

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

CRISTINA LIMA DE MORAIS

**INFLUÊNCIA DE PARTÍCULAS NÃO-ERODÍVEIS COM
DIFERENTES GRANULOMETRIAS NA EMISSÃO EM
LEITOS E EM PILHAS DE ESTOCAGEM**

Vitória

2018

CRISTINA LIMA DE MORAIS

**INFLUÊNCIA DE PARTÍCULAS NÃO-ERODÍVEIS COM
DIFERENTES GRANULOMETRIAS NA EMISSÃO EM LEITOS E EM
PILHAS DE ESTOCAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof. Dr. Jane Meri Santos

Coorientadores: Prof. Dr. Bruno Furieri

Prof. Dr. Maria Clara S. F. Caliman

Vitória

2018

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos que tem derramado na minha vida. O Senhor sabe das minhas lutas e de todas as dificuldades que encontrei no meu caminho até aqui. Obrigado Deus, por ter me feito vencedora.

À minha mãe Ivanete por me incentivar a lutar por uma vida melhor e por me ensinar que seria através da educação que eu poderia construir minhas oportunidades. Eu só fiz o que fiz porque eu tive o seu apoio sempre.

Aos meus padrinhos, Silvia e Abiner, que sonharam o mesmo sonho que eu e me ajudaram nas minhas conquistas.

Às minhas queridas amigas Kézia, Thaís e Pâmela, nas quais eu sempre encontrei apoio e um ombro para chorar minhas lágrimas e para compartilhar minhas alegrias durante todo esse período.

Aos professores, Maria Clara Caliman e Bruno Furieri, meus coorientadores, pelo apoio, amizade e consideração para que eu pudesse realizar minha pesquisa.

À professora Jane Meri Santos por me orientar e por me proporcionar discussões científicas engrandecedoras todas as vezes que tivemos oportunidade. Sentar para conversar com ela sempre foi a melhor experiência dentro das atividades do PPGEA.

Ao professor Neyval Costa Reis Junior pelo grande entusiasmo demonstrado ao contribuir com meu trabalho e me ajudar nas horas que eu precisei.

Ao professor Fábio Ressel, meu professor de graduação, que foi um exemplo de profissional para mim e que se dispôs de seu tempo em prol das minhas dúvidas.

Ao professor Jean-Luc Harion do IMT Lille Douai pela grande contribuição para minha pesquisa.

Aos demais amigos de laboratório, colegas e colaboradores do PPGEA que contribuíram para que eu concluísse minha jornada, em especial Izabele, Yasmin, Ramon, Israel Bahia, Lya, Yumi e Felipe.

À CAPES, pelo apoio financeiro ao programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental da UFES.

Se dois homens vêm andando por uma estrada, cada um com um pão, e, ao se encontrarem, trocarem os pães, cada um vai embora com um. Se dois homens vêm andando por uma estrada, cada um com uma ideia, e, ao se encontrarem, trocarem as ideias, cada um vai embora com duas.

Provérbio chinês

RESUMO

A emissão de materiais granulados armazenados em pilhas de estocagem em pátios abertos expostos à erosão eólica é uma importante questão ambiental discutida na atualidade. Um dos casos problemáticos neste aspecto são partículas de carvão e minério de ferro devido ao elevado potencial de emissão fugitiva durante seu manuseio e armazenamento. Além de resultar em perda de material para as indústrias, aumentam as concentrações de partículas na atmosfera, representando riscos para a saúde quando transportadas para áreas habitadas. Esforços têm sido feitos, no sentido de criar e testar novos modelos para estimar esse tipo de emissão, como no caso de Caliman (2017). Caliman (2017) construiu e validou seu modelo utilizando experimentos com pilhas de estocagem compostas por uma mistura binária de partículas erodíveis e não erodíveis em duas diferentes proporções de partículas não erodíveis. Como na natureza os processos de erosão eólica ocorrem em uma ampla faixa de diâmetros em várias velocidades, o presente trabalho teve como objetivo investigar a influência de mais de uma distribuição de tamanhos não erodíveis com erodibilidade variável na emissão em leitos e em pilhas de estocagem através do modelo de Caliman (2017). Para a aplicação do modelo, alguns parâmetros foram definidos. Primeiramente, simulações numéricas do fluxo de vento em um leito contendo rugosidades foram realizadas para prever a evolução superficial da velocidade de fricção. Além disso, a validade da relação linear entre a taxa de cobertura e a altura erodida de um leito hipotético foi avaliada para características granulométricas mais reais. Finalmente, o modelo foi aplicado e seus resultados comparados com dados experimentais. Adicionalmente, uma análise da evolução da cobertura superficial das pilhas dos experimentos utilizados foi realizada para verificação do comportamento descrito na literatura. Os resultados mostraram que as simulações numéricas do leito não ofereceram melhoras nos valores de emissão modelados. A relação entre a taxa de cobertura e a altura final erodida ainda pode ser considerada linear para misturas compostas de diferentes granulometrias não erodíveis com erodibilidade variável. Apesar dos erros encontrados, observa-se que a tendência física do fenômeno da erosão foi bem modelada. O modelo tem base física tanto quando foi criado como quando foi testado no presente trabalho, requerendo apenas investigações mais profundas de quais, entre as considerações feitas, propagou mais erros. A análise da evolução da cobertura superficial das pilhas experimentais mostrou que se pode, em parte, explicar a distribuição de partículas sob a superfície da pilha tanto qualitativamente quanto quantitativamente. Porém, nem todos os fenômenos podem ser visualizados e incluídos na análise.

Palavras-chave: erosão eólica, simulações numéricas, emissões fugitivas, partículas não erodíveis.

ABSTRACT

Emission of granular materials stored in stockpiles exposed to wind erosion is an important environmental issue currently discussed. One of the problematic cases are coal and iron ore particles due to the high fugitive emission potential during their handling and storage. Efforts have been made to create and test new models to estimate this type of emission, as in Caliman (2017) case. Caliman (2017) builded and validated the model using experiments with stockpiles composed of a binary mixture of erodible and non-erodible particles in two different proportions of non-erodible particles. As in nature the wind erosion processes occur in a wide range of diameters at various velocities, the present work aimed to investigate the influence of different non-erodible particle size distribution on beds and stockpile emission through the Caliman (2017) model. For the application of the model, some parameters were defined investigate the influence of different non-erodible particle size distribution on beds and stockpile emission through the Caliman (2017) model. In addition, an analysis of the evolution of the surface cover rate of the piles of the experiments used was performed to verify the behavior described in the literature. The results showed that the numerical simulations of the bed did not offer improvements in the modeled emission values. The relationship between the coverage rate and the eroded final height can still be considered linear for mixtures composed of different non-erodible granulometries with variable erodibility. Despite the errors, it is observed that the physical tendency of the erosion phenomenon was well modeled. The model has a physical basis both when it was created and when it was tested in the present work, requiring only deeper investigations of which, among the considerations made, propagated more errors. The analysis of the evolution of the surface cover rate of the experimental piles showed that the particle distribution can be partly explained, both qualitatively and quantitatively. However, not all phenomena can be visualized and included in the analysis.

Keywords: aeolian erosion, numerical simulations, fugitive emissions, non-erodible particles.

NOMENCLATURA

Acrônimos

CFD	Computational Fluid Dynamics
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds averaged Navier-Stokes
SST	Shear-Stress Transport
USEPA	United States Environmental Protection Agency

Símbolos romanos

A, M, N	Coeficientes numérico	
a	Inclinação da reta da relação entre CR e H	
A	Área da seção transversal do domínio	m^2
A_{ij}	Subáreas da pilha do modelo USEPA	m^2
b	Largura do elemento rugoso	m
CR	Taxa de cobertura de partículas não-erodíveis	%
CR_i	Taxa de cobertura inicial	%
d	Distância da parede mais próxima no modelo $k - \omega$ SST	m
D	Diâmetro das partículas	m
D_{NE}	Diâmetro das partículas não-erodíveis	m
E	Massa emitida total no modelo da USEPA	g
E_f	Massa emitida	kg
F_1, F_2	Funções de mistura no modelo $k - \omega$ SST	
F_a	Força de coesão	N
F_d	Força de arrasto	N
F_l	Força de sustentação	N
F_g	Força gravitacional	N
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
h	Altura da pilha	m
h_r	Altura do elemento rugoso	m
H	Altura erodida	m
H_f	Altura final erodida	m
k	Energia cinética turbulenta	m^2/s^2
K	Multiplicador do tamanho de partículas da USEPA	
m	Parâmetro do modelo de Raupach <i>et al.</i> (1993)	
$\dot{m}$	Fluxo de massa na entrada do domínio	kg/s
n_r	Número de elementos rugosos	
N	Número de perturbações no modelo USEPA	
p	Pressão estática	Pa
P	Potencial de erosão do modelo USEPA	kg/m^2
R''	Razão de velocidades de fricção de Raupach <i>et al.</i> (1993)	
R_{fric}	Razão de velocidades de fricção	
R_{MIN}	Valor mínimo de R_{fric} no modelo de emissão	
S_{bed}	Área do leito	m^2

S_{ij}	Tensor taxa de deformação	1/s
S_{floor}	Área basal dos elementos rugosos	m^2
$S_{frontal}$	Área frontal dos elementos rugosos	m^2
S_{θ,u^*}	Subáreas da pilha no modelo de Caliman (2017)	m^2
T	Temperatura	°C
u^*	Velocidade de fricção	m/s
u_r^*	Velocidade de fricção média em uma superfície erodível sob a influência de rugosidades	m/s
u_s^*	Velocidade de fricção média em uma superfície sem a influência de rugosidades.	m/s
u_s	Velocidade superficial a 25 cm da pilha no modelo USEPA	m/s
u_r	Velocidade do vento na superfície livre no modelo USEPA	m/s
u_t^*	Velocidade de fricção limite da partículas	m/s
u_{10}^+	Velocidade mais rápida entre as perturbação do modelo USEPA	m/s
U_∞	Velocidade de corrente livre	m/s
V_{bed}	Volume do leito	m^3
V_{tot}	Volume total ocupado pelas partículas	m^3
x	Coordenadas cartesianas	
z	Direção vertical	

Símbolos gregos

$\alpha, \beta, \sigma_k, \sigma_\omega$	Constantes no modelo $k - \omega$ SST	
$\alpha_1, \beta_1, \sigma_{k1}, \sigma_{\omega1}$	Constantes no modelo $k - \omega$ SST a partir do modelo $k - \omega$	
$\alpha_2, \beta_2, \sigma_{k2}, \sigma_{\omega2}$	Constantes no modelo $k - \omega$ SST a partir do modelo $k - \varepsilon$	
α_{NE}	Fração mássica de partículas não-erodíveis	%
β^*	Constante empírica do modelo $k - \omega$	
γ	Energia superficial que caracteriza a coesão	kg/s^2
δ	Altura da camada limite	m
ε	Dissipação de energia cinética	m^2/s^3
θ	Ângulo de inclinação do escoamento	°
λ	Densidade de elementos rugosos	
μ	Viscosidade dinâmica	$N s/m^2$
μ_t	Viscosidade turbulenta	$N s/m^2$
ν	Viscosidade cinemática	m^2/s^2
ξ	Ângulo de repouso de um material granular	°
ρ	Massa específica do fluido	kg/m^3
ρ_{bed}	Massa específica do leito	kg/m^3
ρ_p	Massa específica da partícula	kg/m^3
σ	Razão entre a área basal e a área frontal dos elementos de rugosidade do modelo de Raupach <i>et al.</i> (1993)	
τ	Tensão de cisalhamento total	N/m^2
τ_z	Componente vertical da tensão de cisalhamento	N/m^2

τ_{ij}	Tensor de tensão	N/m^2
τ_s''	tensão de cisalhamento máxima em uma superfície sem a presença de elementos não erodíveis	N/m^2
φ	Fração volumétrica	
ω	Taxa de dissipação turbulenta específica	$1/s$

Subscritos

i, j, k	Notação indicial
ref	Valores de referência

Superscritos

—	Valores médios
+, ~	Valores adimensionais

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forças que agem na partícula submetida a um gradiente de velocidade: sustentação, arraste, coesão e gravidade. Adaptado de Nascimento (2014).	20
Figura 2 - Expressões teóricas (linhas) e de experimentos (símbolos) da velocidade de fricção limite. Adaptado de Kok et al. (2012).	22
Figura 3 - Forças que agem sobre uma partícula que se apoia em uma superfície de inclinação θ (Caliman, 2017).	23
Figura 4 - Evolução da massa emitida e do fluxo de massa emitida em uma superfície composta por partículas erodíveis e não erodíveis (adaptado de Furieri et al. 2013a).	24
Figura 5 - (a) leito antes da pavimentação e (b) leito depois da pavimentação. Adaptado de Caliman (2017).	24
onde nr é o número de elementos rugosos, b é a largura média [m], hr é a altura média [m] (Figura 6) e S_{bed} é a área coberta pelos nr elementos não erodíveis [m ²].	26
Figura 7 - Representação esquemática dos parâmetros h , b , $S_{frontal}$ e S_{floor} de elementos rugosos não-erodíveis (Turpin et al.2010).	29
Figura 8 - Contornos de velocidades de vento de superfície normalizadas (us / ur) para duas configurações de estoques (USEPA, 2006).	31
Figura 9 - Evolução da proporção superficial ocupada pelas partículas não-erodíveis em função da altura erodida (Caliman, 2017).	37
Figura 10 - Tensão de cisalhamento total e a componente z da tensão de cisalhamento.	38
Figura 11 - Isosuperfícies de θ constante (intervalos de 5°) com os seus limites correspondentes relativamente a uma superfície plana e a distribuição da velocidade de fricção em cada uma dessas superfícies ($U_{\infty} = 8$)(Caliman, 2017).	39
Figura 12 - (a) Esquema do túnel de vento, (b) estruturas para formação da camada limite turbulenta, (c) seção de teste e (d) Ventilador centrífugo. Adaptado de Caliman (2017).	42
Figura 13 - (a) Dispositivo utilizado para construção da pilha, (b) dimensões médias e (c) visão lateral.	44
Figura 14 - Critério de emissão, diâmetro das partículas e velocidades testadas.	46
Figura 15 - Domínio computacional.	47
Figura 16 – Domínio computacional (a) e em detalhe as rugosidades (b).	53
Figura 17 – Lateral do domínio (a) mostrando o refinamento na malha (b) realizado na região das rugosidades.	54
Figura 18 - Distribuição normal.	54
Figura 19 - Sub-faixas da areia preta.	55
Figura 20 - Sub-faixas da areia amarela a 7 m/s. Em destaque o diâmetro a partir do qual as partículas amarelas se tornam não-erodíveis com base no critério de emissão descrito do Capítulo 4.	56
Figura 21 - Sub-faixas da areia amarela a 8 m/s. Em destaque o diâmetro a partir do qual as partículas amarelas se tornam não-erodíveis com base no critério de emissão descrito do Capítulo 4.	56

Figura 22 - Sub-faixas da areia amarela a 9 m/s. Em destaque o diâmetro a partir do qual as partículas amarelas se tornam não-erodíveis com base no critério de emissão descrito do Capítulo 4.	57
Figura 23 - Evolução da proporção ocupada por partículas não-erodíveis em função da altura erodida (Caliman, 2017).	58
Figura 24 - Distribuição da tensão de cisalhamento sobre a superfície de um leito para os Casos D.	62
Figura 25 - Distribuição da tensão de cisalhamento sobre a superfície de um leito para os Casos E.	63
Figura 26 - Distribuição da tensão de cisalhamento sobre a superfície de um leito para os Casos F.	63
Figura 27 - Relação e entre a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis e a altura erodida do leito hipotético para as granulometrias e velocidades dos casos D.	66
Figura 28 - Comportamento da taxa de cobertura em função da altura erodida para o caso D1.	66
Figura 29 - Disposição das partículas no leito para o caso (a) D1 e para o caso (b) D3.	67
Figura 30 - Relação e entre a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis e a altura erodida do leito hipotético para as granulometrias e velocidades dos casos 1.	68
Figura 31 - Relação entre a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis e a altura erodida do leito hipotético para os casos E.	69
Figura 32 - Relação entre a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis e a altura erodida do leito hipotético para os casos F.	69
Figura 33 - Estágio inicial (a) e final (b) da erosão para o Caso D2.	73
Figura 34 - Distribuição de tensão de cisalhamento (a) e distribuição de inclinação em que o fluido escoava sobrepostas a pilha do Caso D2 no estágio final (b). Adaptado de Caliman (2017).	74
Figura 35 - Resultados numéricos para pilha isolada: (a) distribuição da tensão de cisalhamento e (b) linhas de corrente sobre a pilha (Caliman, 2017).	76
Figura 36 - Estágios inicial e final da erosão das pilhas para todos os casos.	77
Figura 37 - Isosuperfícies de ângulo constantes com seus respectivos critérios de emissão relativo a uma superfície plana e a distribuição de velocidade de fricção em cada uma dessas superfícies para as três velocidade de corrente livre testadas. Adaptado de Caliman (2017). .	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Multiplicadores do tamanho de partícula com base no diâmetro (USEPA, 2006)..	32
Tabela 2 - Proporções de areia utilizadas nos experimentos e massas inicial e emitida das pilhas.	44
Tabela 3 - Condições de contorno necessárias para a simulação numérica do escoamento. ...	52
Tabela 4 - Tensão de cisalhamento média normalizada investigada em cada caso.	64
Tabela 5 - Configurações utilizadas nas simulações e para o cálculo das constantes A, M e N.	64
Tabela 6 - Inclinação da reta e taxa de cobertura inicial (coeficiente linear) obtidos pela Equação (14) e pela Equação (15), respectivamente e obtidos pelo escaneamento dos diâmetros (provenientes do ajuste linear das curvas da relação entre a taxa de cobertura e a altura erodida para cada caso).....	70
Tabela 7 - Comparação entre os resultados experimentais e modelados utilizando as novas constantes A, M e N calculadas no presente trabalho. φ é a fração volumétrica da mistura e α_{NE} é a fração mássica de partículas não-erodíveis.	71
Tabela 8 - Critério de emissão dos diâmetros da distribuição granulométrica das areias com base na inclinação da pilha.	81
Tabela 9 - Número de rugosidades para a proporção de 80% de areia branca, 12 % de areia amarela e 8% de areia preta a diferentes velocidades. Em destaque as sub-faixas não incluídas na simulação.	92
Tabela 10 - Número de rugosidades para a proporção de 65% de areia branca, 21 % de areia amarela e 14% de areia preta a diferentes velocidades. Em destaque as sub-faixas não incluídas na simulação.	93
Tabela 11 - Número de rugosidades para a proporção de 50% de areia branca, 30 % de areia amarela e 20% de areia preta a diferentes velocidades.	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	19
	2.1 OBJETIVO GERAL	19
	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO DA LITERATURA	20
	3.1 ASPECTOS BÁSICOS E PRINCÍPIOS DA EMISSÃO DE PARTÍCULAS	20
	3.2 ESTUDOS SOBRE A INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS NÃO ERODÍVEIS NA EROÇÃO EÓLICA	23
	3.3 ESTUDOS SOBRE EMISSÃO EM DUNAS E PILHAS DE ESTOCAGEM.....	30
	3.4 MODELOS DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO	35
	3.5 CONCLUSÃO DA REVISÃO DA LITERATURA.....	41
4	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO EM TÚNEL DE VENTO	42
5	METODOLOGIA	47
	5.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE CISALHAMENTO SOBRE UM LEITO COMPOSTO DE ELEMENTOS RUGOSOS	47
	5.2.1 DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO	47
	5.2.2 DESCRIÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL	47
	5.2.3 EQUAÇÕES GOVERNANTES.....	48
	5.2.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO	52
	5.2.5 SOLUÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES.....	53
	5.2.6 CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS	54
	5.3 AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A TAXA DE COBERTURA E A ALTURA FINAL ERODIDA	58
	5.4 CÁLCULO DA EMISSÃO EM UMA PILHA A LONGADA PELO MODELO DE CALIMAN (2017)	59
	5.5 ANÁLISE QUALITATIVA DA TAXA DE COBERTURA FINAL SOB A SUPERFÍCIE DE UMA PILHA A LONGADA EXPERIMENTAL.....	59
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
	6.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE CISALHAMENTO SOBRE UM LEITO COMPOSTO DE ELEMENTOS RUGOSOS	61
	6.3 AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A TAXA DE COBERTURA E A ALTURA FINAL ERODIDA.....	64

6.4	CÁLCULO DA EMISSÃO EM UMA PILHA LONGADA PELO MODELO DE CALIMAN (2017)	71
6.5	ANÁLISE QUALITATIVA DA TAXA DE COBERTURA SOB A SUPERFÍCIE DE UMA PILHA LONGADA EXPERIMENTAL	73
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	82
7.2	CONCLUSÕES.....	82
7.3	RECOMENDAÇÕES FUTURAS	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	APÊNDICE I	92

1 INTRODUÇÃO

A emissão de materiais granulados armazenados em pilhas de estocagem em pátios abertos expostos à erosão eólica é uma importante questão ambiental discutida na atualidade. Um dos casos problemáticos neste aspecto são partículas de carvão e minério de ferro devido ao elevado potencial de emissão fugitiva durante seu manuseio e armazenamento. Além de resultar em perda de material para as indústrias, aumentam as concentrações de partículas na atmosfera, representando riscos para a saúde quando transportadas para áreas habitadas.

Existem muitos fatores que influenciam o processo de erosão eólica em pilhas: massa específica do material estocado, umidade, distribuição de partículas e geometria da pilha. Entre estes, os mais relevantes são a velocidade do vento e a disponibilidade de partículas erodíveis (passíveis de serem emitidas a determinada velocidade do vento) (Badr e Harion, 2005). O modelo mais utilizado para estimar as emissões devido à erosão eólica de pilhas de estocagem foi proposto pela Agência de Proteção do Meio ambiente dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency*) (USEPA, 2006). No entanto, a maior limitação do modelo é não considerar a proporção de partículas erodíveis e não-erodíveis na mistura de materiais granulados. Esforços têm sido feitos, no sentido de criar novos modelos de emissão, normalmente construídos a partir de leitos de partículas. Trabalhos como de Descamps *et al.* (2005) e Caliman (2017) podem ser citados, sendo a pavimentação, a saltação, a taxa de cobertura superficial de partículas não-erodíveis e a distribuição granulométrica, as principais características levadas em consideração na elaboração dos modelos.

Descamps *et al.* (2005) desenvolveram um modelo para quantificar a evolução temporal do fluxo de massa de partículas emitidas em um leito exposto a um escoamento turbulento. Com o aumento da erosão, as partículas não-erodíveis, que não podem ser transportadas pelo vento, acumulam-se até que o leito atinja uma altura erodida onde mais nenhuma emissão é observada (pavimentação). Sua maior limitação é considerar que a erosão cessa quando o leito está totalmente coberto por partículas não-erodíveis. Resultados experimentais mostraram que a erosão cessa com uma taxa de cobertura de partículas não-erodíveis inferior a 100% (Descamps, 2004; Furieri *et al.* 2013a).

Para melhor compreensão do fenômeno, é interessante analisar a pavimentação por meio da partição da tensão de cisalhamento entre elementos não erodíveis e a superfície ao seu redor. A partição do cisalhamento tem sido investigada por vários pesquisadores ao longo dos

anos (Marshall, 1971; Gillette e Stockton, 1989; Iversen *et al.* 1991; Raupach, 1991; Raupach *et al.* 1993; Marticorena e Bergametti, 1995; Crawley e Nickling, 2003). Os resultados desses estudos mostram que quando partículas de maior diâmetro estão presentes elas criam zonas de baixo cisalhamento na esteira, não sendo possível atingir a velocidade de fricção mínima requerida para a emissão das partículas. Apesar dos bons resultados alcançados por esses estudos, limitações são encontradas para a realização de experimentos quando eles abrangem diferentes disposições dos elementos no leito e formas, como cilindros e esferas, por exemplo. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) surgiu como uma alternativa para as dificuldades experimentais encontradas.

Para caracterizar o processo da pavimentação pelo conceito de partição da tensão de cisalhamento utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional, Turpin *et al.* (2010) realizaram simulações numéricas em leitos com diferentes densidades de elementos com distribuições uniformes de tamanhos. Os autores desenvolveram uma formulação matemática que propunha avaliar a evolução da velocidade de fricção da superfície erodível em função da taxa de cobertura e da forma das partículas não-erodíveis. Os resultados obtidos apresentaram boa concordância com estudos anteriores (Marshall, 1971; Lyles and Allison, 1975; Gillette e Stockton, 1989; Musick e Gillette, 1990; McKenna Neuman e Nickling, 1995; Crawley and Nickling, 2003; Gillies *et al.* 2007). Furieri *et al.* (2013b) realizaram simulações numéricas semelhantes, porém utilizando uma distribuição polidispersa de tamanhos de elementos rugosos para taxas de coberturas de até 12%. Os resultados mostraram que a equação proposta por Turpin *et al.* (2010) continua válida mesmo neste caso.

Com o propósito de preencher a lacuna deixada pelo modelo de emissão de Descamps *et al.* (2005) e fazendo uso da partição da tensão de cisalhamento pela equação proposta por Turpin *et al.* (2010) para a modelagem da pavimentação, Caliman (2017) desenvolveu um modelo para calcular a altura final erodida, e consequentemente, a emissão, considerando o estágio final da erosão sobre o leito.

Para que a altura final erodida do leito pudesse ser calculada dois procedimentos foram realizados. Primeiro foram realizadas novas simulações numéricas da partição do cisalhamento sobre um leito contendo elementos não-erodíveis para taxas de cobertura de até 40%, tal como em seus experimentos. Com isso, novas constantes para a formulação de Turpin *et al.* (2010) foram encontradas.

Caliman (2017) propôs também que a taxa de cobertura é uma função linear da altura final erodida para uma mistura contendo apenas uma faixa de partículas não-erodíveis onde a condição de erodibilidade é sempre preservada, baseando-se também nas características das areias utilizadas em seus experimentos. Dessa forma, a equação de Turpin *et al.* (2010), com as novas constantes provenientes das simulações, e a relação entre a taxa de cobertura e a altura final erodida puderam ser utilizadas no cálculo da altura final erodida. Finalmente, por uma simples equação utilizando essa altura e a área do leito, a massa emitida poderia ser calculada por meio do volume emitido.

Utilizando a distribuição de tensões sobre uma pilha alongada obtida numericamente tal como por diversos autores (Badr e Harion, 2005; Badr e Harion, 2007; Diego *et al.* 2009; Turpin e Harion, 2010; Faria *et al.* 2011; Cong *et al.* 2012; Derakhshani *et al.* 2013; Ferreira *et al.* 2013; Furieri *et al.* 2013a; Furieri *et al.* 2014; Novak *et al.* 2015), Caliman (2017), propôs uma adaptação do modelo de emissão para pilhas de estocagem. Em algumas regiões da pilha, o escoamento segue padrões diferentes do leito, modificando a forma como as partículas são emitidas. Os resultados numéricos mostraram que a velocidade de fricção limite é diferente em cada região da pilha de acordo com o ângulo do escoamento do vento na superfície da pilha. A ideia do modelo é separar a pilha em isosuperfícies que apresentem o mesmo critério de emissão. Assim, cada isosuperfície poderia ser considerada como um leito e então o modelo poderia ser aplicado.

