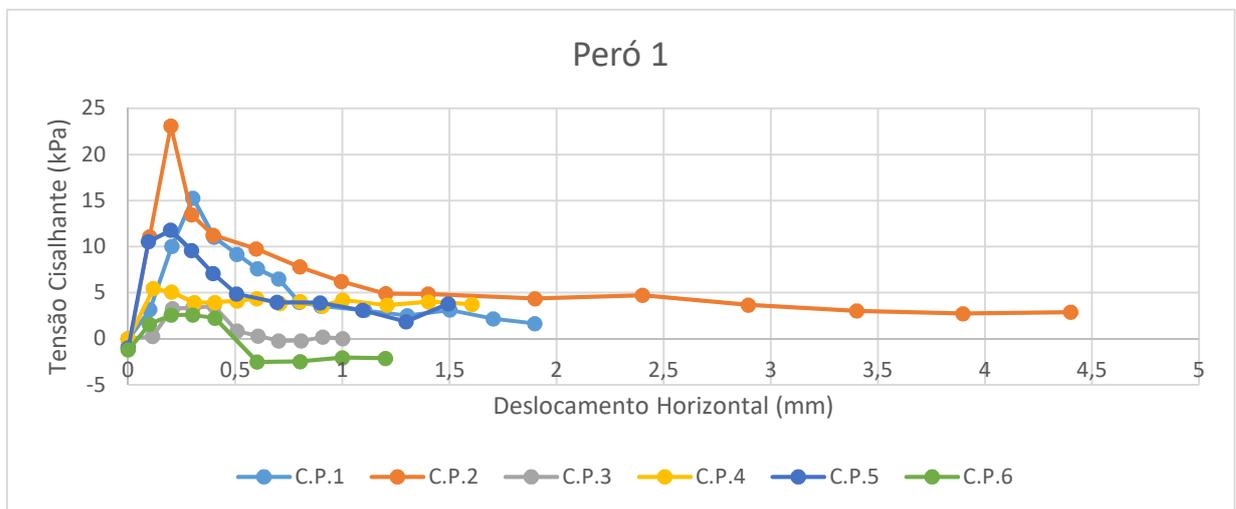


Figura 28 – Gráfico de tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal de Perú 1.

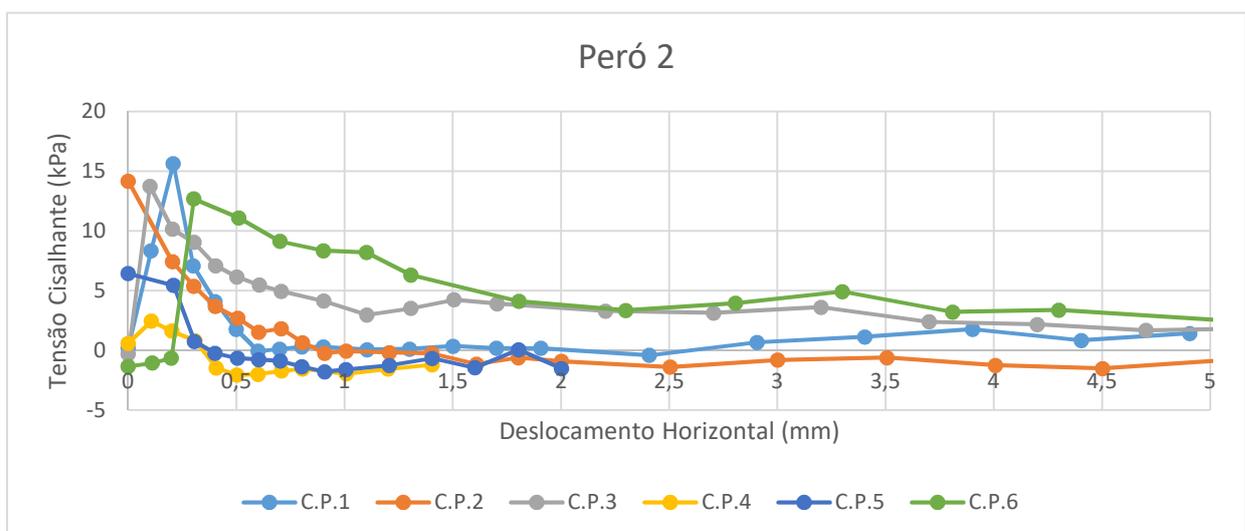


Figura 29 – Gráfico de tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal de Perú 2.

Nota-se que o gráfico obtido para Però 1 corresponde às expectativas de um gráfico tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal, apresentando um pico de tensão para cada corpo de prova, sendo o corpo de prova 2 (C.P.2) aquele com maior valor (23,4 kPa), que corresponde à resistência ao cisalhamento. Na tabela 5 e no gráfico da figura 30 encontra-se a correlação entre teor de umidade e tensão cisalhante da amostra Però 1.

Tabela 5 – Porosidade, teor de umidade e tensão cisalhante máxima de Però 1.

Peró 1			
C.P.	Porosidade (%)	Teor de Umidade (%)	Tensão Cisalhante (kPa)
1	46,7%	3,15%	15,299
2	45,9%	15,53%	23,395
3	46,1%	0,18%	3,581
4	45,2%	5,56%	5,440
5	46%	17,60%	11,913
6	45,4%	8,79%	2,611

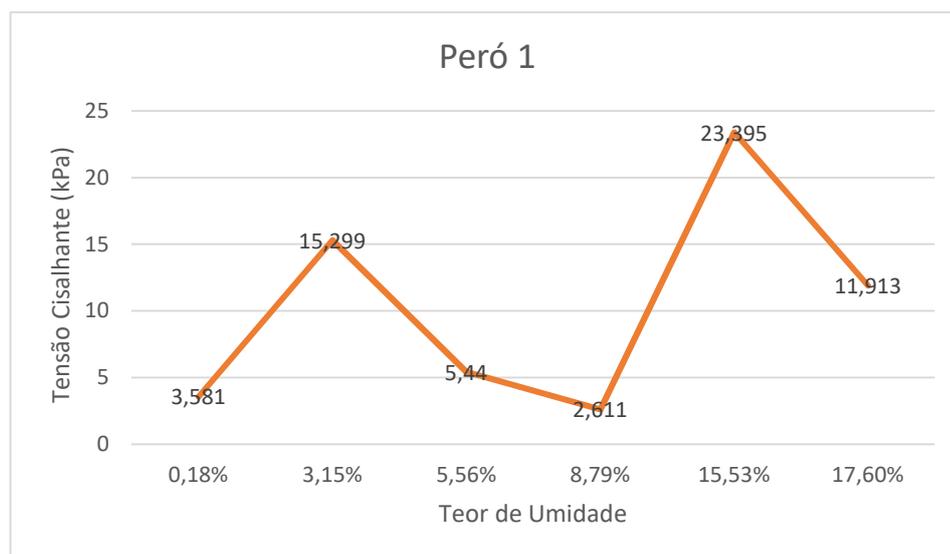


Figura 30 – Gráfico de tensão cisalhante vs. teor de umidade de Però 1.

