

ANÁLISE DAS CONDICIONANTES NATURAIS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AREIAS DAS DUNAS COSTEIRAS DE CABO FRIO

René SENA GARCIA¹; Andrea Ferreira BORGES²

RESUMO

Dunas costeiras estão sujeitas a variações nas condições de umidade e de salinidade, condicionadas pela velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura, pluviosidade e exposição à névoa salina, fatores que influenciam na erodibilidade dos sedimentos. Este trabalho estuda a influência da evaporação e a sucção dos sais presentes nos sedimentos arenosos nas dunas do Perú, em Cabo Frio. A sucção osmótica é uma parcela da sucção total no solo junto à sucção mátrica, e resulta da presença de sais no fluido dos poros. A sucção mátrica atua em solos não saturados, em função da tensão superficial da água e da curvatura dos meniscos formados entre os grãos sólidos, enquanto osmótica pode atuar em solos saturados ou não saturados. Para simular os ambientes de dunas foram coletadas duas amostras nas dunas do Perú. Para todas as amostras foram adotados três tipos de condicionantes, simulando o efeito dos sais trazidos pela névoa salina sobre as dunas costeiras, isto é, uma com água destilada, e duas amostras de areia com soluções salinas de concentrações de 1,8% e 3,5% de NaCl. Para análise da evaporação as amostras ficaram por 35 dias para medições, já nos ensaios de sucção as amostras com as proporções citadas, foram testadas baseadas em 3 estágios de saturação e os testes de cisalhamentos caracterizaram as areias lavadas fofas e com solução salina. Os resultados obtidos apontam que há diferença de resultados nas análises realizada em ambiente não salino e salino, o que permite concluir que o comportamento na evaporação, sucção e tensões cisalhantes desses solos arenosos são influenciados pelo ambiente. A variação na sucção osmótica nas areias demonstrou o efeito no comportamento mecânico; se variar a concentração de sais no fluido dos poros, ocorrerá uma variação de volume e na resistência ao cisalhamento do solo.

Palavras-chave: cisalhamento em areias; nevoa salina; sucção mátrica

¹ D.Sc. Prof. Eng. Civil, UNESA, Brasil. Tel.: 5521 992842356 rsenag@hotmail.com. Universidade Estácio de Sá. Av. Dom Helder Câmara, 5080 (21) 2583-7100.

² D.Sc. Profa. Eng. Civil, UFRJ, Brasil. Tel.: 5521 991592568 aborges@geologia.ufrj.br. Universidade Federal de Rio de Janeiro, Cidade Universitária-Rio de Janeiro.

1. INTRODUÇÃO

O contato da terra com o mar, a ação contínua dos diferentes agentes climáticos, o movimento dos sedimentos e a atividade biológica marinha, conformam ao longo do tempo esse aspecto às vezes abrupto e às vezes linear e plano que têm as costas. A região costeira está submetida não somente à influência física dos fenômenos naturais vinculados ao mar, como os ventos, às marés, às correntes, etc., como também à influência social e econômica que o atrativo do mar gera em seu entorno, como assentamentos urbanos e turismo. Por isso é unânime a concepção de que o gerenciamento da costa compreende não somente o controle da diversidade de usos e atividades que possam dar-se junto ao mar, como também a organização do espaço que suporta atividades que influem diretamente sobre as características físicas e morfológicas da faixa litorânea (PILARCZYK, 1990).

São analisados os processos sedimentológicos nas areias de Cabo Frio, no estado de Rio de Janeiro, considerando as condicionantes naturais e as propriedades físicas dos sedimentos, e sua relação com a força de arrasto do vento, a força de suspensão aerodinâmica e a força coesiva entre as partículas. Pretende-se analisar e processar as amostras dos sedimentos nas dunas, visando à identificação, caracterização e previsão qualitativa e quantitativa dos principais processos morfológicos, hidráulicos, assim como, os associados à distribuição, transporte e disposição dos sedimentos praias e sua relação com o sal. Por último, se espera que com a análise da influência do sal se permita avaliar os vários processos associados a erosão costeira, como os deslocamentos das dunas de areia.

2. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

Dunas costeiras são pequenas elevações de areia formadas pelos ventos que vêm do mar. Os ventos carregam a areia fina até que as dunas venham a ser estabilizadas por vegetação pioneira. As dunas costeiras formam-se pela interação entre o mar, o vento, a areia e a vegetação. As correntes marítimas litorâneas transportam grandes quantidades de areia. Partes destes grãos são depositados nas praias pelas marés altas. A areia acumulada é transportada pelos ventos dominantes para áreas mais elevadas da praia (ARENS, 2002).

A intensidade e direção dos ventos junto com as disponibilidades dos sedimentos ocasionam problemas nas dunas costeiras e que sem dúvidas podem representar ameaças e riscos a esse ecossistema. Desta forma, fica notória a importância de um estudo mais aprofundado das direções e velocidades de migração das dunas eólicas destas áreas, face à existência dos riscos ambientais relacionados a numerosos usos conflituosos do espaço físico. A origem e evolução das acumulações eólicas são determinadas por fatores ambientais de escala regional ou local, tais como o suprimento de sedimentos, a textura dos sedimentos, a cobertura vegetal, a velocidade e variabilidade dos ventos, a topografia pretérita, as variações climáticas e do nível do mar, o soerguimento e subsidência tectônica, assim como as variações de salinidade (ABBOT, 1994).

As formações das dunas costeiras são decorrentes de processos atuantes a longo e em curto prazo. No primeiro caso, a morfologia dunar pode manter-se sem qualquer alteração por centenas a milhares de anos. No segundo caso, a construção e a evolução da morfologia dunar estão submetidas às modificações temporais, que podem ser diárias ou sazonais. Tais modificações, em geral, estão relacionadas com fenômenos naturais, cuja variabilidade depende do sistema de circulação atmosférica local e global como as brisas marinhas e terrestres (KOMAR, 1998).

É apresentado um procedimento para a análise e processamento dos sedimentos nas dunas, visando à identificação, caracterização e previsão qualitativa e quantitativa dos principais processos morfológicos, hidráulicos, assim como, os associados à distribuição, transporte e disposição dos sedimentos praias e sua relação com o sal e as condicionantes naturais, a saber, umidade, evaporação e sucção.