O modelo de estimativa de emissão proposto por Caliman (2017) apresenta algumas limitações como: (i) consideração de uma distribuição espacial uniforme das partículas ao longo da altura do leito, (ii) validação do modelo para uma única distribuição de diâmetros de partículas não-erodíveis e (iii) utilização de uma relação entre a taxa de cobertura e a altura final erodida característica da presença de uma única faixa de diâmetros não-erodíveis cuja erodibilidade não se altera para a faixa de velocidade do vento investigadas.

Porém, apesar das limitações, boa concordância foi observada entre a massa emitida calculada e massa emitida medida experimentalmente, tanto para leitos quanto para pilhas. Dessa forma, o modelo se apresenta como uma alternativa inovadora para o cálculo da emissão em leitos e em pilhas de estocagem necessitando apenas investigações mais detalhadas sobre a sua aplicabilidade.

Para que o modelo possa ser representativo de uma quantidade maior de casos, algumas questões podem ser investigadas:

- Validade das constantes da equação de Turpin *et al.* (2010) para taxas de cobertura de até 40% obtidas numericamente por Caliman (2017) para outras distribuições granulométricas dentro dessa faixa de taxa de cobertura. Nesse caso, para a aplicação do modelo não seria necessário realizar novas simulações numéricas para determinar as constantes toda vez que as características das partículas mudassem.
- Validade da relação entre a altura final erodida e a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis proposta por Caliman (2017) para casos reais em que existem diversas faixas de partículas cuja erodibilidade pode mudar com a velocidade do vento.

Nesse contexto, o presente trabalho se propõe a avaliar a influência de partículas não-erodíveis de diferentes granulometrias na emissão em leitos e empilhas de estocagem através da aplicação do modelo de emissão de Caliman (2017) investigando algumas de suas principais lacunas.

Essa dissertação está organizada em 6 capítulos após essa introdução. O Capítulo 2 apresenta os objetivos gerais e específicos. O Capítulo 3 traz a revisão da literatura sobre os aspectos básicos da erosão eólica, estudos acerca da influência de elementos não erodíveis na emissão e estudos com pilhas de estocagem. O Capítulo 4 apresenta a descrição de experimentos realizados com pilhas de estocagem alongadas e partículas de areia, cujas características são importantes para os capítulos que seguem. O Capítulo 5 expõe a metodologia utilizada para as simulações numéricas em um leito rugoso, a avaliação da relação entre a altura final erodida e a taxa de cobertura e a análise das imagens dos experimentos. O capítulo 6 discute os resultados dos objetivos propostos e finalmente, o Capítulo 7 traz as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência de partículas não-erodíveis de diferentes tamanhos e de erodibilidade variável na emissão em leitos e em pilhas de estocagem através do modelo de Caliman (2017).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as constantes da formulação que associa a velocidade de fricção sobre a superfície erodida e a taxa de cobertura através da distribuição de tensões de cisalhamento obtida por simulações numéricas do escoamento do vento sobre um leito de erodibilidade variável sob diferentes velocidades de corrente livre.
- Verificar se a relação entre a altura erodida e a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis é linear, tal como proposto por Caliman (2017), para composições com mais de uma distribuição de tamanhos não erodíveis e erodibilidade variável com a velocidade do vento incidente.
- Aplicar o modelo de estimativa de emissões adaptado de Caliman (2017) em pilhas de estocagem de material granulado com erodibilidade variável e avaliar seu desempenho com base em resultados experimentais.
- Avaliar qualitativamente a taxa de cobertura final experimental sobre a superfície de uma pilha alongada através de imagens de análises experimentais de túnel de vento.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 ASPECTOS BÁSICOS E PRINCÍPIOS DA EMISSÃO DE PARTÍCULAS

A erosão eólica é um processo de movimentação de partículas induzido pela força do vento. Envolve uma física complexa, onde os processos relacionam um conjunto de interações partícula-escoamento, partícula-superfície e partícula-partícula, sendo a maioria deles dependentes do tamanho dessas partículas (“areia” quando a faixa de diâmetro varia de 60 a 2000 μm e “poeira” quando o diâmetro é menor que 60 μm) (Shao, 2008).

A emissão de partículas é influenciada principalmente pelas forças aerodinâmicas, que tendem a removê-las da superfície, (como a força de arraste F_d e a força de sustentação F_l) e pelas forças que resistem ao movimento (como a força da gravidade F_g e a força de coesão entre as partículas F_a), como mostrado na Figura 1 (Shao, 2008; Furieri, 2012; Nascimento, 2014).

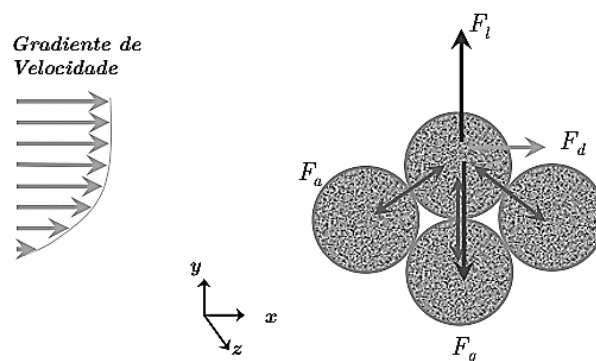


Figura 1 - Forças que agem na partícula submetida a um gradiente de velocidade: sustentação, arraste, coesão e gravidade. Adaptado de Nascimento (2014).

Para que as partículas do solo se movimentem no ar, as forças de sustentação associadas ao cisalhamento do vento perto da superfície ou causadas por impactos de partículas, devem superar as forças gravitacionais e de coesão agindo sobre elas. Quando as partículas são muito pequenas, elas não têm peso suficiente para resistir ao cisalhamento do vento. Acabam suspensas pelas forças de sustentação e pelos movimentos turbulentos do escoamento. A esse movimento dá-se o nome de suspensão. A suspensão modificada refere-se ao movimento de partículas ligeiramente mais pesadas que não são afetadas pelos pequenos vórtices do escoamento. Partículas maiores o suficiente para não serem movidas pela suspensão

modificada, são transportadas por um mecanismo chamado de saltação. A força de sustentação é novamente a força predominante, permitindo o movimento das partículas. No entanto, depois de suspensão, a força da gravidade se sobressai e as partículas tendem a retornar a superfície de onde decolaram. Assim, elas podem apenas se depositar novamente na superfície ou impulsionar a decolagem de outras partículas. Assim como na suspensão modificada, a saltação modificada se refere a partículas ligeiramente mais pesadas que as sujeitas ao movimento de saltação pura. Se as partículas são muito pesadas para sofrerem suspensão ou saltação elas estarão sujeitas ao movimento de rolamento, se movendo ou deslizando ao longo a superfície erodida.

As forças aerodinâmicas que agem sobre as partículas estão associadas ao arraste do vento próximo a superfície, sendo assim, função da velocidade de fricção u^* , característica do escoamento em camadas limite representando o valor conceitual do cisalhamento na superfície, definida por:

$$u^* = \sqrt{\tau/\rho} \quad (1)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento na superfície $[Pa]$ e ρ é a massa específica do fluido $[kg/m^3]$.

É importante definir também, para o estudo do movimento de partículas, a velocidade de fricção limite u_t^* , que é a velocidade de fricção mínima requerida para que o movimento da partícula na atmosfera seja iniciado. Quando a velocidade de fricção na superfície não atinge a velocidade de fricção limite do material ($u^* < u_t^*$), as partículas tendem a permanecer sobre a superfície. Quando ocorre o contrário ($u^* > u_t^*$), o movimento das partículas é iniciado. A velocidade de fricção limite é essencialmente uma propriedade do material granulado aglomerado e sua forma de aglomeração. Ela descreve a capacidade da superfície para resistir à erosão do vento e é afetada por uma série de fatores, como a massa específica da partícula e do fluido, o diâmetro da partícula, os efeitos da gravidade, a umidade e os efeitos coesivos.

Apesar disso, em condições ideais, como a ausência de umidade e dos efeitos coesivos entre as partículas, u_t^* pode ser expressa em função do diâmetro da partícula. Bagnold (1941) foi um dos primeiros a desenvolver uma expressão para u_t^* com base no balanço das forças que agem sobre as partículas. No entanto, a proposta de Bagnold apresentava limitações como considerar o balanço apenas entre as forças de arrasto e de gravidade e não estar definida para diâmetros pequenos. Assim, estudos experimentais e teóricos subsequentes surgiram resultando

em outras expressões para u_t^* . A Figura 2 apresenta as curvas dos principais estudos relacionados ao tema, até o mais recente de Shao e Lu (2000) (Kok *et al.* 2012).

Shao e Lu (2000), diferentemente de Bagnold (1941), propuseram uma expressão que também leva em consideração as forças de coesão, importante para partículas de pequeno diâmetro. O critério de emissão de partículas Shao e Lu (2000) é:

$$u_t^* = 0,11 \sqrt{\frac{\rho_p - \rho}{\rho} g D + \frac{\gamma}{\rho D}} \quad (2)$$

onde ρ_p é a massa específica da partícula [kg/m^3], ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3], D é o diâmetro da partícula [m], g é a aceleração da gravidade [m/s^2] e γ é energia superficial que caracteriza a coesão [N/m].

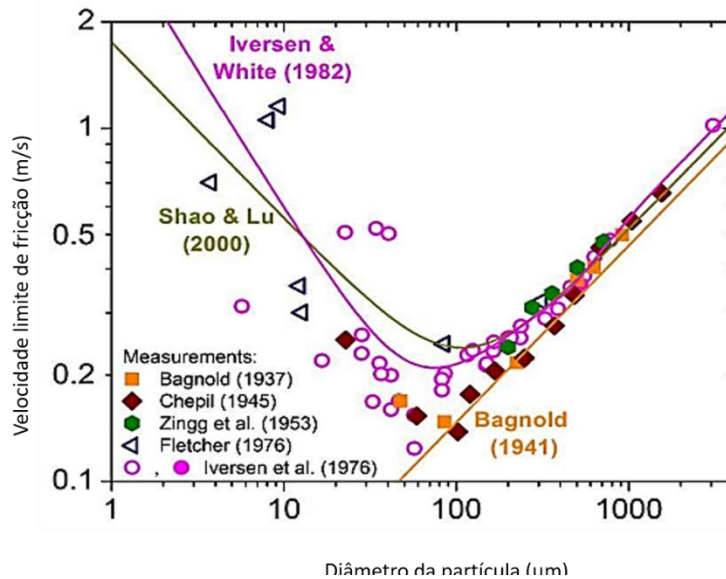


Figura 2 - Expressões teóricas (linhas) e de experimentos (símbolos) da velocidade de fricção limite. Adaptado de Kok *et al.* (2012).

No entanto, em uma superfície inclinada a velocidade de fricção limite é diferente da encontrada em uma superfície plana. Isso porque a força da gravidade tem componentes normais e tangenciais dependentes do ângulo θ da superfície. A Figura 3 mostra as forças que agem sobre uma partícula que se apoia em uma superfície de inclinação θ com ângulo de fricção interna entre as partículas ξ .

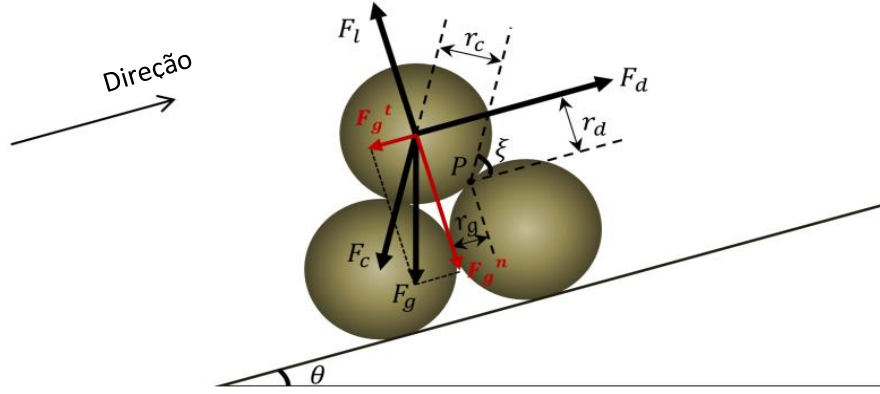


Figura 3 - Forças que agem sobre uma partícula que se apoia em uma superfície de inclinação θ (Caliman, 2017).

Iversen e Rasmussen (1994) propuseram uma relação entre a velocidade de fricção limite em uma superfície plana ($u_t^*(0)$) e a velocidade de fricção limite em uma superfície inclinada ($u_t^*(\theta)$) pela seguinte equação:

$$\frac{u_t^*(\theta)^2}{u_t^*(0)^2} = \cos \theta + \frac{\sin \theta}{\tan \xi} \quad (3)$$

onde θ é o ângulo de inclinação da superfície e ξ é o ângulo de fricção interna. Dessa forma partículas sobre uma superfície inclinada cujo escoamento é contrário a gravidade são emitidas a uma u_t^* maior. E quando o escoamento é a favor da gravidade as partículas são emitidas a uma u_t^* menor, pois a gravidade, que antes que era uma força que dificultava o escoamento, agora favorece o mesmo.

3.2 ESTUDOS SOBRE A INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS NÃO ERODÍVEIS NA EROSÃO EÓLICA

A evolução temporal da massa emitida e do fluxo de massa emitida numa superfície composta por partículas erodíveis e não-erodíveis é mostrada na Figura 4. É possível observar que a massa emitida aumenta nos momentos iniciais, porém tende a permanecer constante nos momentos finais da erosão. Já o fluxo de massa emitida tem seu valor máximo no início do escoamento decaindo exponencialmente com o tempo (Furieri *et al.* 2013a; Caliman, 2017). Esse comportamento é típico de superfícies compostas por elementos erodíveis e não erodíveis. O aumento inicial da massa emitida é devido ao movimento das partículas que tiveram sua velocidade de fricção limite atingida pelo escoamento do vento. Com o passar o tempo, ou a

disponibilidade dessas partículas vai diminuindo ou a velocidade de fricção limite delas não é mais atingida. Esse fenômeno onde a emissão não é mais observada é chamado de pavimentação.

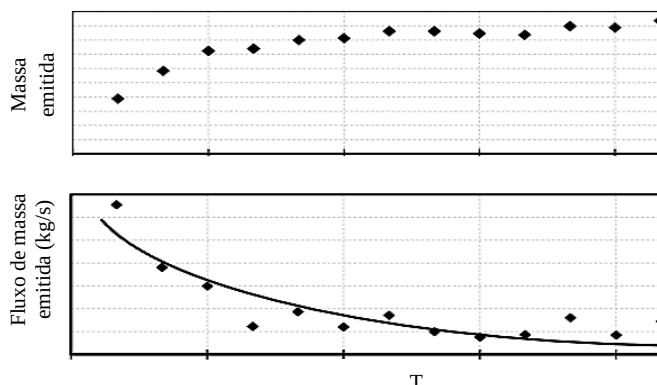


Figura 4 - Evolução da massa emitida e do fluxo de massa emitida em uma superfície composta por partículas erodíveis e não erodíveis (adaptado de Furieri *et al.* 2013a).

A Figura 5 (a) apresenta um leito composto por uma mistura de partículas erodíveis e não-erodíveis antes da pavimentação e a Figura 5 (b) apresenta o mesmo leito depois da pavimentação. É possível notar que depois da pavimentação o leito apresenta uma maior quantidade de partículas não erodíveis (de maior diâmetro) em sua superfície e que a pavimentação ocorreu mesmo quando a superfície ainda tinha disponibilidade de partículas erodíveis (de menor diâmetro).

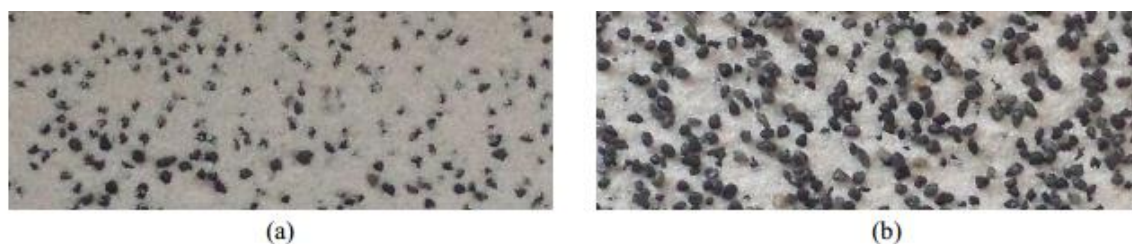


Figura 5 - (a) leito antes da pavimentação e (b) leito depois da pavimentação. Adaptado de Caliman (2017).

Elementos não erodíveis modificam o escoamento ao seu redor, diminuindo a velocidade de fricção superficial. Dessa forma, a presença deles dificulta a ação do cisalhamento do vento de forma que a velocidade de fricção limite dos elementos erodíveis não é mais atingida (Descamps, 2004; Turpin *et al.* 2010; Furieri *et al.* 2013a; Furieri *et al.* 2013b; Caliman, 2017).

Alguns estudos que levaram em consideração a presença de elementos não erodíveis evidenciaram o efeito de proteção criado por eles (Tan *et al.* 2013; Furieri *et al.* 2013a; Gillies *et al.* 2015; Miri *et al.* 2017; Caliman, 2017).

Tan *et al.* (2013) simularam os efeitos da redução da velocidade em leitos de cascalho com túneis de vento portáteis para diferentes velocidades do vento. Os autores verificaram que a presença dos cascalhos protege a superfície erodível da erosão do vento pela absorção do momentum. Concluíram que, no controle da erosão de areia, um melhor efeito de redução de velocidade do vento pode ser alcançado cobrindo parcialmente as superfícies subjacentes com cascalhos.

Furieri *et al.* (2013a) estudaram, experimentalmente os efeitos de partículas não-erodíveis na erosão eólica em pilhas de estocagem. Foram testadas duas diferentes proporções de partículas não-erodíveis para três diferentes velocidades. Os resultados mostraram que o acúmulo de partículas não erodíveis induz a pavimentação em algumas regiões da pilha. Além disso, o fluxo de massa de partículas decai mais rápido quando a pilha é composta por uma maior quantidade de partículas não-erodíveis, indicando que o aumento da quantidade desses elementos em uma mistura tem a capacidade de reduzir a quantidade de partículas emitidas.

Gillies *et al.* (2015) investigaram o uso de grandes elementos rugosos para controle da erosão de areia em dunas. Os autores realizaram experimentos de campo usando aglomerados de palha dispostos sobre uma região das dunas. Os resultados medidos do fluxo de partícula e do perfil vertical de velocidade indicaram que a presença desses elementos rugosos cria um efeito de proteção pela redução da tensão de cisalhamento ao seu redor e consequentemente, pela diminuição da velocidade de fricção.

Miri *et al.* (2017) estudaram como diferentes tipos de vegetação em diferentes proporções afetam a velocidade do vento durante a erosão eólica. Os resultados de medições de velocidade e do fluxo de massa das partículas mostraram que a vegetação tem capacidade para reduzir a tensão de cisalhamento, porém, devido a possibilidade de deformação desse tipo de elemento, essa capacidade é reduzida com o aumento da velocidade do vento.

Caliman (2017) realizou experimentos com leitos de areia a diferentes velocidades e diferentes frações mássicas de partículas não erodíveis para avaliar a evolução temporal do fluxo de massa emitida. Os resultados mostraram que, de forma geral, o fluxo de massa emitida decai exponencialmente com o tempo, sendo esse decaimento mais lento a maiores frações de

partículas não erodíveis e menores velocidades, evidenciando o efeito de proteção criado pelos elementos não erodíveis e a influência da velocidade na erosão.

Esse efeito de proteção criado pela presença de elementos não erodíveis pode ser melhor compreendido por meio da partição da tensão de cisalhamento entre a superfície erodível e esses elementos. Dentre os estudos clássicos relacionados ao assunto, pode-se destacar os de Marshall (1971), Gillette e Stockton (1989), Iversen *et al.* (1991) e Raupach *et al.* (1993).

Marshall (1971) realizou experimentos com túnel de vento simulando o escoamento de vento sobre superfícies com elementos de rugosidade para estudar a divisão das forças entre esses elementos e a superfície ao redor deles. A partição da tensão de cisalhamento foi testada para rugosidades de formas cilíndricas e hemisféricas variando-se a razão diâmetro-altura e a distância entre os elementos, bem como utilizando-se distribuições aleatórias e regulares dos elementos sobre a superfície. Os resultados mostraram que a tensão total de cisalhamento não parece apresentar diferença considerável com a distribuição dos elementos no leito quando arranjos da mesma densidade λ de elementos são comparados. Essa densidade é definida como:

$$\lambda = n_r \bar{b} \bar{h}_r / S_{bed} \quad (4)$$

onde n_r é o número de elementos rugosos, $\bar{b}$ é a largura média [m], $\bar{h}_r$ é a altura média [m] (Figura 6) e S_{bed} é a área coberta pelos n_r elementos não erodíveis [m²].

Gillette e Stockton (1989) estudaram os efeitos de partículas não-erodíveis na erosão de superfícies erodíveis. Mediram o fluxo de partículas em função do cisalhamento do vento em túnel de vento. Três tamanhos de esferas de vidro erodíveis e três não-erodíveis foram utilizadas. As esferas foram misturadas em nove diferentes combinações e uma camada de aproximadamente 1 cm foi colocada dentro do túnel de vento de forma que as não-erodíveis ficassem enterradas pela metade na mistura. Ou seja, apenas hemisferas estavam acima da superfície plana. Os resultados mostraram que os efeitos de esferas não-erodíveis sobre a emissão de esferas erodíveis foi o aumento da velocidade de fricção limite para a superfície de partículas erodíveis entre as não-erodíveis. Ou seja, as partículas não-erodíveis protegeram a superfície pela absorção de parte do momentum do escoamento do vento.

Iversen *et al.* (1991) estudaram o escoamento ao redor de elementos rugosos isolados para avaliar os efeitos desses obstáculos na erosão eólica. Realizaram experimentos em túnel

de vento envolvendo cilindros de 3 a 10 *cm* e prismas retangulares de 4 a 16 *cm* dispostos em leitos de areia. Os resultados mostraram que a topografia adjacente ao elemento de rugosidade retangular ou cilíndrico é uma forte função da geometria do elemento. Através da topografia da areia ao redor dos elementos os autores puderam observar vórtices e padrões de escoamento ao redor dos elementos e relacionaram isso a regiões de erosão e deposição devido à presença dos obstáculos.

Raupach *et al.* (1993) desenvolveram uma expressão para a partição do cisalhamento devido a presença de elementos não erodíveis como uma função de λ :

$$R'' = \frac{u_s^*}{u_r^*} = \left[\frac{\tau_s''}{\tau} \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{(1 - m\sigma\lambda)(1 + m\beta\lambda)} \right]^{1/2} \quad (5)$$

onde u_s^* é a velocidade de fricção média [*m/s*] em uma superfície sem a influência de rugosidades, u_r^* é a velocidade de fricção média em uma superfície erodível sob a influência de rugosidades [*m/s*], τ_s'' é a tensão de cisalhamento máxima em uma superfície sem a presença de elementos não erodíveis [*Pa*], τ é a tensão de cisalhamento total em uma superfície sob a influência de rugosidades [*Pa*], m (< 1) é um parâmetro que contabiliza diferenças entre a tensão de cisalhamento média na superfície do substrato e a tensão de cisalhamento máxima na superfície em qualquer ponto, σ é a proporção entre área basal e a área frontal dos elementos de rugosidade e β é a proporção entre o coeficiente de arrasto para elementos de rugosidade isolados e o coeficiente de arrasto para a superfície.

Investigações acerca dessa formulação proposta por Raupach *et al.* (1993) mostraram que o modelo, em geral, fornece uma boa aproximação para a partição do cisalhamento, apesar de mais investigações acerca m e β serem necessárias (Brown *et al.* 2008; Walter *et al.* 2012).

Outros estudos mais recentes relacionados ao tema se destacaram, sendo que alguns deles, já faziam uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional como forma de estudar a partição do cisalhamento de maneira menos dispendiosa que os procedimentos experimentais realizados anteriormente (Li e Shao 2003; Turpin *et al.* 2010; Furieri *et al.* 2013a; Web *et al.* 2014; Caliman, 2017).

Li e Shao (2003) estudaram numericamente os efeitos da dimensões e da distribuição dos elementos rugosos na partição do cisalhamento. Os autores desenvolveram estudos com Simulações das Grandes Escalas (*Large Edge Simulation – LES*) para prever escoamentos turbulentos sobre elementos rugosos, utilizando cilindros isolados e variando a densidade λ dos

elementos pela variação da altura e diâmetro dos cilindros. Os resultados mostraram que o cisalhamento é mais sensível à altura do que ao diâmetro da rugosidade. Além disso, as simulações mostraram que a disposição dos elementos não erodíveis para uma densidade de elementos λ fixa pode afetar o arrasto e a partição do cisalhamento. No entanto, como essas conclusões se basearam em um baixo número de testes, maiores investigações são necessárias.

Turpin *et al.* (2010) realizaram simulações de leitos contendo elementos não erodíveis para investigar a velocidade de fricção na superfície erodível. Os efeitos da turbulência foram modelados utilizando o modelo $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*). O trabalho avaliou o parâmetro R_{fric} , definido como:

$$R_{fric} = \frac{u_r^*}{u_s^*} = \frac{1}{R^n} \quad (6)$$

onde u_r^* é a velocidade de fricção média em uma superfície erodível sob a influência de rugosidades $[m/s]$ e u_s^* é a velocidade de fricção média $[m/s]$ em uma superfície sem a influencia de rugosidades.

Esse parâmetro reflete a evolução da velocidade de fricção com o aumento do número e altura dos elementos rugosos. Os autores encontraram diferenças consideráveis na velocidade de fricção para configurações com a mesma densidade λ e diferentes razões b/h (diferentes em cada teste feito e não dentro de um mesmo leito), indicando que ela é fortemente influenciada pelas propriedades das partículas não erodíveis na superfície do leito. Eles propuseram então, uma formulação matemática diferente da formulação de Raupach *et al.* (1993) para retirar a dependência explícita de λ e incluir essas propriedades:

$$1 - R_{fric} = A(CR)^M (S_{frontal}/S_{floor})^N \quad (7)$$

onde A , M e N são constantes provenientes de simulações, CR é a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis, $S_{frontal}$ é a área frontal dos elementos $[m^2]$ e S_{floor} é a área basal dos elementos $[m^2]$. A razão $S_{frontal}/S_{floor}$ para elementos cilíndricos é dado por:

$$\frac{S_{frontal}}{S_{floor}} = \frac{4}{\pi} \frac{\bar{h}_r}{\bar{D}_{NE}} \quad (8)$$

onde $\bar{D}_{NE}$ e $\bar{h}_r$ são, respectivamente, o diâmetro médio $[m]$ e a altura média $[m]$ dos elementos não-erodíveis.

As simulações realizadas por Turpin *et al.* (2010) foram validadas com resultados de estudos anteriores comparando-se a razão de velocidades de fricção medidas e modeladas (Marshall, 1971; Lyles and Allison, 1975; Gillette e Stockton, 1989; Musick e Gillette, 1990; McKenna Neuman e Nickling, 1995; Crawley and Nickling, 2003; Gillies *et al.* 2007).

