

# FORMAÇÃO E DESTRUIÇÃO DE DUNAS SUSCITA RISCO PARA ZONA COSTEIRA URBANA. UMA ABORDAGEM DE CONFLITO

Mário Talaia<sup>1</sup>

## 1 Introdução

O estudo da morfologia dunar no seu conjunto e a sua análise pormenorizada em cortes permitem conhecer a dinâmica da movimentação de grãos de areia. A recolha de grãos de areia em postos experimentais permite estabelecer ligações com os ventos predominantes capazes de transportarem ou arrastarem grãos de areia para a formação de dunas. Conhecida a velocidade mínima para a movimentação de grãos de areia que alimentam uma duna é possível através de uma base de dados meteorológicos, conhecer os rumos do vento e número de horas por ano que a condicionam. Há riscos eólicos no movimento dos grãos de areia por determinarem, por exemplo, o avanço dos grãos de areia sobre áreas ocupadas pelo ser humano e a criação de corredores de risco que facilitam o avanço das águas do oceano.

É sabido que no decorrer do tempo o mundo das areias e a interpretação física de fenómenos associados ao movimento ou transporte de grãos de areia tem fascinado o ser humano, em geral, e até as crianças, em particular, gostam de brincar com o movimento de grãos de areia (BAGNOLD, 1973; OGAWA; BEDDOW, 1984; KUNII; LEVENPIEL, 1977; NORDMEIER, 2001).

É sabido que o vento não é um agente de intensidade permanente. A sua intensidade, sentido e direção são variáveis: uma consequência é o processo de transporte de areia resultar em deposição ou abate, ou seja, a areia transportada para alimentar uma duna pode ser deslocada em sentido inverso. Para a formação de dunas é necessário vento acima de determinada intensidade e haver uma fonte de cedência de grãos de areia, ou seja, uma zona onde haja disponibilidade para fornecimento de sedimentos arenosos, de grãos considerados finos capazes de serem transportados por ventos típicos.

A intensidade do vento gera uma força resistente ou de arrasto que pode descolar o grão de areia e depende do peso e figura geométrica do grão de areia. Na expressão que determina a força resistente ou de arrasto, a variável área define a superfície da secção reta na direção do vento (não se deve usar a área da superfície exterior do grão de areia).

Existem alguns tipos de transporte de areia resultantes da ação do vento, e que foram possíveis de observar na recolha de registos, nomeadamente: o transporte por arrasto quando os grãos de areia são arrastados pela superfície sem esta perder o contacto com a mesma; o transporte por saltitação quando a ocorrência é de curta

---

<sup>1</sup> Docente do Departamento de Física da Universidade de Aveiro - Portugal. E-mail: mart@ua.pt.

trajetória no ar e há queda de grãos de areia na superfície; e o transporte em suspensão quando há perda de contacto entre a superfície e os grãos de areia, permanecendo estes durante um longo período de tempo no ar.

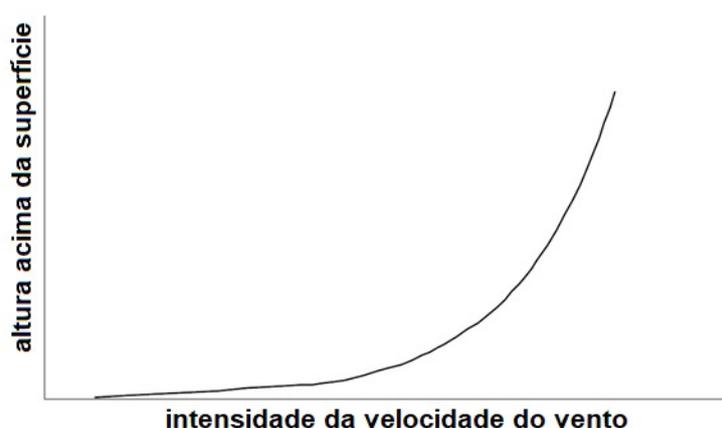
## 2. Teoria e critério Talaia

O movimento de areia é causado pela transmissão de impulso do vento, para os grãos de areia. O impulso é a quantidade de movimento,

$$I = mU \quad (1)$$

em que  $m$  representa a massa e  $U$  a velocidade.

A variação do impulso ao longo do tempo resulta numa força sobre a superfície. As moléculas do ar que colidem com os grãos de areia são sujeitas a fricção e posteriormente estas vão perder quantidade de movimento e desacelerar. As moléculas do ar desaceleradas colidem com as moléculas do ar que não foram desaceleradas das camadas superiores do ar e como resultado, as moléculas das camadas superiores vão desacelerar um pouco. Este efeito é mais pronunciado próximo da superfície. Consequentemente a média da velocidade das moléculas sofre um incremento com a altitude como se mostra na Figura 1.



**Figura 1.** Perfil vertical da velocidade do vento.

Quando as moléculas do ar parecem mover-se paralelamente à superfície o movimento pode ser considerado de “escoamento laminar”. Este tipo de escoamento ocorre apenas quando a intensidade da velocidade do vento é muito pequena e não existe movimento ou transporte de grãos de areia.

Na situação em que se regista um vento de corte a aumentar, as camadas paralelas de escoamento deixam de existir e o escoamento torna-se turbulento. Como consequência deste tipo de “escoamento turbulento”, surge uma tensão de corte,  $\tau$ , que é a força que o vento exerce na superfície da areia, e o seu valor é determinado usando a expressão (Prandtl citado por TERWINDT, 1977),

$$\tau = \rho_a l^2 \frac{dU}{dz} \quad (2)$$

onde  $\rho_a$  representa a massa volúmica do ar,  $l$  o comprimento da mistura e  $dU/dz$  o gradiente vertical da velocidade.