3. REFERÊNCIAS À FORMAÇÃO DAS DUNAS COSTEIRAS

Uma duna de areia precisa de uma grande quantidade de areia solta para que o sedimento possa ser soprado pelo vento, isto é, que sob a ação do vento ou brisa passará a movimentar os grãos de areia. Para isto acontecer o vento deve ter energia suficiente para erodir e transportar as partículas sedimentares, unido a constância, isto é, deve soprar ao longo de todo o ano durante períodos temporais cumpridos, assim com espaço para erodir e transportar o sedimento, o denominado *fetch* eólico. Ainda, só o sedimento seco está disponível para ser erodido e transportado e a superfície deverá estar desprovida de vegetação ou pouco vegetada. O vento é um agente de transporte extremamente seletivo, muito mais que a água, pois é menos denso e menos viscoso, pelo que, apenas transporta em suspensão partículas muito finas (ARENS, 2001).

Quando o vento recolhe a areia, ela se movimenta, mas grande parte a menos de cinco centímetros de altura. O vento move a areia de três formas diferentes, a saber saltação, quando os grãos de areia saltitam sob o efeito do vento que corresponde a 95% do movimento das areias, outra forma é a de arrasto que é quando os grãos de areia colidem com outros grãos, por exemplo, de argila ou cascalho, o que os leva a se mover e responde por 4% do movimento das areias. A terceira forma de movimentação se dá por suspensão, aqui a areia é levada para o alto pelo vento e depois cai. Cerca de 1% da areia se movimenta assim.

À medida que o vento conduz areia ao topo da pilha, formação da crista da duna, ela se torna tão íngreme que começa a se mover, causando uma avalanche de areia na face de deslizamento. A queda da pilha se interrompe quando a face de deslizamento atinge o ângulo correto para que a duna se mantenha estável. O ângulo de repouso, usualmente é de 30 a 34 graus (SHORT, 1999).

Quando areia suficiente se acumula em torno de um obstáculo, a duna mesma se torna o obstáculo, e continua a crescer. A depender da velocidade e direção do vento e do peso da areia local, dunas podem assumir formas e tamanhos diferentes. Ventos mais fortes tendem a criar dunas mais altas; ventos mais amenos tendem a espalhá-las. Se a direção do vento se mantém constante ao longo dos anos, as dunas se deslocam gradualmente nesse sentido. A forma das dunas depende da quantidade de sedimento disponível, da direção e da constância do vento.

Há quase um número infinito de variedades de dunas, essas variedades provavelmente representam as transições de um tipo básico de duna em outro devido ao resultado de flutuações na direção e força do vento, a quantidade de areia, as obstruções físicas, tais como vegetação e outros fatores, como a umidade. Exemplos típicos incluem dunas barcanas com um corno ou extremidade muito alargado, dunas lineares com muitos ramos divergentes de uma extremidade (*feather dunes*) e dunas parabólicas que são em forma de V ao invés de U. Muitos fatores afetam os tipos de dunas, mas os principais são relacionados com a variabilidade do vento e a disponibilidade de areia. A Figura 1 mostra a dependência das dunas a partir destes dois tipos de fatores. Neste diagrama, é considerado

o regime anual da variabilidade do vento representado por vários regimes definidos de acordo com a direção do vento, ou seja, unimodal, bimodal e regimes complexos (YAPING, 2008).

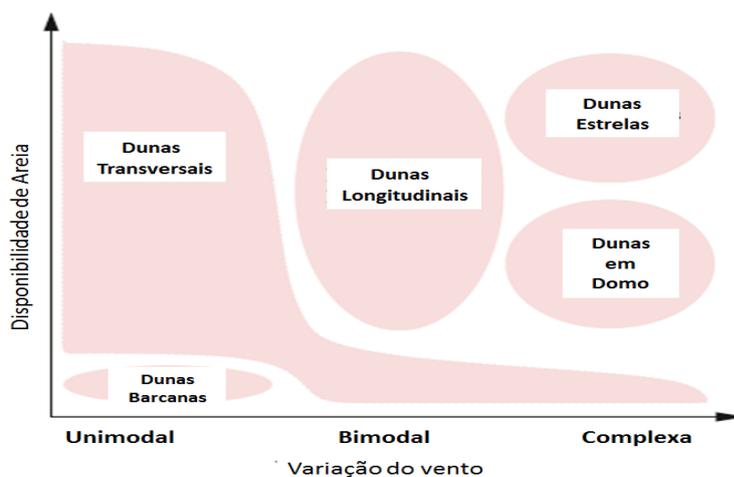


Figura 1. Relação entre os tipos de dunas em função da disponibilidade de areia e a direção do vento (YAPING, 2008).

4. ANÁLISE DOS SEDIMENTOS RECENTES

A granulometria dos sedimentos constitui um fator de controle importante na morfologia do perfil praial. Estudos realizados por Bagnold (1954) e Bascom (1951) mostraram uma relação estreita entre o tamanho médio do grão e a declividade do perfil praial. Na maioria dos casos, essa estreita relação tem sido atribuída à interação dos sedimentos com a energia das ondas incidentes (KOMAR, 1976).

Com o intuito verificar as principais propriedades dos sedimentos para a formação da praia e o campo de dunas adjacente, foi feita a amostragem de sedimentos, como ilustrado na Figura 2, em dois pontos distintos, um localizado na duna de transição entre a área erosional e a relativamente estável, denominada como Però-1 e a outra na pós-berma de assentamento, denominada Però-2. Os sedimentos foram coletados na face superior com raspagem superficial no limite superior das dunas.

5. CONDICIONANTES NATURAIS EM AREIAS

As dunas costeiras estão sujeitas a constantes variações nas condições de umidade e de salinidade, que são influenciadas pela velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura ambiente, pluviosidade e exposição à névoa salina. Estas condições influenciam na erodibilidade dos sedimentos, isto é, o aumento da umidade e da salinidade promove maior agregação das partículas, dificultando a sua remoção.

5.1. Salinidade

A salinidade é uma medida da quantidade de sais existentes em massas de água naturais. A forma mais simples de descrever a salinidade é como a razão entre a quantidade total de sólidos (em massa) dissolvidos e a massa da água que lhe serve de solvente, ou seja, pode ser expressa g/kg que daria uma equivalência de 1 % para 10 g/kg. Por exemplo, em 1 quilograma de água do mar há em média 35 gramas de compostos dissolvidos, chamados

sais inorgânicos, ou seja, 96,5% da água do mar é constituída de água pura e 3,5% de sais ou 35 partes por mil. Já dentro dessa parcela dos sais inorgânicos o mais abundante é o cloreto de sódio (NaCl) que corresponde a 86% da proporção total (RIBE, 1975).