Nas simulações realizadas por Turpin *et al.* (2010) as rugosidades ou partículas não-erodíveis são representados como cilindros. Os autores justificaram que na Equação (7) ao se utilizar a relação entre áreas $S_{frontal}/S_{floor}$, o coeficiente de arrasto dependia apenas dessa razão e não mais da forma do elemento rugoso. Além disso, o uso desse parâmetro de área adimensional incorporaria melhor a influência da forma do elemento na velocidade de fricção do que o parâmetro de comprimento adimensional h/b anteriormente sugerido (Figura 7).

Adicionalmente os resultados das simulações também confirmaram que a erosão do solo pelo escoamento do vento é fortemente atenuada pela presença de elementos não erodíveis na superfície.

Furieri *et al.* (2013b) realizou simulações semelhantes a Turpin *et al.* (2010), verificando que a Equação (7) também é válida para uma distribuição de elementos rugosos com diferentes razões diâmetro-altura em um mesmo leito para taxas de cobertura de até 12%.

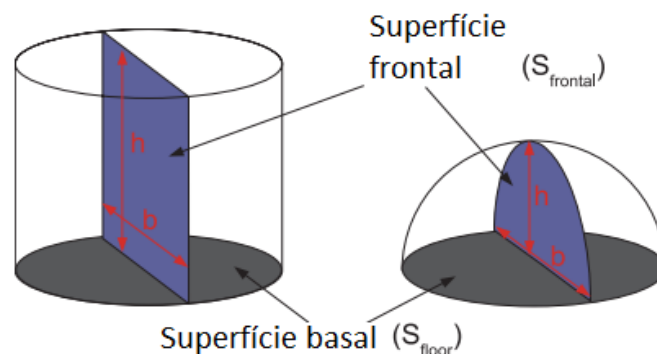


Figura 7 - Representação esquemática dos parâmetros h , b , $S_{frontal}$ e S_{floor} de elementos rugosos não-erodíveis (Turpin *et al.* 2010).

Webb *et al.* (2014) estudaram os efeitos de elementos não erodíveis na erosão eólica calculando o fluxo de partículas através da distribuição de tensão de cisalhamento. Primeiro, utilizando dados experimentais da distribuição da tensão de cisalhamento e depois através da modelagem de Raupach *et al.* (1993). Os resultados mostraram que o fluxo de partículas calculado usando resultados experimentais podem variar mais de uma ordem de magnitude dependendo da densidade de elementos λ . Já o fluxo de partículas calculado pela modelagem

de Raupach *et al.* (1993) mostraram que essa variável foi superestimada de 2 a 3 ordens de magnitude a depender de λ . Os autores concluíram também que a distribuição da tensão de cisalhamento é influenciada pela variação de λ e que a modelagem da distribuição da tensão de cisalhamento, apesar de mais prática, é a metodologia que apresenta erros de maior magnitude.

Caliman (2017) realizou simulações semelhantes às de Furieri *et al.* (2013b) para ampliar as constantes da Equação (7) para taxas de cobertura de até 40%. Com esses resultados foi possível incluir no modelo de emissão desenvolvido pela autora a evolução da velocidade de fricção sobre a superfície de um leito para que a pavimentação fosse modelada.

Assim é possível constatar que o efeito de proteção criado por elementos não erodíveis não foi somente observado como também foi explicado por diversos tipos de estudos. Mostrando que a principal consequência da presença deles em superfície erodíveis é a diminuição da velocidade de fricção ao seu redor, não permitindo que a velocidade de fricção limite das partículas adjacentes seja atingida.

3.3 ESTUDOS SOBRE EMISSÃO EM DUNAS E PILHAS DE ESTOCAGEM

O modelo mais utilizado para estimar as emissões em pilhas de estocagem foi proposto pela US EPA (*United States Environmental Protection Agency*) (USEPA, 2006). Sabe-se que velocidade de fricção não é constante na superfície da pilha, uma vez que a pilha age como um obstáculo e modifica o escoamento ao seu redor (Badr e Harion, 2005). Dessa forma, a depender da geometria da pilha, diferentes distribuições de tensão de cisalhamento poderão ser encontradas. O modelo da US EPA toma essa informação como base e divide a pilha em regiões de mesma de velocidade normalizada u_s/u_r (onde u_s é a velocidade superficial a 25 cm da pilha e u_r é a velocidade do vento na superfície livre) e considera cada região como uma fonte difusa de emissão.

A partir de experimentos de túnel de vento, determinou-se a distribuição de velocidade normalizada para duas formas de pilha e três ângulos de incidência (USEPA, 2006). A Figura 8 mostra os contornos dessa variável para as duas formas de pilha e para incidência do vento a 90°.

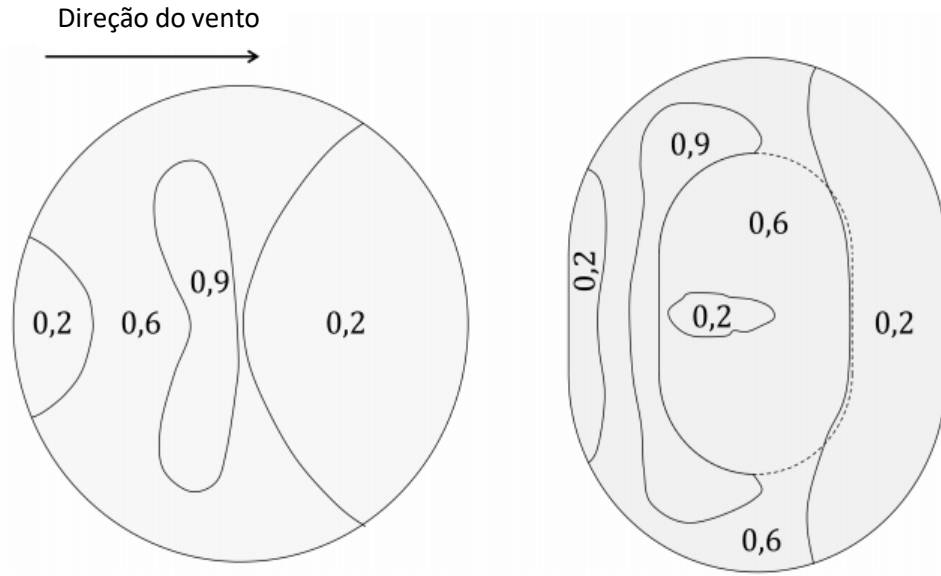


Figura 8 - Contornos de velocidades de vento de superfície normalizadas para duas configurações de estoques (USEPA, 2006).

Com essa informação, a velocidade de fricção é calculada para cada região através da equação:

$$u^* = 0,10 \frac{u_s}{u_r} u_{10}^+ \quad (9)$$

onde u_{10}^+ é a velocidade mais rápida entre as perturbações corrigida para uma altura de referência do anemômetro de 10 m.

Calculada a velocidade de fricção e dado a velocidade de fricção limite do material (medida experimentalmente), obtém-se o potencial de erosão para cada região pela equação:

$$\begin{cases} P = 58 (u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \\ P = 0 \text{ para } u^* \leq u_t^* \end{cases} \quad (10)$$

onde u^* é a velocidade de fricção e u_t^* é a velocidade de fricção limite.

A emissão global é dada pela Equação (11), onde soma-se a emissão proveniente de cada região da pilha.

$$E = K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{ij} A_{ij} \quad (11)$$

onde E é a emissão total [g], K é o multiplicador relacionado ao tamanho da partícula, M é a quantidade de superfícies com mesmo valor de u_s/u_r , N é o número de perturbações por ano, P_{ij} é o potencial de erosão correspondente à maior velocidade do vento para o i -ésimo período entre perturbações para cada uma das j -ésima áreas da pilha e $A_{i,j}$ cada uma das subáreas da pilha.

O multiplicador de tamanho de partícula K para a equação varia com o tamanho aerodinâmico da partícula conforme a Tabela 1. É importante ressaltar que o modelo considera o material como uma mistura de partículas até determinada faixa de diâmetro, logo pode-se dizer que a mistura é vista como uma mistura de partículas que podem ser erodíveis e não erodíveis a depender da velocidade incidente sobre a pilha. No entanto o modelo não considera em que proporção essas partículas erodíveis e não-erodíveis estão presentes, sendo esta, sua maior limitação.

Tabela 1 - Multiplicadores do tamanho de partícula com base no diâmetro (USEPA, 2006).

Multiplicadores do tamanho de partícula aerodinâmico			
30 μm	< 15 μm	< 10 μm	< 2,5 μm
1,0	0,6	0,5	0,075

Diversos estudos foram realizados ao longo dos anos com o objetivo de melhor investigar a o escoamento ao redor de pilhas de estocagem, sendo que a maioria deles integrou o modelo da US EPA aos seus resultados para avaliação da emissão.

Badr e Harion (2005) avaliaram numericamente o escoamento sobre duas geometrias de pilhas e compararam a distribuição de velocidade obtida com resultados experimentais de túnel de vento (USEPA, 1985, 1988; Stunder e Arya, 1988). Para a modelagem da turbulência foram testados vários modelos, sendo o modelo $k - \omega$ SST escolhido por apresentar melhores resultados em comparação com dados experimentais. A concordância entre os valores modelados e medidos dos valores de tensão de cisalhamento sobre as pilhas foi geralmente boa para todas as configurações testadas. Os autores concluíram que os padrões de tensão de cisalhamento observados influenciam a quantidade de partículas emitidas a partir da superfície da pilha.

Toraño *et al.* (2007) investigaram a influência da forma da pilha na erosão eólica usando simulações numéricas. O objetivo do estudo foi determinar qual das duas configurações testadas, uma pilha semicircular ou duas pilhas cônicas, emite menos poeira. Para a modelagem da turbulência foi utilizado o modelo $k - \varepsilon$ por apresentar bons resultados quando comparados com os dados experimentais. Os resultados mostraram que a configuração que menos emite poeira é a semicircular. No entanto, por ela possuir menor área superficial comparada com as pilhas cônicas, no cálculo da emissão por metro quadrado, as emissões são bastante similares.

Turpin e Harion (2009) modelaram numericamente o escoamento sobre pilhas de topo plano em diferentes direções do vento e avaliaram as implicações do achatamento da crista sobre as emissões de poeira ao integrar os resultados das simulações com o modelo de emissão da US EPA. O achatamento da crista foi modificado fazendo-se cortes a determinadas distâncias a partir do pico. Para a modelagem da turbulência foi utilizado o modelo $k - \omega$ SST. Os resultados mostraram que com o aumento da distância de corte, a velocidade torna-se maior na parte superior das pilhas, aumentando a área erodível para qualquer velocidade do vento. Além disso, a variação do ângulo de incidência do vento mostrou que quando o ângulo se aproxima de 0° , a emissão, embora ocorra em uma parte maior da pilha, está associada a um baixo grau de erosão. Concluíram também, que a pilha com potencial de erosão mais fraco é aquela com crista pontiaguda quando o vento é perpendicular ao alinhamento da pilha.

Turpin e Harion (2010) realizaram simulações numéricas de pátio industrial real contendo pilhas e edificações e calcularam a emissão utilizando o modelo de emissão da US EPA. Os autores concluíram que a presença de obstáculos ao redor das pilhas tem influência nas estimativas de emissão e devem ter seus efeitos avaliados.

Cong *et al.* (2012) avaliaram a emissão em um pátio aberto (pela integração de resultados numéricos ao modelo de emissão da US EPA), variando a forma de 16 pilhas arranjadas em 4 colunas, a distância entre elas e a orientação de incidência do vento. Utilizaram o modelo $k - \varepsilon$ para o fechamento da turbulência nas simulações. Os autores observaram um efeito de proteção criado pelas pilhas vizinhas, levando a diminuição a emissão total de poeira. No entanto, quanto maior a distância entre elas maior se torna a emissão.

Furieri *et al.* (2012) compararam a emissão em pilhas de estocagem alongadas isoladas e sucessivas sob diferentes distancias com uma incidência do vento a 60° . Os autores realizaram simulações numéricas com modelos dessas pilhas utilizando, para o fechamento da turbulência, o modelo $k - \omega$ SST. Os resultados numéricos mostraram que uma pilha isolada emite menos

poeira do que quando cada pilha é colocada próxima a outra. O efeito de proteção apontado por outros autores não foi observado para esse tipo de configuração de pilha.

Ferreira *et al.* (2013) investigaram, experimentalmente e numericamente, a distribuição de velocidades de fricção ao longo de dunas isoladas e sucessivas. Utilizaram o modelo $k - \varepsilon$ para o fechamento da turbulência nas simulações. Os autores encontraram que a erosão a jusante de uma duna, em dunas sucessivas, é maior devido as perturbações induzidas pela duna anterior a ela.

Novak *et al.* (2015) utilizaram a dinâmica de fluidos computacional para calcular o campo de velocidades ao redor de pilhas sob a proteção de barreiras de vento. Os resultados foram integrados ao modelo da USEPA para o cálculo da emissão. Apesar do efeito limitado das barreiras na redução das velocidades locais e consequentemente, na taxa de erosão, a presença de cercas adjacentes, edifícios, estruturas e a configurações das pilhas têm demonstrado ter uma influência importante nas condições do vento e devem, portanto, ser sempre tidos em conta nas análises da emissão.

Jiang *et al.* (2017) investigaram numericamente o movimento de partículas na superfície de uma duna utilizando Simulações das Grandes Escalas (*Large Edge Simulation – LES*) para a modelagem do escoamento. Os resultados mostraram que a presença da duna altera o movimento do ar e o movimento das partículas. Em regiões de declive as partículas ganham energia e saltam, podendo inclusive, erodir a superfície atrás dessas regiões.

Wang *et al.* (2017) investigaram os efeitos de dunas menores a diferentes distâncias a montante de uma grande duna. Os autores usaram LES e medições experimentais para avaliar o escoamento do vento sobre as duas. As dunas menores foram geometricamente semelhantes à duna grande, mas todos os comprimentos foram reduzidos pela metade. Os resultados mostraram que à medida que a duna pequena se aproxima da duna grande, a morfologia da duna grande é completamente alterada e eventualmente, em casos de estruturas compostas por materiais granulosos, a duna pequena acabará por se fundir com a duna grande enquanto, simultaneamente, uma duna pequena será ejetada da duna grande. Esse comportamento evidencia a interação entre estruturas erodíveis e o processo de migração de partículas durante o processo de erosão.

Fonias e Grigoriadis (2018) estudaram a influência de partículas sobre a superfície de dunas utilizando LES. Os resultados mostraram que a velocidade do escoamento é modificada pela presença de partículas, sendo a energia cinética turbulenta reduzida pela presença delas. Os autores também identificaram zonas de recirculação a jusante da pilha onde as partículas

tem baixa velocidade sendo encontradas também baixos níveis de concentrações. O estudo quis evidenciar, de forma geral, o comportamento do escoamento sobre as dunas na presença de partículas.

Dessa forma, os estudos relacionados ao tema evidenciam que a geometria de pilhas e de dunas, assim como obstáculos próximos a elas tem forte influência na emissão das partículas.

3.4 MODELOS DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO

Descamps *et al.* (2005) desenvolveram um modelo para quantificar a evolução temporal do fluxo de massa em um leito de partículas com ampla distribuição de tamanhos de partículas expostas ao escoamento turbulento. Os autores consideraram o decréscimo temporal das forças aerodinâmicas agindo nas partículas e conseqüentemente, a evolução temporal da distribuição dessas partículas na superfície do leito. Logo, foi o primeiro trabalho a modelar o fenômeno da pavimentação. No entanto, Descamps *et al.* (2005) assumiram que a erosão cessa quando o leito está completamente coberto por partículas não erodíveis, discordando então, com resultados experimentais.

Kok *et al.* (2014) desenvolveram uma expressão analítica para o fluxo de partículas emitido por solos erodíveis dependente apenas de variáveis cujos valores normalmente estão disponíveis, como a velocidade do vento e as propriedades do solo. O modelo leva em consideração que a saltação pode influenciar a emissão de outras partículas pelo impacto causado quando as partículas saltantes retornam ao leito. Além disso, inclui a coesão entre as partículas de menor diâmetro, sendo válido então, para uma ampla distribuição de tamanhos. Porém, esse modelo tem como limitação não estimar a variação do fluxo de massa emitida com o tempo, considerando assim, que quantidade de partículas erodíveis é ilimitada.

Klose *et al.* (2014) propuseram uma nova abordagem para um modelo que considera a convecção turbulenta na emissão. Baseado em simulações numéricas, um novo método para descrição do fluxo de quantidade de movimento instantâneo foi desenvolvido, assim como correções para consideração da coesão devido aos efeitos da umidade e para consideração da presença de elementos não-erodíveis. No entanto, a correção para inclusão dos efeitos de elementos não-erodíveis ainda apresenta limitações pelo modelo não ter sido comparado, ao incluí-la, com resultados experimentais, sendo necessárias mais investigações acerca de sua validade.

Zou *et al.* (2015) propuseram um modelo conceitual para a quantidade de material emitida durante a erosão considerando uma ampla gama de fatores envolvidos no fenômeno. A distribuição de tamanho de partícula, teor de sal e matéria orgânica, teor de água líquida, teor de água congelada, cobertura de neve e raízes de plantas são considerados como fatores de antierodibilidade do leito; vegetação e cobertura de cascalho são considerados fatores de interferência rugosa; e todos esses fatores são expressos como força de cisalhamento. Através da comparação entre um gráfico padrão de quantidade de massa emitida em função da tensão de cisalhamento e o gráfico correspondente resultado de testes experimentais, o modelo permite que dados em escalas reduzidas sejam extrapolados para escalas de campo. Porém, a estimativa ainda é teórica, não tendo embasamento ou comprovação experimental.

Hoonhout e Vries (2016) apresentaram um modelo que considera a variação espacial e temporal da disponibilidade de sedimentos na altura e sobre a superfície do leito. Simulações das propriedades espaciais e temporais da superfície são realizadas para estimar as variações que interferem no processo de emissão, como a distribuição de partículas e o efeito de proteção criado por elementos rugosos não erodíveis que emergem da superfície com a erosão do vento. A performance do modelo foi avaliada através de estudos de casos hipotéticos e de resultados experimentais obtidos da literatura, evidenciando que o mesmo ainda precisa ser melhor investigado.

Caliman (2017) propôs um modelo para leitos composto por uma simples equação que calcula a massa emitida por meio do volume emitido:

$$E_f = (1 - \alpha_{NE})\rho_{bed}H_fS_{bed} \quad (12)$$

onde α_{NE} é a fração mássica de partículas não-erodíveis, $\rho_{bed} = \varphi\rho_p$ [kg/m^3], φ é a fração volumétrica da mistura, ρ_p é a massa específica das partículas [kg/m^3], H_f é a altura final erodida do leito e S_{bed} é área do leito [m^2].

Para estimar H_f considerando os efeitos da pavimentação, utilizou-se a equação proposta por Turpin *et al* (2010) (Equação (7)) onde seria necessário encontrar primeiramente as velocidades de fricção sobre uma superfície contendo rugosidades para calcular as constantes A , M e N da equação. Caliman (2017) realizou uma série de simulações em leitos rugosos para taxas de cobertura de partículas não-erodíveis de até 40% e encontrou que as constantes são (por um ajuste da equação utilizando método dos mínimos quadrados) 0,188, 0,313 e 0,216, respectivamente.

Para aplicar os resultados encontrados para determinadas taxas de cobertura seria necessário também encontrar uma relação que relaciona a taxa de cobertura e a altura erodida. A Figura 9 apresenta a evolução da proporção superficial ocupada pelas partículas não-erodíveis (CR) em função da altura erodida (H) para uma distribuição uniforme de tamanhos de partículas não-erodíveis cuja erodibilidade é mantida para uma determinada velocidade. Da observação dessa evolução, considerado que a altura média do elemento rugoso ($\bar{D}_{NE}$) é igual a altura erodida de cada camada descoberta durante a erosão e que as partículas estão distribuídas na mesma proporção em cada camada, a relação entre CR e H é:

$$CR = aH + CR_i \quad (13)$$

onde CR_i é a taxa de cobertura inicial de partículas não-erodíveis.

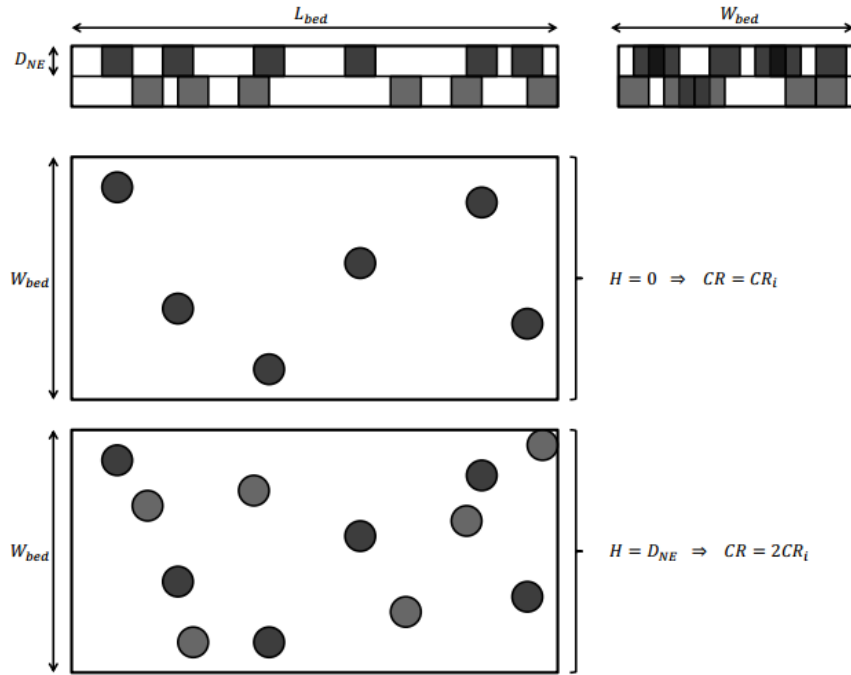


Figura 9 - Evolução da proporção superficial ocupada pelas partículas não-erodíveis em função da altura erodida (Caliman, 2017).

Sendo a inclinação da reta dada por:

$$a = \frac{CR_i}{\bar{D}_{NE}} \quad (14)$$

onde a taxa de cobertura inicial de partículas não-erodíveis, de acordo com dados experimentais de Caliman (2017), é equivalente a:

$$CR_i = \alpha_{NE} \varphi \quad (15)$$

α_{NE} é a fração mássica de partículas não-erodíveis e φ é a fração volumétrica da mistura. φ pode ser calculado por:

$$\varphi = \frac{V_{tot}}{V_{bed}} \quad (16)$$

onde V_{tot} é o volume total ocupado pelas partículas e V_{bed} é o volume do leito.

Substituindo na Equação (7) a relação da Equação (13):

$$1 - R_{fric} = A(aH + CR_i)^M \left(\frac{4H}{\pi \bar{D}_{NE}} \right)^N \quad (17)$$

e considerando que no estágio final da erosão R_{fric} é mínimo, a equação se torna:

$$1 - R_{MIN} = A(aH_f + CR_i)^M \left(\frac{4H_f}{\pi \bar{D}_{NE}} \right)^N \quad (18)$$

Dessa forma H_f pode ser calculado e a emissão estimada pela Equação (12).

Para pilhas, Caliman (2017) propôs aplicar o modelo, anteriormente desenvolvido para leitos, subdividindo a pilha em áreas que apresentem os mesmos ângulos θ em que o fluido escoar sobre a pilha:

$$\theta = \arcsin(\tau_z/\tau) \quad (19)$$

onde τ_z , é o componente vertical da tensão de cisalhamento. A Figura 10 mostra a tensão de cisalhamento total e a componente z da tensão de cisalhamento.

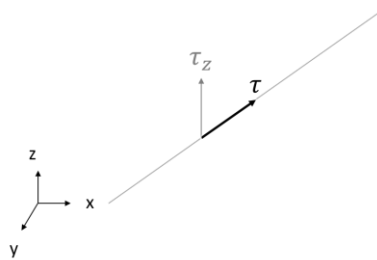


Figura 10 - Tensão de cisalhamento total e a componente z da tensão de cisalhamento.

A Figura 11 mostra as isosuperfícies de θ constante (com intervalos de 5°) com suas velocidades de fricção limite correspondentes relativamente a uma superfície plana e a distribuição da velocidade de fricção em cada uma dessas superfícies para uma velocidade de corrente livre de 8 m/s e incidência do vento a 90° . No modelo, as isosuperfícies de θ e u^* são separadas com intervalos de 2° e $0,01 \text{ m/s}$, respectivamente, após vários testes com diferentes intervalos feitos por Caliman (2017) não apresentarem variações significativas na massa emitida.

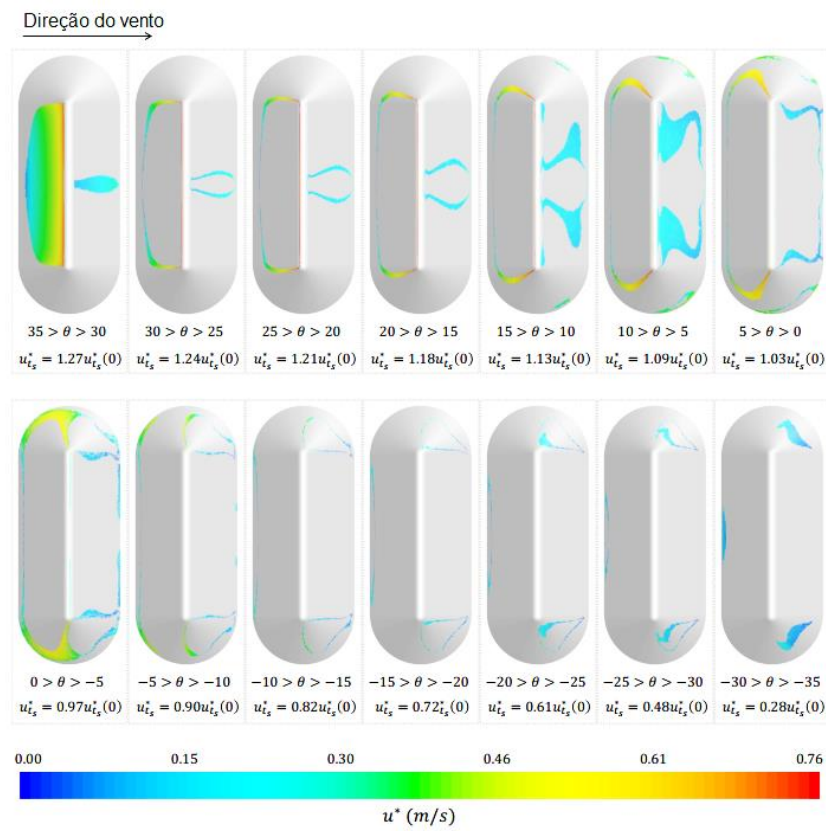


Figura 11 - Isosuperfícies de θ constante (intervalos de 5°) com os seus limites correspondentes relativamente a uma superfície plana e a distribuição da velocidade de fricção em cada uma dessas superfícies ($U_\infty = 8$)(Caliman, 2017).

Assim, utilizando a equação de Iversen e Rasmussen (1994) (Equação (3)) é possível corrigir a velocidade de fricção em que as partículas são emitidas levando em consideração a influência da inclinação da superfície da pilha. Depois de dividir a pilha em isosuperfícies de mesmo θ , onde o θ é constante, dado um grau de exposição ao vento u^* , cada região é considerada como um leito de partículas e então o modelo proposto anteriormente pode ser aplicado.