Por sua vez, o gráfico resultado dos ensaios de Però 2, apesar de apresentar também um pico de tensão cisalhante para cada corpo de prova, estes se encontram em maioria relacionados a muito pouco deslocamento horizontal. Um aspecto inesperado foram os valores muito próximos tensão cisalhante dos corpos de prova C.P.1, C.P.3 e C.P.6, apesar dos seus teores de umidade variados, como podem ser observados na tabela 6 e na figura 31.

Tabela 6 – Porosidade, teor de umidade e tensão cisalhante máxima de Però 2

Peró 2			
C.P.	Porosidade (%)	Teor de Umidade (%)	Tensão Cisalhante (kPa)
1	44,8%	4,34%	15,653
2	45,4%	0,41%	14,183
3	45,3%	17,76%	13,751
4	44,0%	0,32%	2,458
5	46%	3,97%	6,452
6	46,18%	20,86%	12,695

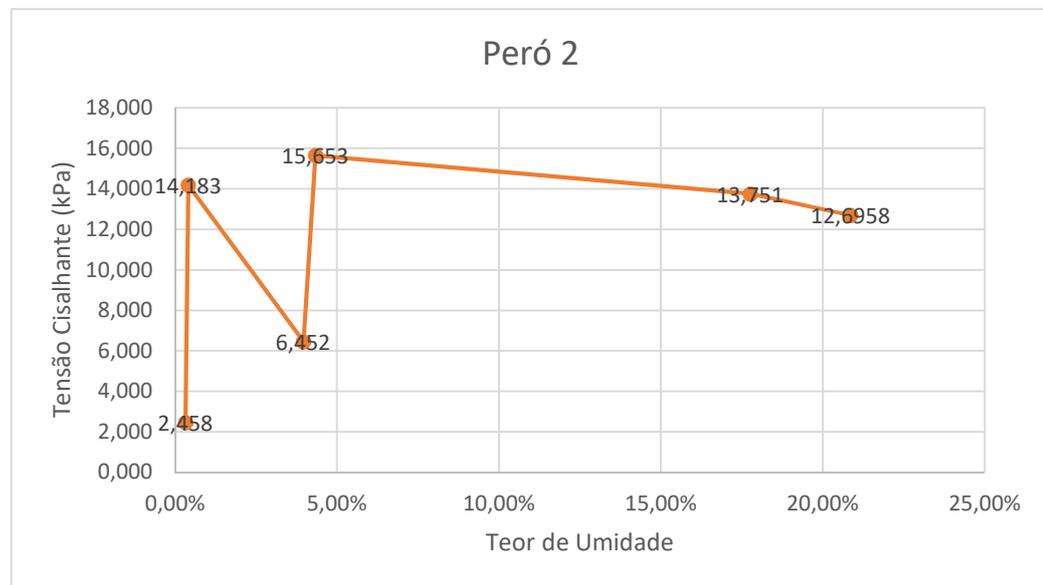


Figura 31 – Gráfico de tensão cisalhante vs. teor de umidade de Però 2.

Como pode ser observado nos gráficos e tabelas anteriores, Però 1 apresentou maior resistência ao cisalhamento, cerca de 23,4 kPa a teor de umidade de 15,5%, que Però 2 com tensões máximas de 14 kPa aproximadamente a teores de umidade variados, como demonstrado na figura 31 acima. Tendo em vista que os resultados obtidos para Però 2 denotam valores muito próximo de tensão cisalhante, decidiu-se somar à essa análise os dados adquiridos por OLIVEIRA (2018). Juntando as informações de ambos trabalhos, foi elaborado o gráfico da figura 32 e a tabela 7, onde está evidente o pico de resistência ao cisalhamento de 23,6 kPa quando a amostra apresenta 10,8% de teor de umidade. Vale ressaltar que os corpos de prova do presente estudo apresentaram, em média, maior porosidade que aqueles preparados por OLIVEIRA (2018) – 45% e 43%, respectivamente. Esta divergência pode ser explicada pela diferença dos métodos de preparação dos corpos de prova, neste trabalho optou-se por dispor

os sedimentos posteriormente à colocação de água destilada, enquanto no OLIVEIRA (2018) o fez na ordem inversa.

Tabela 7 – Porosidade, teor de umidade e tensão cisalhante máxima de Però 2. Corpos de prova identificados com a letra *O* correspondem aos de OLIVEIRA (2018).

Peró 2			
C.P.	n (%)	ω (%)	τ (kPa)
O.3	43	0,00	6,43
C.P.4	44	0,32	1,70
C.P.2	45	0,41	14,06
C.P.5	46	3,97	6,31
O.5	43	4,01	13,19
C.P.1	45	4,34	14,20
O.2	40	7,01	6,25
O.4	44	10,82	23,63
C.P.3	45	17,76	13,83
O.1	44	18,09	2,75
C.P.6	46	20,86	12,87

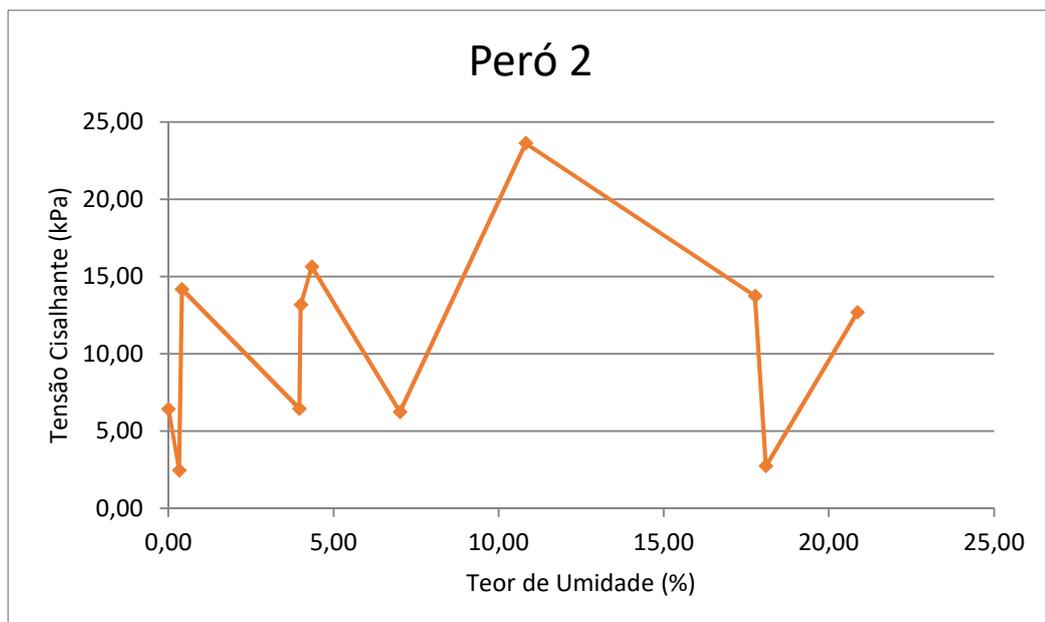


Figura 32 – Gráfico de tensão cisalhante vs. teor de umidade de Però 2 com dados obtidos neste estudo juntamente com os resultados de OLIVEIRA (2018)

Sabemos que em materiais arenosos, como é o caso das amostras deste estudo, a resistência ao cisalhamento sem atuação da tensão normal depende da coesão aparente dos grãos, resultante da pressão capilar da água e da sucção osmótica, que se dá de acordo com teores de umidade e salinidade de um solo úmido, não saturado. Para melhor compreender este fenômeno foram utilizados os valores de condutividade e salinidade obtidos por OLIVEIRA (2018) para as amostras Perú 1 e Perú 2 (tabela 8) para determinação do potencial osmótico de cada corpo de prova a partir da equação de Van't Hoff, descrita a seguir:

$$\Psi_0 = - R.T.C \quad (7)$$

Onde:

Ψ_0 = potencial osmótico

R = constante universal dos gases

T = temperatura da solução

C = concentração de sais

Tabela 8 – Valores de condutividade e salinidade de Perú 1, Perú 2 e Perú 12.