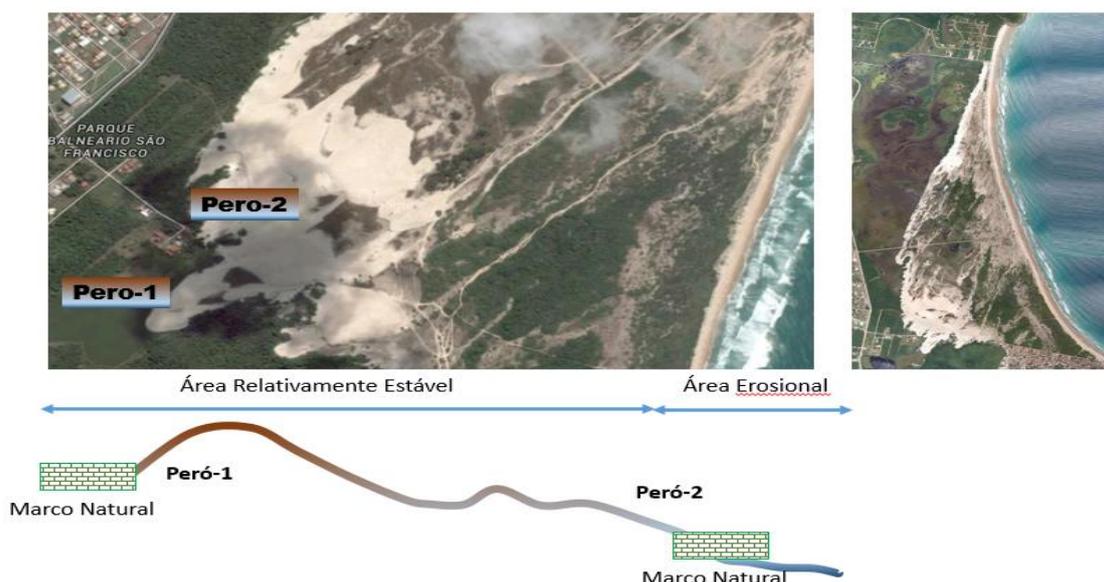


Figura 2. Levantamento do perfil transversal e pontos de amostragem de sedimentos em Cabo Frio. Na Tabela 1 são apresentados os tamanhos dos grãos dos pontos amostrados.

Tabela 1.- Análise granulométrica comparativa dos sedimentos superficiais analisados.

Amostra	Referencial para tamanho do grão de areia		
	0,6 mm (Grossa)	0,2 mm (Média)	0,06 mm (Fina)
Peró-1	0	55	44
Peró-2	0	41	59

O nível de salinidade da água tende a aumentar nas épocas mais quentes e secas do ano devido à maior evaporação da água. A água do mar finamente vaporizada pela força da arrebentação das ondas ao longo da costa produz a denominada nevoa salina que permite que as pequenas gotas sequem e formem um pó salgado que pode ser soprado terra adentro. Esse sal, então, é levado para dentro do solo pela chuva ou simplesmente nele depositado (SUASSUNA, 2010).

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. 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. Na região superficial o controle da salinidade é determinado pelo balanço entre a precipitação e a evaporação. 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 (PICKARD, 1990).

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

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. Este valor submetido a temperatura de 15 graus Celsius e a pressão de uma atmosfera a concentração da solução padrão de KCl é 32,4356 g por kg de água. Para calcular o conteúdo total de sal dissolvido em g por kg de água do mar pode ser utilizada a expressão $1,00510 \times S$, onde S é definido pela salinidade calculada pela equação anterior. Na Tabela 2, estão determinados os valores da salinidade (S) e os valores de sais dissolvidos associados ao valor de salinidade calculado.

Tabela 2. Valores de salinidade e sais dissolvidos.

Amostra	Condutividade microS/cm	K15	Salinidade ppm	Sais dissolvidos g/Kg de água
Peró-1	79,20	0,24	7,49	7,53
Peró-2	86,32	0,27	8,22	8,27

5.2 Análise da evaporação

SMAJSTRLA e ZAZUETA (2003) relatam que a perda de água por evaporação é aquela parcela de água que evapora das gotas pulverizadas pelo ar, e a perda por arraste diz respeito à água carregada pelo vento. Os principais fatores que interferem nos valores de perdas de água por evaporação e arraste, nas dunas costeiras, são a umidade relativa do ar, temperatura do ar e da água e a velocidade do vento.

Evaporação e evapotranspiração ocorrem quando a água líquida é convertida em vapor e transferida à atmosfera, em razão do ingresso de energia no sistema, geralmente a radiação solar. Esta transferência ocorre fisicamente, nas formas de difusão molecular e turbulenta. Exemplificando, se existir em um ambiente uma forte diferença de pressão de vapor entre um ponto e outro, provocado pela radiação solar, etc., essa diferença provoca um aumento da umidade relativa na vizinhança entre eles pelo processo de difusão, onde busca-se o equilíbrio da pressão de vapor entre os pontos. Este ar não fica saturado devido ao efeito do vento que transporta a umidade e renova o espaço, caracterizando um processo de advecção.

Conceitualmente, advecção é a mudança de estado por ação de um agente externo, difusão é a mudança de estado pelas diferenças dos gradientes de seus próprios elementos e a dispersão é a combinação destes dois processos (SMAJSTRLA e ZAZUETA, 2003).

Este trabalho teve os objetivos de simular as perdas de água por evaporação por meio de testes de laboratório a temperatura ambiente. A Tabela 3 detalha os cálculos referentes ao início e fim da evaporação, assim como massa de sal para cada amostra analisada. Estes resultados correspondem à massa de água evaporada nas amostras misturadas com água destilada ou areia com ausência de sal, com areia com teor médio de 1,80g de sal (NaCl) concentrado na solução; e areia com teor de 3,50g de sal (NaCl) concentrado na solução. Durante a evaporação, a concentração da solução aumenta, portanto é conveniente calcular a concentração de sal por massa de areia.

Tabela 3. Resultados dos principais parâmetros associadas à evaporação.