Se a constante de Von Kármán for introduzida na expressão (2), por manipulações matemáticas, é possível escrever,

$$U_z = 5,75 \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} \log\left(\frac{z}{k_0}\right) \quad (3)$$

em que  $k_0$  representa a altura acima da superfície onde a velocidade do vento se iguala a zero e o valor de  $\sqrt{\tau/\rho_a}$  pode ser substituído pelo valor da velocidade de corte  $U_*$ . Nestes termos, a expressão (3) pode ser reescrita,

$$U_z = 5,75 U_* \log\left(\frac{z}{k_0}\right) \quad (4)$$

ou, como mostra HOLTON (2004),

$$U_z = 2,5 U_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5)$$

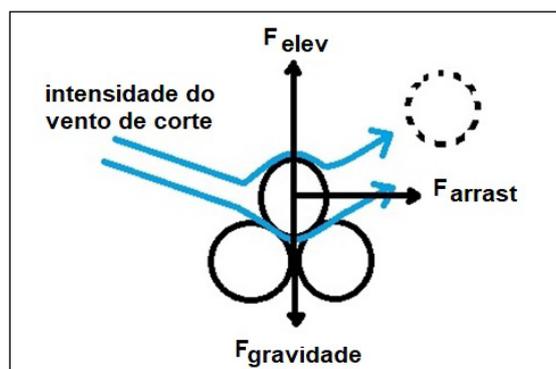
em que  $z_0$  é a rugosidade da superfície onde o vento de corte atua.

As expressões (4) e (5) indicam que o vento tem um perfil logarítmico. Dada a dificuldade em usar a Lei Logarítmica e pela facilidade de aplicação da Lei da Potência, neste trabalho avaliou-se o parâmetro  $\alpha$  para dois níveis de medida, através da expressão,

$$\frac{U_{z1}}{U_{z2}} = \left(\frac{z1}{z2}\right)^\alpha \quad (6)$$

em que  $z1$  representa a altura ao nível 1,  $z2$  a altura ao nível 2,  $U_{z1}$  a velocidade no nível 1 e  $U_{z2}$  a velocidade ao nível 2. O expoente  $\alpha$  depende apenas da rugosidade da superfície terrestre local e da estabilidade atmosférica. Há tabelas na literatura de especialidade onde se pode consultar o valor de  $\alpha$ . Neste trabalho usou-se  $\alpha=0,15$ .

A Figura 2 mostra um diagrama de forças atuantes num grão de areia. A interpretação física da ilustração da figura sugere que quando o ar flui sobre a superfície da areia, a tensão de corte exerce uma série de forças na partícula de areia solta. Estas forças são a força que condiciona o valor da força de corte,  $F_{arrast}$ , paralela à superfície, a força de elevação,  $F_{elev}$ , e a força gravítica,  $F_{gravidade}$ , sendo as duas últimas perpendiculares à superfície.



**Figura 2.** Diagrama de forças que atuam num grão de areia.

A força de corte ou de arrastamento depende do gradiente de pressão que é criado à volta do grão de areia e da rugosidade da sua superfície. De acordo com BAGNOL (1973) é determinada a partir da expressão,

$$F_{\text{arrast}} = \beta d^2 \rho_a U_*^2 \leftrightarrow F_{\text{arrast}} = \frac{1}{2} C_d \rho_a A U^2 \quad (7)$$

onde  $\beta$  é uma constante empírica,  $d$  o diâmetro médio do grão de areia,  $C_d$  coeficiente de forma do grão de areia,  $A$  a área projetada segundo o movimento,  $m$  a massa de ar e  $U$  a velocidade da corrente gasosa.

De acordo com Gelbart (1986), para a determinação do diâmetro médio da areia usa-se a expressão

$$d = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \quad (8)$$

em que  $d$  representa o diâmetro médio das partículas de areias,  $x_i$  a fração do peso das partículas de diâmetro  $d_i$ , em cada gama considerada. Estas variáveis são determinadas a partir do empacotamento de peneiros em vibração (máquina com vibração que usa empacotamento de vários peneiros de diferentes malhas) e com diferentes calibres.

Se a massa volúmica do grão de areia (sólido)  $\rho_s$  e a massa volúmica aparente  $\rho_{\text{ap}}$  forem conhecidas, é possível determinar o valor da porosidade ou espaços vazios entre as partículas de areia. De acordo com Geldart (1986) a massa volúmica aparente e massa volúmica da areia estão relacionadas através da expressão,

$$\rho_{\text{ap}} = \rho_s (1 - \varepsilon) \quad (9)$$

em que  $\varepsilon$  representa a porosidade. Através de manipulações matemáticas, a porosidade é determinada por,

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{ap}}}{\rho_s} \quad (10)$$

A força de elevação,  $F_{\text{elev}}$ , é devida ao forte gradiente de velocidade junto à superfície. Este gradiente causa uma força de sucção na direção do gradiente de velocidade, ou seja, os grãos sofrem uma força ascendente na direção do semieixo positivo do eixo dos  $zz$  perpendicular à superfície. Muitas vezes a força de elevação é desconsiderada. A força de elevação pode ser calculada a partir da expressão (ADEL, 1987),

$$F_{\text{elev}} = \frac{5,08}{\pi} \rho_a \vartheta^{0,5} d^2 \left( \frac{U_*}{k} \right) \left[ \frac{\ln \left( \frac{z}{z_0} \right)}{z^{0,5}} \right] \quad (11)$$

onde  $\vartheta$  representa a viscosidade cinemática (cociente entre a viscosidade dinâmica e a massa volúmica do fluido). Deve-se dar atenção à aplicação de (11), ou seja, na prática quando não há transporte de areia a força de elevação perde intensidade (diminui rapidamente) devido ao ar passar por baixo dos grãos de areia.