Outras considerações utilizadas no modelo são:

- i. Assume-se uma distribuição homogênea das partículas ao longo da superfície de pilha, ou seja, uma distribuição de tamanho das partículas idêntica foi considerada para cada isosuperfície S_{θ,u^*} . Quando as partículas estão dispostas em uma pilha, existe uma tendência das partículas maiores rolarem devido à gravidade ou se acumularem em algumas regiões. Portanto, a distribuição da mistura tem pequenas mudanças ao longo da superfície da pilha devido à sua forma. No entanto, essas mudanças não são consideradas na proposta modelo.
- ii. O modelo proposto foi desenvolvido para aplicação em material granular com uma distribuição de tamanho de partícula contendo partículas não-erodíveis. Se houvesse apenas partículas erodíveis, a pilha sofreria grandes deformações durante a erosão. Portanto, o modelo para pilhas é relevante apenas no caso de erosão limitada.
- iii. Entre as áreas subdivididas da pilha, as superfícies S_{θ,u^*} em que todas as partículas tornam-se erodíveis podem ser encontradas. Nesse caso, $S_{\theta,u^*} = 0$, $R_{fric} = 1$ e $CR = 0$, o que significa que o modelo não é capaz de determinar H_f usando a formulação para R_{fric} . Essas regiões correspondem às inclinações de $36^\circ > \theta > 35^\circ$ e $-36^\circ > \theta > -35^\circ$. Para superar a dificuldade de se estimar H_f nas áreas problemáticas da pilha onde todas as partículas são erodíveis, a seguinte aproximação na modelagem foi utilizada: todas as emissões de regiões que contêm partículas não-erodíveis foram contabilizadas e os valores de H_f foram registrados para cada caso; para as isosuperfícies S_{θ,u^*} em que todas as partículas são erodíveis, o valor máximo de H_f a partir dos valores registrados foram utilizados para calcular as emissões.
- iv. No modelo para pilhas, a relação entre a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis e altura erodida do leito é encontrada pelo escaneamento dos diâmetros da distribuição granulométrica. A taxa de cobertura daqueles que são não-erodíveis, dados uma inclinação da pilha e uma velocidade de fricção, são somados sucessivamente para contabilizar a taxa de cobertura final e a soma de seus respectivos diâmetros são contabilizados como altura erodida. Esse procedimento, para os casos testados por Caliman (2017), leva a uma relação linear entre CR e H tal como suposto pela autora.

3.5 CONCLUSÃO DA REVISÃO DA LITERATURA

Os estudos da erosão eólica sob o aspecto da partição do cisalhamento têm ajudado na melhor compreensão e modelagem do fenômeno quando observado na escala das partículas. A avaliação da velocidade de fricção sobre a superfície do leito evidencia que a partição do cisalhamento mensurada em função da densidade de elemento λ ainda apresenta resultados controversos. Logo, a abordagem de Turpin *et al.* (2010) se mostra como a melhor escolha para esse tipo de estudo.

Simulações numérica do escoamento médio ao redor de pilhas também tem fomentado as pesquisas no fornecimento de dados que permitam concluir que a geometria da pilha e elementos ao redor dela tem forte influência na emissão de partículas.

A associação dessas duas abordagens, tal como realizado por Caliman (2017), traz contribuições inovadoras para o desenvolvimento e análise de novos modelos com base em resultados de estudos bastante consolidados na literatura atual.

4 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO EM TÚNEL DE VENTO

Os experimentos foram conduzidos pela Professora Dra. Maria Clara S. F. Caliman no túnel de vento do *Département Energétique Industrielle* (Douai, França) no período de realização de seu doutorado na França, porém, os dados aqui utilizados ainda não foram publicados. A Figura 12 (a) mostra um esquema do túnel de vento e suas principais dimensões. Vários elementos de rugosidade foram colocados anteriores a seção de teste (Figura 12 (b)) permitindo a formação de uma camada limite turbulenta de modo que na seção de teste (Figura 12 (c)) a espessura da camada limite δ fosse suficientemente maior do que a altura da pilha h ($\delta = 16\text{ cm}$ e $h = 7,7\text{ cm}$, respectivamente). O escoamento foi controlado por um ventilador axial localizado a jusante do túnel de vento (Figura 12 (d)). Uma câmera fotográfica foi instalada na parte de cima da seção de teste (parede de vidro transparente) para registrar a evolução do processo de erosão. Mais detalhes do túnel de vento são encontrados em Furieri et al. (2013a).

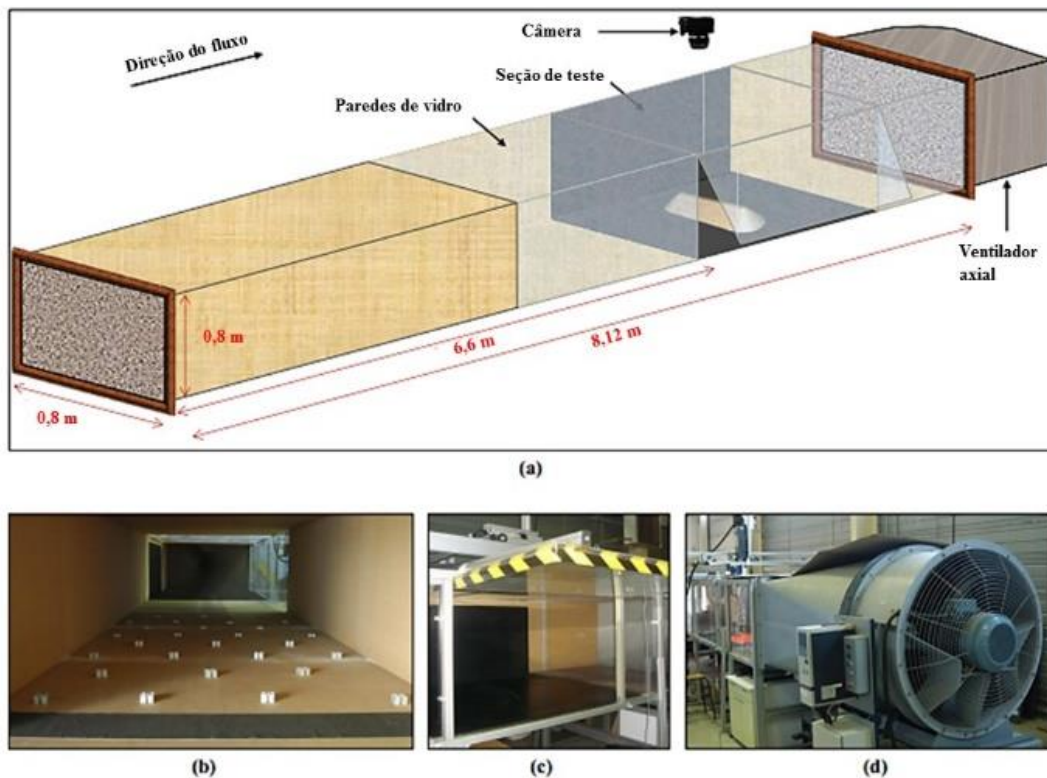


Figura 12 - (a) Esquema do túnel de vento, (b) estruturas para formação da camada limite turbulenta, (c) seção de teste e (d) Ventilador centrífugo. Adaptado de Caliman (2017).

Três faixas granulométricas de areia com massa específica de 2630 kg/m^3 foram utilizadas para representar as partículas erodíveis, as de erodibilidade variável e as não-erodíveis nas condições do experimento; no presente trabalho estas serão denominadas: areia fina branca com diâmetro variando de 56 a $194 \mu\text{m}$, areia média amarela com diâmetro variando de 300 a $600 \mu\text{m}$ e areia grossa preta com diâmetro variando de 700 a $1300 \mu\text{m}$. A coloração da areia foi escolhida de forma a permitir a diferenciação da erodibilidade das partículas nas imagens.

Os modelos de pilhas foram construídos dentro do túnel de vento usando um dispositivo similar a um funil industrial, mostrado na Figura 13 (a). Furieri *et al.* (2013a) realizaram vários testes para garantir a repetibilidade da forma da pilha e das dimensões dadas pelos dispositivo. As dimensões da pilha de areia apresentam uma escala de aproximadamente 1:200 em relação a uma pilha real e são apresentadas na Figura 13 (b) e na Figura 13 (c): 7,7 cm de altura, 23,6 cm de comprimento, 57,9 cm de largura, e $34,5^\circ$ de ângulo de repouso.

Os experimentos com o túnel de vento compreenderam apenas uma pilha isolada com incidência do vento a 90° . As diferentes proporções de areia que foram utilizadas são apresentadas na Tabela 2. Depois da pesagem da massa inicial da pilha, uma nova pesagem foi realizada ao término dos testes. A subtração da pesagem inicial da pesagem final forneceu a quantidade de areia emitida. A duração do escoamento foi de 15 minutos, tempo em que a pavimentação foi observada para todos os casos. Fotografias foram tiradas no início da experiência e a cada 30 segundos até 5 minutos.

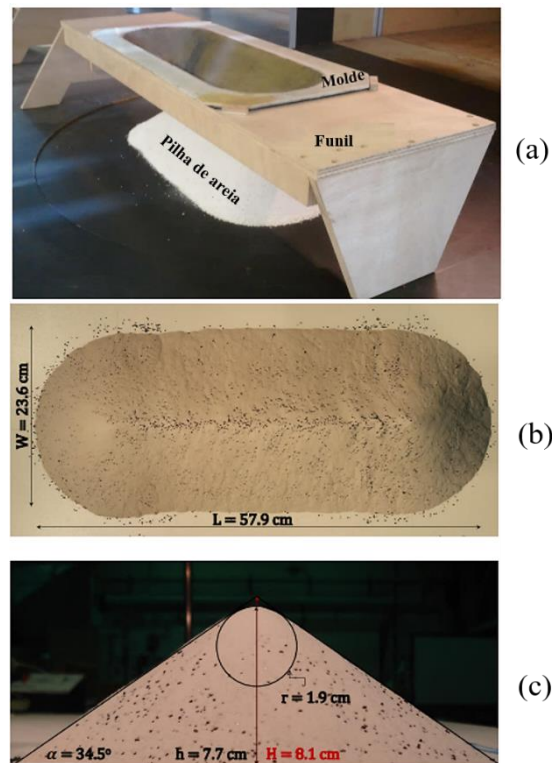


Figura 13 - (a) Dispositivo utilizado para construção da pilha, (b) dimensões médias e (c) visão lateral.

Tabela 2 - Proporções de areia utilizadas nos experimentos e massas inicial e emitida das pilhas.

C	Velo	Br	Am	P	M	M
aso	cidade (m/s)	ancas (%)	arelas (%)	retas (%)	assa	assa
D	7	80	12	8	6190,6	175,5
D	8	80	12	8	6190,6	278,5
D	9	80	12	8	6190,6	434,5
E	7	65	21	14	6700,0	129,3
E	8	65	21	14	6700,0	269,5
E	9	65	21	14	6700,0	415,7
F	7	50	30	20	7100,0	116,0
F	8	50	30	20	7100,0	153,9
F	9	50	30	20	7100,0	280,2

A Figura 14 apresenta o critério de emissão utilizado para escolha dos diâmetros das partículas obtido de estudos experimentais de Iversen e White (1982), White (1982) e Foucaut e Stanislas (1996). Este critério baseia-se na velocidade de fricção limite adimensional ($\tilde{u}_t^*$) (Equação (20)) e no diâmetro adimensional de partícula ($\tilde{D}$) (Equação (21)). O critério é utilizado para determinar, se partículas de determinado diâmetro, são erodíveis ou não, de

acordo com a velocidade de fricção adimensional do vento ($\tilde{u}^*$) (Equação (23)) (White, 1982; Foucaut e Stanislas, 1996).

$$\tilde{u}_t^* = 22,71\tilde{D}^{0,043} + 10,23\tilde{D}^{-0,118} - 32,5 \quad (20)$$

$$\tilde{D} = \frac{D}{D_{ref}} \quad (21)$$

onde

$$D_{ref} = \left(\frac{\nu^2}{\gamma_p} \right)^{1/3} \quad (22)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do ar [m^2/s], $\gamma_p = (\rho_p g / \rho_{ar})$ a gravidade aparente [m/s^2], ρ_p é a massa específica da partícula [kg/m^3], ρ_{ar} é a massa específica do ar [kg/m^3] e g é a aceleração da gravidade [m/s^2].

Três velocidades de corrente livre (7, 8 e 9 m/s) foram testadas no túnel de vento. A velocidade de fricção foi estimada pela Equação (23) determinada por Kurose e Komori (2001). A Figura 14 mostra os valores calculados de velocidade de fricção adimensional.

$$\tilde{u}^* = u^* / u_{ref}^* \quad (23)$$

onde

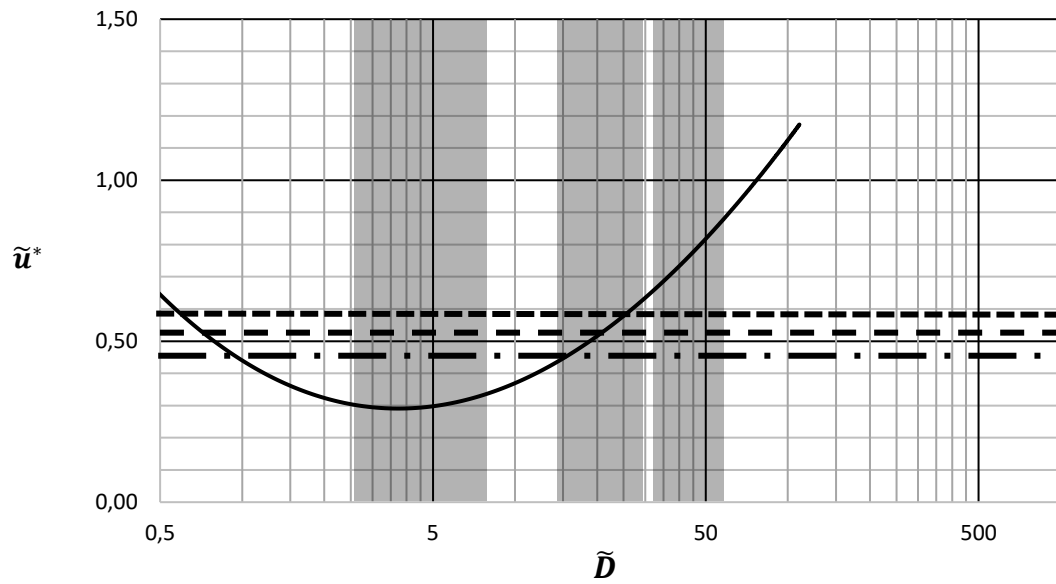
$$u_{ref}^* = (\gamma_p \nu)^{1/3} \quad (24)$$

$$u^* = u_s^* (1 + 0,0043h^+) \quad (25)$$

onde h^+ é o diâmetro médio adimensional das partículas não-erodíveis ($h^+ = h_{NEP} u_s^* / \nu$, onde h_{NEP} é o diâmetro médio das partículas não-erodíveis [m] e ν é a viscosidade cinemática [m^2/s]) e u_s^* é a velocidade de fricção para uma superfície lisa calculado pela relação proposta por Mollinger e Nieuwstadt (1996):

$$u_s^* = 0,036U_\infty + 0,033 \quad (26)$$

onde U_∞ é a velocidade de corrente livre [m/s].



	Critério de	Velocidades testadas			
	Faixas testadas				
Erodibilidade	$\tilde{D}$		U_∞ (m/s)	u^* (m/s)	$\tilde{u}^*$
Erodível	2,5 a 8,8	— · —	7,0	0,31	0,45
Variável	13,6 a 27,2	- - -	8,0	0,35	0,51
Não-erodível	31,8 a 59,0	- - - -	9,0	0,39	0,58

Figura 14 - Critério de emissão, diâmetro das partículas e velocidades testadas.

5 METODOLOGIA

5.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE CISALHAMENTO SOBRE UM LEITO COMPOSTO DE ELEMENTOS RUGOSOS

5.2.1 DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO

O modelo físico consiste de uma parte de um leito formado por uma mistura de partículas erodíveis e não-erodíveis numa atmosfera neutra. As partículas não-erodíveis são representadas por elementos de rugosidade fixos e as partículas erodíveis pela superfície lisa ao redor desses elementos. As partículas foram dispostas aleatoriamente sobre a superfície, sendo que a velocidade do escoamento sobre elas segue um perfil vertical logarítmico. Como o domínio representa apenas uma parte do leito, foi considerado que essa parte é representativa e se repete periodicamente.

5.2.2 DESCRIÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL

Dado o modelo físico descrito na Seção 5.1.1, o domínio computacional foi elaborado como mostrado na Figura 15, tendo como dimensões $0,030\text{ m} \times 0,030\text{ m}$ de base e $0,100\text{ m}$ de altura. A quantidade de cilindros utilizada em cada simulação é mostrada nas tabelas do Apêndice I.

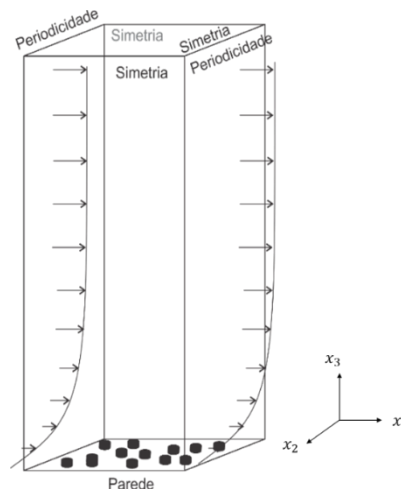


Figura 15 - Domínio computacional.

5.2.3 EQUAÇÕES GOVERNANTES

As simulações numéricas realizadas no presente trabalho se deram em regime permanente. Dessa forma os termos transientes nas equações médias de conservação não são considerados. Além disso é importante pontuar uma consideração utilizada em relação às forças devido ao empuxo térmico que podem atuar em escoamentos atmosféricos. Em todos os casos simulados no presente trabalho a atmosfera foi considerada como sendo de estabilidade atmosférica neutra. A atmosfera é classificada como neutra quando o gradiente vertical de temperaturas pode ser escrito pela Equação (38):

$$\frac{dT}{dz} = -0,98^\circ\text{C}/100\text{ m} \quad (27)$$

Atmosferas estáveis ou instáveis apresentam o gradiente vertical de temperaturas diferente do valor apresentado na Equação (27). Na condição de estabilidade atmosférica neutra a movimentação das parcelas de ar se dá em condições adiabáticas, não havendo variações térmicas e, portanto, as forças devido ao empuxo térmico são desprezíveis prevalecendo as forças mecânicas devido ao cisalhamento. Vale ressaltar que, em estudos de escoamentos atmosféricos, adota-se a variável temperatura potencial (θ) para representar as trocas térmicas existentes. A temperatura potencial é definida como aquela que uma parcela de ar teria se fosse movimentada por um escoamento adiabático até uma pressão de referência (Seinfeld e Pandis, 2006). Uma vez que a equação de conservação de energia pode ser escrita em termos da temperatura potencial média $\bar{\theta}$, a substituição da variável temperatura T por $\bar{\theta}$ (na equação de conservação de energia) permite que escoamentos atmosféricos em condição de estabilidade atmosférica neutra possam ser simulados sem que a equação de conservação de energia seja resolvida devido ao fato de que $\partial\bar{\theta}/\partial z = 0$ para estes casos (Costa, 2016).

Logo, o escoamento do vento sobre o leito de partículas e consequentemente, a velocidade de fricção ao redor das rugosidades, foram modelados resolvendo-se apenas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento. As equações de conservação de massa e quantidade de movimento descritas em termos da média de Reynolds em regime permanente são, respectivamente:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) \end{aligned} \quad (29)$$

onde ρ representa a massa específica [kg/m^3], u representa os componentes da velocidade [m/s], p é a pressão estática [Pa] e μ é a viscosidade dinâmica [$Pa \cdot s$].

A Equação (28), da conservação de massa representa o balanço de massa ao longo de um volume de controle diferencial. Os termos da equação mostram a variação da massa no volume de controle com o tempo e o fluxo líquido de massa através da superfície do volume de controle, respectivamente.

A Equação (29), da conservação da quantidade de movimento, representa o balanço de quantidade de movimento ao longo de um volume de controle diferencial. Os termos da equação mostram, respectivamente: a variação com o tempo da quantidade de movimento no volume de controle, o transporte advectivo de momentum para o escoamento médio, as forças do gradiente de pressão, as forças viscosas e as forças do tensor de Reynolds.

Essas equações chamadas equações médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes RANS*), levam a um termo extra $(-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j)$, fluxo de movimento turbulento, chamado tensor de tensão de Reynolds. Após a substituição de todas as variáveis, existem mais variáveis que equações para resolver o campo de escoamento e um problema de fechamento emerge.

Para tentar resolver o problema de fechamento Boussinesq em 1887 introduziu o conceito de viscosidade turbulenta. De acordo com Boussinesq, o tensor de Reynolds pode ser tratado como no escoamento laminar substituindo a viscosidade dinâmica pela viscosidade turbulenta como mostrado na equação. Essa analogia é precisa para muitos escoamentos e simplifica a descrição matemática e a solução:

$$\tau_{ij} = (-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) = u_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (30)$$

onde u_t é a viscosidade turbulenta tendo as mesmas dimensões da viscosidade dinâmica.

A viscosidade turbulenta carrega todas as informações acerca das flutuações turbulentas do escoamento. Os modelos de viscosidade turbulenta podem ser categorizados de acordo com o número de equações adicionais a serem resolvidas: (i) equações algébricas, (ii) uma equação diferencial e (iii) duas equações diferenciais (Souza *et al.* 2011).

Os modelos mais disseminados são os modelos de duas equações. Eles incluem duas equações diferenciais para descrever as quantidades turbulentas, das quais uma delas sempre é para a energia cinética turbulenta k . O modelo $k - \varepsilon$ é um modelo de duas equações bastante popular que resolve adicionalmente uma equação para a taxa de dissipação turbulenta ε . O modelo $k - \varepsilon$ normalmente requer termos extras nas equações, a fim de explicar o amortecimento da turbulência que ocorre perto das paredes. Apesar de um bom desempenho em algumas aplicações de engenharia e do custo computacional relativamente baixo, os modelos $k - \varepsilon$ podem apresentar baixa precisão para fluxos complexos com um gradiente de pressão adverso (Blazek, 2015).

O modelo $k - \omega$ é uma alternativa ao modelo $k - \varepsilon$, no qual uma equação diferencial adicional é introduzida para a taxa de dissipação turbulenta específica ω . O modelo $k - \omega$ é mais preciso que o modelo $k - \varepsilon$ nas camadas mais próximas a parede, dando melhores previsões para camadas limite com gradiente adverso de pressão (Yu e Righetto, 2001; Argyropoulos e Markatos, 2015). No entanto, o modelo $k - \omega$ tem a desvantagem de ter as equações extremamente sensíveis aos valores de ω na corrente livre, fora da camada limite. Menter (1994) propôs um modelo híbrido entre o $k - \varepsilon$ e o $k - \omega$, o *Shear-Stress Transport (SST)* $k - \omega$. O $k - \omega$ SST combina as vantagens de ambos os modelos utilizando a formulação $k - \omega$ perto da parede e gradualmente mudando para a formulação $k - \varepsilon$ longe da parede.

O modelo de turbulência selecionado foi o modelo $k - \omega$ *Shear Stress Transport (SST)*. Pois, além de ser mais simples e tratar regiões tanto perto quanto longe da parede, foi utilizado em estudos semelhantes apresentando bons resultados (Badr (2007), Turpin *et al.* (2010), Furieri *et al.* (2013b) e Caliman (2017)).

As equações de transporte para k e ω utilizadas no modelo $k - \omega$ SST, para condições estacionárias, são:

$$\frac{\partial(\rho k \bar{u}_j)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\omega\bar{u}_j)}{\partial x_j} = & \frac{\alpha\rho}{u_t} P_k - \beta\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega\mu_t) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 \\ & - F_1)\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (32)$$

onde P_k é a produção de k :

$$P_k = \min(2u_t\bar{S}_{ij} \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}, 10\beta^*\rho k\omega) \quad (33)$$

Um limitador de produção é inserido com o termo $10\beta^*\rho k\omega$ para prevenir a supertimação da energia cinética turbulenta perto de pontos de estagnação, uma desvantagem bem conhecida dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$.

O último termo da Equação (32) é ativado pela função de mistura F_1 que faz a transição entre a formulação do $k - \omega$ perto da parede ($F_1 = 1$) e a formulação do $k - \varepsilon$ na parte externa da camada limite ($F_1 = 0$):

$$F_1 = \tanh \left(\left[\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega d}, \frac{500\mu}{d^2\rho\omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}d^2} \right) \right]^4 \right) \quad (34)$$

onde d é a distância da parede mais próxima e :

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial\omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (35)$$

Cada uma das constantes α , β , σ_k e σ_ω são calculadas pelas constantes correspondentes de $k - \varepsilon$ e de $k - \omega$ usando a função de mistura F_1 via $\alpha = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 (1 - F_1)$ e assim por diante. Assim as constantes do modelo são: $\alpha_1 = 5/9$, $\beta_1 = 3/4$, $\sigma_{k1} = 0,85$, $\sigma_{\omega 1} = 0,5$, $\alpha_2 = 0,44$, $\beta_2 = 0,0828$, $\sigma_{k2} = 1$ e $\sigma_{\omega 2} = 0,856$.

Finalmente, a viscosidade turbulenta no modelo $k - \omega$ SST é expressa por:

$$\mu_t = \frac{0,31\rho k}{\max(a_1\omega, SF_2)} \quad (36)$$

onde $S = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$ e F_2 é uma segunda função de mistura definida por:

$$F_2 = \tanh\left(\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\omega d}, \frac{500\mu}{d^2\rho\omega}\right)\right]^2\right) \quad (37)$$

5.2.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

A condição periódica foi aplicada na entrada e na saída do domínio apresentado na Figura 15, uma vez que o padrão de escoamento esperado tem uma natureza periódica. Condições de simetria (gradientes normais de todas as variáveis nulos) foram definidas nas fronteiras laterais e superior para reduzir o esforço computacional. A base do domínio e as rugosidades foram consideradas como parede e foi imposta a condição de não deslizamento. Matematicamente, essas condições de contorno podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Condições de contorno necessárias para a simulação numérica do escoamento.

Localização no domínio	Condição de contorno	
Entrada/ saída	$\dot{m} = \rho U_\infty A$ onde A é a área da seção transversal do domínio computacional e U_∞ representa as velocidades de corrente livre de 7, 8 e 9 m/s.	Condição de periodicidade. O fluxo de massa na entrada é igual ao fluxo de massa na saída.
Topo e laterais	$\overline{u_2} = \frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_2} = \frac{\partial \overline{u_3}}{\partial x_2} = 0$	Condição de simetria. Os gradientes normais de velocidade são nulos.
Base e superfície das rugosidades	$\overline{u_1} = \overline{u_2} = \overline{u_3} = 0$	Condição de não deslizamento. Velocidades nulas na região da parede.