NaCl inicial = 0 ‰		0 g _{sal} /g _{água}					
amostra	M(inicial)(g)	M(seca ao ar)(g)	M(seca na estufa)(g)	M(placa)(g)	M(areia seca + sal)(g)	M(final)(g)	
Peró 1	272,26	224,91	224,77	40,90	183,87	0,14	
Peró 2	262,31	211,50	211,44	39,65	171,79	0,06	
NaCl inicial = 18 ‰		0,018 g _{sal} /g _{água}					
amostra	M(inicial)(g)	M(seca ao ar)(g)	M(seca na estufa)(g)	M(placa)(g)	M(areia seca + sal)(g)	M(final)(g)	
Peró 1	265,05	219,1	218,92	37,66	181,26	0,18	
Peró 2	258,52	218,19	218,11	43,00	175,11	0,08	
NaCl inicial = 35 ‰		0,035 g _{sal} /g _{água}					
amostra	M(inicial)(g)	M(seca ao ar)(g)	M(seca na estufa)(g)	M(placa)(g)	M(areia seca + sal)(g)	M(final)(g)	
Peró 1	265,70	218,03	217,85	37,78	180,07	0,18	
Peró 2	274,56	224,77	224,65	41,68	182,97	0,12	

Estes resultados correspondem à massa evaporada de água nas amostras misturadas com água destilada, com soluções de concentrações iniciais iguais a 18 e 35 partes por mil de cloreto de sódio (NaCl). Como ressaltado para as amostras de areia do Perú, é conveniente calcular a concentração de sal por massa de areia, pois, a concentração da solução aumenta durante a evaporação. A variação da temperatura e da umidade foi considerada no cálculo dos valores médios nos intervalos de medida da evaporação, para permitir o cálculo das taxas de evaporação relacionadas a esses valores médios, realizados no laboratório.

Os gráficos da Figura 3 ilustram a variação da massa de água evaporada por unidade de área e a saturação, todos por unidade de tempo, para os três tipos de ensaios, a saber, com água destilada, 18 e 35 partes por mil de NaCl na solução.

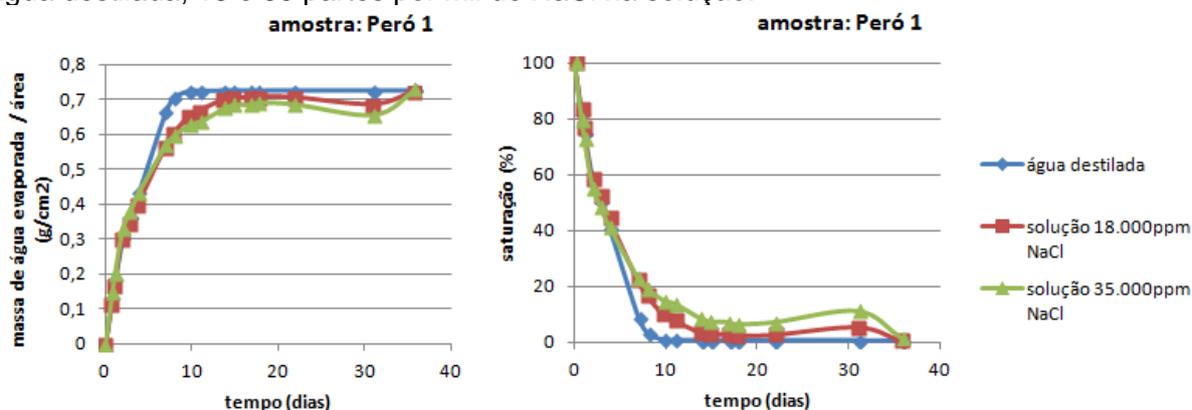


Figura 3. Massa de água evaporada e valores de saturação ao longo do tempo na amostra Perú-1.

A partir das análises gráficas dos ensaios realizados em laboratório verificou-se que, nos testes de evaporação de água dos poros que em todas as amostras com salinidade maior apresentaram uma maior retenção de água. Sendo assim, amostras com maior salinidade apresentam uma maior sucção osmótica.

5.3 Efeitos da sucção

Segundo MARINHO (2000), a sucção pode ser definida 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, aumentando ou reduzindo o grau de saturação. A sucção é normalmente expressa como pressão em Pascal (Pa). Utiliza-se também carga de pressão para representar o estado de pressão da água. Em

geral, a sucção dos solos é dividida em duas parcelas, a matricial ou mátrica e a osmótica. A componente matricial está relacionada com a matriz do solo, ou seja, ao tipo de partículas e seu arranjo estrutural, que determina a geometria dos poros e garantas, e com a tensão superficial da água. A componente osmótica está relacionada à composição química da água do solo. A sucção total é a soma destas duas parcelas.

Sucção osmótica: é uma parcela da sucção total no solo, que é composta pela sucção mátrica e pela sucção osmótica, e se deve à presença de sais no fluido dos poros. A sucção osmótica pode atuar em solos saturados ou não saturados.

Sucção mátrica: atua em solos não saturados, em função da tensão superficial da água e da curvatura dos meniscos formados entre os grãos sólidos.

5.3.1 Técnica do papel filtro

Uma das principais relações constitutivas utilizadas na interpretação do comportamento do solo não saturado é sua curva característica, a qual relaciona a quantidade de água presente dentro dos poros do solo e a sucção. Dentre os equipamentos e métodos utilizados para a determinação desta curva, a técnica do papel filtro tem se destacado por ser um método economicamente viável, de simples execução e que abrange uma faixa de sucção relativamente ampla (30-30.000 kPa), além de permitir a determinação das duas parcelas da sucção. (AL-KHAFAF, 1974).

Entretanto, por sua simplicidade, o método pode levar a erros devido a descuidos na sua execução ou interpretação dos resultados. A sua simplicidade muitas vezes leva o usuário a utilizá-la de forma descuidada. Isto tem induzido a erros e criado certas dúvidas sobre o método. Uma descrição detalhada do método pode ser encontrada em MARINHO (1994) onde são abordados os seguintes aspectos: tempo de equilíbrio, interação entre o solo e o papel e calibração do papel filtro. A norma ASTM D5298-10 (ASTM, 2010) descreve o procedimento do ensaio e fornece a curva de calibração de dois papéis filtro.

O método do papel filtro para medida de sucção é baseado no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso com deficiência de umidade é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor, ou seja, o papel passa a absorver certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção. A técnica consiste em colocar em contato comum a amostra de solo um pedaço de papel filtro específico até que seja estabelecido o equilíbrio de umidade entre eles.

Tendo-se a relação entre sucção e umidade do papel filtro, isto é, a curva de calibração, a sucção do solo pode ser obtida. O estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém conteúdos de umidade diferentes. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção da correta sucção (MARINHO, 1994).

A disposição do papel filtro na medição de sucção mátrica fica em contato com o solo e atua como uma membrana permeável à água e solutos, ou seja, a solução intersticial é permitida de se mover através do papel filtro junto com a água absorvida, a transferência de água do solo para o papel é feita por capilaridade. Dois papéis filtro, em porções com área superior a 66cm² são colocados em contato direto com a amostra para medir a sucção mátrica, como mostra a sequência da Figura 4.



Figura 4. Etapas de preparação das amostras para a sucção mátrica.