Amostra	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Salinidade da solução (g(sal)/kg(água))	Salinidade Msal/Mareia (g/kg)
Perú 1	208	0,152	0,543
Perú 2	157	0,115	0,391
Perú 12	161	0,118	0,411

Fonte: OLIVEIRA (2018)

Nas tabelas 9 e 10, é possível analisar conjuntamente os parâmetros de porosidade, teor de umidade, concentração de sais, tensão cisalhante e potencial osmótico de cada corpo de prova. Constata-se que os maiores potenciais osmóticos (em módulo) calculados, -7619,73 kPa para C.P.3 de Perú 1 e -5073,14 kPa para C.P.4 de Perú 2, correspondem a tensões cisalhantes baixas, de 3,581 kPa e 1,641 kPa, respectivamente. Essa relação já era esperada, pois os baixos teores de umidade nestes corpos de prova, próximos a zero, apesar de aumentar concentração de sais acaba por diminuir a coesão dos grãos por não haver água suficiente nos poros atuando na pressão capilar e sucção osmótica.

Tabela 9 – Valores de porosidade, teor de umidade, salinidade, tensão cisalhante e potencial osmótico para Perú 1.

Peró 1	Teor de Umidade (%)	Porosidade (%)	Salinidade Msal/Mareia (g/kg)	Tensão Cisalhante (kPa)	Potencial Osmótico (kPa)
C.P.3	0,18	46,1	0,543	3,581	- 7619,73
C.P.1	3,15	46,7	0,543	15,299	- 293,79
C.P.4	5,56	45,2	0,543	5,440	- 212,12
C.P.6	8,79	45,4	0,543	2,611	- 203,66
C.P.2	15,53	45,9	0,543	23,395	- 134,82
C.P.5	17,60	46,0	0,543	11,913	- 115,15

Tabela 10 – Valores de porosidade, teor de umidade, salinidade, tensão cisalhante e potencial osmótico para Perú 2. Os corpos de prova identificados com a letra *O* correspondem àqueles de OLIVEIRA (2018)

Peró 2	Teor de Umidade (%)	Porosidade (%)	Salinidade Msal/Mareia (g/kg)	Tensão Cisalhante (kPa)	Potencial Osmótico (kPa)
O.3	0,00	43	0,391	6,43	–
C.P.4	0,32	44,0	0,391	2,457	- 5073,14
C.P.2	0,41	45,4	0,391	14,182	- 429,57
C.P.5	3,97	46	0,391	6,451	- 295,17
O.5	4,01	43	0,391	13,19	- 759,25
C.P.1	4,34	44,8	0,391	15,652	- 344,91
O.2	7,01	40	0,391	6,25	- 434,29
O.4	10,82	44	0,391	23,63	- 281,13
C.P.3	17,76	45,3	0,391	13,751	- 82,59
O.1	18,09	44	0,391	2,75	- 168,25
C.P.6	20,86	46,18	0,391	12,696	- 68,53

Para melhor se observar a correlação entre potencial osmótico e a resistência ao cisalhamento, foram produzidos os gráficos das figuras 33 e 34, dos quais foram excluídos os valores de potencial osmótico excessivamente altos (relacionados à teores de umidade próximos a zero).

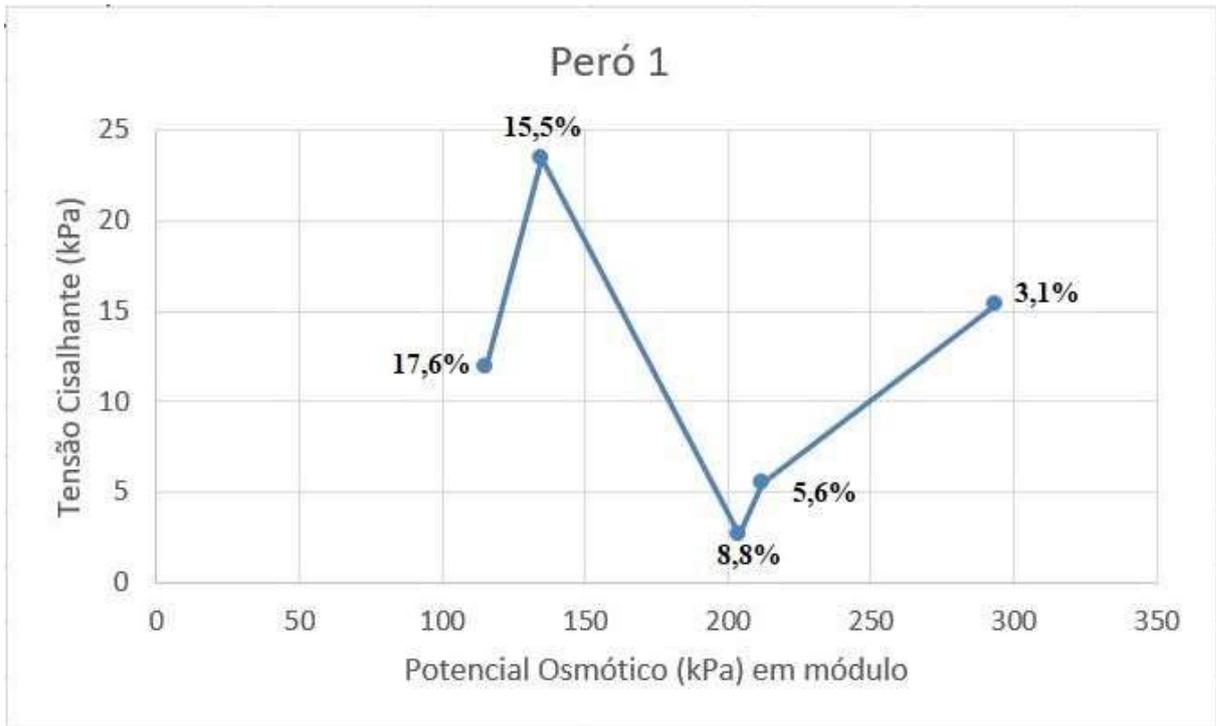


Figura 33 – Gráfico de tensão cisalhante vs. potencial osmótico de Peró 1, com informação do teor de umidade.