5.2.5 SOLUÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

Foram feitas simulações numéricas computacionais utilizando o *software* comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional *Ansys Fluent* versão 17.0, cujo código é baseado no método dos volumes finitos. Para a construção da geometria e da malha foi utilizado o *software Gambit*. Detalhes de uma das malhas geradas podem ser visualizados na Figura 16.

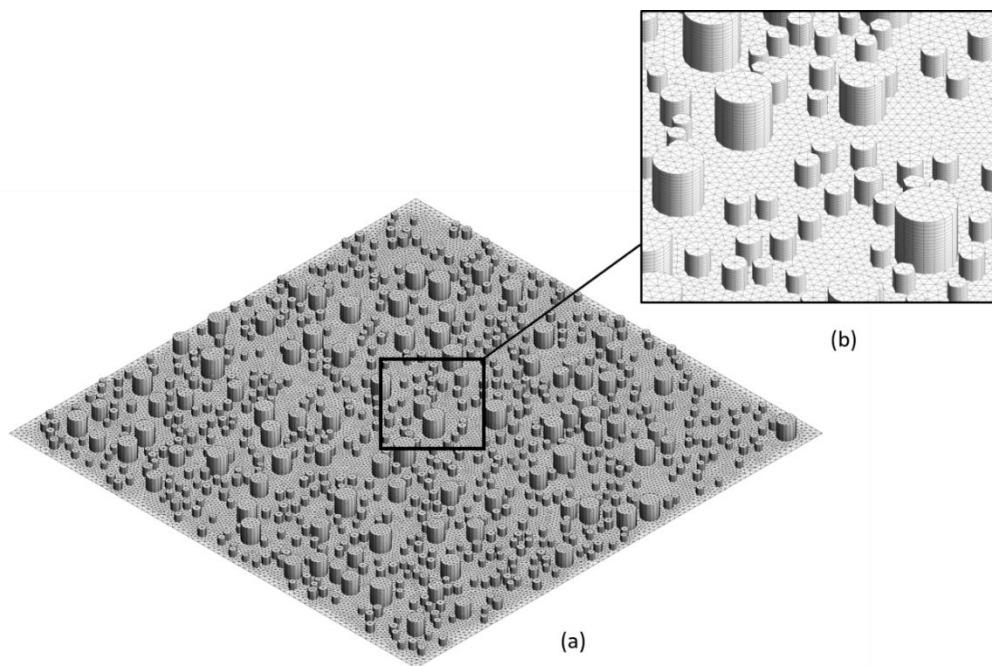


Figura 16 – Domínio computacional (a) e em detalhe as rugosidades (b).

O domínio foi dividido em duas partes (Figura 17) com uma interface a uma altura igual a três vezes maior diâmetro para permitir um bom refinamento da malha próximo a superfície. Abaixo da interface a malha foi produzida por extrusão de células triangulares definidas na superfície erodível e nas paredes dos elementos rugosos (Figura 16 (b)). Acima, pela extrusão de células retangulares.

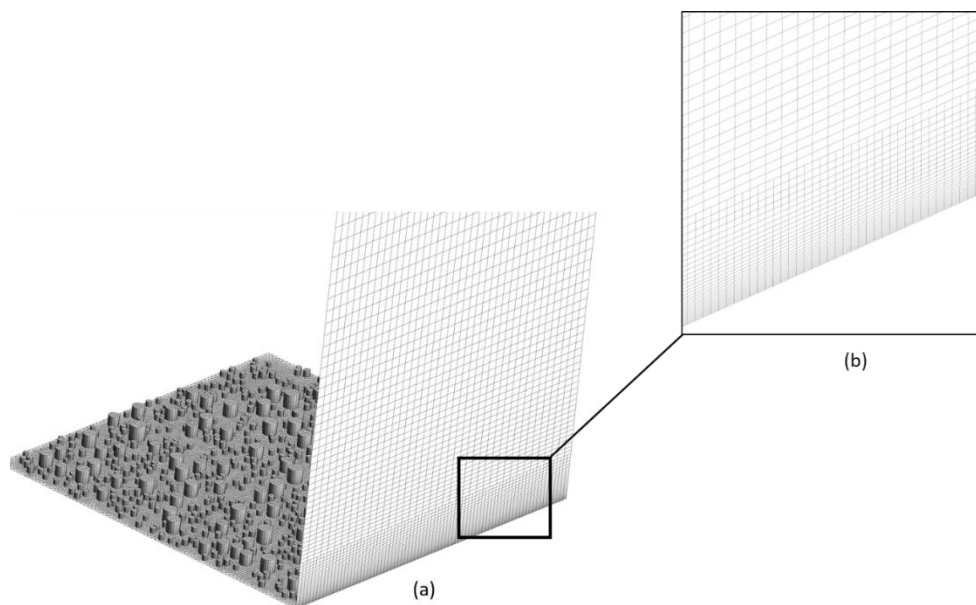


Figura 17 – Lateral do domínio (a) mostrando o refinamento na malha (b) realizado na região das rugosidades.

5.2.6 CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS

Os casos foram testados para: (i) três proporções de partículas, conforme as características granulométricas das areias utilizadas nos experimentos descritos no Capítulo 4 e (ii) três velocidades de corrente livre também utilizadas nos referidos experimentos.

Como a distribuição granulométrica de cada tipo de areia segue uma distribuição normal (Figura 18) foi possível determinar o diâmetro médio e sua porcentagem dentro de cada sub-faixa da normal.

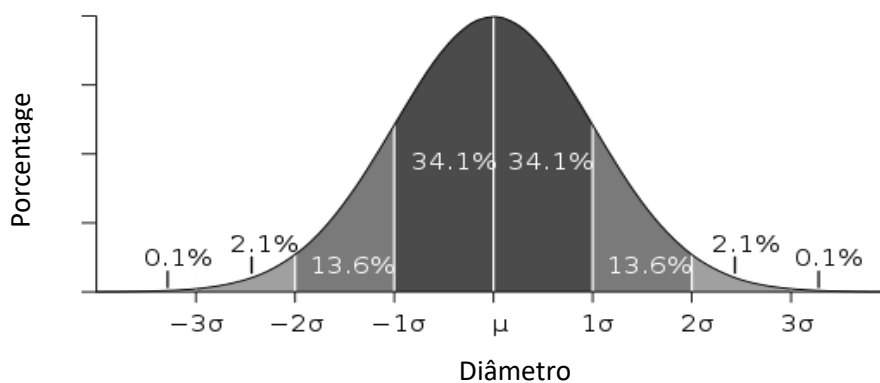


Figura 18 - Distribuição normal.

Essa porcentagem representou a taxa de cobertura inicial de cada sub-faixa (CR_i), em contraste com o que foi determinado por Caliman (2017) na Equação (15), onde CR_i é o produto da fração mássica das partículas α_{NE} pela fração volumétrica φ . Logo, inicialmente, foi assumida a hipótese de que $\varphi = 1$ para todos dos casos, como uma aproximação.

Uma vez que a taxa de cobertura também é definida por:

$$CR_i = \frac{n_r \left(\frac{\pi}{4} \bar{D}_{r_i}^2 \right)}{S_{bed}} \quad (38)$$

onde $\bar{D}_{r_i}$ é o diâmetro médio das rugosidades [m] e n_r é o número de rugosidades, foi possível calcular o número n_r de cilindros correspondente a cada diâmetro médio dentro de cada sub-faixa para cada areia.

Adicionalmente, como a areia amarela tem erodibilidade variável, o diâmetro a partir do qual ela deixa de ser erodível varia com a velocidade. Desta forma, com o aumento da velocidade aumentou-se a quantidade de sub-faixas de diâmetros erodíveis, sendo, portanto, incorporados à superfície lisa ao redor das rugosidades. As sub-faixas consideradas em cada areia foram as mostradas na Figura 19, na Figura 20, na Figura 21 e na Figura 22, onde a região em destaque indica as sub-faixas erodíveis para os quais nenhuma quantidade de cilindros foi calculada.

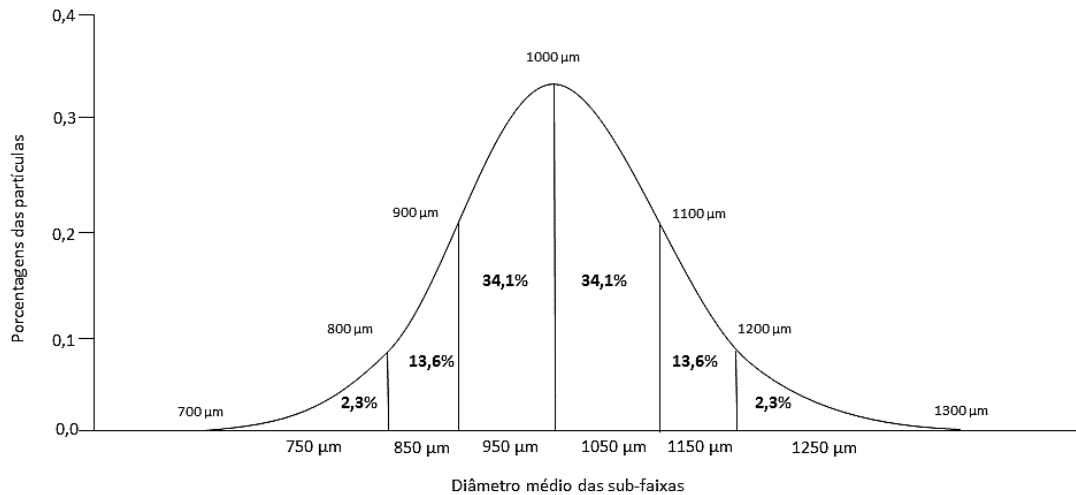


Figura 19 - Sub-faixas da areia preta.

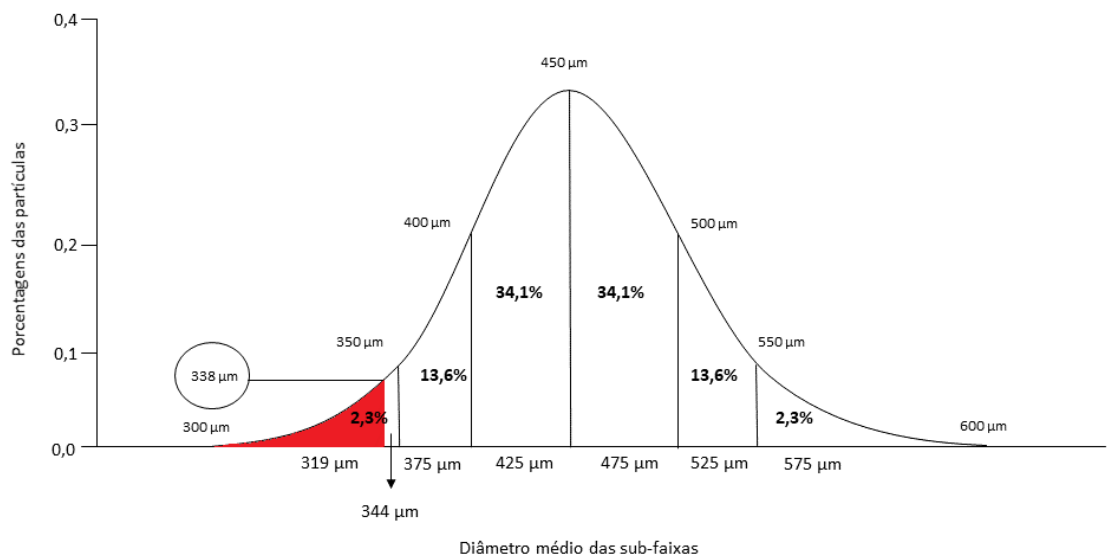


Figura 20 - Sub-faixas da areia amarela a 7 *m/s*. Em destaque o diâmetro a partir do qual as partículas amarelas se tornam não-erodíveis com base no critério de emissão descrito do Capítulo 4.

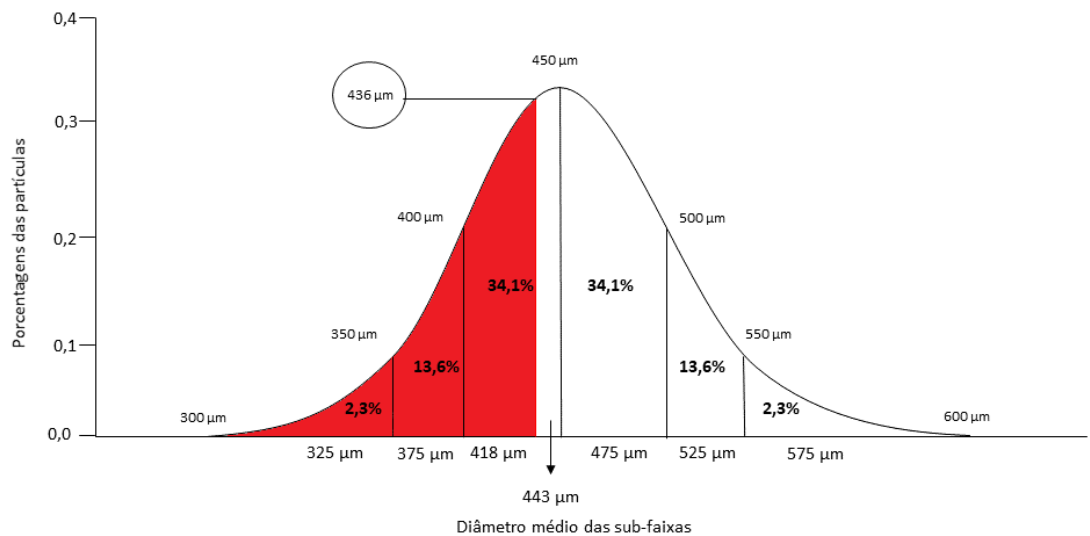


Figura 21 - Sub-faixas da areia amarela a 8 *m/s*. Em destaque o diâmetro a partir do qual as partículas amarelas se tornam não-erodíveis com base no critério de emissão descrito do Capítulo 4.

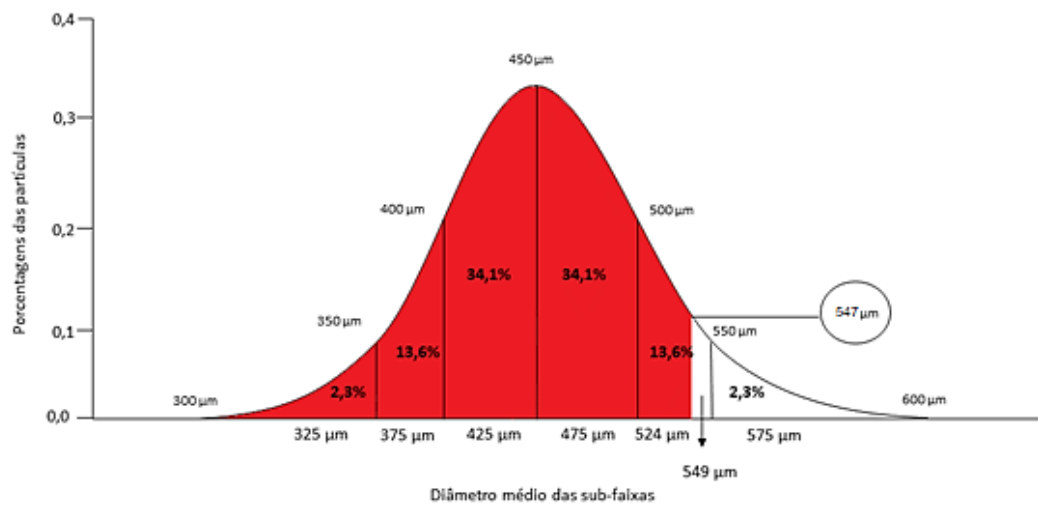


Figura 22 - Sub-faixas da areia amarela a 9 m/s . Em destaque o diâmetro a partir do qual as partículas amarelas se tornam não-erodíveis com base no critério de emissão descrito do Capítulo 4.

Os casos simulados e os resultados do cálculo do número de cilindros realizado para um leito de $0,030\ m \times 0,030\ m$ são mostrados nas tabelas do Apêndice 1.

5.3 AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A TAXA DE COBERTURA E A ALTURA FINAL ERODIDA

Caliman (2017) encontrou uma relação linear entre a taxa de cobertura e altura final erodida de um leito através de considerações feitas com base na granulometria das areias utilizadas em seus experimentos avaliando implicitamente a evolução da erosão no tempo. Realizou o seguinte raciocínio para encontrar uma relação para a evolução de CR como uma função de H para uma distribuição unimodal de partículas não erodíveis dispostas em um leito sem inclinação em relação ao plano horizontal: considerando que a altura erodida é igual ao diâmetro dos grãos não-erodíveis, com o avanço da erosão a mesma quantidade de partículas não-erodíveis existente inicialmente emerge na superfície do leito sucessivamente (Figura 23).

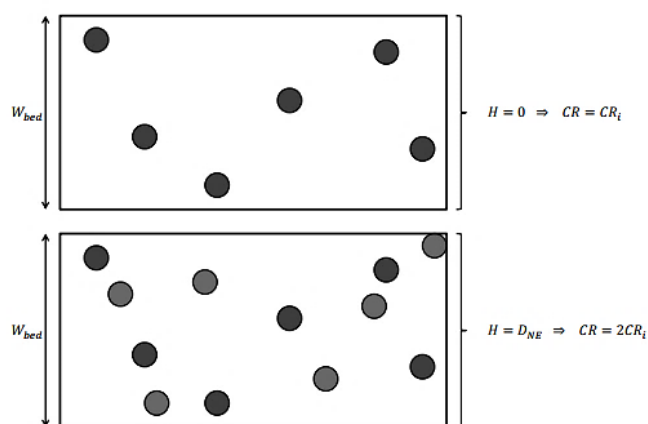


Figura 23 - Evolução da proporção ocupada por partículas não-erodíveis em função da altura erodida (Caliman, 2017).

Como mencionado anteriormente essa relação é linear e foi verificada experimentalmente para uma única distribuição de tamanhos de partículas não erodíveis cuja erodibilidade não varia com a velocidade do vento.

Na aplicação do modelo essa relação é encontrada pelo escaneamento dos diâmetros da distribuição granulométrica, sendo a taxa de cobertura daqueles que são não-erodíveis somados sucessivamente para contabilizar a taxa de cobertura final e a soma de seus respectivos diâmetros contabilizados como altura erodida.

A mesma metodologia foi utilizada no presente estudo para fazer uma avaliação da validade dessa relação linear considerando:

- i. Presença de mais um diâmetro de partículas não-erodíveis (partículas de areia preta e a porção não erodível das partículas de areia amarela para as velocidades de $7, 8$ e 9 m/s);
- ii. Variação da erodibilidade das partículas de areia amarela de acordo com mudanças na velocidade do vento.

Os resultados obtidos dessa discussão são mostrados na Seção 6.2.

5.4 CÁLCULO DA EMISSÃO EM UMA PILHA LONGADA PELO MODELO DE CALIMAN (2017)

O procedimento para o cálculo da emissão pelo modelo de emissão de Caliman (2017) consistiu em:

- i. Utilizar a distribuição de tensão de cisalhamento sobre a pilha obtida numericamente por Caliman (2017) para subdividi-la em isosuperfícies de mesmo critério de emissão de partículas.
- ii. Considerar cada isosuperfície como um leito.
- iii. Utilizar a relação entre a altura erodida final do leito e a taxa de cobertura final e os dados de R_{fric} e de A , M e N obtidos numericamente para calcular a altura final erodida.
- iv. Usar a altura final erodida encontrada e a área de cada isosuperfície para estimar a massa emitida.
- v. Dados os valores calculados pelo modelo de emissão de Caliman (2017) utilizando granulometrias não-erodíveis diferentes, comparar com os dados de emissão obtidos nos experimentos descritos no Capítulo 4.

Os resultados obtidos são mostrados na Seção 6.3.

5.5 ANÁLISE QUALITATIVA DA TAXA DE COBERTURA FINAL SOB A SUPERFÍCIE DE UMA PILHA LONGADA EXPERIMENTAL

Como mencionado no Capítulo 4, que trata da descrição dos experimentos realizados com a pilha alongada, a duração do escoamento foi de 15 minutos para todos os casos testados

e fotografias foram tiradas no início da experiência e a cada 30 segundos até 5 minutos até o final.

A análise da taxa de cobertura para cada caso nos momentos inicial e final foi proposta para tentar explicar a presença das partículas em determinadas regiões da pilha. Foi necessário determinar quais partículas são erodíveis e quais partículas são não-erodíveis. Sabendo-se que a velocidade de fricção limite das partículas u_t^* modifica-se na superfície da pilha devido a inclinação θ , foi utilizada a equação de Iversen e Rasmussen (1994) (Equação (3)) para determinação da nova velocidade de fricção limite $u_t^*(\theta)$ na região correspondente a cada θ nas imagens das pilhas.

Para cada região correspondente a um θ , a emissão ou não da partícula também é condicionada pela velocidade de fricção do vento u^* sobre aquela região. Assim, dado um θ , a distribuição de velocidade de fricção sobre a pilha (similar à Figura 11) foi utilizado para se determinar se $u^* > u_t^*(\theta)$, caso em que as partículas seriam emitidas. Com esse resultado, uma avaliação qualitativa sistemática das imagens foi realizada verificando de forma geral as partículas em cada região que foram emitidas ou não. Apesar de discussão semelhante ter sido realizada em trabalhos anteriores (Furieri *et al.* 2013a; Caliman, 2017), o procedimento se justifica por auxiliar na comprovação de que os experimentos utilizados no presente estudo seguem o mesmo comportamento físico descrito na literatura. Os resultados obtidos da análise qualitativa são apresentados na Seção 6.4.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE CISALHAMENTO SOBRE UM LEITO COMPOSTO DE ELEMENTOS RUGOSOS

A Figura 24 apresenta a visão de topo da distribuição da tensão de cisalhamento para os casos D. Os casos estão apresentados com a mesma escala de valores. Os valores da tensão de cisalhamento foram normalizados pelo valor calculado no caso sem rugosidades para 7 m/s ($0,124 \text{ Pa}$), 8 m/s ($0,162 \text{ Pa}$) e 9 m/s ($0,205 \text{ Pa}$). O Caso D1, mostrado na Figura 24 (a) é o caso D com a maior quantidade de elementos não erodíveis, com diâmetros variando de 344 a $1250 \mu\text{m}$ com uma taxa de cobertura de $19,79 \%$. Com o aumento da velocidade algumas partículas representativas da faixa de tamanhos da areia amarela se tornam erodíveis sendo incorporadas à superfície. Observa-se então a variação da erodibilidade dos diâmetros dessa areia. A Figura 24 (b) mostra o Caso D2, com uma quantidade menor de elementos que o Caso D1, sendo que os diâmetros variam de 443 a $1250 \mu\text{m}$ com uma taxa de cobertura de $15,15 \%$. O Caso D3, com a menor quantidade de partículas, é apresentado na Figura 24 (c). Porém, apesar de uma menor quantidade de elementos não erodíveis, esse caso é composto predominantemente por diâmetros maiores, variando de 549 a $1250 \mu\text{m}$. Ele apresenta também a menor taxa de cobertura, $8,37 \%$.

É possível que os valores de tensão de cisalhamento mais altos são encontrados nos pontos de separação das partículas mais altas. Quando a altura dos elementos não erodíveis é menor, o escoamento do vento é distribuído pelas laterais e pelo topo dos mesmos. Quanto a altura dos elementos é maior, o vento tende a escoar com mais facilidade pelas laterais. Dessa forma, tem-se um fluxo maior de momentum distribuído nessa região, fazendo com que a tensão de cisalhamento nessas regiões seja maior. Porém, esse comportamento é observado com mais intensidade a montante de elementos de maior altura cuja superfície adjacente apresenta uma menor quantidade de elementos, pois a presença deles atenua o escoamento fazendo com que o mesmo chegue próximo aos elementos de maior altura com menor intensidade. A visualização tridimensional desse comportamento é apresentada na Figura 24 (d).

O efeito de proteção causado pelos elementos não erodíveis pode ser visualizado na Figura 24 (e). Zonas de baixo cisalhamento são formadas na esteira desses elementos. Na presença de outros elementos, essas zonas se expandem e interagem umas com as outras.

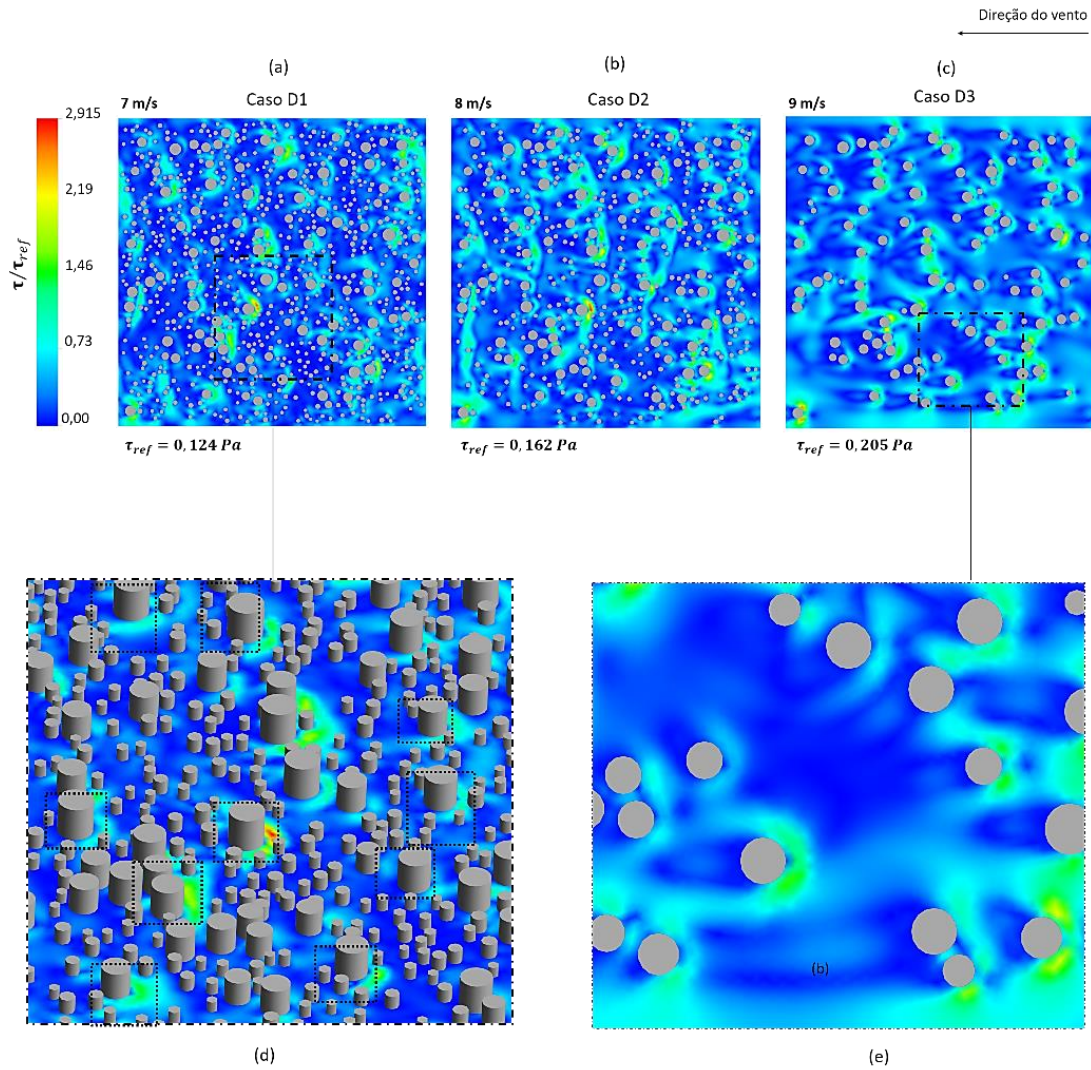


Figura 24 - Distribuição da tensão de cisalhamento sobre a superfície de um leito para os Casos D.