No caso da medição de sucção total, o papel não fica em contato com o solo e, então, o ar que fica entre o papel filtro e o solo atua como membrana semipermeável. A transferência aqui é feita através de vapor, e o vapor antes de ser absorvido pelo papel filtro deve superar as forças matricial e osmótica para sair do solo. Foi colocado um espaçador de plástico entre o solo e o papel de filtro em porções com área superior a 66 cm^2 , a fim de não permitir o contato direto entre o papel filtro e o solo, como mostra a sequência de fotos na Figura 5.

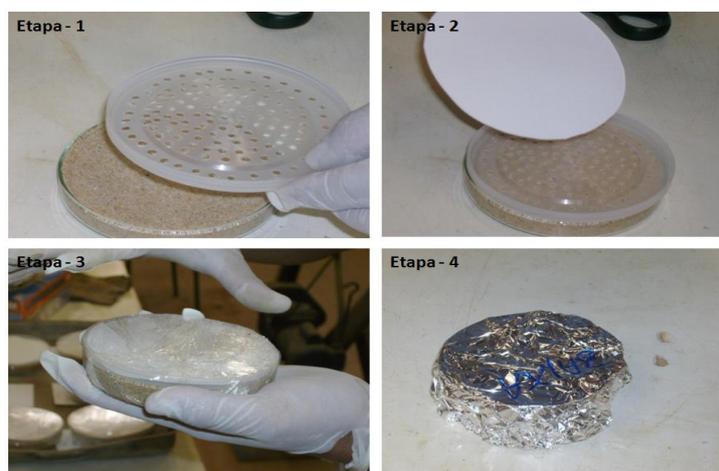


Figura 5. Etapas de preparação das amostras para a sucção total.

Para o papel filtro *Whatman* Nº 42, utilizado nos ensaios de sucção, a umidade inicial no estado seco ao ar é aproximadamente 6%, isto permite medições de sucção de zero até 29MPa. Esta é a máxima sucção que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do solo.

Após o conjunto ser hermeticamente fechado, foi deixado ao tempo de equilíbrio de 7 a 10 dias. Após este período, procedeu-se o cálculo de umidade dos papéis-filtro pela equação 1 e da umidade do solo, pela equação 2 e conseqüentemente foram calculadas a sucção matricial através das equações 3 e 4 e a sucção total pelas equações 5 e 6 de Leong et. al (2002). A sucção matricial e total são estimadas por uma correlação com a umidade do papel filtro (W_{pf}), obtida da calibração com outras medidas diretas da sucção, reversando o cálculo da sucção osmótica pela equação 7.

$$W_{pf} (\%) = \frac{Massa_{umida} - Massa_{seca}}{Massa_{seca}} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{solo} (\%) = \frac{Massa_{agua}}{Massa_{solidos}} \times 100\% \quad (2)$$

Sucção Mátrica em kPaPara umidade $W_{pf} \geq 47\%$:

$$Sucção (kPa) = 10^{(2,909 - 0,0229 W_{pf})} \quad (3)$$

Para umidade $W_{pf} < 47\%$:

$$Sucção (kPa) = 10^{(4,945 - 0,0673 W_{pf})} \quad (4)$$

Sucção Total em kPaPara umidade $W_{pf} \geq 26\%$:

$$Sucção (kPa) = 10^{(8,778 - 0,222 W_{pf})} \quad (5)$$

Para umidade $W_{pf} < 26\%$:

$$Sucção (kPa) = 10^{(5,31 - 0,0879 W_{pf})} \quad (6)$$

Sucção total em kPa

$$Sucção_{total} = Sucção_{mátrica} + Sucção_{osmótica} \quad (7)$$

Para a montagem do papel de filtro *Whatman* N° 42, usa-se pinças para manusear os papéis-filtro, previamente cortados com o diâmetro das placas. Coloca-se o papel-filtro no topo e acondiciona-se a placa como anteriormente explicado, esperando-se de 10 dias tanto para a sucção matricial como para a sucção osmótica para equalização com o papel-filtro.

Após esse período, retira-se o envoltório de cada placa, numeradas e previamente pesadas. Abre-se a parte de cima de cada placa, pegar o papel-filtro com pinça para efetuar a pesagem, que deve ser bem criteriosa, dos papéis-filtro conforme trajetórias de umedecimento e secagem ao ar.

O papel-filtro é mantido sobre a balança e o peso é anotado a cada 10s, de 10 a 60s após retirado da placa, obtendo-se assim uma trajetória de secagem ao ar; então, é seco na estufa por um mínimo de 2 horas a 105-110° C, e novamente pesado a cada 10s, de 10 a 60s após retirado da estufa, obtendo-se assim uma trajetória de umedecimento ao ar. A curva descrita pelos pesos anotados a cada 10s é extrapolada para o tempo 0, obtendo-se assim o peso do papel-filtro logo após ser retirado do contato com a amostra ou da estufa, conforme o caso.

Procede-se então aos cálculos de peso dos papéis pela raiz do tempo, que relacionados ao peso de cada placa antes e após a secagem na estufa, e aos índices físicos, darão os resultados de sucção versus umidade do solo.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da sucção matricial e total para o Sistema de Dunas de Cabo Frio medidos a partir do condicionamento do grau de saturação a temperatura normal das placas de areias, o que implica grau de umedecimento normal associado à temperatura ambiente.

Tabela 4. Resultados da sucção total, mátrix e osmótica do Sistema de Dunas de Cabo Frio.