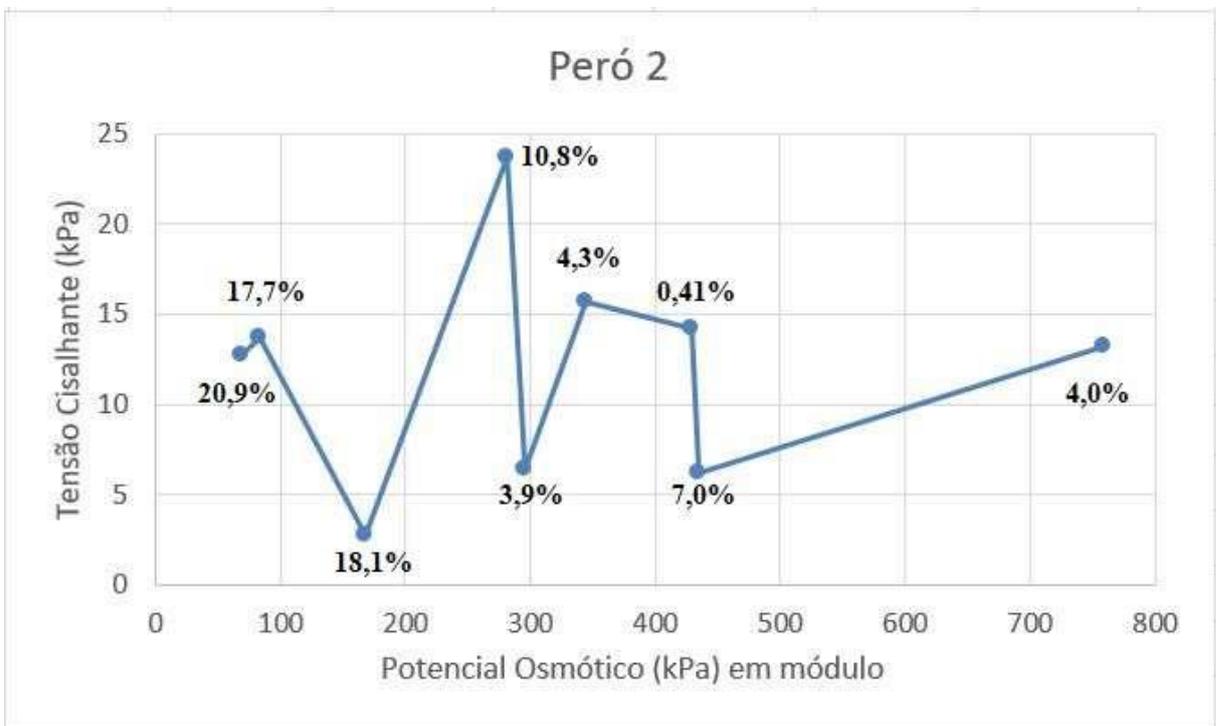


Figura 34 – Gráfico de tensão cisalhante vs. potencial osmótico de Peró 2, com informação do teor de umidade.

Analisando os gráficos anteriores podemos observar que em corpos de prova com teores de umidade mais elevados, entre 10 e 25%, a resistência ao cisalhamento tende a aumentar conforme diminui-se a umidade, atingindo tensões cisalhantes de ruptura de 23,4 kPa a umidade de 15,5% (Peró 1) e 23,6 kPa a umidade de 10,8% (Peró 2). A razão desse comportamento é o aumento da concentração de sais causado pela evaporação da água, que conseqüentemente eleva o potencial osmótico, responsável pela sucção osmótica que juntamente com aumento da pressão capilar intensificam a sucção mátrica nos sedimentos, o que, por fim, desenvolve uma maior coesão entre os grãos. No entanto, para corpos de prova com teores de umidade inferiores à 10% os valores de potencial osmótico elevados não resultam em maior resistência ao cisalhamento. Presume-se que isso aconteça, possivelmente, devido ao desaparecimento dos meniscos responsáveis pela sucção mátrica quando os sedimentos se encontram com teores de umidade muito baixos. Uma vez que potencial osmótico foi determinado somente a partir dos valores de salinidade, ele não equivale à sucção osmótica.

Os resultados da relação entre resistência, teor de umidade e potencial osmótico obtidos para Peró 1 correspondem melhor às expectativas anteriores a realização dos ensaios do que os resultados dos corpos de prova de Peró 2, que demonstram maior dispersão dos valores de tensão cisalhante de ruptura e potencial osmótico para teores umidade semelhantes (notadamente, para teores de 3,9, 4,0 e 4,3%). Uma possível explicação para esta dispersão está na maior dificuldade de preparação de corpos de prova homogêneos de Peró 2, devido a sua granulometria mais fina. Essa relação depende também do formato e da distribuição do tamanho dos poros, que não foi analisada neste trabalho.

7.4. TÚNEL DE VENTO

7.4.1. ENSAIO I

O primeiro ensaio no túnel de vento teve duração de 72 horas e velocidade de deslocamento do ar oscilando entre 2,5 e 3,0 m/s. A disposição da amostra Peró 2 no interior do túnel foi feita utilizando um béquer como instrumento de distribuição dos sedimentos. Inicialmente foi colocada uma fina camada, depois esta foi aplainada com o uso de uma régua. Decidiu-se por deixar alguma rugosidade nessa camada para observação do comportamento das mesmas sob os efeitos do vento. Em seguida, foi depositado a partir de uma altura constante, de aproximadamente 20 cm, um cone do mesmo material. Na figura 35 pode-se verificar a evolução do ensaio.