A mesma análise descrita acima pode ser realizada nos demais casos, apresentados na Figura 25 e na Figura 26.

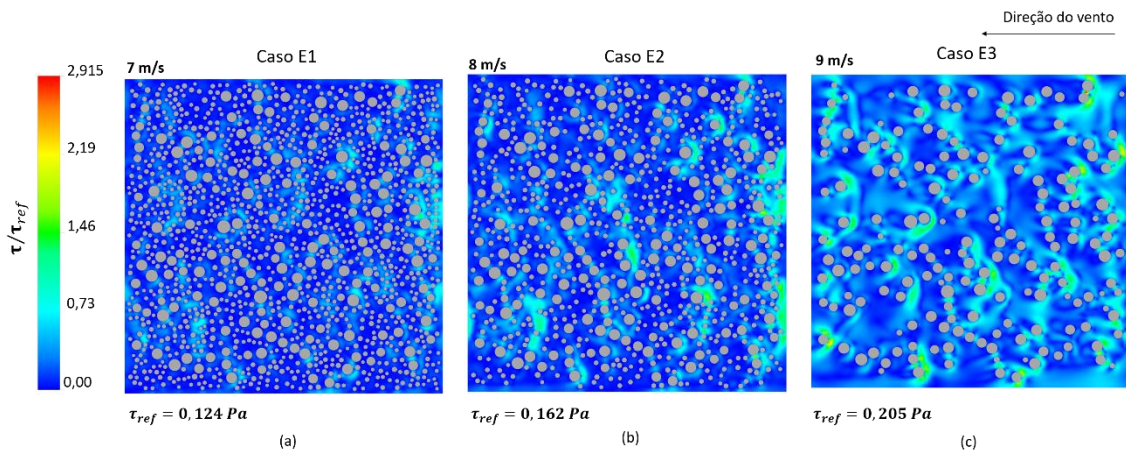


Figura 25 - Distribuição da tensão de cisalhamento sobre a superfície de um leito para os Casos E.

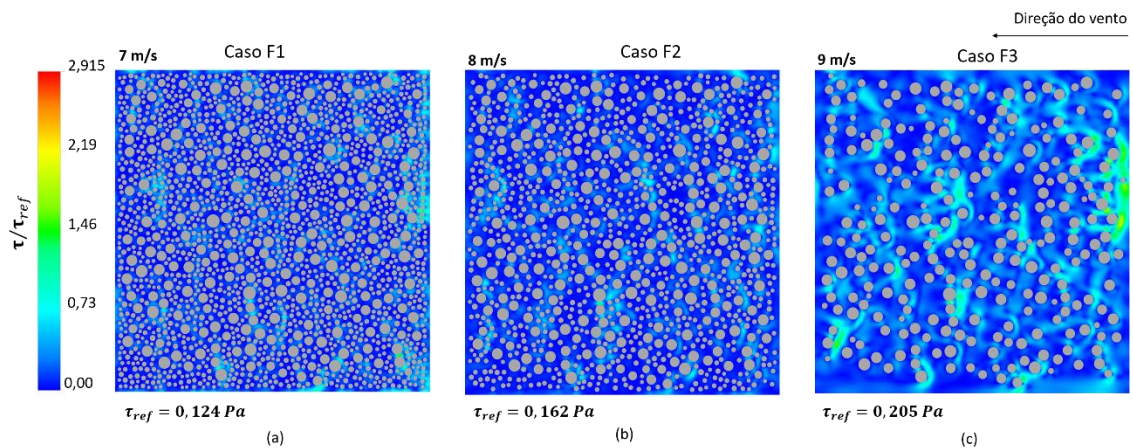


Figura 26 - Distribuição da tensão de cisalhamento sobre a superfície de um leito para os Casos F.

Comparando os Casos D, E e F, cuja proporção de partículas aumenta sucessivamente, observa-se que a diferença entre eles está no fato de que com o aumento da taxa de cobertura, mais o escoamento é atenuado sendo encontrados menores valores médios de tensão de cisalhamento.

A Tabela 4 mostra a tensão de cisalhamento média para cada caso. Em um mesmo conjunto de casos, cuja quantidade de elementos foi calculada com base na mesma proporção inicial de partículas, com o aumento da velocidade a taxa de cobertura diminui devido a decolagem de partículas cujo critério de emissão foi atingido. Dessa forma, menos elementos compõem o leito e menos o escoamento é atenuado. Assim, maiores níveis de tensão de cisalhamento são atingidos. A mesma velocidade, com o aumento da taxa de cobertura, o inverso ocorre e menores valores de tensão de cisalhamento são encontrados.

Tabela 4 - Tensão de cisalhamento média normalizada investigada em cada caso.

Caso	U_{∞} (m/s)	CR	$\tau/\tau_{ref_{med}}$
D1	7	0,1979	0,317
D2	8	0,1515	0,375
D3	9	0,0835	0,385
E1	7	0,3563	0,161
E2	8	0,2650	0,223
E3	9	0,1465	0,345
F1	7	0,4948	0,1599
F2	8	0,3786	0,1401
F3	9	0,2093	0,274

A Tabela 5 apresenta as configurações utilizadas nas simulações e os dados para o cálculo das constantes. u^* foi calculada pela média dos valores ponderada pela área das células da simulação. A , M e N com base nos resultados numéricos foram: $A = 0,2629$, $M = 0,3069$ e $N = 4,7678$. Os erros relativos entre os valores simulados e modelados pela Equação (7) com os novos coeficientes não excederam 9%. Além disso, pode-se considerar que o ajuste proposto apresentou boa concordância com os resultados numéricos uma vez que $R^2 = 0,90$. Lembrando que: u_s^* é a velocidade de fricção em uma superfície lisa, u_r^* é a velocidade de fricção em uma superfície rugosa, $R_{fric(simulado)}$ é calculado utilizando a Equação (6) e $R_{fric(modelado)}$ é calculado utilizando a Equação (7) com as constantes ajustadas.

Tabela 5 - Configurações utilizadas nas simulações e para o cálculo das constantes A, M e N.

Cas o	n_r	CR	$\frac{S_{frontal}}{S_{floor}}$	u_s^* (m/s)	u_r^* (m/s)	$1 - R_{fric(simulado)}$	$1 - R_{fric(modelado)}$
D1	780	0,1979	1,27	0,3181	0,1628	0,4885	0,5125
E1	1364	0,3463	1,27	0,3181	0,1152	0,6379	0,6083
F1	1948	0,4948	1,27	0,3181	0,1140	0,6416	0,6790
D2	447	0,1515	1,27	0,3636	0,2057	0,4342	0,4721
E2	783	0,2650	1,27	0,3636	0,1536	0,5777	0,5606
F2	1118	0,3786	1,27	0,3636	0,1232	0,6610	0,6255
D3	108	0,0835	1,27	0,4091	0,2358	0,4235	0,3932
E3	189	0,1465	1,27	0,4091	0,2225	0,4562	0,4674
F3	270	0,2093	1,27	0,4091	0,1963	0,5201	0,5215

6.3 AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A TAXA DE COBERTURA E A ALTURA FINAL ERODIDA

Para avaliar a validade da relação linear entre a taxa de cobertura e a altura erodida para as características granulométricas do presente estudo foi suposto uma isosuperfície hipotética de um leito de área igual a $0,1 \text{ m}^2$ e altura de $0,0025 \text{ m}$. Foi feito um escaneamento dos diâmetros da distribuição granulométrica de cada caso, sendo a taxa de cobertura daqueles diâmetros que são não-erodíveis somados sucessivamente para contabilizar a taxa de cobertura final e a soma de seus respectivos diâmetros contabilizados como altura erodida. A velocidade de fricção limite u_t^* para cada diâmetro dentro da distribuição foi calculada com base no critério de emissão de Shao e Lu (2008) e a velocidade de fricção na superfície u^* por Kurose e Komori (2001) e Mollinger e Nieuwstadt (1996). As velocidades de fricção calculadas para as velocidades de corrente livre de 7, 8 e 9 m/s foram, 0,3038, 0,3506 e $0,3936 \text{ m/s}$, respectivamente. Um determinado diâmetro foi considerado não erodível quando $u^* < u_t^*$.

A Figura 27 ilustra os resultados do procedimento descrito acima para avaliação da relação entre a taxa de cobertura e a altura erodida para as granulometrias e velocidades dos casos D. A Figura 27 também mostra o ajuste linear dos dados para cada caso. Observando os resultados para o caso D1 é possível notar que a curva apresenta uma reta horizontal no início, uma pequena inclinação positiva, uma outra reta horizontal menor que a primeira e depois uma longa faixa de dados que formam uma reta ascendente.

Para explicar esse comportamento é necessário entender os princípios que regem a relação. A Figura 28 apresenta o comportamento da taxa de cobertura em função da altura erodida para o Caso D1. A altura erodida aumenta de cima para baixo no eixo vertical. A taxa de cobertura é contabilizada pela área vista do topo dos diâmetros apresentados em vista frontal na Figura 28 para uma dada altura erodida. As linhas contínuas mostram a altura erodida na qual a taxa de cobertura permanece constante.

Quando a altura erodida H é igual a zero, a taxa de cobertura CR do leito é igual a taxa de cobertura inicial CR_i . Com o avanço de H é possível notar que a CR permanece constante até atingir uma altura equivalente à altura do menor diâmetro não-erodível. A taxa de cobertura constante ao longo da altura (ΔH_1) corresponde a primeira reta horizontal vista na Figura 27. A continuidade da erosão leva ao contínuo avanço de H . Com esse comportamento, novos diâmetros são descobertos, sucessivamente, e são mostrados pelas linhas tracejadas. Com isso, a taxa de cobertura vai aumentando sobre a superfície do leito, resultando na primeira inclinação

positiva da Figura 27. Com mais um incremento de H , observa-se novamente uma faixa de alturas onde a taxa de cobertura é constante (ΔH_2). Essa segunda faixa de H onde CR é constante dá origem à segunda reta horizontal da Figura 27. Como o tamanho das partículas vai aumentando dentro da distribuição granulométrica, os diâmetros maiores que o menor diâmetro não-erodível vão aparecendo com mais frequência não deixando com que essa região de CR constante cresça, chegando a tal ponto, onde mais nenhuma região de CR constante pode ser observada, resultado na longa faixa de dados que forma a segunda reta ascendente na Figura 27.

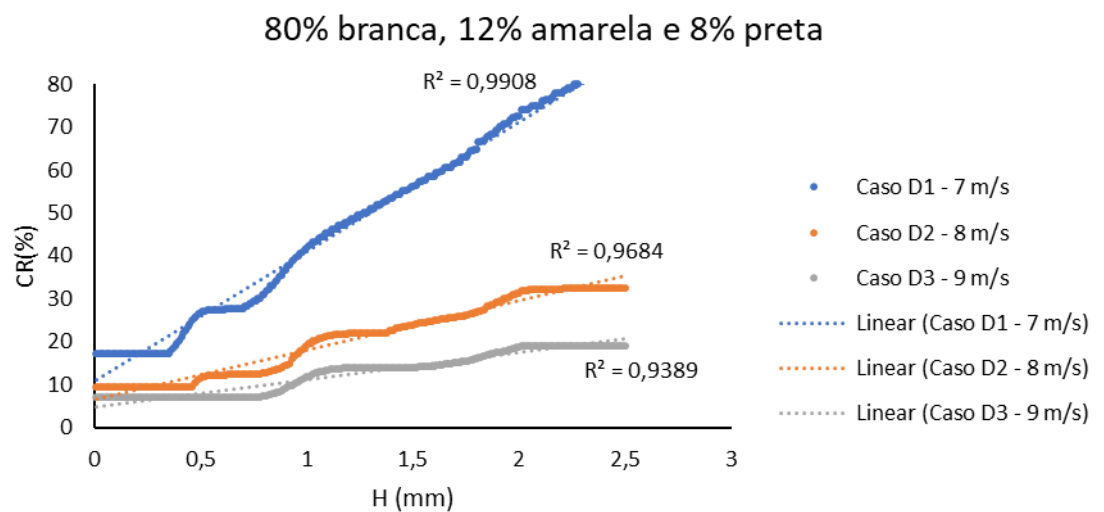


Figura 27 - Relação entre a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis e a altura erodida do leito hipotético para as granulometrias e velocidades dos casos D.

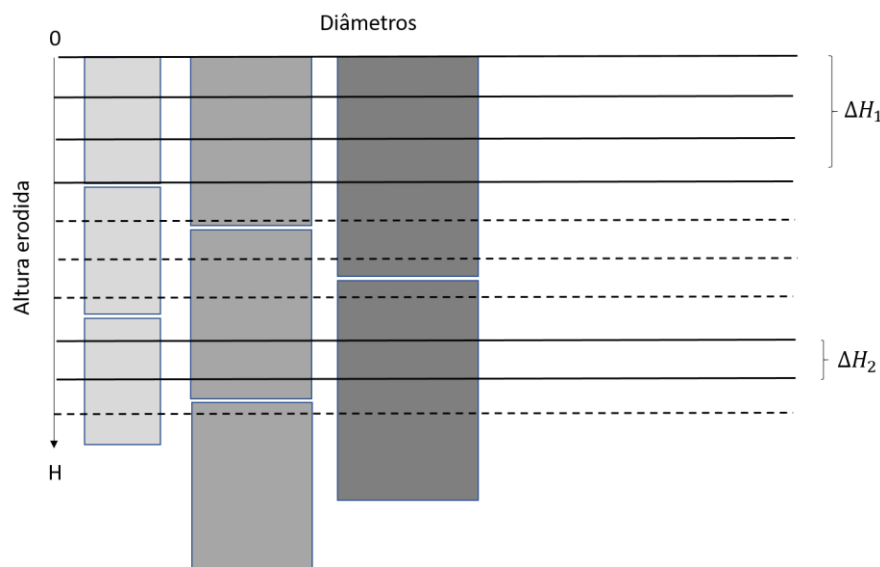


Figura 28 - Comportamento da taxa de cobertura em função da altura erodida para o caso D1.

Comparando-se os casos D1, D2 e D3 na Figura 27, uma das diferenças está no fato de que as retas horizontais iniciais presentes nas curvas ficam maiores com o aumento da velocidade. Isso se deve ao fato de que com o aumento da velocidade mais partículas de menores diâmetro se tornam erodíveis, deslocando o primeiro diâmetro não-erodível para valores mais elevados, resultando em maiores ΔH onde a CR é constante. Outra análise desses casos também pode ser feita se observarmos a inclinação das retas. É possível observar que quanto maior a velocidade menor a inclinação da reta, pois o aumento da velocidade propicia ao mesmo tempo aumento do diâmetro médio não erodível (pois esse valor vai se tornando cada vez mais próximo dos maiores diâmetros da distribuição) e redução da taxa de cobertura (pois mais partículas vão se tornando erodíveis), resultado esperado se observarmos a Equação (14), mostrando assim que existe a mesma tendência descrita na literatura. Também, observa-se que a taxa de cobertura é maior e varia mais no caso D1 que no caso D3. A explicação para esse fato está ligada ao tamanho dos diâmetros não erodíveis. No caso D1 o diâmetro a partir do qual as partículas são não-erodíveis é menor, devido à menor velocidade. Logo, elas tendem a ocupar melhor a superfície do leito aumentando a taxa de cobertura (Figura 29 (a)). No caso D3 o diâmetro a partir do qual as partículas são não-erodíveis é maior, pois a uma maior velocidade os diâmetros menores foram emitidos. Logo, devido ao tamanho, maiores os espaços na superfície do leito onde não é possível a disposição de nenhuma partícula na granulometria disponível (Figura 29 (b)), resultando em menores taxas de cobertura.

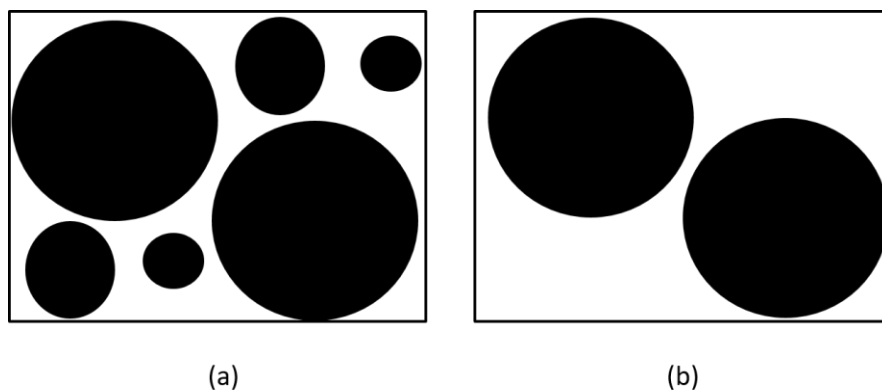


Figura 29 - Disposição das partículas no leito para o caso (a) D1 e para o caso (b) D3.

A Figura 30 mostra os resultados para os casos 1, a 7 m/s , para as diferentes proporções de areia utilizadas. A 7 m/s apenas uma parte da areia amarela é erodível, logo a

taxa de cobertura inicial é um pouco menor que a soma das proporções das areias amarela e preta. 20%, 35% e 50% para os casos D1, E1 e F1, respectivamente. O caso D1 é o que apresenta menor quantidade de partículas não-erodíveis na mistura, logo é o caso com menor taxa de cobertura. Por essa razão também, a erosão avança a uma altura erodida final quase que da mesma dimensão da altura total do leito. Pois, como em cada camada existe pouca quantidade de partículas não-erodíveis, é preciso descobrir várias camadas até que o leito esteja majoritariamente coberto. Já o caso F1 é o que mais tem partículas não erodíveis, resultando na maior taxa de cobertura mostrada na Figura 30. De forma oposta ao caso D1, a erosão avança a uma altura erodida final menor que a altura total do leito, pois como em cada camada existe muita quantidade de partículas não-erodíveis, não é preciso descobrir várias camadas até que o leito esteja majoritariamente coberto.

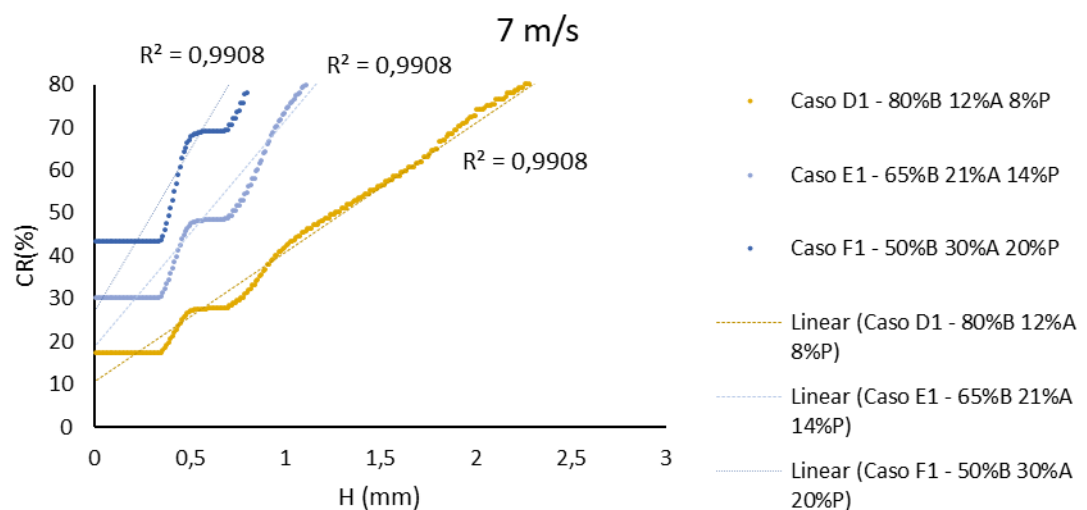


Figura 30 - Relação entre a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis e a altura erodida do leito hipotético para as granulometrias e velocidades dos casos 1.

Na Figura 30 também é possível observar que quanto maior a proporção de partículas amarelas e pretas (não-erodíveis), maior a inclinação da reta do ajuste, isso porque nessa situação maior é a taxa de cobertura inicial, resultado esperado se observarmos a Equação (14).

Análises semelhantes às descritas acima podem ser realizada para os demais casos apresentados na Figura 31 e na Figura 32. Quanto às curvas, em todos os casos é

matematicamente admissível fazer um ajuste linear dos dados dado o alto valor para R^2 encontrado.

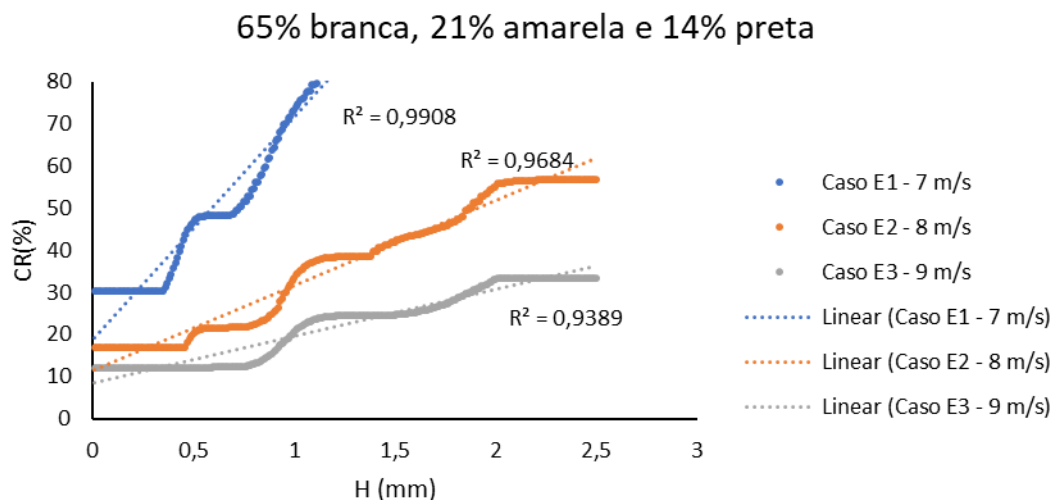


Figura 31 - Relação entre a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis e a altura erodida do leito hipotético para os casos E.

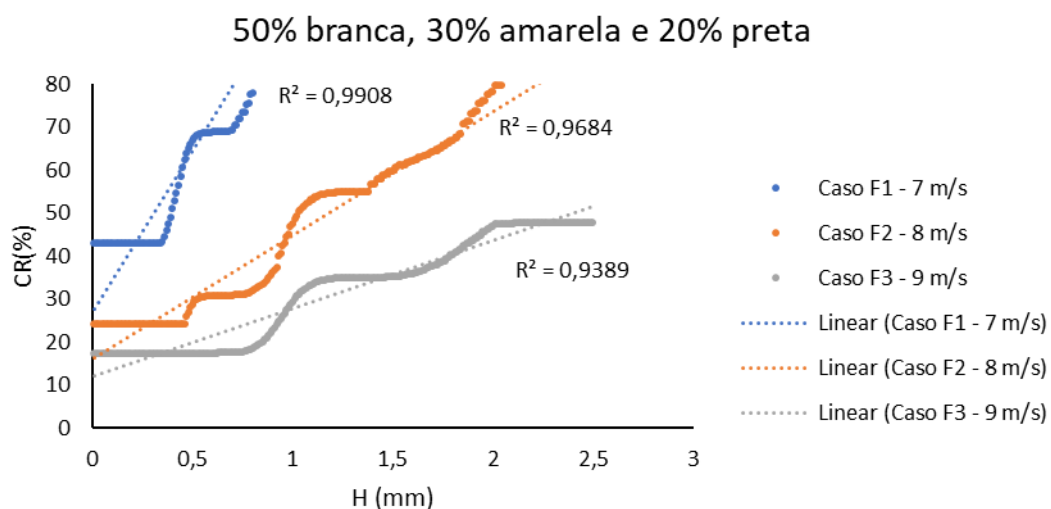


Figura 32 - Relação entre a taxa de cobertura de partículas não-erodíveis e a altura erodida do leito hipotético para os casos F.

A Tabela 6 apresenta a inclinação da reta e a taxa de cobertura inicial, obtidas pela Equação (14) e pela Equação (15), respectivamente e as obtidas pelo ajuste linear das curvas da relação entre a taxa de cobertura e a altura erodida para cada caso. Como a isosuperfície hipotética considerada é da pilha, e dados o volume da mesma ($V_{pilha} = 0,0045 \text{ m}^3$), a massa

específica das partículas ($\rho_p = 2630 \text{ kg/m}^3$) e a massa de partículas m_p inicial utilizada em cada caso (

Tabela 2), φ antes assumido com 1, pode agora ser calculado por $\varphi = (\rho_p/m_p)/V_{pilha}$. α_{NE} é encontrado somando-se a porcentagem de partículas não-erodíveis de cada caso (Apêndice I).

Tabela 6 - Inclinação da reta e taxa de cobertura inicial (coeficiente linear) obtidos pela Equação (14) e pela Equação (15), respectivamente e obtidos pelo escaneamento dos diâmetros (provenientes do ajuste linear das curvas da relação entre a taxa de cobertura e a altura erodida para cada caso).

Caso	D_{NE} (mm)	φ	α_{NE}	CR_i			a		
				Calc.	Esc.	Erro (%)	Calc.	Esc.	Erro (%)
D1	0,7	0,5156	0,1979	10,20	10,77	5,5	14,58	30,11	107
E1	0,8	0,5580	0,3463	19,32	18,84	2,5	24,15	52,70	118
F1	0,9	0,5913	0,4948	29,26	26,91	8,0	32,51	75,28	132
D2	0,7	0,5156	0,1515	7,81	6,46	17,3	11,16	11,51	3
E2	0,8	0,5580	0,2651	14,79	11,3	23,6	18,49	20,14	9
F2	0,9	0,5913	0,3789	22,40	16,14	28,0	24,89	28,78	16
D3	0,7	0,5156	0,0837	4,32	4,78	10,8	6,17	6,35	3
E3	0,8	0,5580	0,1465	8,17	8,36	2,3	10,22	11,12	9
F3	0,9	0,5913	0,2093	12,38	11,94	3,5	13,75	15,89	16

Os resultados apresentados na Tabela 6 mostram que o erro relativo entre a CR_i calculada pela Equação (15) e a CR_i proveniente do ajuste linear varia muito em cada caso, sendo que os casos a 8 m/s (casos 1) apresentam os valores mais elevados, chegando a 28%. Já o coeficiente angular da reta a , calculado pela Equação (14), apresenta erros maiores que 100% a 7 m/s e um valor máximo de 16% nos demais casos. Os altos níveis de erro relativo encontrados à 7 m/s para a podem ser atribuídos ao fato de que a diferença entre a taxa de cobertura inicial da curva e a taxa de cobertura do ajuste são as maiores entre todas as outras velocidades.