A força devida a ação da gravidade que cada partícula de areia exerce sobre uma vizinha, é função da densidade e do volume de cada partícula de areia. Quando é assumido um corpo geométrico esférico a força de gravidade pode ser obtida de acordo com Bagnold (1973),

$$F_{\text{gravidade}} (= P) = \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho_a) g d^3 \quad (12)$$

em que P representa o peso do grão de areia.

A velocidade de corte crítica é a velocidade de corte necessária para provocar o movimento da areia, e pode ser avaliada através de manipulações matemáticas das forças atuantes na areia (ver a Figura 2). O movimento da areia começa quando a conjugação do valor da força resultante a partir da força de arrasto (ou força de corte) e da força de elevação é superior à intensidade do peso da areia (HIJMA; LODDER, 2004). Quando é desprezada a força de elevação, a velocidade de corte crítica pode ser obtida por (ADEL, 1987),

$$U_{*critica} = \left[ \left( \frac{\pi}{6} \right) \left( \frac{\tan \theta}{\beta} \right) \right]^{0,5} \left[ \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d \right]^{0,5} \quad (13)$$

em que  $\theta$  representa o ângulo onde é valorizado o atrito no grão de areia. O valor deste ângulo é cerca de  $34^\circ$ . Quando o diâmetro médio do grão de areia for superior a  $200\mu\text{m}$ , o valor do primeiro fator do segundo membro da expressão (13) é aproximadamente 0,1. Para a fase de "salto" da areia, este fator toma o valor de 0,085 (BAGNOLD, 1987). Quando não se despreza a força de elevação a determinação da velocidade de corte crítica torna-se um problema de difícil solução.

Talaia (2002) mostrou experimentalmente que para partículas de areia de diâmetro superior a  $150\mu\text{m}$ , a expressão empírica que contempla não só os aspetos físicos do fenómeno físico bem como os dados experimentais, numa situação de leito de areia fluidizado, é dada por,

$$Re_{mf} = [28,7^2 + 0,0428Ga]^{0,5} - 28,7 \quad (14)$$

onde Ga representa o número de Galileu (também conhecido por número de Arquimedes) e  $Re_{mf}$  o número de Reynolds, na condição mínima de fluidização. Quer o número de Galileu quer o número de Reynolds são parâmetros adimensionais que caracterizam as propriedades das partículas de areia, do ar e do escoamento, respetivamente. O número de Galileu é obtido a partir da expressão,

$$Ga = \frac{\rho_a d^3 (\rho_s - \rho_a) g}{\mu_a^2} \quad (15)$$

e o número de Reynolds é obtido a partir da expressão,

$$Re_{mf} = \frac{\rho_a U_{mf} d}{\mu_a} \quad (16)$$

Conhecidas as propriedades físicas do ar é possível prever o valor da velocidade mínima de fluidização,  $U_{mf}$ .

Para conhecer o início do transporte de grãos de areia, o autor desenvolveu um modelo a que chamou "critério Talaia" por aplicação de uma análise dimensional (KAY;

NEDDERMAN, 1985) uma expressão capaz de interpretar fisicamente o momento do início de transporte de um grão de areia sob a ação do vento.

É oportuno referir que a utilização de análise dimensional a um fenómeno físico é uma ferramenta muito poderosa para se “adivinhar” ou “formular” expressões que respondam às condições físicas de uma questão problema (TALAIA, 2000; VIEIRA, 2003).

O autor desenvolveu um modelo de previsão considerando a situação física (início de transporte de um grão de areia sob a ação do vento) para interpretar fisicamente o fenómeno e ser capaz de identificar as variáveis envolvidas. O ponto de partida para a análise dimensional foi admitir que para o valor de  $g$  (aceleração local) e conhecidos o diâmetro equivalente  $d$  do grão de areia, a massa volúmica do grão de areia, a massa volúmica do ar, a viscosidade dinâmica do ar, o valor da intensidade da velocidade do ar,  $U$ , pode ser previsto a partir da função,

$$U = U(\rho_s, \rho_a, \mu_a, d, g) \quad (17)$$

A análise dimensional da relação (17) passa a ser obtida segundo as técnicas tradicionais (ver por exemplo TALAIA, 2000; KAY; NEDDERMAN, 1985; TALAIA, 2002). Havendo na expressão (17) seis variáveis envolvidas e sendo três as grandezas fundamentais (massa, comprimento e tempo), devem escolher-se três variáveis principais a partir das quais se adimensionalizam as outras duas. Através de manipulações matemáticas e fazendo a “linhagem” com dados registados experimentalmente pelo autor, é possível encontrar o modelo de previsão para a velocidade mínima capaz de iniciar o transporte de uma areia de diâmetro médio  $d$  com um coeficiente de correlação de Pearson de 0,9995 (critério Talaia),

$$U \geq 1,034 \times 10^5 \frac{\mu_a^{0,23} \rho_a^{0,77} g^{0,39} d^{0,16}}{\rho_s} \quad (18)$$

A expressão (18) mostra que conhecidas as propriedades físicas do fluido (neste caso ar), a massa volúmica e diâmetro do grão de areia, é possível avaliar a intensidade da velocidade mínima capaz de dar início ao movimento dos grãos de areia.