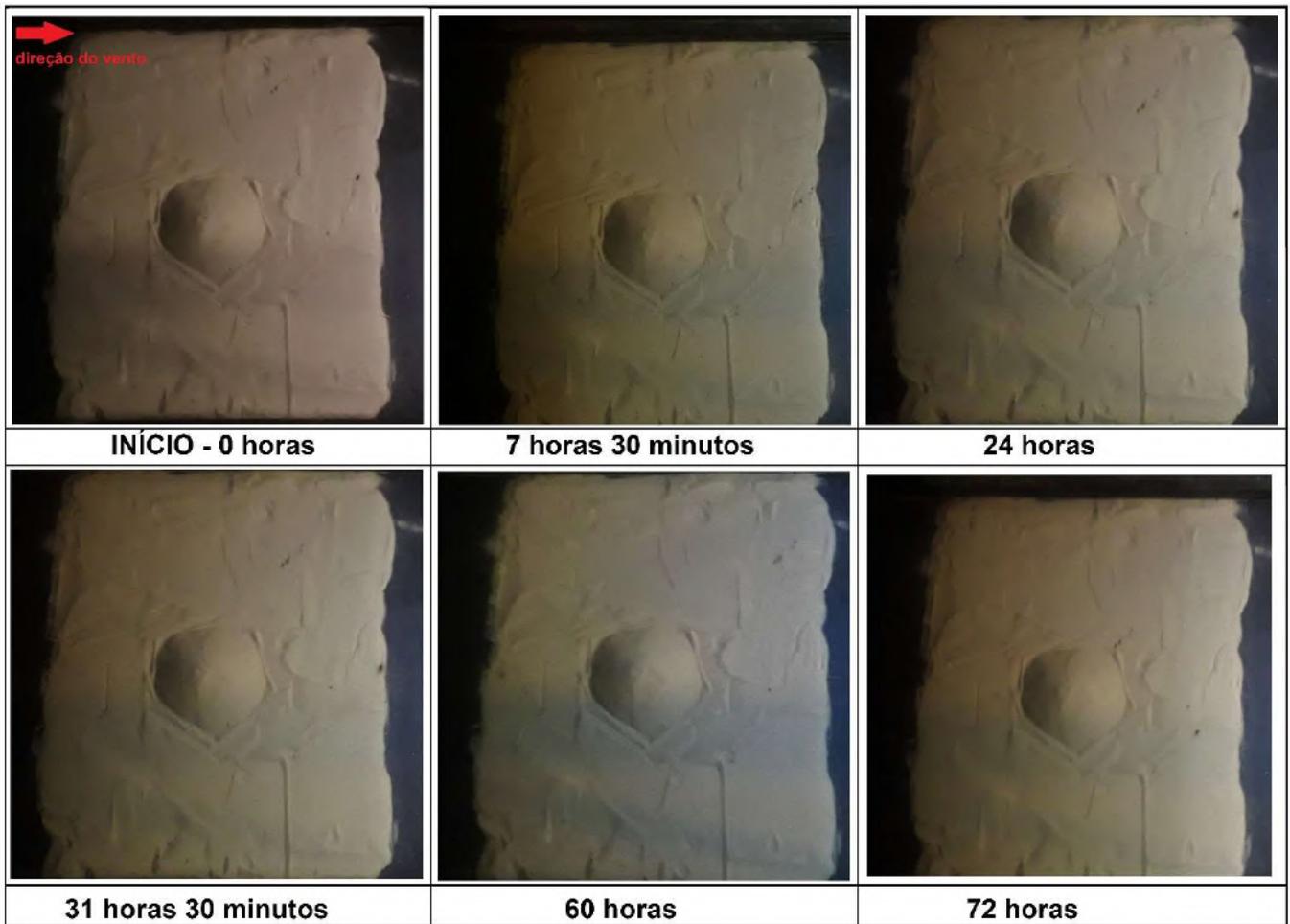


Figura 35 – Túnel de Vento: Ensaio 1: Evolução de 72 horas

Fonte: Fotos do autor.

Como está exposto na compilação de imagens acima, a mobilização dos sedimentos em condições de ventos de até 3 m/s foi praticamente nula. Vale ressaltar que não foi realizado nenhum procedimento para aumentar a concentração de sais nem alterações no teor de umidade dessa amostra, o que poderia ocasionar o aumento da sucção osmótica e consequente maior coesão entre os grãos. Dessa forma, ficou evidente que o motivo para falta de movimentação dos sedimentos nesse caso foi a baixa intensidade do vento.

7.4.2. ENSAIO II

Devido aos resultados insatisfatórios do primeiro ensaio em razão da baixa velocidade atingida pelo vento, a segunda tentativa foi realizada após a retirada do tecido (organza sintética) que cobria a tela de aço. Seu intuito era o de proteger as pás do exaustor dos sedimentos que viessem a ser lançados nelas, no entanto a presença dela acabava por bloquear

em excesso a passagem do ar, diminuindo sua velocidade de deslocamento. Foi utilizado o mesmo corpo de prova do experimento anterior que já estava disposto dentro do túnel, sem quaisquer modificações.

A velocidade do vento no segundo ensaio variou de 5,7 a 6,5 m/s, mais que dobrando os valores do primeiro caso e aumentando a turbulência. Porém, os novos parâmetros se mostraram inadequados, provocando uma intensa mobilização dos sedimentos arenosos, visivelmente mais acentuada na lateral esquerda do túnel, como pode ser verificada na figura 36. O ensaio durou apenas 2 minutos.



Figura 36 – Túnel de Vento: Ensaio 2: Resultado 2 minutos.

Fonte: Fotos do autor.

7.4.3. ENSAIO III

Buscando um meio-termo entre os ensaios anteriores, colocou-se novamente um tecido sobre a tela de proteção. Foi escolhido o tecido microtule que possui a trama mais aberta que a organza, permitindo uma maior fluidez do ar, mesmo sendo posto em duas camadas como foi feito neste último ensaio.

Novamente uma porção da amostra Però 2 foi depositada da maneira descrita anteriormente, no ensaio I, porém, para este ensaio, decidiu-se por não aplinar a camada disposta anteriormente à deposição do cone, como pode ser observado na figura 37.



Figura 37 – Túnel de vento: Ensaio 3. Momento inicial.

Fonte: Foto do autor.

A velocidade neste ensaio oscilou entre 3,5 m/s e 4 m/s, e seu tempo de duração foi de 25 horas. Logo na primeira hora ocorreu uma abertura nos sedimentos ao lado esquerdo – lado este que já foi identificado no ensaio anterior como aquele que apresenta maior intensidade ou turbulência do vento. As seguintes fotos, compiladas nas figuras 38, 39 e 40, demonstram como se a evolução das formas neste terceiro ensaio.