0 ppm NaCl															
Estágio 1 de Saturação					Estágio 2 de Saturação					Estágio 3 de Saturação					
TOTAL		MÁTRIX		OSMÓTICA	TOTAL		MÁTRIX		OSMÓTICA	TOTAL		MÁTRIX		OSMÓTICA	
Umida	Seca	Umida	Seca		Umida	Seca	Umida	Seca		Umida	Seca	Umida	Seca		
Peró-1	0,9060	0,7225	1,6526	0,6725		0,8973	0,7282	1,3720	0,6662		0,7586	0,7018	0,6935	0,6529	
	Wpf (%)	25,40	Wpf (%)	145,74		Wpf (%)	23,22	Wpf (%)	105,94		Wpf (%)	8,09	Wpf (%)	6,22	
Sucção (kPa)		1195,43		0,37	1195,05		1857,02		3,04	1853,98		39681,09		33612,51	6068,58
18 ppm NaCl															
Estágio 1 de Saturação					Estágio 2 de Saturação					Estágio 3 de Saturação					
TOTAL		MÁTRIX		OSMÓTICA	TOTAL		MÁTRIX		OSMÓTICA	TOTAL		MÁTRIX		OSMÓTICA	
Umida	Seca	Umida	Seca		Umida	Seca	Umida	Seca		Umida	Seca	Umida	Seca		
Peró-1	0,8199	0,6850	1,6646	0,6864		0,8359	0,7164	1,5960	0,6911		0,7556	0,7080	0,7114	0,6706	
	Wpf (%)	19,69	Wpf (%)	142,51		Wpf (%)	16,68	Wpf (%)	130,94		Wpf (%)	6,72	Wpf (%)	6,08	
Sucção (kPa)		3792,69		0,44	3792,25		6978,68		0,81	6977,86		52364,13		34319,41	18044,72
35 ppm NaCl															
Estágio 1 de Saturação					Estágio 2 de Saturação					Estágio 3 de Saturação					
TOTAL		MÁTRIX		OSMÓTICA	TOTAL		MÁTRIX		OSMÓTICA	TOTAL		MÁTRIX		OSMÓTICA	
Umida	Seca	Umida	Seca		Umida	Seca	Umida	Seca		Umida	Seca	Umida	Seca		
Peró-1	0,8823	0,7340	1,9575	0,8351		0,8289	0,7279	1,0044	0,7941		0,7492	0,7006	0,7919	0,7430	
	Wpf (%)	20,20	Wpf (%)	134,40		Wpf (%)	13,88	Wpf (%)	26,48		Wpf (%)	6,94	Wpf (%)	6,58	
Sucção (kPa)		3420,08		0,68	3419,41		12312,34		1454,48	10857,87		61330,92		31773,86	29557,06

5.4 Determinação da curva capilar pelo modelo de Brooks e Corey

O modelo de BROOKS e COREY (1964) para a curva capilar em função da pressão é expresso pelo grau de saturação efetivo (S_e) expresso pelas equações 8 e 9.

$$S_e = \left(\frac{P}{P_a} \right)^{-\kappa} \quad (8)$$

$$S_e = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} \quad (9)$$

S_w = grau de saturação de água

S_{rw} = grau de saturação residual de água

P = pressão capilar, neste caso, igual á sucção (= $u_a - u_w$)

P_a = pressão de entrada de ar

κ = expoente determinado experimentalmente.

Escrevendo a pressão em função da saturação resulta na equação 10.

$$P = P_a \cdot S_e^{(-1/\kappa)} \quad (10)$$

Para as areias estudadas, a saturação residual de água pode ser considerada nula, então a saturação efetiva é igual à saturação de água. Então, as equações 9 e 10 podem ser reescritas como:

$$S_w = \left(\frac{P}{P_a} \right)^{-\kappa} \quad (11)$$

$$P = P_a \cdot S_w^{(-1/\kappa)} \quad (12)$$

Resumidamente são apresentados, na Tabela 5, os valores de Pa em Pascoal e k, calculados. Estes parâmetros foram determinados a partir do ajuste potencial entre os três pontos plotados em função do tipo de sucção e a saturação, como ilustrado na Figura 6.

Tabela 5. Valores de Pa e k, para todas as amostras em análise.

Amostras		0 ppm NaCl			18 ppm NaCl			35 ppm NaCl		
		Total	Mátrica	Osmótica	Total	Mátrica	Osmótica	Total	Mátrica	Osmótica
Peró-1	Pa	971,600	0,251	1212,100	4297,800	0,250	4572,500	4724,100	8,864	4726,000
	k	1,024	0,383	2,786	2,381	0,582	4,926	2,165	0,717	3,279
Peró-2	Pa	969,070	0,184	1208,400	3377,200	2,388	3768,800	4922,400	25,051	3628,400
	k	1,099	0,389	3,650	2,165	0,678	5,882	2,445	0,981	3,584

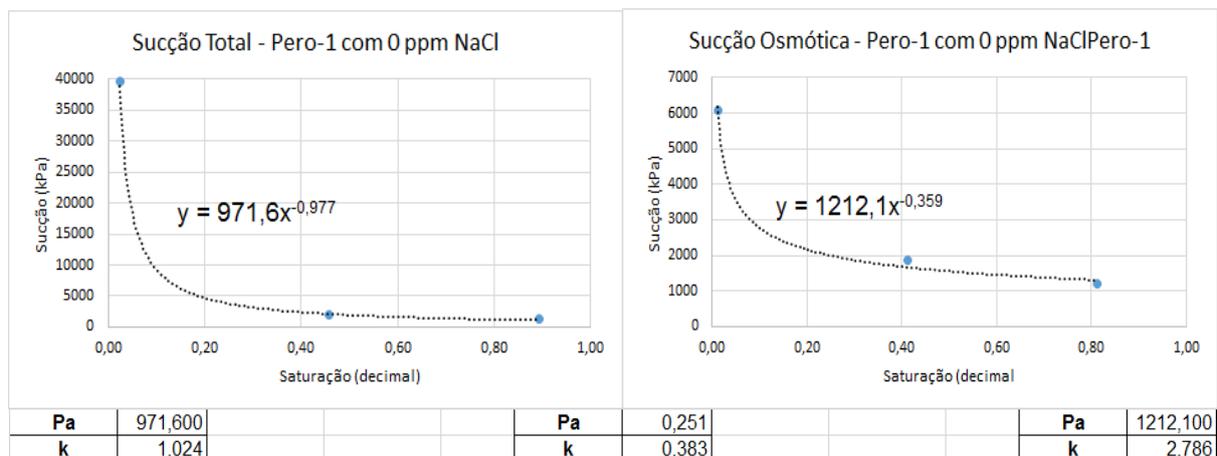


Figura 6. Ajuste das curvas para determinação dos parâmetros de Brooks e Corey

6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AREIAS

De acordo com DAS (2007), pode-se definir que a “resistência interna por área unitária que a massa de solo pode oferecer para resistir a rupturas e a deslizamentos ao longo de qualquer plano no seu interior” é a resistência ao cisalhamento. Quando se atinge o máximo de tensão se considera o rompimento do solo, mobilizando assim totalmente a resistência do solo. CAPUTO (2013) complementa que a tensão cisalhante máxima que um solo pode suportar sem sofrer rupturas é a resistência ao cisalhamento que o solo possui. Em outras palavras, cisalhamento é a ruptura dos solos e que geralmente não ocorre através da tensão de tração. Desta forma, podemos concluir que a capacidade que o solo tem em suportar cargas depende da resistência ao cisalhamento, conservando assim a estabilidade do solo.

6.1 Ensaio de Cisalhamento Direto

Na Tabela 6 é apresentado os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados para cada uma das amostras seleccionadas sem sal em Peró-1. A partir dos sete estágios dos ensaios, variando a carga vertical de 1kg até 7kg realizados sem a presença de sal foi obtido a envoltória do cisalhamento, seguindo os critérios da envoltória de *Mohr-Coulomb*, tendo assim, o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão (c) associado ao valor da arcotangente da função da envoltória. A Figura 7 está em concordância com a Tabela 6.