### 3 Metodologia e experimentação

A investigação foi realizada em laboratório e na praia da Costa Nova, esta localizada no distrito de Aveiro (Litoral centro) e integrada no troço costeiro Espinho - Cabo Mondego (Portugal). É uma praia adjacente, banhada a Oeste pelo oceano Atlântico e está inserida sobre uma restinga, resultante da acumulação de sedimentos durante a formação da Laguna de Aveiro, com início de formação, por volta do século X até ao século XVIII. A Laguna de Aveiro comunica com o mar, através de um canal aberto artificialmente, de acesso ao Porto Marítimo de Aveiro. A praia, de natureza arenosa, tem associado um cordão dunar de largura variável que separa a Laguna do mar. O cordão dunar apresenta alturas que variam entre os 3 e os 12 metros e alberga espécies de flora muito importantes, na preservação e sustentação de areias que o constituem. Na retaguarda do cordão dunar, há aglomerados de prédios e moradias, bem como estabelecimentos de comércio, entre outros. É de particular importância referir que esta zona da costa portuguesa, está interrompida por várias estruturas de defesa costeira, como esporões e enrocamentos, sendo de maior importância e influência o Molho Norte da Barra. Pelo referido, a destruição de dunas suscita risco para a zona urbana.

A recolha de amostras (areia) na zona dunar foi realizada superficialmente, na época do verão, nas seguintes coordenadas geográficas aproximadas de N40°37,968' e W008°44,968'.

As amostras de areia foram secas numa estufa a uma temperatura de 150°C e posteriormente, com recurso ao uso de um peneiro vibratório foram determinados diâmetros médios de grãos de areia usando diferentes peneiros com diferente malha Mesh.

Com o auxílio de um anemómetro e bússola de marinheiro, no local da recolha, registaram-se temperatura do ar, intensidade do vento e rumo em duas alturas, 20cm e a 150cm da superfície dunar.

A Figura 3 mostra como uma amostra de areia é transportada pela ação do vento numa queda livre por ação da gravidade (é bom realçar que a zona dunar em estudo, no verão, é sacudida por nortadas intensas).



**Figura 3.** Desvio da posição vertical de queda das areias, devido à ação do vento.

Para compreender como se processa o transporte de areia, usaram-se duas amostras de areia com o mesmo calibre médio, sendo que por estratégia se “corou” uma das amostras com corante de cor “avermelhada”. A Figura 4 mostra o resultado de areias coradas (num saco a areia sem corante e no recipiente de vidro a areia corada).



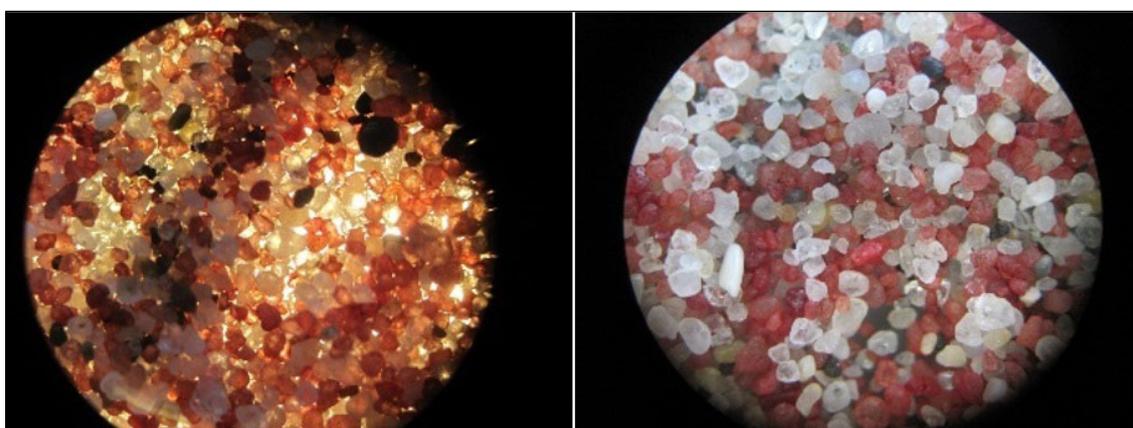
**Figura 4.** Aplicação de corante a uma das amostras de areia.

As duas amostras de areia foram colocadas no leito da duna, sobre um tapete plástico e dispostas lado a lado, como se mostra na Figura 5, para observar comportamentos, verificar e comparar a influência do vento no arrasto dos grãos de areia e, posteriormente, capturadas por ratoeiras (covas em desnível).



**Figura 5.** Duas amostras de areia colocadas na manta plástica.

Foram tiradas fotografias da mistura das duas amostras já misturadas por ação do vento, com o recurso a um microscópio e a uma máquina fotográfica, como se mostra na Figura 6.



**Figura 6.** Uma vista de microscópio (com e sem luz) com as duas amostras misturadas.

Posteriormente para um controlo rigoroso do início de movimentação de grãos de areia foram realizados ensaios em laboratório com alteração da intensidade da velocidade do vento para as areias com e sem corante. Nestas experiências as areias eram colocadas numa plataforma horizontal e por gama de tamanho eram submetidas a uma corrente de ar controlada e gerada por um secador de cabelo ou ventilador. Perpendicularmente ao plano do escoamento foi colocado um anemómetro a 9cm da superfície para o registo da intensidade do vento, como se mostra na Figura 7.