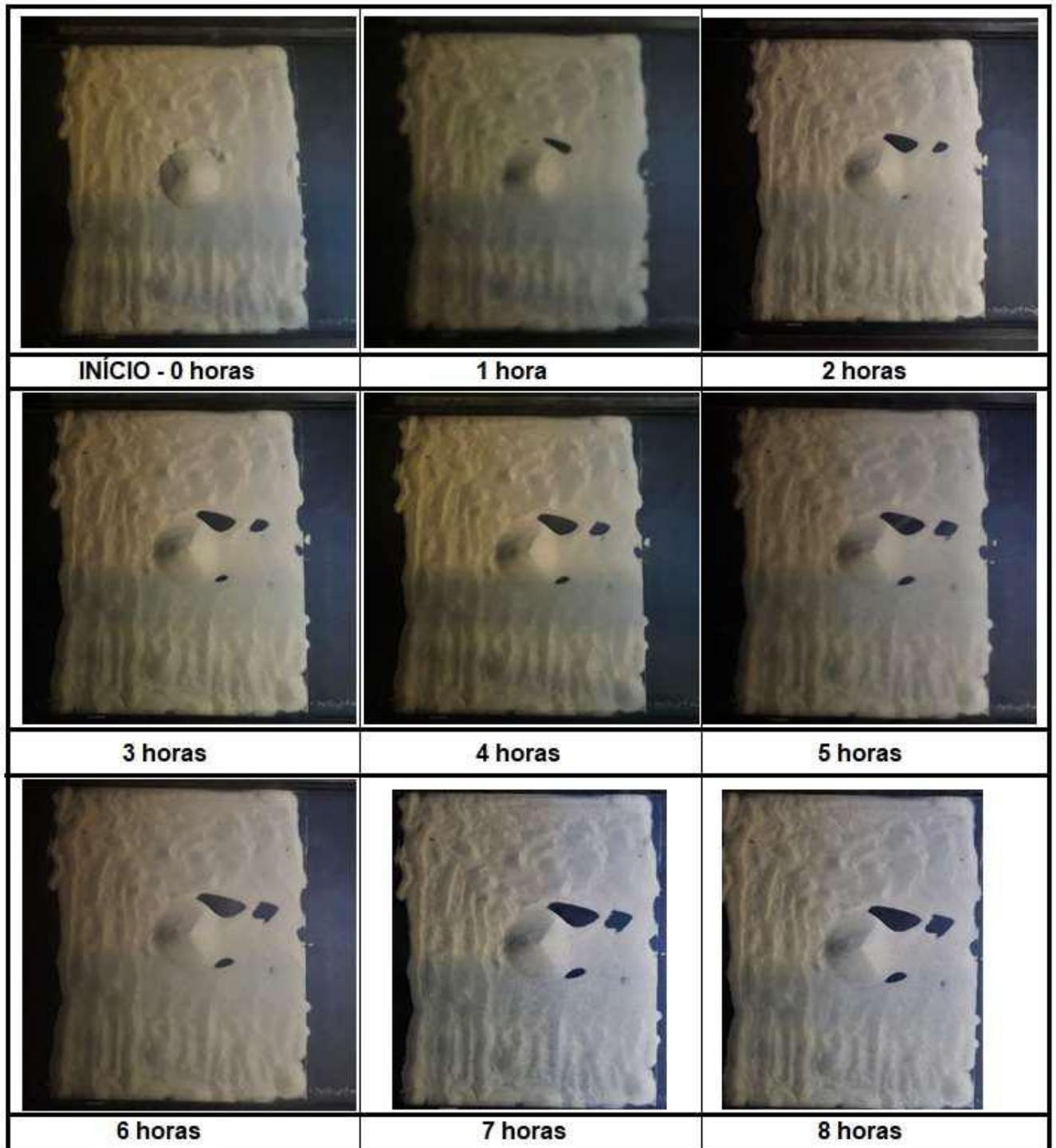


Figura 38 – Túnel de Vento: Ensaio 3: Evolução de 8 horas.

Fonte: Fotos do autor.

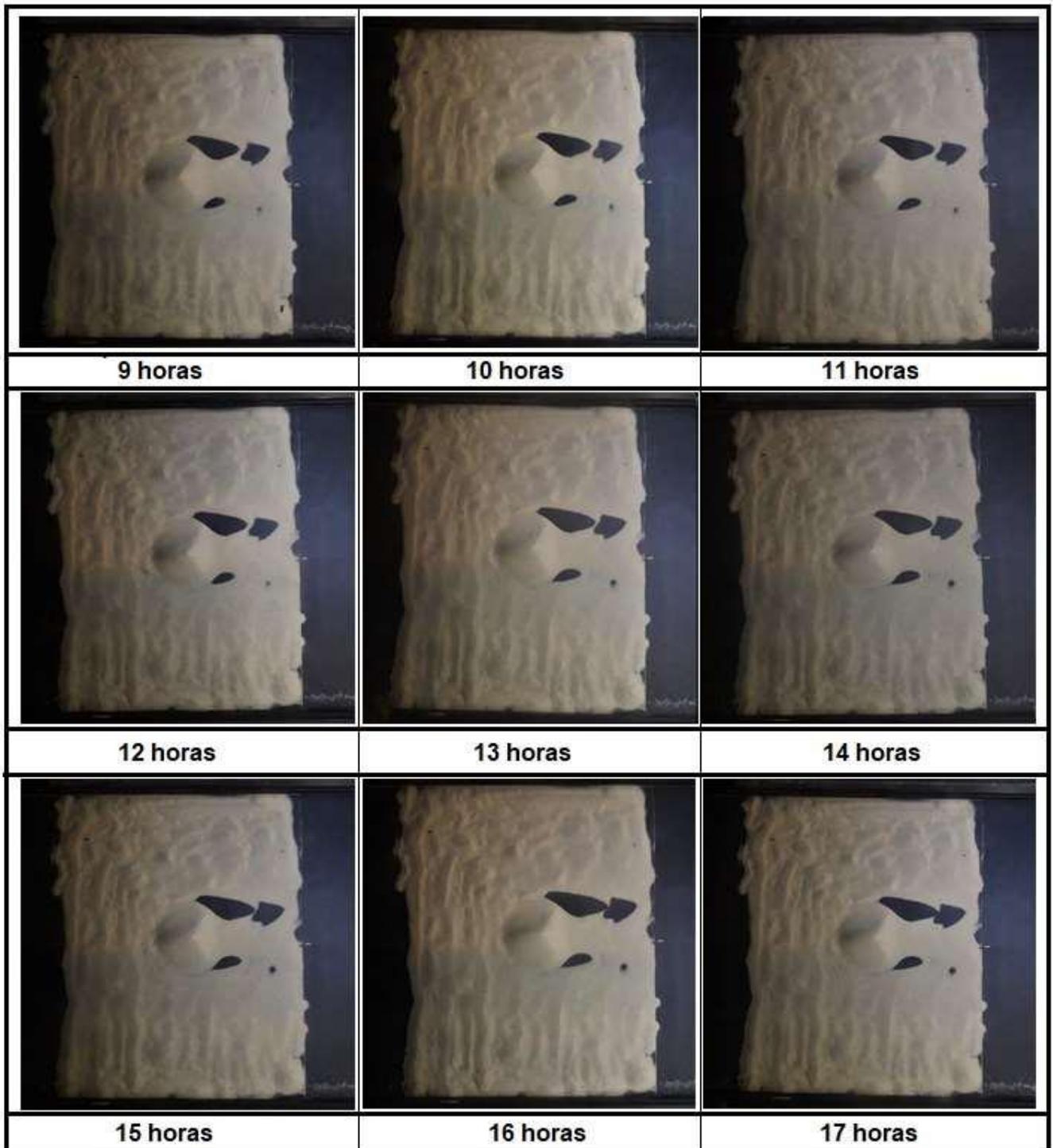


Figura 39 – Túnel de Vento: Ensaio 3: Evolução de 9 a 17 horas.

Fonte: Fotos do autor.