Assim, podemos conjecturar que esses resultados estão em boa concordância com o que foi proposto por Caliman (2017) quando aplicado às características granulométricas das areias consideradas no presente trabalho, revelando que a relação linear entre a taxa de

cobertura e a altura final erodida ainda pode ser considerada válida mesmo com a inclusão de mais uma faixa de tamanhos com erodibilidade variável. A consideração de mais uma faixa de tamanhos de erodibilidade variável, de forma geral, age alterando a taxa de cobertura e deslocando o valor do diâmetro médio não-erodível.

6.4 CÁLCULO DA EMISSÃO EM UMA PILHA LONGADA PELO MODELO DE CALIMAN (2017)

O modelo para pilhas foi aplicado utilizando-se primeiramente as constantes A , M e N calculadas no presente trabalho, como mostrado na Tabela 7. A Tabela 7 mostra a velocidade de corrente livre utilizada, a fração volumétrica da mistura φ , a fração mássica de partículas não-erodíveis α_{NE} , a massa emitida experimental medida, a massa emitida modelada e os erros relativos de cada caso. É possível observar que o erro relativo quando as novas constantes foram utilizadas, foi considerável, variando de 68 a 88%. As constantes encontradas no presente trabalho foram determinadas a partir da consideração de $\varphi = 1$, porém, φ pode ser calculada a partir de dados da pilha. Logo, os erros encontrados podem ser atribuídos, em parte, a essa discrepância nos valores de φ no processo de cálculo da emissão.

Tabela 7 - Comparação entre os resultados experimentais e modelados utilizando as novas constantes A , M e N calculadas no presente trabalho. φ é a fração volumétrica da mistura e α_{NE} é a fração mássica de partículas não-erodíveis.

Caso	U_{∞} (m/s)	φ	α_{NE}	Massa emitida (g)				
				Presente trabalho			Caliman (2017)	
				Exp.	Mod.	Erro (%)	Mod.	Erro (%)
D1	7	0,5156	0,1979	175,5	37,8	78	76,6	56
E1	7	0,5580	0,3463	129,3	36,4	68	45,0	65
F1	7	0,5913	0,4948	116,0	32,6	72	28,4	76
D2	8	0,5156	0,1515	278,5	41,5	85	114,4	59
E2	8	0,5580	0,2651	269,5	45,6	83	72,2	73
F2	8	0,5913	0,3789	153,9	44,9	71	50,5	67
D3	9	0,5156	0,0837	434,5	52,4	88	152,1	65
E3	9	0,5580	0,1465	415,7	57,8	86	103,6	75
F3	9	0,5913	0,2093	280,2	61,9	78	78,6	72

Uma segunda aplicação do modelo foi realizada utilizando agora as constantes calculadas por Caliman (2017). Os resultados, também mostrados na Tabela 7, mostram que os níveis de erros variaram de 56% a 76%. Nesse caso o modelo ainda carrega níveis elevados de erros, porém em menor magnitude. Isso pode ser explicado pelo fato de que as simulações de Caliman (2017) foram realizadas para uma ampla faixa de diâmetros e taxas de cobertura, sendo assim mais abrangentes que as realizadas no presente trabalho.

Apesar dos erros, os resultados do modelo seguiram o mesmo padrão dos resultados experimentais. Com o aumento da proporção inicial de partículas não-erodíveis, na mesma velocidade (casos 1, por exemplo), menor a quantidade de massa emitida, evidenciando que o aumento da presença de partículas maiores cria um efeito de proteção no qual menos partículas erodíveis são emitidas. Também, com o aumento da velocidade, na mesma proporção inicial de partículas não-erodíveis (casos D1, D2 e D3, por exemplo), aumenta-se também a quantidade de massa emitida, mostrando que quanto maior a velocidade, mais partículas se tornam erodíveis.

Dessa forma, observa-se que a tendência física do fenômeno de erosão foi bem modelada, porém, as considerações feitas na concepção e aplicação do modelo como distribuição uniforme das partículas ao longo da altura do leito, distribuição homogênea das partículas sobre a superfície da pilha e não consideração das mudanças da forma da pilha com a erosão, tenham propagado erros quantitativos nas proporções mostradas.

6.5 ANÁLISE QUALITATIVA DA TAXA DE COBERTURA SOB A SUPERFÍCIE DE UMA PILHA ALONGADA EXPERIMENTAL

A Figura 33 mostra os estágios inicial e final da erosão para o Caso D2. Nesse caso a pilha com proporção inicial de 65% de areia branca, 21% de areia amarela e 14% de areia preta foi exposta a velocidade de corrente livre de 8 m/s. Observa-se que o escoamento do vento durante a erosão provoca alterações na distribuição final das partículas sobre a superfície da pilha em relação ao estágio inicial. As regiões B e C apresentam maior quantidade de partículas de areia preta. A região A1 permanece quase inalterada em relação a mesma região no estágio inicial. Já a região A2 apresenta uma maior concentração de partículas amarelas. A região D por sua vez apresenta uma maior quantidade de partículas pretas em sua extremidade.

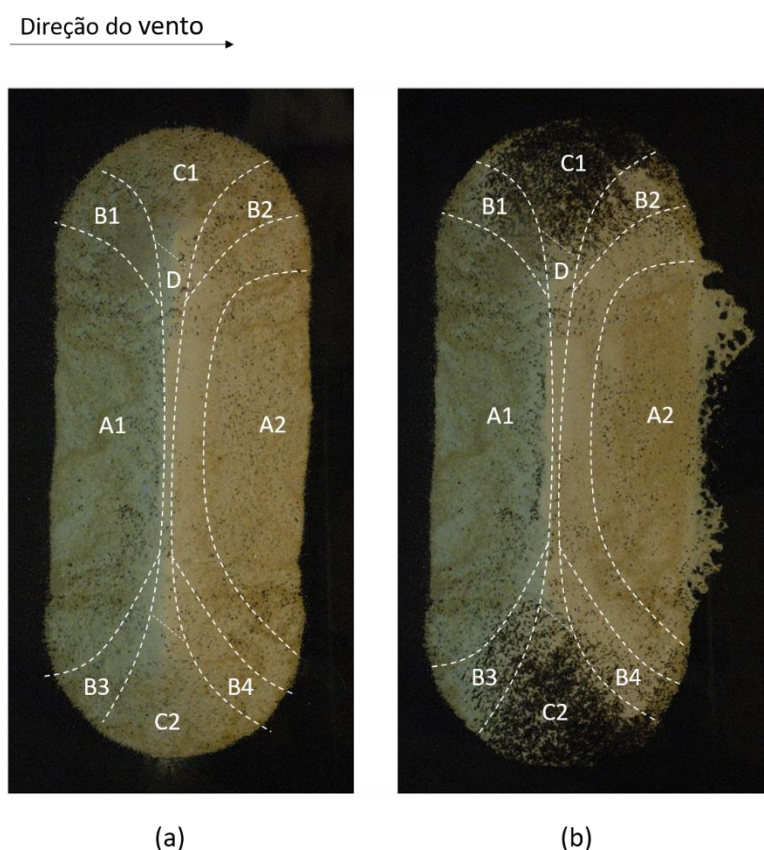


Figura 33 - Estágio inicial (a) e final (b) da erosão para o Caso D2.

A composição da superfície da pilha é condicionada tanto pela inclinação do escoamento do vento quando ele passa sobre ela quanto pela velocidade de fricção ali presente.

Dessa forma, pode-se explicar a distribuição de areias mostrada na Figura 33 observando a distribuição dessas variáveis sobre a pilha.

A Figura 34 apresenta a distribuição de tensão de cisalhamento e a distribuição de inclinação em que o fluido escoá sobrepostas a pilha do Caso D2 no estágio final. A tensão de cisalhamento na superfície da pilha mostrada na Figura 34 (a) está normalizada pela tensão de cisalhamento de referência em uma superfície lisa. Quanto mais próximo os valores sobre a pilha dos tons mais quentes da escala da distribuição de tensão de cisalhamento, maiores os valores dessa variável. Quanto mais próximos os valores sobre a pilha dos tons mais quentes da escala da distribuição de inclinação, maior o critério de emissão e consequentemente, maior a dificuldade para as partículas serem emitidas. Isso porque o escoamento nessas regiões está subindo, contrário a força da gravidade que age sobre as partículas na superfície inclinada. Também, quanto mais próximos os valores sobre a pilha dos tons mais frios da escala da distribuição de inclinação, menor o critério de emissão e consequentemente, menor a dificuldade para as partículas serem emitidas. Isso porque o escoamento está descendo nessas regiões, no mesmo sentido da força da gravidade que age sobre elas na superfície inclinada

As regiões C1 e C2 estão sujeitas a tensões de cisalhamento moderadas nas escalas azul claro e verde. Ao mesmo tempo, nessas mesmas regiões, a inclinação do escoamento se situa aproximadamente nas escalas verde e amarelo, ou seja, dificuldade relativamente baixa das partículas erodíveis serem emitidas. Assim, observa-se que essas regiões foram fortemente erodidas, restando, majoritariamente, partículas pretas não-erodíveis. O mesmo pode ser dito das regiões B1 e B3.

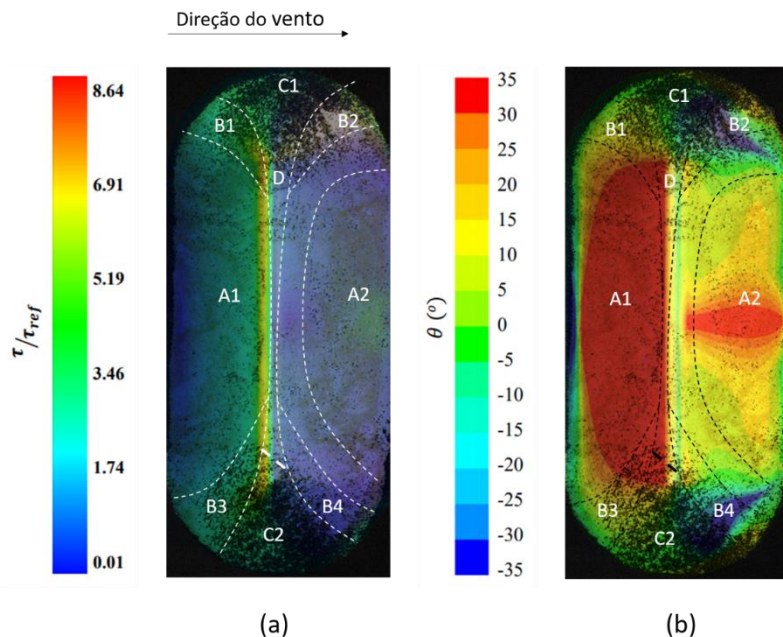


Figura 34 - Distribuição de tensão de cisalhamento (a) e distribuição de inclinação em que o fluido escoava sobrepostas a pilha do Caso D2 no estágio final (b). Adaptado de Caliman (2017).

As regiões B2 e B4 apresentam tensões de cisalhamento relativamente baixas, na escala azul. Porém, nessas regiões o escoamento está descendo na superfície da pilha (com inclinação na escala azul). Isso significa que as partículas são emitidas com muita facilidade sendo a tensão de cisalhamento ali, suficiente para movimentá-las. Dessa forma, também se nota um acúmulo de partículas pretas não erodíveis.

A região D apresenta níveis de cisalhamento baixo na escala azul e níveis de inclinação na escala amarela. Assim, a região não enfrenta muitas dificuldades para emissão de partículas. Apesar da pequena proporção é possível observar uma acumulação de partículas pretas não-erodíveis nas extremidades da região.

Na maior parte da região A1, são observados baixos níveis de cisalhamento, aproximadamente na escala azul. Ao mesmo tempo, o escoamento está subindo na superfície da pilha (escala vermelha), sendo muito difícil a emissão de partículas erodíveis. Dessa forma, nota-se que a região permanece inalterada ao final da erosão em comparação com o estágio inicial da mesma região mostrada na Figura 33 (a). Vale salientar que na extremidade direita da região A1 existe uma pequena acumulação de partículas pretas não erodíveis. Isso se deve ao fato que nessa parte, apesar de ser mais difícil a emissão, o cisalhamento ali é alto facilitando o movimento dos elementos erodíveis.

A região A2 é uma zona de recirculação, como mostrado na Figura 35. O escoamento sobe na região central e desce nas laterais formando um círculo. Assim, essa região apresenta baixos níveis de cisalhamento (aproximadamente na escala azul) e certa facilidade na emissão de partículas erodíveis na parte da zona de recirculação na qual o escoamento está descendo (níveis na escala amarela e verde na Figura 34). Na porção central dessa região, tem-se baixos níveis de cisalhamento e bastante dificuldade para a emissão de partículas erodíveis devido a inclinação contrária ao movimento (níveis de inclinação da escala vermelha na Figura 34).

Porém, observa-se que tanto na parte da zona de recirculação onde é mais fácil a emissão quanto na parte onde é mais difícil existe, majoritariamente, a presença de partículas amarelas. Isso evidencia que para as condições presentes nessa região da pilha onde o escoamento é facilitado, a areia amarela se comporta como não-erodível apesar de ter se comportado como erodível e ter sido emitida em outras regiões.

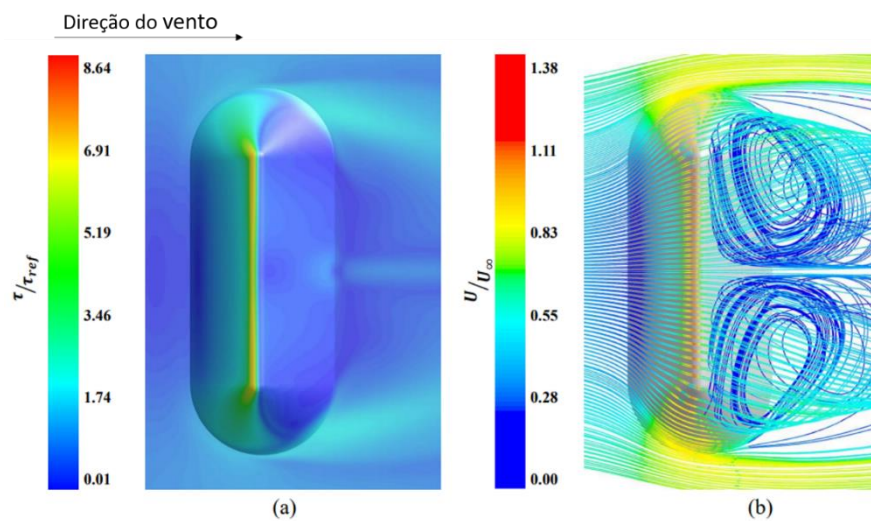


Figura 35 - Resultados numéricos para pilha isolada: (a) distribuição da tensão de cisalhamento e (b) linhas de corrente sobre a pilha (Caliman, 2017).

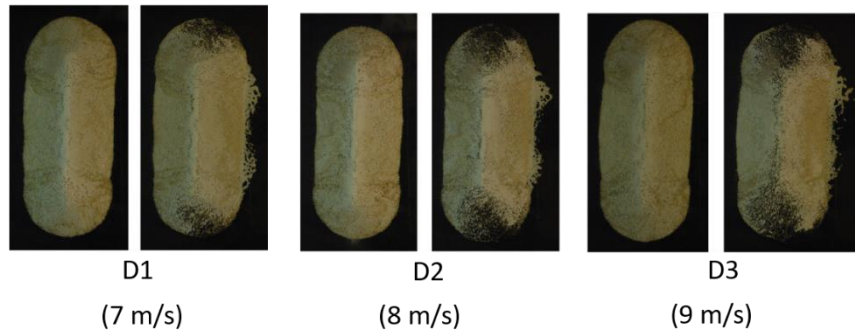
A Figura 36 mostra os estágios inicial e final da erosão para todos os casos. A mesma análise descrita acima pode ser realizada para os demais casos D e casos E com a diferença de que com o aumento da velocidade e da proporção inicial de partículas amarelas e pretas os efeitos observados ocorreram com mais intensidade resultado em regiões maiores de acúmulo de partículas não-erodíveis.

Os casos F mostrados na Figura 36 são casos de comportamento diferente dos demais. A proporção de partículas amarelas e pretas foi tal que houve pouca diferença entre os estágios inicial e final, ainda que fosse fornecido um aumento da velocidade de corrente livre. Isso mostra que quanto maior a proporção de partículas não-erodíveis, maior o efeito de proteção observado, menor a quantidade de partículas emitidas e menores as alterações observadas na superfície da pilha.

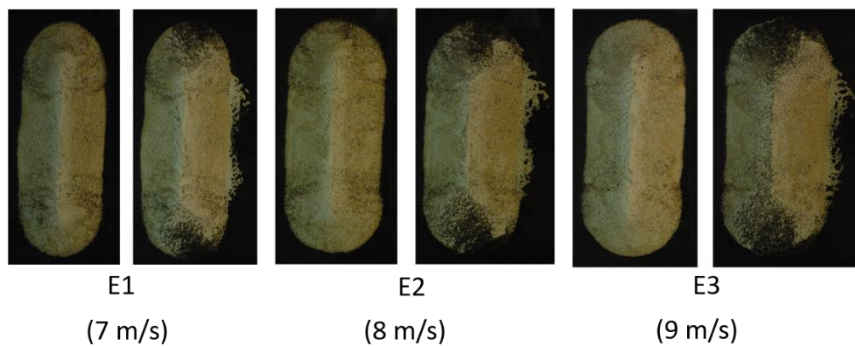
Uma análise mais detalhada pode ser feita se as imagens da pilha erodida forem quantitativamente comparadas com os valores do critério de emissão das partículas (velocidade de fricção limite) das frações de areia e com os valores da velocidade de fricção ali incidente. A Tabela 8 mostra o valor do critério de emissão de forma generalizada para os diâmetros médios da faixa normal para os três tipos de areia de acordo com a inclinação em que o fluido passa sobre a pilha. A Figura 37 mostra faixas de inclinação do escoamento com os respectivos

valores do critério de emissão e a velocidade de fricção para as três velocidades de corrente livre testadas.

Casos D - 80% branca, 12% amarela, 8% preta



Casos E - 65% branca, 21% amarela, 14% preta



Casos F - 50% branca, 30% amarela, 20% preta

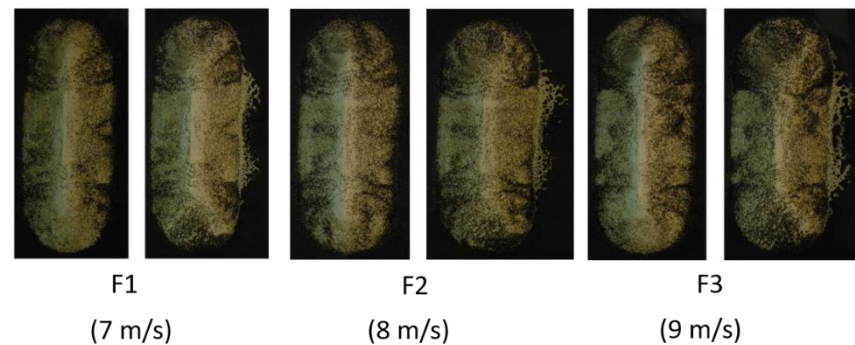


Figura 36 - Estágios inicial e final da erosão das pilhas para todos os casos

Como exemplo, pode-se comparar a imagem da pilha experimental do caso D2 a 8 m/s de corrente livre no final da exposição ao vento na Figura 36 com: os dados de inclinação e de velocidade de fricção da Figura 37 e com o critério de emissão das partículas apresentados na Tabela 8.

A velocidade de fricção a partir da quinta faixa de ângulos (Figura 37), apenas nas extremidades superior e inferior da pilha, varia em média, de 0,15 a 0,53 m/s. A Tabela 8 mostra que partículas brancas e amarelas tendem a saltar dessa região se considerarmos a máxima dessa faixa de velocidade de fricção. Já o critério de emissão da maioria das partículas na faixa granulométrica preta não tem o critério de emissão atingido, permanecendo na região. Já a velocidade de fricção do vento nas sete primeiras faixas de ângulos em destaque na porção localizada no lado direito da pilha, varia em média, de 0,15 a 0,30 m/s, como mostrado na Figura 37. A Tabela 8 mostra que a areia branca inicialmente encontrada nessas regiões é majoritariamente erodível, uma vez que $u^* > u_t^*(\theta)$ em toda a faixa granulométrica considerando a máxima dessa faixa de velocidade de fricção. Também, fazendo a mesma análise para a areia amarela, vemos que $u^* < u_t^*(\theta)$ na maior parte da faixa granulométrica. Logo, a areia amarela nessas regiões pode ser considerada não erodível. Isso explicaria o fato de que nessas inclinações da pilha existem uma maior acumulação de areia amarela.

Em uma região deslocada para a esquerda paralela a crista da pilha dentro da primeira faixa de ângulos com u^* variando aproximadamente de 0,46 a 0,53 m/s, pode-se perceber certa acumulação de partículas pretas, pois nessa região temos $u^* > u_t^*(\theta)$ para as partículas brancas e amarelas e $u^* < u_t^*(\theta)$ para a maioria das partículas pretas.

Esse comportamento tende a ser o mesmo nos demais casos D e nos casos E se intensificando com o aumento da velocidade de corrente livre e com a proporção de partículas amarelas e pretas. Isso pode ser comprovado comparando-se os casos D2 e E2.

Regiões não citadas na discussão acima tenderam a permanecer inalteradas com a exposição ao vento, ainda que se a análise realizada anteriormente comparando-se u^* e $u_t^*(\theta)$ fosse feita. Na primeira faixa de ângulos por exemplo, do lado esquerdo da pilha temos regiões com alto cisalhamento que superariam $u_t^*(\theta)$ das partículas brancas e amarelas, levando-as a saltar. Porém, pode ser visto que isso não acontece.

Vale salientar que tanto nas imagens experimentais quanto nas imagens da distribuição de ângulo e velocidade de fricção, é apresentado o momento final da erosão. Não é possível saber o que aconteceu sobre a superfície da pilha entre os momentos inicial e final, qual era o tipo de cobertura das camadas que foram sendo erodidas e nem como o efeito de proteção criado pelas partículas maiores agiu sobre as demais partículas. Além disso, os valores de velocidade de fricção sobre a pilha foram obtidos numericamente através das médias de Reynolds, não representando valores exatos da variável. Também, a velocidade de fricção limite é calculada

com base em modelos empíricos representando também aproximações. Logo, nem todas as características finais da superfície podem ser explicadas de forma quantitativa.

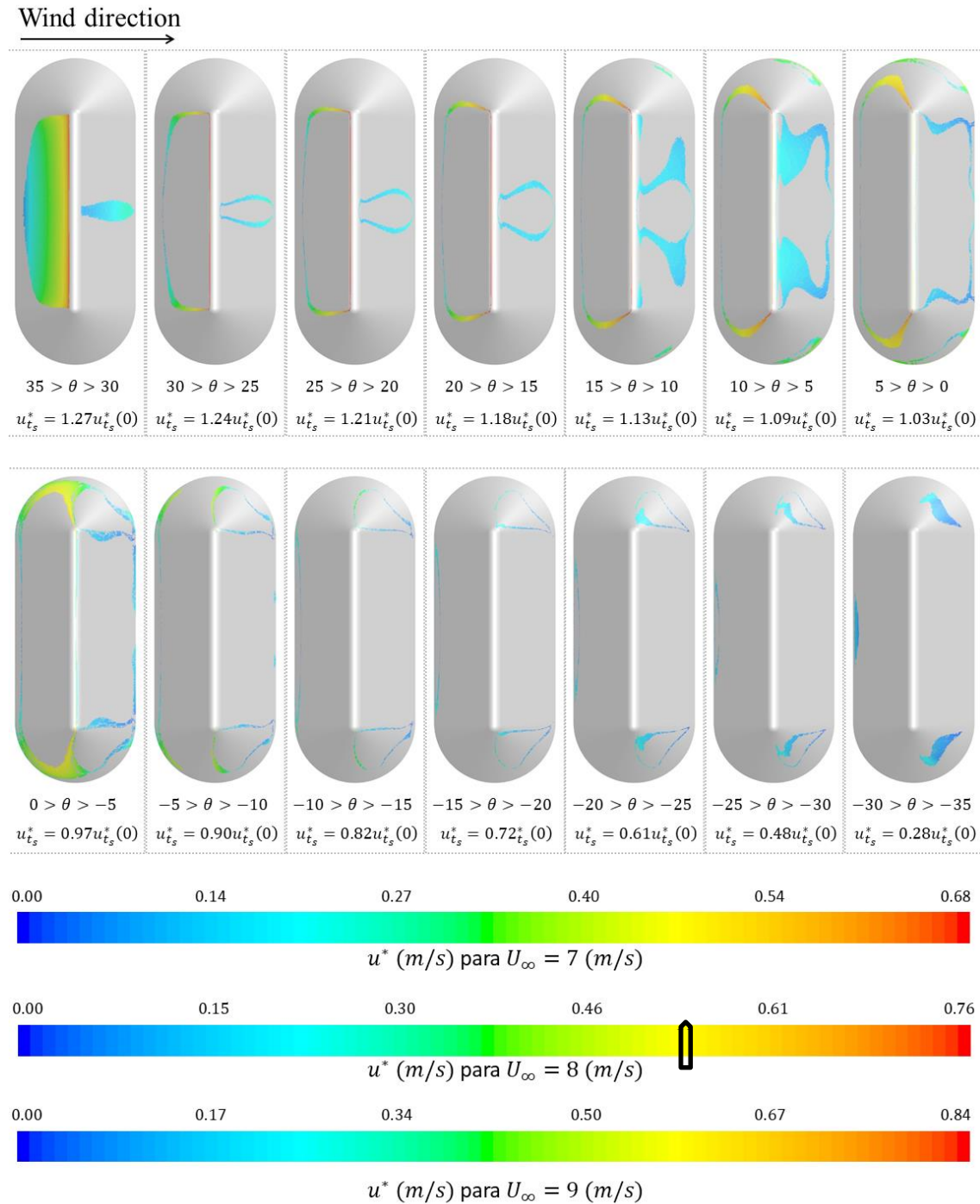


Figura 37 - Isosuperfícies de ângulo constantes com seus respectivos critérios de emissão relativo a uma superfície plana e a distribuição de velocidade de fricção em cada uma dessas superfícies para as três velocidade de corrente livre testadas. Adaptado de Caliman (2017).

Nos casos F, por exemplo, comparando-se u^* e $u_t^*(\theta)$ na maioria das faixas de ângulos, muitas partículas deveriam ter saltado, mas pode ser visto que quase não houve mudanças significativas com nenhuma das velocidades. Provavelmente, os efeitos da pavimentação agiram fortemente, e como se sabe, a emissão das partículas também é condicionada por esse fator.

Tabela 8 - Critério de emissão dos diâmetros da distribuição granulométrica das areias com base na inclinação da pilha.