Tabela 6. Valores de tensão normal e de cisalhamento para amostra sem sal em Perú-1.

Peró-1	Tensões na ruptura			
	σ (Pa)	τ (Pa)	σ (kPa)	τ (kPa)
Estágio 1	4769,84	4007,23	4,77	4,01
2	9300,58	5635,90	9,30	5,64
3	21018,25	9709,52	21,02	9,71
4	17989,01	10921,91	17,99	10,92
5	23318,93	14410,13	23,32	14,41
6	32337,56	18472,39	32,34	18,47
7	44084,79	24737,33	44,08	24,74
Envoltória (reta de ajuste):				
c =		0,795 kPa		
tan(ϕ) =		0,539		
ϕ =		28,31 °		

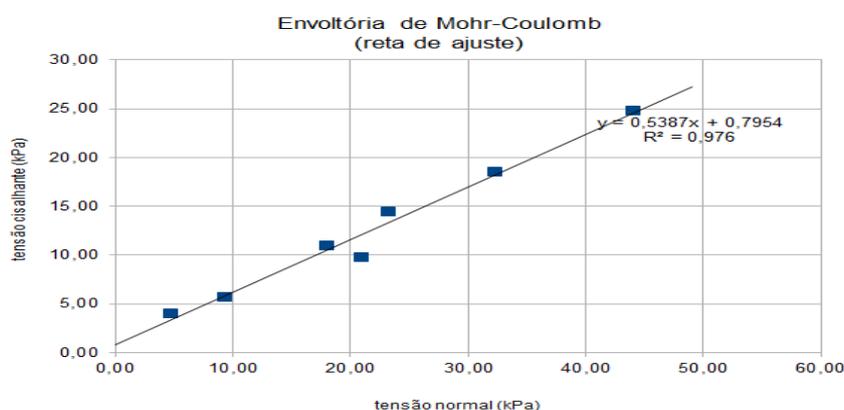


Figura 7. Ajuste de curvas entre as tensões para amostra sem sal de Perú-1.

6.2 Ensaio de cisalhamento direto da amostra Perú-1 com a presença de sal.

Neste tópico apenas será apresentado os resultados do ensaio de cisalhamento direto para as amostras de Perú-1 com solução de NaCl a 18.000ppm dissolvidos em água destilada. Isto se justifica pelos ensaios feitos no túnel de vento, que não será contemplado neste trabalho e que apenas foram testadas dunas com areias do Perú-1. Nesta situação foram modelados vários cenários, mas apenas utilizando areias do Perú-1, daí a necessidade dos ensaios com o intuito de aproximar o real ao que será visto nos testes, explicado em detalhes em outros trabalhos. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com a presença de sal, com diferentes cargas verticais de 1,01838 kgf, 2,1863kgf, e 3,1852kgf respectivamente com velocidades de 1 mm/min. A Figura 8 mostra a variação de tensão cisalhante com o deslocamento, tendo assim, uma tensão cisalhante variando de 2,8 kPa à 9kPa, aproximadamente.

Uma vez determinado os valores de tensão normal e de cisalhamento nos estágios 1, 2 e 3, Tabela 7, a partir dos testes realizados foram plotados esses pontos, e seguindo os critérios da envoltória de *Mohr-Coulomb*, foi possível determinar o ângulo de cisalhamento de aproximadamente 27,8 graus.

A partir dos três ensaios realizados com a presença de sal foi obtido a envoltória do cisalhamento tendo assim, o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão (c) com valor de 2,2214kPa e ϕ com o ângulo de 27,8°, associado ao valor da arcotangente de 0,5278 respectivamente (Figura 9).

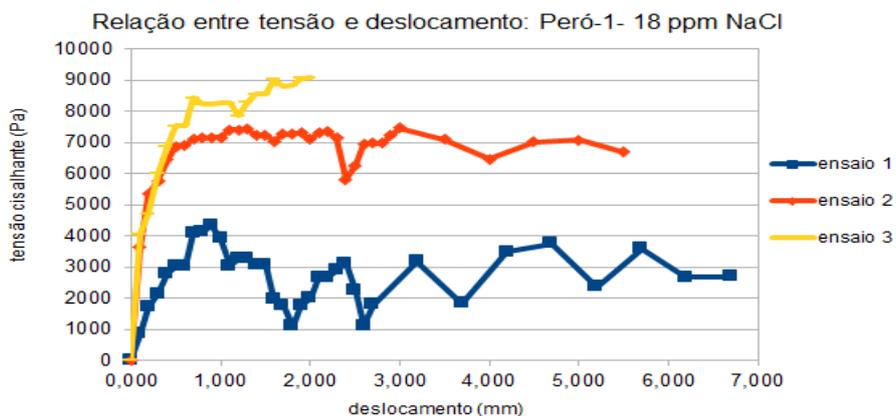


Figura 8. Comportamento do deslocamento da amostra em função da tensão de cisalhamento

Tabela 7. Valores das tensões de ruptura para Peró-1.

Estágio	Tensões na ruptura			
	σ	τ	σ	τ
	(Pa)	(Pa)	(kPa)	(kPa)
1	4616,28	4334,31	4,62	4,33
2	8560,02	7398,09	8,56	7,40
3	12373,99	8418,02	12,37	8,42

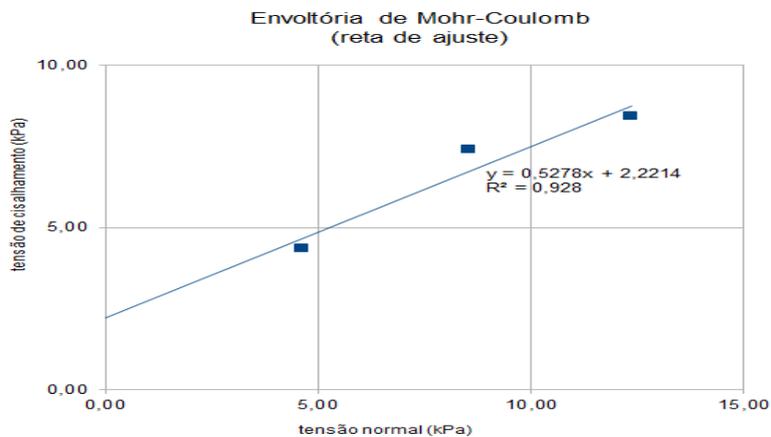


Figura 9. Envoltória de Mohr-Coulomb e sua respectiva reta de ajuste.