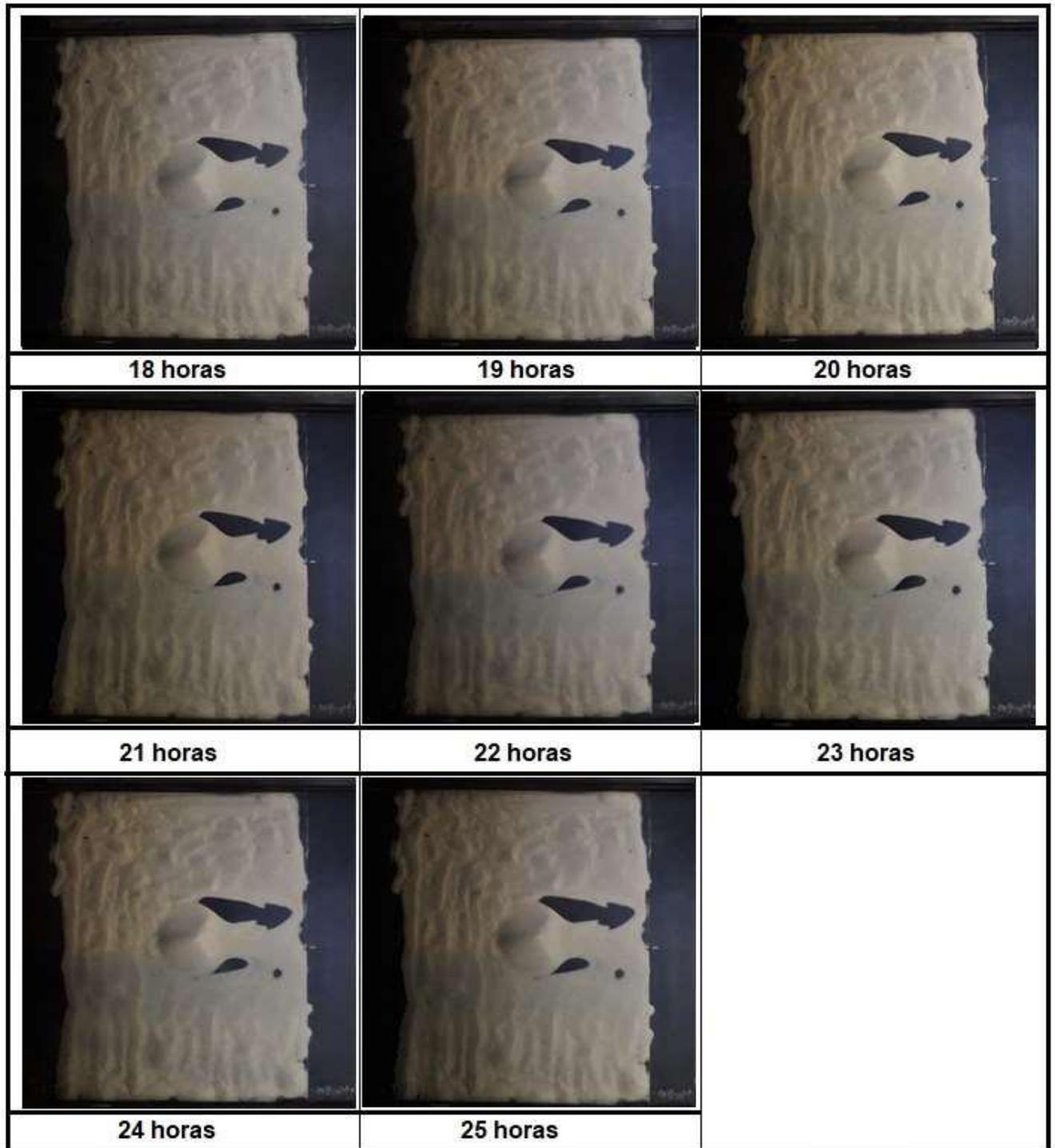


Figura 40 – Túnel de Vento: Ensaio 3: Evolução de 17 a 25 horas.

Fonte: Fotos do autor.

As aberturas que surgiram no decorrer do ensaio nas laterais e a frente do monte de sedimentos foram causadas pela turbulência do vento causada pela própria estrutura atuar como obstáculo para passagem do ar em movimento. Quanto à transição da estrutura cônica para uma forma semelhante a uma duna barcana, como prevê o modelo de HERRMANN & SAUERMAN (2000), nota-se a um desenvolvimento de morfologia semelhante àquelas de dunas, apresentando lados de barlavento, menos íngreme, e sotavento, mais inclinado, e uma possível face de avalanche. Tais feições estão evidentes na figura 41. Apesar da morfologia assumida pelos sedimentos neste ensaio não se adequar perfeitamente à forma esperada de uma duna barcana, com cristas laterais alongadas, os resultados obtidos demonstram que estas se desenvolveriam, possivelmente, caso se aumentasse o período de duração do ensaio.

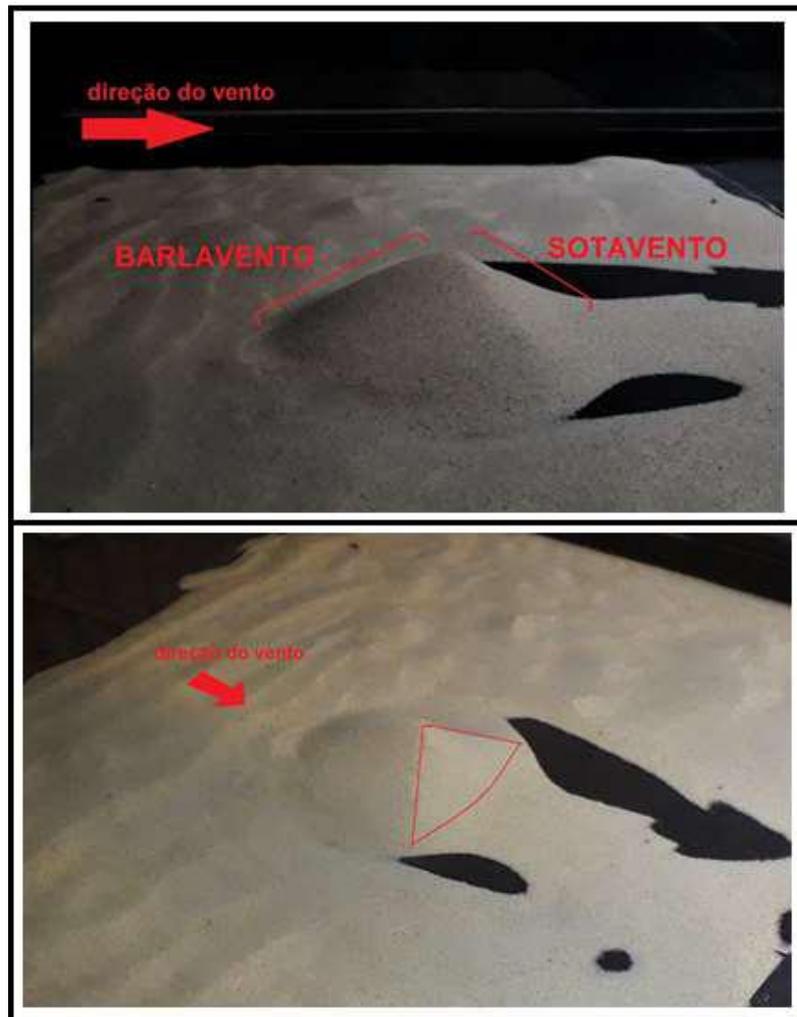


Figura 41 – Ensaio Túnel de Vento. Barlavento, sotavento e face de avalanche.

Fonte: Fotos do autor.

8. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Tendo em vista a análise dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, é possível afirmar que o procedimento de preparação dos corpos de prova ocorreu de maneira apropriada, posto que os valores de porosidade obtidos determinados têm pouca variação para uma mesma amostra. Este fator é o primordial para que os resultados dos ensaios de cada corpo de prova possam ser comparados de forma confiável. Cabe destacar que houve maior dificuldade no preparo dos corpos de prova de Peró 2 do que naqueles de Peró 1, presumidamente por sua granulometria mais fina que é mais facilmente desacomodada no processo de saturação, causando heterogeneidades na porosidade dos corpos de prova. Ainda assim, os resultados obtidos foram satisfatórios.