Areia branca							Areia amarela							Areia preta						
%	2,3	13,6	34,1	34,1	13,6	2,3	2,3	13,6	34,1	34,1	13,6	2,3	2,3	13,6	34,1	34,1	13,6	2,3		
$D_{med}(10^{-4}m)$	0,68	0,91	1,1	1,4	1,6	1,8	3,3	3,8	4,3	4,8	5,3	5,8	7,5	8,5	$9,5E$ – 04	$1,1E$ – 03	$1,2E$ – 03	$1,3E$ – 03		
Critério	$u_t^*(\theta)$						$u_t^*(\theta)$						$u_t^*(\theta)$							
$35 > \theta > 30$	0,31	0,29	0,29	0,30	0,30	0,31	0,38	0,40	0,42	0,45	0,47	0,49	0,55	0,59	0,62	0,65	0,68	0,71		
$30 > \theta > 25$	0,30	0,29	0,28	0,29	0,30	9,66	0,37	0,39	0,41	0,44	0,46	12,06	0,54	0,57	0,60	0,63	0,66	14,54		
$25 > \theta > 20$	0,29	0,28	0,28	0,28	0,29	9,42	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	11,77	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	14,19		
$20 > \theta > 15$	0,28	0,27	0,27	0,27	0,28	9,19	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	11,47	0,51	0,54	0,57	0,60	0,63	13,84		
$15 > \theta > 10$	0,27	0,26	0,26	0,26	0,27	8,80	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	10,99	0,49	0,52	0,55	0,58	0,60	13,25		
$10 > \theta > 5$	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	8,49	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	10,60	0,47	0,50	0,53	0,56	0,58	12,78		
$5 > \theta > 0$	0,25	0,24	0,24	0,24	0,25	8,02	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	10,02	0,45	0,48	0,50	0,53	0,55	12,08		
$0 > \theta > -5$	0,23	0,22	0,22	0,23	0,23	7,55	0,29	0,31	0,32	0,34	0,36	9,43	0,42	0,45	0,47	0,50	0,52	11,38		
$-5 > \theta$																				
> -10	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	7,01	0,27	0,28	0,30	0,32	0,33	8,75	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48	10,56		
$-10 > \theta$																				
> -15	0,20	0,19	0,19	0,19	0,20	6,39	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	7,97	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	9,62		
$-15 > \theta$																				
> -20	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	5,61	0,21	0,23	0,24	0,25	0,26	7,00	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	8,44		
$-20 > \theta$																				
> -25	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15	4,75	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	5,93	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	7,15		
$-25 > \theta$																				
> -30	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	3,74	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	4,67	0,21	0,22	0,23	0,25	0,26	5,63		
$-30 > \theta$																				
> -35	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	2,18	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	2,72	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	3,28		

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

7.2 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto verificar: (i) se as constantes A , M e N obtidas de forma a particularizar misturas específicas de areia produzem melhores resultados do modelo de emissão, (ii) avaliar a linearidade da relação entre a taxa de cobertura e a altura erodida para a presença de uma terceira granulometria de erodibilidade variável, (iii) validar os resultados do modelo para a presença de uma terceira granulometria com erodibilidade variável e (iv) avaliar a taxa de cobertura final sobre a superfície de uma pilha experimental alongada composta por uma terceira granulometria com erodibilidade variável.

Novas simulações de um leito composto por elementos rugosos, apesar de terem sido feitas de forma a tentar caracterizar melhor os tipos de partículas utilizadas, não apresentaram ganhos importantes em relação às constantes A , M e N obtidas anteriormente por Caliman (2017).

Já a relação entre a taxa de cobertura e a altura final erodida ainda pode ser considerada linear para as granulometrias e velocidades testadas, apesar dos erros encontrados pelo ajuste das curvas.

O modelo apresentou resultados de emissão com erros significativos em relação aos resultados experimentais. Isso não significa que o modelo não tenha validade, mas apenas que as considerações feitas sua concepção e uso na presente pesquisa propagaram erros demais para que se tivesse o desempenho esperado. A distribuição uniforme das partículas ao longo da altura do leito, distribuição homogênea das partículas sobre a superfície da pilha e não consideração das mudanças da forma da pilha com a erosão, podem ser citados como considerações que podem ter influenciado os resultados do modelo.

A emissão modelada apresentou a mesma tendência da emissão medida experimentalmente. Com o aumento da velocidade, utilizando-se uma mesma proporção de partículas não-erodíveis, maior foi a emissão, pois o aumento da velocidade propiciou que mais partículas se tornassem erodíveis. Ao avaliar o aumento da proporção de partículas não-erodíveis, na mesma velocidade de corrente livre, observou-se que menos partículas foram emitidas devido ao aumento do efeito da pavimentação causado pelo aumento do número de

partículas maiores. Logo, o modelo tem fundamento físico tanto quando foi criado quanto quando foi testado no presente trabalho. É necessário apenas investigações mais profundas de quais, entre as considerações feitas, tem propagado mais erros.

A análise geral das imagens dos experimentos mostrou que se pode, em parte, explicar a distribuição de partículas sob a superfície da pilha tanto qualitativamente quanto quantitativamente pela avaliação do critério de emissão considerando o ângulo e a velocidade de fricção. Porém, nem todos os fenômenos podem ser observados, como a distribuição de novas camadas descobertas com o tempo e os efeitos da pavimentação. Também, os contornos utilizados são modelos idealizados de simulações para representação final da distribuição de tensões sobre a pilha. Ela muda de forma e ainda não se tem informação de como essa distribuição varia com essa mudança. Logo, os resultados encontrados são avaliações produto do uso das ferramentas disponíveis até então.

Como conclusão geral da influência de partículas de diferentes granulometrias na emissão, tem-se que, apesar de ser mais um agente no cálculo da emissão, uma terceira granulometria de erodibilidade variável subdivide-se, ora sendo erodível e ora sendo não erodível, sendo parte incorporada aos elementos erodíveis e parte incorporada aos elementos não-erodíveis. Dessa forma, no final, acaba-se por ter sempre os mesmos dois tipos de elemento com o mesmo comportamento: erodíveis e não-erodíveis.

7.3 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

A tese de Caliman (2017) já traz recomendações pertinentes acerca de novas investigações a serem realizadas para aplicações do modelo a situações mais reais. Recomendações adicionais incluem:

- Verificar o uso de proporção de partículas e diâmetro médio constantes em todas as áreas da pilha, pois essas variáveis mudam com o aumento da velocidade, caso considerado no presente estudo, e também variam com a inclinação em que o fluido escoia sobre a pilha. A depender da inclinação e da velocidade de fricção, mais ou menos partículas se tornam erodíveis, logo a fração de partículas não-erodíveis e o diâmetro médio das mesmas varia em cada região.

- Realizar novos experimentos com partículas de diferentes granulometrias não-erodíveis com diferença considerável entre as cores das areias. A análise digital das imagens pode fornecer informações mais detalhadas do que acontece na superfície da pilha, porém o uso de areias de cores muito semelhantes, como a areia branca e a areia amarela, dificultam esse tipo de estudo de forma quantitativa.
- Realizar análise temporal da taxa de cobertura de imagens digitais de experimentos com pilhas de diferentes granulometrias não-erodíveis. A quantificação da taxa de cobertura com o tempo pode fornecer meios de propor um modelo com variação temporal da taxa de emissão. Apesar da emissão total ser, em teoria, mais relevante, nem sempre em situações mais realistas as pilhas conseguem chegar ao estado final onde ocorre a pavimentação completa. Em pátios de estocagem industriais as pilhas são carregadas e descarregadas constantemente e o tempo de exposição ao vento, onde existe emissão de partículas, pode não corresponder ao tempo final de erosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Argyropoulos, C. & Markatos, N. 2015. Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows. *Applied Mathematical Modelling*, v. 39, p. 693–732. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.07.001>.

Bagnold, R. 1941. The physics of blown sand and desert dunes. Vol. 265). London: Methuen & Co.

Badr, T. & Harion, J.-L. 2005. Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions. *Atmospheric Environment*, v. 39, p. 5576 – 5584. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.053>.

Badr, T. & Harion, J.-L. 2007. Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions. *Atmospheric Environment*, v. 41, p. 360 – 368. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.038>.

Blazek, J. 2015. Computational fluid dynamics: principles and applications. Butterworth-Heinemann

Brown, S., Nickling, W. G. & Gillies, J. A. 2008. A wind tunnel examination of shear stress partitioning for an assortment of surface roughness distributions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 113. <https://doi.org/10.1029/2007JF000790>.

Caliman, M. F. S. C. Influência das partículas não-erodíveis na erosão eólica. 2017. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

Cong, X., Yang, S., Cao, S., Chen, Z., Dai, M. & Peng, S. 2012. Effect of aggregate stockpile configuration and layout on dust emissions in an open yard. *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, p. 5482 – 5491. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.01.014>.

Costa, I. B. Avaliação de desempenho do modelo de turbulência $k - \omega$ sst para dispersão de poluentes ao redor de obstáculo cúbico em diferentes condições de estabilidade atmosférica . 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

Crawley, D. & Nickling, W. 2003. Drag partition for regularly-arrayed rough surfaces. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 107, p. 445–468. <http://doi.org/10.1023/A:1022119909546>.

Derakhshani, S. M., Schott, D. L. & Lodewijks, G. 2013. Dust emission modelling around a stockpile by using computational fluid dynamics and discrete element method. *AIP Conf. Proc.* v. 1542, p. 1055–1058. <https://doi.org/10.1063/1.4812116>.

Descamps, I. Erosion éolienne d'un lit de particules large spectre granulométrique. Wind erosion of a bed of particles with a wide size distribution. 2004. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica e Energética), Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Douai, 2004.

Descamps, I., Harion, J.-L. & Baudoin, B. 2005. Taking-off model of particles with a wide size distribution. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 44, p. 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.04.007>.

Diego, I., Pelegry, A., Torno, S., Toraño, J. & Menendez, M. 2009. Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles. *Applied Mathematical Modelling*, v. 33, p. 3197 – 3207. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.10.037>.

Faria, R., Ferreira, A.D., Sismeiro, J.L., Mendes, J.C.F. & Sousa, A.C.M. 2011. Wind tunnel and computational study of the stoss slope effect on the aeolian erosion of transverse sand dunes. *Aeolian Research*, v. 3, p. 303–314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.07.004>

Ferreira, A. D., Pinheiro, S. R. & Francisco, S. C. 2013. Experimental and numerical study on the shear velocity distribution along one or two dunes in tandem. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 13, p. 557-570. <https://doi.org/10.1007/s10652-013-9282-7>.

Fonias, E. N. & Grigoriadis, D. G. E. 2018. Large Eddy Simulation of Flow over Dunes Laden with Inertial Particles. In: Grigoriadis D., Geurts B., Kuerten H., Fröhlich J., Armenio V. (eds), *Direct and Large-Eddy Simulation X*. ERCOFTAC Series (v. 24). Cham: Springer.

Foucaut, J-M. & Stanislas, M. 1996. Take-off threshold velocity of solid particles lying under a turbulent boundary layer. *Experiments in Fluids*, v. 20 , p. 377–382. <https://doi.org/10.1007/BF00191019>.

Furieri, B. Erosion éolienne de tas de stockage de matières granulaires sur sites industriels: amélioration des méthodes de quantification des émissions. 2012. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica e Energética). Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Douai, 2012.

Furieri, B., Harion, J-L., Santos, J. M. & Milliez, M. 2012. Comparative analysis of dust emissions: isolated stockpile vs two nearby stockpiles. In: Longhurst, J.W.S., Brebbia, C. A. (eds), *Air Pollution XX* (v. 57, p. 285–294). WitPress.

- Furieri, B., Russeil, S., Santos, J. M. & Harion, J.-L. 2013a. Effects of non-erodible particles on aeolian erosion: Wind-tunnel simulations of a sand oblong storage pile. *Atmospheric Environment*, v. 79, p. 672 – 680. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.026>.
- Furieri, B., Harion, J.L., Milliez, M., Russeil, S. & Santos, J. M. 2013b. Numerical modelling of aeolian erosion over a surface with non-uniformly distributed roughness elements. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 39, p. 156–166. <https://doi.org/10.1002/esp.3435>.
- Furieri, B., Santos, J.M. & Russeil, S. 2014. Aeolian erosion of storage piles yard: contribution of the surrounding areas. *Environment Fluid Mechanics*, v. 14, p. 51- 67. <https://doi.org/10.1007/s10652-013-9293-4>
- Gillette, D. & Stockton, P. 1989. The effect of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 94, p. 12885–12893. <https://doi.org/10.1029/JD094iD10p12885>.
- Gillies, J., Nickling, W. & King, J. 2007. Shear stress partitioning in large patches of roughness in the atmospheric inertial sublayer. *Boundary-layer meteorology*, v. 122, p. 367–396. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9101-5>.
- Gillies, J.A., Green, H., McCarley-Holder, G., Grimm, S., Howard, C., Barbieri, N., Ono, D. & Schade, T. 2015. Using solid element roughness to control sand movement: Keeler Dunes, Keeler, California. *Aeolian Research*, 18, 35–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.05.004>.
- Hoonhout, B. M. & Vries, S. 2016. A process-based model for aeolian sediment transport and spatiotemporal varying sediment availability. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 121, p. 1555–1575. <https://doi.org/doi:10.1002/2015JF003692>.
- Iversen, J., Wang, W., Rasmussen, K., Mikkelsen, H. & Leach, R. 1991. Roughness element effect on local and universal saltation transport. In: O. Barndorff-Nielsen, B. Willetts (Eds.), *Aeolian Grain Transport: Acta Mechanica Supplementum* (v.2, p. 65–75.). Vienna: Springer.
- Iversen, J. & Rasmussen, K. 1994. The effect of surface slope on saltation threshold. *Sedimentology*, v. 41, p. 721–728. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1994.tb01419.x>.
- Iversen, J. & White, B. 1982. Saltation threshold on earth, mars and venus. *Sedimentology*, v. 29, p. 111–119. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1982.tb01713.x>.
- Jiang, H., Dun, H., Tong, D. & Huang, N. 2017. Sand transportation and reverse patterns over leeward face of sand dune. *Geomorphology*, v. 283, p. 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.030>.

Klose, M., Shao, Y., Li, X., Zhang, H., Ishizuka, M., Mikami, M. & Leys, J. F. 2014. Further development of a parametrization for convective turbulent dust emission and evaluation based on field observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 119, p. 10441-10457. <https://doi.org/10.1002/2014JD021688>.

Kok, J., Parteli, E., Michaels, T. & Karam, D. 2012. The physics of wind-blown sand and dust. *Reports on Progress in Physics*, v. 75, p. 106901. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901>

Kok, J., Mahowald, N., Fratini, G., Gillies, J., Ishizuka, M., Leys, J., Mikami, M., Park, M.-S., Park, S.-U., Van Pelt, R. & Zobeck, T. 2014. An improved dust emission model - part 1: Model description and comparison against measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 14, p. 13023–13041. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13023-2014>.

Kurose, R. & Komori, S. 2001. Turbulence structure over a particle roughness. *International journal of multiphase flow*, v. 27, p. 673–683. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00044-6](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00044-6).

Li, A. & Shao, Y. 2003. Numerical simulation of drag partition over rough surfaces. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 108, p. 317–342. <https://doi.org/10.1023/A:1024179025508>.

Lyles, L. & Allison, B. 1975. Wind erosion: The protective role of simulated standing stubble. *American Society of Agricultural Engineering*, v. 19, p. 61–64.

Marshall, J. 1971. Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution. *Agricultural Meteorology*, v. 8, p. 269–292. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90116-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90116-6).

Marticorena, B. & Bergametti, G. 1995. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 100, p. 16415–16430. <https://doi.org/10.1029/95JD00690>.

Mckenna Neuman, C. & Nickling, W. 1995. Aeolian sediment flux decay: Nonlinear behaviour on developing deflation lag surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 20, p. 423–435. <https://doi.org/10.1002/esp.3290200504>.

Menter, F. 1992. Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions. *AIAA journal*, v. 30, p. 1657–1659. <https://doi.org/10.2514/3.11115>.

Miri, A., Dragovich, D. & Dong, Z. 2017. Vegetation morphologic and aerodynamic characteristics reduce aeolian erosion. *Nature: Scientific Reports*, v. 7, p. 12831. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13084-x>.

Mollinger, A. & Nieuwstadt, F. 1996. Measurement of the lift force on a particle fixed to the wall in the sublayer of a fully developed turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 316, p. 285–306. <https://doi.org/10.1017/S0022112096000547>.

Musick, H. B. & Gillette, D. A. 1990. Field evaluation of relationships between a vegetation structural parameter and sheltering against wind erosion. *Land Degradation & Development*, v. 2, p. 87–94. <https://doi.org/10.1002/ldr.3400020203>.

Nascimento, E. L. Suspensão e deposição de material particulado emitido por pilhas de estocagem de granulados: uma abordagem numérica empregando LES. 2014. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

Novak, L., Bizjan, B., Pražnikar, J., Horvat, B., Orbanić, A. & Širok, B. 2015. Numerical Modeling of Dust Lifting from a Complex-Geometry Industrial Stockpile. *Journal of Mechanical Engineering*, v. 61, p. 621-631 . <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2015.2824>.

Raupach, M. 1991. Drag and drag partition on rough surfaces. *BoundaryLayer Meteorology*, v. 60, p. 375–395. <https://doi.org/10.1007/BF00155203>.

Raupach, M., Gillette, D. & Leys, J. (1993). The effect of roughness elements on wind erosion threshold. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D2), 3023–3029. <https://doi.org/10.1029/92JD01922>.

Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N. 2006. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. (2nd Edition). New York: John Wiley & Sons.

Shao, Y. (2008). Physics and Modelling of Wind Erosion. (Vol 37). Netherlands: Springer.

Shao, Y. & Lu, H. 2000. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 105, p. 22437–22443. <https://doi.org/10.1029/2000JD900304>.

Souza, J. F. A., Oliveira, L. R., Azevedo, J. L. L., Soares, I. D. & Mata, M. M. 2011. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 29, p. 21-41.

Stunder, B. & Arya, S. 1988. Windbreak effectiveness for storage pile fugitive dust control: a wind tunnel study. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v. 38, p. 135-143. <https://doi.org/10.1080/08940630.1988.10466360>.

Tan, L., Zhang, W., Qu, J., Zhang, K., An, Z. & Wang, X. 2013. Aeolian sand transport over gobi with different gravel coverages under limited sand supply: a mobile wind tunnel investigation. *Aeolian Research*, v. 11, p. 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.10.003>.

Turpin, C. & Harion, J-L. 2009. Numerical modeling of flow structures over various flat-topped stockpiles height: Implications on dust emissions. *Atmospheric Environment*, v. 43, p. 5579 – 5587. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.047>.

Turpin, C., Badr, T. & Harion, J-L. 2010. Numerical modelling of aeolian erosion over rough surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 35, p. 1418–1429. <https://doi.org/10.1002/esp.1980>.

Toraño, J., Rodriguez, R., Diego, I., Rivas, J. & Pelegry, A. 2007. Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation. *Applied Mathematical Modelling*, v. 31, p. 2487 – 2502. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.10.012>.

US Environmental Protection Agency. 1985. Windbreak coal pile study. Department of Marine, Earth and Atmospheric Sciences, North Carolina State University.

US Environmental Protection Agency. 1988. Update of fugitive dust emissions factors in AP-42. Midwest Research Institute, Kansas City, AP-42 section 11.2—wind erosion.

US Environmental Protection Agency. 2006. Miscellaneous Sources, Industrial Wind Erosion, AP-42.

Walter, B., Gromke, C. & Lehning, M. 2012. Shear-stress partitioning in live plant canopies and modifications to raupach's model. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 144, p. 217–241. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9719-4>.

Webb, N. P., Okin, G. S. & Brown, S. 2014. The effect of roughness elements on wind erosion: The importance of surface shear stress distribution, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 119, p. 6066–6084. <https://doi.org/doi:10.1002/2014JD021491>.

White B. 1982. Two-phase measurements of saltatin turbulent boundary layer. *Journal of Multiphase Flow*, v. 8, p. 459-473. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(82\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0301-9322(82)90018-0).

Yu, L. & Righetto, A. 2001. Depth-averaged turbulence k–w model and applications. *Advances in Engineering Software*, v. 32, p. 375–394. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(00\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(00)00100-9).

Zou, X. Y., Zhang, C., Cheng, H., Kang, L. & Wu, Y. 2015. Cogitation on developing a dynamic model of soil wind erosion. *Earth Sciences*, v. 58, p. 462-473.
<https://doi.org/10.1007/s11430-014-5002-5>.

APÊNDICE I

Tabela 9 - Número de rugosidades para a proporção de 80% de areia branca, 12 % de areia amarela e 8% de areia preta a diferentes velocidades. Em destaque as sub-faixas não incluídas na simulação.

CASO D1 - 7 m/s					CASO D2 - 8 m/s					CASO D3 - 9 m/s				
Amarelas					Amarelas					Amarelas				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 12%)	$h_{med}(m)$	n_r	(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 12%)	$h_{med}(m)$	n_r	(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 12%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,017	0,000319	0,00210	0,000319	24	0,023	0,000325	0,00276	0,000325	30	0,023	0,000325	0,00276	0,000325	30
0,006	0,000344	0,00066	0,000344	6	0,136	0,000375	0,01632	0,000375	133	0,136	0,000375	0,01632	0,000375	133
0,136	0,000375	0,01632	0,000375	133	0,246	0,000418	0,02946	0,000418	193	0,341	0,000425	0,04092	0,000425	260
0,341	0,000425	0,04092	0,000425	260	0,095	0,000443	0,01146	0,000443	67	0,341	0,000475	0,04092	0,000475	208
0,341	0,000475	0,04092	0,000475	208	0,341	0,000475	0,04092	0,000475	208	0,128	0,000524	0,01534	0,000524	64
0,136	0,000525	0,01632	0,000525	68	0,136	0,000525	0,01632	0,000525	68	0,008	0,000549	0,00097	0,000549	4
0,023	0,000575	0,00276	0,000575	10	0,023	0,000575	0,00276	0,000575	10	0,023	0,000575	0,00276	0,000575	10
Pretas					Pretas					Pretas				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 8%)	$h_{med}(m)$	n_r	(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 8%)	$h_{med}(m)$	n_r	(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 8%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,00075	0,00184	0,000750	4	0,023	0,000750	0,00184	0,00075	4	0,023	0,000750	0,00184	0,00075	4
0,136	0,00085	0,01088	0,000850	17	0,136	0,000850	0,01088	0,00085	17	0,136	0,000850	0,01088	0,00085	17
0,341	0,00095	0,02728	0,000950	35	0,341	0,000950	0,02728	0,00095	35	0,341	0,000950	0,02728	0,00095	35
0,341	0,00105	0,02728	0,001050	28	0,341	0,001050	0,02728	0,00105	28	0,341	0,001050	0,02728	0,00105	28
0,136	0,00115	0,01088	0,001150	9	0,136	0,001150	0,01088	0,00115	9	0,136	0,001150	0,01088	0,00115	9
0,023	0,00125	0,00184	0,001250	1	0,023	0,001250	0,00184	0,00125	1	0,023	0,001250	0,00184	0,00125	1

Tabela 10 - Número de rugosidades para a proporção de 65% de areia branca, 21 % de areia amarela e 14% de areia preta a diferentes velocidades.
Em destaque as sub-faixas não incluídas na simulação.

CASO E1 - 7 m/s

Amarelas				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 21%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,017	0,000319	0,00367	0,000319	41
0,006	0,000344	0,00116	0,000344	11
0,136	0,000375	0,02856	0,000375	233
0,341	0,000425	0,07161	0,000425	455
0,341	0,000475	0,07161	0,000475	364
0,136	0,000525	0,02856	0,000525	119
0,023	0,000575	0,00483	0,000575	17
Pretas				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 14%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,00075	0,00322	0,000750	7
0,136	0,00085	0,01904	0,000850	30
0,341	0,00095	0,04774	0,000950	61
0,341	0,00105	0,04774	0,001050	50
0,136	0,00115	0,01904	0,001150	17
0,023	0,00125	0,00322	0,001250	2

CASO E2 - 8 m/s

Amarelas				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 21%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,000325	0,00483	0,000325	52
0,136	0,000375	0,02856	0,000375	233
0,246	0,000418	0,05156	0,000418	338
0,095	0,000443	0,02005	0,000443	117
0,341	0,000475	0,07161	0,000475	364
0,136	0,000525	0,02856	0,000525	119
0,023	0,000575	0,00483	0,000575	17
Pretas				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 14%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,000750	0,00322	0,00075	7
0,136	0,000850	0,01904	0,00085	30
0,341	0,000950	0,04774	0,00095	61
0,341	0,001050	0,04774	0,00105	50
0,136	0,001150	0,01904	0,00115	17
0,023	0,001250	0,00322	0,00125	2

CASO E3 - 9 m/s

Amarelas				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 21%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,000325	0,00483	0,000325	52
0,136	0,000375	0,02856	0,000375	233
0,341	0,000425	0,07161	0,000425	455
0,341	0,000475	0,07161	0,000475	364
0,128	0,000524	0,02684	0,000524	112
0,008	0,000549	0,001713	0,000549	7
0,023	0,000575	0,004830	0,000575	17
Pretas				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 14%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,000750	0,00322	0,00075	7
0,136	0,000850	0,01904	0,00085	30
0,341	0,000950	0,04774	0,00095	61
0,341	0,001050	0,04774	0,00105	50
0,136	0,001150	0,01904	0,00115	17
0,023	0,001250	0,00322	0,00125	2

Tabela 11 - Número de rugosidades para a proporção de 50% de areia branca, 30 % de areia amarela e 20% de areia preta a diferentes velocidades.

CASO F1 - 7 m/s

Amarela				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 30%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,017	0,000319	0,00524	0,000319	59
0,006	0,000344	0,00166	0,000344	16
0,136	0,000375	0,04080	0,000375	333
0,341	0,000425	0,10230	0,000425	649
0,341	0,000475	0,10230	0,000475	520
0,136	0,000525	0,04080	0,000525	170
0,023	0,000575	0,00690	0,000575	24
Preta				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 20%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,00075	0,0046	0,000750	9
0,136	0,00085	0,0272	0,000850	43
0,341	0,00095	0,0682	0,000950	87
0,341	0,00105	0,0682	0,001050	71
0,136	0,00115	0,0272	0,001150	24
0,023	0,00125	0,0046	0,001250	3

CASO F2 - 8 m/s

Amarela				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 30%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,000325	0,00690	0,000325	75
0,136	0,000375	0,04080	0,000375	333
0,246	0,000418	0,07366	0,000418	483
0,095	0,000443	0,02864	0,000443	167
0,341	0,000475	0,10230	0,000475	520
0,136	0,000525	0,04080	0,000525	170
0,023	0,000575	0,00690	0,000575	24
Preta				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 20%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,000750	0,0046	0,00075	9
0,136	0,000850	0,0272	0,00085	43
0,341	0,000950	0,0682	0,00095	87
0,341	0,001050	0,0682	0,00105	71
0,136	0,001150	0,0272	0,00115	24
0,023	0,001250	0,0046	0,00125	3

CASO F3 - 9 m/s

Amarela				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 30%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,000325	0,0069	0,000325	75
0,136	0,000375	0,0408	0,000375	333
0,341	0,000425	0,1023	0,000425	649
0,341	0,000475	0,1023	0,000475	520
0,128	0,000524	0,038352	0,000524	160
0,008	0,000549	0,002448	0,000549	9
0,023	0,000575	0,0069	0,000575	24
Preta				
(%)	$D_{med} (m)$	CR_i (% dos 20%)	$h_{med}(m)$	n_r
0,023	0,000750	0,0046	0,00075	9
0,136	0,000850	0,0272	0,00085	43
0,341	0,000950	0,0682	0,00095	87
0,341	0,001050	0,0682	0,00105	71
0,136	0,001150	0,0272	0,00115	24
0,023	0,001250	0,0046	0,00125	3