**Figura 7.** Registo da velocidade capaz de iniciar o movimento de areias.

Na Figura 7 mostra-se uma fase de registos e já é observável o arrasto de areias pela intensidade da velocidade do vento gerador. A intensidade da velocidade que iniciava o transporte da areia foi registada, para cada gama de diâmetro controlada de areia. A disposição do secador de cabelo ou ventilador, ao mesmo nível de funcionamento, era mais próxima ou afastada do “pirâmide” de areia como mostra a Figura 7.

A Figura 8 mostra uma fase do deslocamento das areias. É observável a presença de areias com e sem corante, como seria esperado.



**Figura 8.** Areias a ser movimentadas por ação da corrente de ar.

A Figura 9 mostra uma experiência em que são usadas areias com a mesma gama de tamanho e de cor diferente. Foram testadas para validar o modelo – critério Talaia e para avaliar se a intensidade da velocidade da corrente de ar correspondia aos valores avaliados e registados experimentalmente para o transporte da areia.



**Figura 9.** Areias com mesma granulometria com e sem corante.

Os dados recolhidos foram tratados numa folha de programa Microsoft Office Excel. Determinou-se para cada tamanho de grão de areia, o peso médio, o diâmetro médio, a força de arrasto, o número de Reynolds, o número de Galileu, o número de Reynolds na condição mínima de fluidização, a velocidade mínima de fluidização e a velocidade para o início de transporte de grãos de areia. Para a obtenção do coeficiente de resistência ou de arrasto usou-se o diagrama de Moody.

#### 4 Resultados e sua análise

A granulometria da areia dunar permitiu registar que os grãos de areia apresentam, em média, um diâmetro máximo de  $850\mu\text{m}$ . Os valores determinados através dos peneiros usados permitiu conhecer a granulometria por gamas de diâmetro, ou seja, em média cerca de 75% dos grãos de areia das dunas apresentam um diâmetro na gama entre  $250\mu\text{m}$  e  $500\mu\text{m}$ , cerca de 18 % na gama entre  $500\mu\text{m}$  e  $850\mu\text{m}$ . O restante das amostras colhidas cerca de 7% um diâmetro médio inferior a  $250\mu\text{m}$ .

A partir da experimentação realizada e através de cálculos, foi possível construir a Tabela 1 onde são indicados diferentes valores para cada gama de tamanho dos grãos de areia.

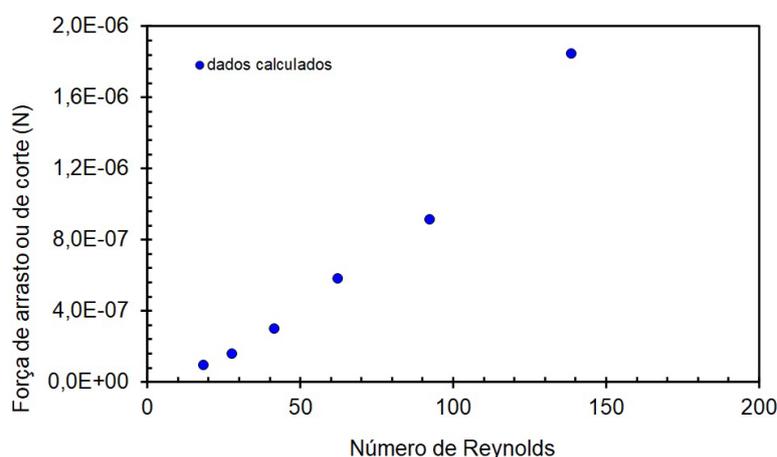
A observação da Tabela 1 indica para cada tamanho do grão de areia o valor da intensidade do vento que se registou experimentalmente para o início de transporte do grão de areia. Na tabela são, ainda, indicados os correspondentes número de Reynolds, coeficientes de arrasto ou de resistência, força de arrasto, peso do grão de areia e cociente entre a força de arrasto e o peso.

A Figura 10 mostra a influência do número de Reynolds na força de arrasto. Pode-se observar que, quanto maior é a força de arrasto, maior é o número de Reynolds.

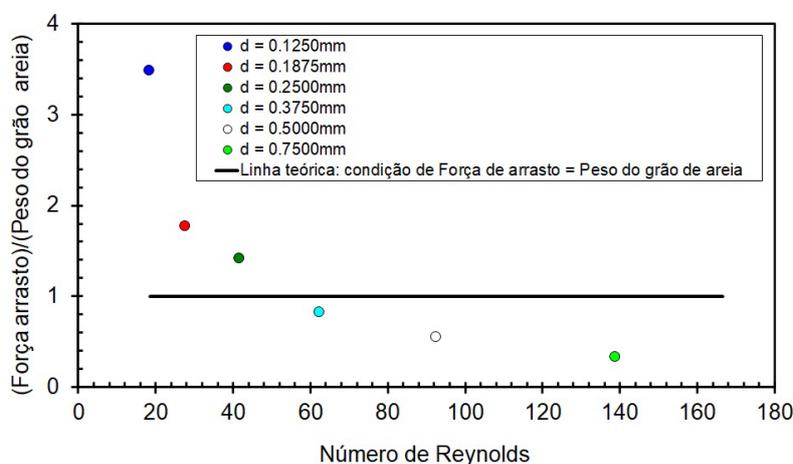
**Tabela 1.** Valores experimentais para a gama de diâmetro existentes nas dunas.