Em todos os ensaios realizados com a presença de sal nas amostras, após a retirada do anel superior da caixa, os sedimentos mantiveram-se significativamente estáveis (Figura 10), não ocorrendo o colapso observado nas amostras sem sal.

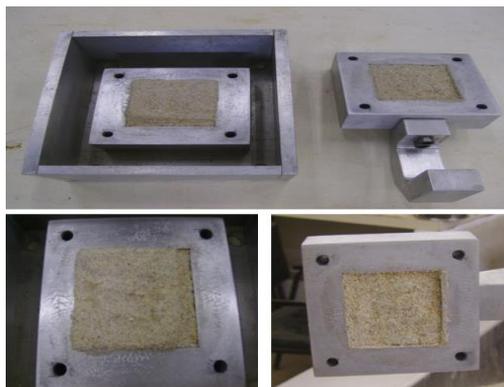


Figura 10. Amostra de areia com sal, após os ensaios de cisalhamento direto, Perú-1.

7. CONCLUSÕES

A partir das análises gráficas e ensaios realizados em laboratório conclui-se que, nos testes de evaporação de água dos poros das amostras com salinidade maior apresentaram uma maior retenção de água. Estes resultados correspondem à massa de água evaporada nas amostras misturadas com água destilada e areia com ausência de sal, com areia com teor médio de 1,80g de sal (NaCl) concentrado na solução; e areia com teor de 3,50g de sal (NaCl) concentrado na solução.

Os resultados obtidos pela técnica do papel filtro apresentaram pouca dispersão e aproveitamento de praticamente todos os pontos, mostrando-se eficiente na determinação da curva característica dos solos estudados. O método mostrou-se eficiente na obtenção dos dados para as curvas de sucção em função da retenção de água dos solos. As curvas características obtidas em diferentes trajetórias mostraram comportamento típico de solos arenosos permitindo determinar por ajuste gráfico os parâmetros de Brooks e Corey. Os resultados obtidos permitiram interpretar o comportamento mecânico e hidráulico da retenção de água de um solo arenoso fino sob variação no teor de umidade, assim como permitiram interpretar o comportamento da retenção de água de areias finas sob variação da salinidade.

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram verificar a relação entre o aumento da sucção com o aumento da velocidade de absorção de água nas amostras de solos estudados com granulometria diferentes. Observaram-se melhores correlações para os solos mais fino devidos provavelmente ao predomínio das sucções matriciais nestes solos.

Através dos ensaios de cisalhamento direto nos quais foi obtido o ângulo de atrito e coesão das amostras com e sem sal, vemos que a coesão variou muito pouco e o ângulo de atrito aumentou na amostra salina. Sendo assim, o sal tem um grande poder na erosão eólica da região podendo alterar o mecanismo de transporte de tais sedimentos erodidos. O tamanho dos grãos influencia no comportamento da areia, intervindo na resistência ao cisalhamento. O padrão encontrado revela que o efeito do tamanho médio dos grãos de areia é um importante fator local a ser considerado nas análises dos processos de transporte eólico. Não foi analisada a influência da densidade dos grãos ou da porosidade, pois todas as amostras apresentaram valores semelhantes para esses parâmetros. Através dos ensaios de cisalhamento direto das amostras com e sem sal da areia de Perú-1, vemos que a coesão variou significativamente e o ângulo de atrito permaneceu praticamente igual. Sendo assim, o sal tem um grande poder na erodibilidade eólica da areia, podendo alterar o mecanismo de transporte dos sedimentos erodidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, M.B. & Price, W. (1994). A Coastal, Estuarial and Harbour Engineers' Reference Book. 2ed. E & FN Spon, London.
- Al-Khafaf & Hanks. (1974). Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential - Soil Science, vol.117, n.4 - pp.194-199.
- Arens, s.m., van Boxel, j.h., Abuodha, J.O.Z. (2002). Changes in grain size of sand in transport over a foredune. Earth Surface Processes and Landforms, 27, 1163-1175.
- Arens, S. M., Jungerius, P. D., Van Der Meu- Len, F. (2001). Coastal Dunes. In: Habitat conservation: Managing in Phisical Enviroments, p. 229-272.
- Bagnold, R.A. (1954). The physics of blown sand and desert dunes, 2 nd ed. London: Methuen, 265 p.
- Bascom, W. N. (1951). The relationship between sand-size and beach-face slope. Transmission of the American Geophysical Union, 32:866-874.
- Brooks, R. H. e Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. Hidrology Paper no 3, Civil Engineering Dep., Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Caputo, H. P., (2013). Mecânica dos Solos, Editora LTC, 6ª edição. São Paulo.
- Das, Braja M. (2007). Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução 6ª edição norteamericana, São Paulo: Thomson. 561 p.
- Goldsmith, V; Rosen P; & Gerter Y. (1990). Eolian transport measurements winds, and comparison with theoretical transport in Israeli coastal dunes. The study of coastal dunes. In: Nordstrom, K.F.; Psuty, N.P & Carter B. Coastal dunes Form and Process. Chichester: J. Willey. Cap v. p. 79 – 97.
- Komar, P. D. (1998). Beaches Processes and Sedimentation.2nd ed. USA: Prentice Hall Inc.
- Marinho, F.A.M. (1994). A técnica do papel filtro para medição da sucção. In: Encontro sobre Solos Não Saturados, Porto Alegre. RS. Anais, Porto Alegre/RS: CPGEC/UFRGS, 1995. p.112–125.
- Marinho, F.A.M. E Stuermer, M.M. (2000). The influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil. Geotechnical Special Publication 99. Edited by Charles D. Shackelford, Sandra L. Houston and Nien-Yin Chang. pp. 125-141.
- Pilarczyk, K. W. (1990). Coastal Protection. 1a ed. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, Holanda.
- Ribe R. L. and J. G. HOWE. An empirical equation relating seawater salinity, temperature, pressure and electrical conductivity. Marine Technology Sociely Journal, 9, 3-13, 1975.
- Short, A.D. (1999). Beach systems. In Short, A. D. Beach and shoreface morphodynamics. Jonh Wiley and Sons.
- Smajstrla, A.G.; Zazueta, F.S. (2003). Evaporation loss during sprinkler irrigation. Gainesville: Agricultural and Biological Engineering Department, 8 p.
- Suassuna, J. (2010). O processo de salinização das águas superficiais e subterrâneas no Nordeste Brasileiro. Fundação Joaquim Nabuco.
- Yaping Shao. (2008). Physics and Modelling of Wind Erosion, University of Cologne, Germany; Springer Science + Business Media B.V.Editorial Advisory Board.