No entanto, como o teor de umidade é medido somente quando terminado o ensaio de resistência ao cisalhamento, e depende da temperatura e umidade relativa do ar no decorrer do período de evaporação, este não pôde ser controlado eficientemente. Apesar dos variados períodos de secagem de 4, 6, 10, 15, 20 e 21 dias dos seis corpos de prova preparados da amostra Peró 2, nenhum apresentou teor de umidade entre 4 e 17%, o que impediu uma análise confiável dos resultados. Por essa razão, optou-se por recorrer aos resultados obtidos por OLIVEIRA (2018) a fim de aumentar a base amostral das análises feitas para Peró 2.

Constata-se que gráficos de tensão cisalhante *vs.* deslocamento horizontal de corpos de prova de Peró 1 e de Peró 2 apresentaram um padrão de curvas similar ao esperado. Ambas as amostras apresentaram maior tensão cisalhante de ruptura próximas à 23,5 kPa, embora a teores de umidade distintos – 15,5% para Peró 1 e 10,8% para Peró 2 –, o que pode ser resultado da influência de seus diferentes parâmetros de granulometria, porosidade e concentração de sais.

Como exposto na análise dos resultados da correlação entre tensão cisalhante, potencial osmótico e umidade, em corpos de prova com teores de umidade entre 10 e 25% a resistência ao cisalhamento aumenta quando o teor de umidade diminui. Este fenômeno ocorre em virtude do aumento da concentração de sais causado pela evaporação da água, ocasionando o aumento do potencial osmótico e, por consequência sua sucção mátrica e coesão dos grãos. Em corpos de prova com teor de umidade mais baixos, inferiores a 10%, o aumento da concentração de sais não se traduz em maior resistência ao cisalhamento, em razão do desaparecimento dos meniscos responsáveis pela sucção mátrica. Para estudos futuros, sugere-se que sejam realizados ensaios de sucção para uma mais efetiva determinação da sucção

osmótica e mátrica, dado que, no presente estudo, o potencial osmótico foi determinado somente a partir dos valores de salinidade, portando não equivale à sucção osmótica.

Quanto às tentativas de simulação prática do modelo numérico de HERRMANN & SAUERMAN (2000) nos testes do túnel de vento, o primeiro e segundo ensaio realizados apresentaram resultados insatisfatórios devido à falta de mobilidade e ao excesso de deslocamento dos sedimentos, respectivamente. O terceiro ensaio, apesar de não lograr a forma de duna barcana com perfeição, se mostrou suficientemente satisfatório, pois houve transição da forma cônica dos sedimentos disposto à uma forma semelhante a uma duna, com aspectos morfológicos equivalentes, como os lados de barlavento e sotavento. Presume-se que ao prolongar o período de ensaio, seria possível a transição completa para a morfologia de duna barcana, como prevê o modelo numérico de HERRMANN & SAUERMAN (2000).

Vale ressaltar que foi identificada uma variabilidade na intensidade do vento no interior do túnel de vento, sendo o lado esquerdo aquele com maior capacidade de mobilização dos sedimentos. Para estudos futuros seria recomendável investigar se a causa desta diferença está no funcionamento do exaustor, na estrutura interna do túnel ou em alguma fissura ou má vedação nas laterais, uma vez que esse a falta de uniformidade da velocidade de deslocamento do ar pode comprometer os resultados deste tipo de ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. 8p. 1984a.

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

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

BAGNOLD, R. A. **The physics of blown sand and desert dunes**. Chapman & Hall Ltd. 1941.

BLESSMANN, J. **Efeitos do vento em edificações**. Coleção: Série Estrutural. Editora: URGs. Ano: 1978.

BROOKFIELD, M. **Aeolian processes and features in cool climates**. Geological Society, London, Special Publications, 354(1), pp.241-258. 2011.

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

CASTRO, J.W.A. **Dunas costeiras do Município de Cabo Frio/Estado do Rio de Janeiro - Brasil**. 2006. Disponível em: http://www.reservataua.com.br/Dunas_Costeiras.htm. Acessado 4 mar. 2019.

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.

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

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Geoparque Costões e Lagunas do Estado do Rio de Janeiro – Proposta.** 2012.

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

DIAS, J. M. A. **Glossário RGCI, P, Praia.** Revista de Gestão Costeira Integrada, 2007. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/prai.html>. Acessado 28 maio 2019

FERNANDEZ, G.B., PEREIRA, T.G., ROCHA, T.B. **Coastal Dunes along Rio de Janeiro Coast: Evolution and Management.** Journal of Coastal Research, SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium), 307-311. Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0258. 2009.

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

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

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

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.

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.

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

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

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**, 4th edition, S.A.E. ISBN 0-7680-0029-7. 1998

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama: Cabo Frio, RJ**. 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/cabo-frio/panorama>. Acessado 28 jun. 2019.

MACHADO, W.A. **A influência da salinidade na erodibilidade das dunas do Perú.**

Monografia de Graduação Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

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

MANSUR, K.L.; CARVALHO, I.S. **Characterization and valuation of the geological heritage identified in the Perú 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.

MARTINEZ, N. **Dunas do Perú: Construir ou não construir? - Revista Cidade.** 2017.

Disponível em: <https://revistacidade.com.br/dunas-do-pero-construir-ou-nao-construir/>.

Acessado 23 maio 2019.

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

MEDEIROS, P.H.C. **Modelagem migratória em escala reduzida aplicada à geoconservação de corpos dunares da região do Perú, município de Cabo Frio/RJ.** Dissertação de Mestrado (em andamento). Departamento de Geologia - IGEO/UFRJ, 2019.

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

OLIVEIRA, L.G.V. **Estudo da influência da variação do teor de umidade na coesão de amostras de sedimentos arenosos sob efeito da névoa salina das dunas do Perú, Cabo**

Frio, RJ. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

OLIVEIRA FILHO S.R. Morfodinâmica Associada entre Duna, Praia e Zona Submarina como Subsídio a Adequada Ocupação do Espaço Costeiro na Praia do Peró – RJ.

Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências e Tecnologia. Área: Análise Geoambiental e Ordenação de Territórios de Regiões Semiáridas e Litorâneas, Universidade Estadual do Ceará. 96p. 2011.

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

PRESS, F. et al. Para Entender a Terra. 656p. Porto Alegre: Bookman, 2006.

RAMOS, R.R.C., CASSAR, J.C.M., GUSMÃO, L.A.B., 2003. 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.

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

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

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

SILVA, A.C.J. **Efeito da concentração de sais na resistência ao cisalhamento de amostras de areia das dunas do Perú, Cabo Frio, Rio de Janeiro.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

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

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar.** 400p. São Paulo: Blucher, 2003.

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

TOMAZELLI, 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.

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

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

WAGNER, C. **Dissolution rate of sodium chloride with diffusion and natural convection as rate-determining factors.** Journal of Physical Chemistry, 53 (7): 1030–1033, July 1949.