velocidade (m/s) altura 9cm	diâmetro médio (µm)	número de Reynolds	coeficiente de resistência	força de arrasto (N)	peso (N)	força de arrasto/peso
2,22	125,0	19	2,5	9,09E-08	2,61E-08	3,5
2,30	187,5	28	1,9	1,55E-07	8,80E-08	1,8
2,40	250,0	42	1,6	2,95E-07	2,09E-07	1,4
2,60	375,0	63	1,4	5,80E-07	7,04E-07	0,8
2,78	500,0	93	1,0	9,09E-07	1,67E-06	0,5
3,30	750,0	139	0,9	1,84E-06	5,63E-06	0,3

Dado o número de Reynolds ser influenciado pela velocidade do vento, à medida que este valor aumenta, há um correspondente aumento da força de arrasto (depende do quadrado da velocidade). Os círculos de cor azul indicados na figura são para os tamanhos das areias indicados na Tabela 1.

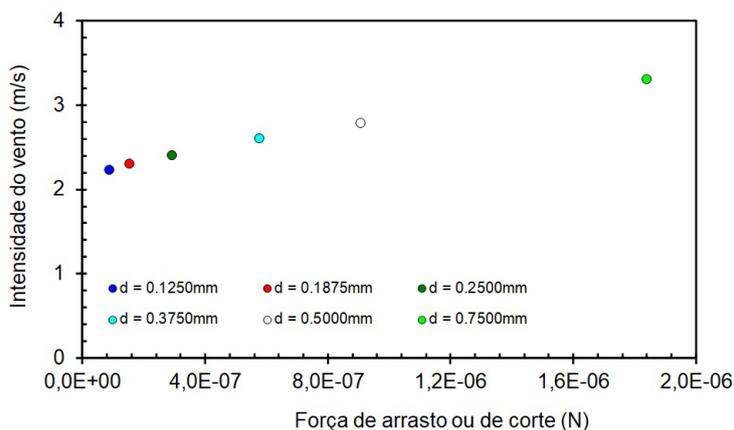
**Figura 10.** Relação entre força de arrasto ou de corte e o número de Reynolds.

A Figura 11 mostra para diferentes diâmetros dos grãos de areia o cociente entre a força de arrasto e o peso de cada areia, como uma função do número de Reynolds.

**Figura 11.** Cociente entre força de arrasto e peso "versus" número de Reynolds.

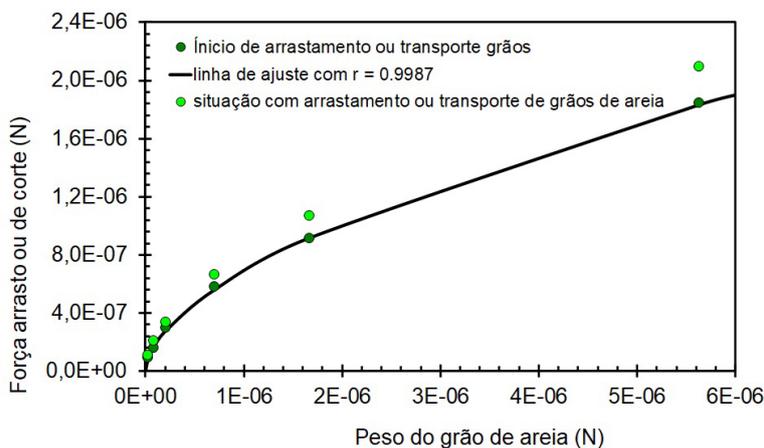
A observação da Figura 11 mostra uma linha a “negrito” e horizontal que indica o valor unitário, ou seja, quando a força de arrasto iguala o peso do grão de areia e os círculos a cores mostram a localização dos pontos experimentais condicionados pelo tamanho do grão de areia. A observação sugere um aumento da força de arrasto à medida que o peso do grão de areia aumenta.

Na Figura 12, como seria de esperar, a força de arrasto aumenta com a intensidade da velocidade do vento. A figura mostra que à medida que o grão de areia aumenta há uma correspondência direta no aumento da intensidade do vento e na força de arrasto que suscita o início de transporte do grão de areia.



**Figura 12.** Intensidade do vento “versus” força de arrasto.

A Figura 13 mostra a influência do peso do grão de areia na força de arrasto ou de corte. A observação do gráfico mostra círculos de cor verde escura que indiciam o início de arrastamento ou transporte de grãos de areia. Os círculos de cor verde clara indiciam a situação prática experimental de grãos de areia a serem movimentados.

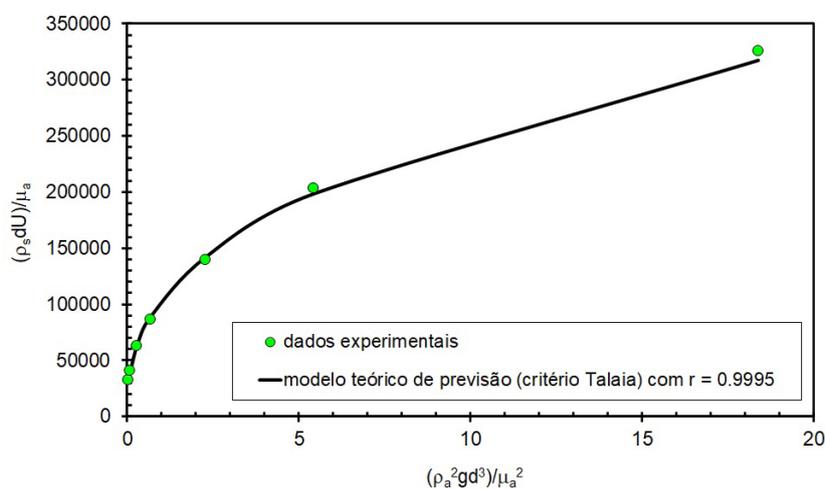


**Figura 13.** Força de arrastamento “versus” peso do grão de areia.

A observação da Figura 13 mostra uma linha a “negrito” contínua que faz a separação entre os grãos de areia em repouso e o início do seu movimento. Para o mesmo peso do grão de areia, valores da força de arrasto superiores aos valores indicados pela linha traçada indiciam o início e o conseqüente deslocamento do grão de areia. Na prática, as experiências realizadas, em laboratório com controlo de variáveis, mostram que os valores indicados a círculo cheio com cor verde clara eram para situações em que o movimento de areia era bem visível. Nestas circunstâncias o

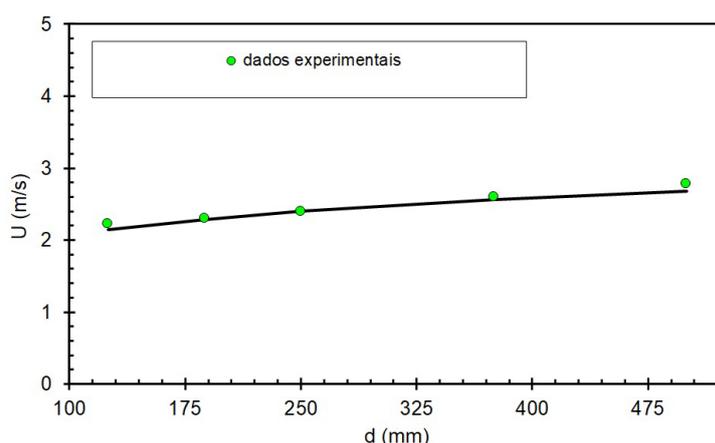
modelo desenvolvido denominado “critério Talaia”, ver expressão (18), foi testado para prever a intensidade do vento capaz de iniciar o transporte dos grãos de areia.

A Figura 14 mostra o resultado coerente dos dados experimentais e da linha de previsão para os parâmetros adimensionais desenvolvidos no modelo indicado na expressão (18). A linha de ajuste apresenta um coeficiente de correlação de Pearson de 0,9995. A observação da figura mostra, inequivocamente, que os valores registados acompanham com excelente concordância a linha do modelo desenvolvido.



**Figura 14.** Relação entre parâmetros  $\pi$  – critério Talaia.

A Figura 15 mostra que quando se conhece o diâmetro de um grão de areia é possível prever a intensidade da velocidade do vento que dá início ao seu movimento ou transporte. Os valores previstos pelo modelo desenvolvido neste trabalho mostram excelente concordância com os valores medidos experimentalmente. No entanto, ressalva-se que o modelo critério Talaia apenas é válido para diâmetros de grão de areia até  $500\mu\text{m}$ . A partir deste diâmetro, novas experiências deverão ser consideradas para corrigir o modelo.



**Figura 15.** Intensidade do vento para o início de transporte de grão de areia – critério Talaia.

Há uma questão que surge neste tipo de investigação “como se conhece o número de horas ao longo do ano que suscitam o movimento de areias e a formação de dunas”.

As estações meteorológicas medem parâmetros normalmente a 10m do solo. Os valores que foram considerados, neste estudo, não foram registados para uma altura de 10m. Nestes termos, é necessário projetar as velocidades registadas para o nível de 9cm para uma altura de 10m usando a expressão (6).

A Tabela 2 indica os valores para os diferentes diâmetros dos grãos de areia controladas e existentes neste estudo na duna da Costa Nova.

**Tabela 2.** velocidades do vento para diferentes diâmetros de grãos de areia.

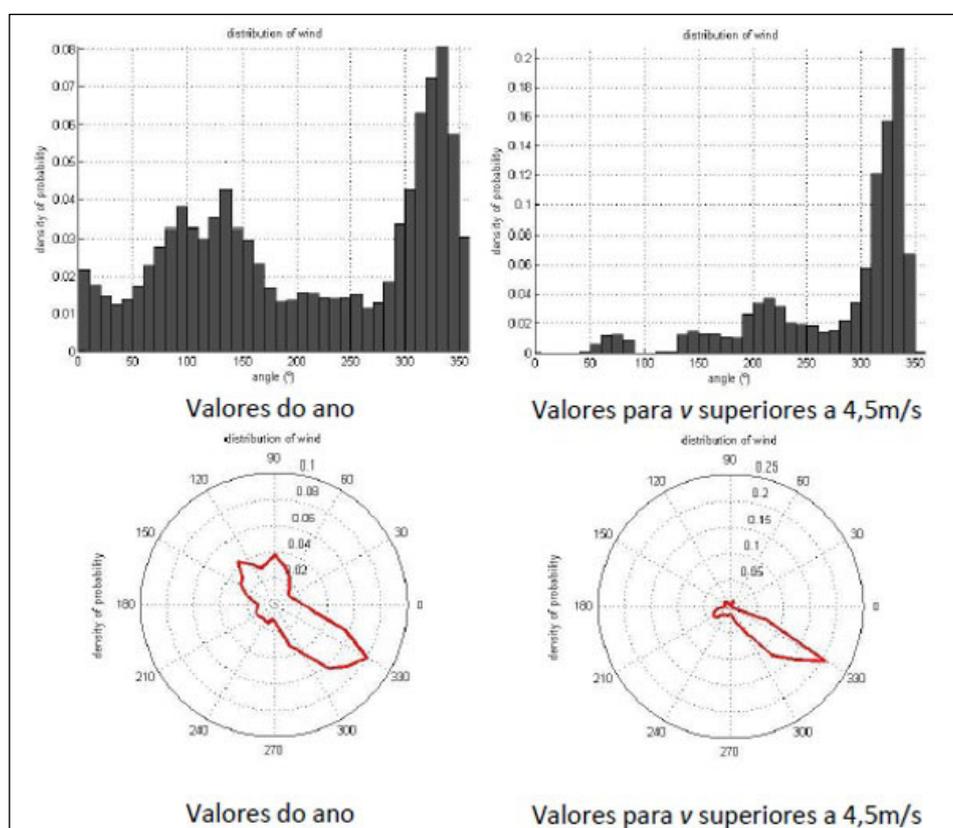
Diâmetro (µm)	velocidade (m/s) (altura 9cm)	velocidade (m/s) (altura 10m)
125	2,22	4,50
187	2,30	4,66
250	2,40	4,86
375	2,60	5,27
500	2,78	5,63

Conhecidas as velocidades para o nível 10m de altura e com base num ficheiro de dados meteorológicos da estação automática para um ano civil (janeiro a dezembro) foi possível conhecer o rumo e o número de horas para velocidade mínima de 4,50 m/s como se indica na Tabela 2.

Um algoritmo em programa em MatLab foi desenvolvido e o resultado mostrou que se registou, durante um ano, uma contribuição de 2780 horas para intensidades do vento superiores a 4,5m/s, num total de 8760 horas possíveis, ou seja, 31,7%.

A rosa dos ventos para o ano inteiro e para intensidades do vento superiores a 4,5 m/s, foi construída para conhecer o rumo predominante.

A Figura 16 mostra os diagramas da densidade de probabilidade da distribuição do vento por rumo e as respetivas rosas do vento, para os dados totais do ano e para os dados cuja velocidade fosse superior a 4,5 m/s.



**Figura 16.** valores da intensidade do vento do ano e para registos superior a 4,5m/s

A observação da Figura 16 mostra coerência do rumo do vento, indicando que densidade de ventos acima de 4,5m/s alimentam ou formam as dunas da praia da Costa Nova, sendo o areal da praia a origem dessas areias.

### Considerações finais

Esta investigação mostrou inequivocamente que os grãos de areia que alimentam ou formam as dunas originam-se no areal da praia e que só uma pequena densidade de ventos, com uma intensidade da velocidade superiores a 4,5m/s, é capaz de suscitar forças de arrastamento que favorecem o transporte dos grãos de areia que se depositam nas dunas.

O modelo desenvolvido e apresentado neste estudo, como critério Talaia, mostrou inequivocamente, para a gama de diâmetros de grãos de areia estudada um excelente acordo na previsão de velocidade para o início do transporte de grãos de areia.

As dunas são uma proteção natural que a natureza oferece para proteção de zonas urbanas junto a costa marítima. O risco das zonas urbanas junto ao litoral quando há destruição de dunas é elevado com consequências imprevisíveis. Medidas de proteção devem ser permanentemente implementadas de modo a manter reduzido o risco de invasão das águas do oceano.

### Referências

- ADEL, J.D. **Eolishe processen op het voorduin**. Department of Physical Geography, University of Utrecht, 1987. 101 p.
- BAGNOLD, R.A. **The Physics of Blown Sand and Desert dunes**. London: Chapman e Hall, 1973. 265 p.
- GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**: John Wiley & Sons. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1986. 468 p.
- HIJMA, M.; LODDER, Q.J. **An evaluation of aeolian sand transport models using four different sand traps at the Hors**, Texel. 2004. Disponível em: <http://tulane.academia.edu/MarcHijma/Books/126504/>. Acesso em: 10 out. 2019.
- HOLTON, J.R. **An introduction to dynamic meteorology**. 4. ed. USA: Elsevier Academic Press, 2004.
- KAY, J.M.; NEDDERMAND, R.M. **Fluid mechanics and transfer processes**. London: Cambridge University Press, 1985.
- KUNII, D.; LEVENPIEL, O. **Fluidization engineering**, Robert E. Krieger Publishing, 1977.
- NORDMEIER, W. Physics of sand: formation of ripple patterns and dunes: selected contribution. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE PHYSICS TEACHER EDUCATION BEYOND 2000, 18., 2001, Barcelona/Paris. **Anais [...]**. Barcelona/Paris: Elsevier, 2001. p. 547-549.
- OGAWA, A.; BEDDOW, J.K. **Separation of particles from air and gases**. CRC Press, 1984. v. 1, 152 p.
- TALAIA, M.A.R. Uma análise dimensional: ascensão de uma bolha no interior de um líquido. **Gazeta de Física**, v. 23, n. 2, p. 9-12, 2000.
- TALAIA, M.A.R. **Incipient Fluidization**: the influence of the pressure on the minimum fluidizing velocity and voidage fraction. Paper Presented on the 2nd Annual European Multiphase Systems Institute meeting and 40th European Two-Phase Flow Group meeting, Stockholm, Sweden, Paper D-5, 3 pages, 2002.
- TERWINDT, J.H.J. **Land transport door wind**: lectures notes. Department of Physical Geography, University of Utrecht, 1977.
- VIEIRA, A. O tamanho conta: a análise dimensional na Física. **Gazeta de Física**, v. 26, n. 1, p. 12-16, 2003.