

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

RAFAELA RAYMUNDO SANTOS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EROÇÃO EÓLICA DE MATERIAIS GRANULADOS
EMITIDOS POR PILHAS DE ESTOCAGEM EMPREGANDO O MODELO DE
TURBULÊNCIA κ - ω SST**

VITÓRIA/ES

2022

RAFAELA RAYMUNDO SANTOS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA EROSÃO EÓLICA DE MATERIAIS GRANULADOS
EMITIDOS POR PILHAS DE ESTOCAGEM EMPREGANDO O MODELO DE
TURBULÊNCIA κ - ω SST**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. Orientador: Prof. Dr. Bruno Furieri.

VITÓRIA/ES

2022

RESUMO

A emissão de partículas a partir de pilhas de estocagem pode resultar em problemas ambientais e riscos para a saúde humana, além da perda de matéria-prima para as indústrias. As emissões de material devido à ação do vento sobre as pilhas de estocagem podem ser influenciadas por diversos fatores, dentre eles a magnitude do vento incidente e parâmetros do material estocado, como diâmetro, densidade, formato, e velocidade de fricção limite. O presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito da velocidade e ângulo de incidência do escoamento nos mecanismos hidrodinâmicos ao redor de uma pilha de estocagem, além de observar como as diferentes velocidades, ângulos de incidência e materiais influenciam na emissão e dispersão de material granulado para a atmosfera. Para tal, a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) foi empregada com o uso do modelo de turbulência κ - ω SST e modelo de fase discreta. Foram testados oito casos distintos, considerando dois materiais componentes da pilha de estocagem (areia e carvão), duas velocidades do escoamento livre (6,08 m/s e 10,00 m/s) e dois ângulos de incidência do vento (90° e 60°). As simulações revelaram que a pilha de estocagem composta por areia apresenta uma maior emissão de material e maior concentração dele no domínio quando comparada à pilha composta por carvão, visto que a primeira possui menor valor de velocidade de fricção limite, e o maior valor de aumento percentual registrado nessa comparação foi 145%. Observou-se também que o aumento da velocidade do escoamento livre resultou em um aumento máximo de 461% na emissão de material e consequente aumento da concentração no domínio. Por fim, as pilhas de estocagem orientadas à 60° em relação à direção do vento apresentaram maiores valores de velocidade média incidente, além de um aumento na emissão de material, que registrou um aumento percentual máximo de 16%.

Palavras-chave: poluição atmosférica, erosão eólica, pilha de estocagem, emissão de particulado, CFD.

ABSTRACT

The particle emission from stockpiles can result in environmental problems and risks to the human health, in addition to the loss of raw material in industries. The material emission due to the wind action on stockpiles can be influenced by several factors, including the magnitude of the approaching wind and parameters of the stored material, such as diameter, density, shape, and threshold friction velocity. The present study aims to evaluate the effect of velocity and angle of incidence of the flow on the hydrodynamical mechanisms around the stockpile, in addition to observing how different velocities, angles of incidence and materials influence the emission and dispersion of granulated material. With this purpose, computational fluid dynamics (CFD) was employed using the κ - ω SST turbulence model and a discrete phase model. Eight different cases were tested, considering two stockpile materials (sand and coal), two free flow speeds (6.08 m/s and 10.00 m/s) and two wind incidence angles (90° and 60°). The simulations revealed that the sand stockpile presents a greater emission of material and a greater concentration in the domain when compared to the coal stockpile, since the first one has a lower value of threshold friction velocity, and the highest value of percentage increase in this comparison was 145%. It was also observed that the increase in the free flow velocity resulted in a maximum increase of 461% in the emission and consequent increase of the concentration in the domain. Finally, the stockpiles oriented 60° to the wind direction showed higher values of average incident speed, in addition to an increase in the material emission, with a maximum percentage increase of 16%.

Keywords: atmospheric pollution, wind erosion, stockpile, particulate emission, CFD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3-1: Modos de transporte das partículas devido ao efeito da erosão eólica: (a) suspensão, (b) salto e (c) rolamento. Adaptado de Duran et al. (2011).....	18
Figura 3-2: Representação esquemática do escoamento ao redor de um cubo. Adaptado de Murakami (1993).....	19
Figura 4-1: Túnel de vento representado pela geometria no <i>software</i> Fluent.	29
Figura 4-2: Vistas do túnel de vento e pilha de estocagem com altura $h = 0,05$ m para pilha de estocagem de carvão. a) Vista frontal do túnel de vento; b) Vista lateral do túnel de vento; c) Detalhe da pilha de estocagem; d) Dimensões da pilha de estocagem a 90° ; e) Dimensões da pilha de estocagem a 60°	30
Figura 4-3: Vistas do túnel de vento e pilha de estocagem com altura $h = 0,05$ m para pilha de estocagem de areia. a) Vista frontal do túnel de vento; b) Vista lateral do túnel de vento; c) Detalhe da pilha de estocagem; d) Dimensões da pilha de estocagem a 90° ; e) Dimensões da pilha de estocagem a 60°	31
Figura 4-4: Malha computacional.	35
Figura 4-5: Corte transversal da geometria com detalhamento da malha.....	36
Figura 4-6: Vistas do domínio precursor, considerando $h = 0,05$ m. a) Vista frontal do domínio precursor; b) Vista superior do domínio precursor.	37
Figura 4-7: Perfis de entrada adimensionalizados para (a) Velocidade na direção x; (b) Energia cinética turbulenta; (c) Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta; (d) Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta.	39
Figura 4-8: Evolução típica de fotografias experimentais em túnel de vento desde o início e evolução temporal do fluxo de massa. Fonte: Furieri <i>et al.</i> (2013).	44
Figura 5-1: Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a $0,00125$ m da superfície da pilha para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre $6,08$ m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre $10,00$ m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre $6,08$ m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre $10,00$ m/s.....	51
Figura 5-2: Seção transversal do contorno de velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha de estocagem para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre $6,08$ m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre $10,00$ m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre $6,08$ m/s; d) 7 – Carvão, velocidade de escoamento livre $10,00$ m/s.	52

Figura 5-3: Vista superior de <i>pathlines</i> coloridas conforme velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha de estocagem para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	54
Figura 5-4: a) Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,25 m da superfície da pilha para o estudo de Turpin e Harion (2009) (b) Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para o Caso 1 do presente estudo.	58
Figura 5-5: (a) Vista superior das <i>pathlines</i> coloridas pela velocidade média adimensional do escoamento a 0,25 m da superfície da pilha para o estudo de Turpin e Harion (2009) (b) Vista superior das <i>pathlines</i> coloridas pela velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para o Caso 1 do presente estudo.	59
Figura 5-6: Contornos de tensão de cisalhamento para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.....	61
Figura 5-7:(a) Contornos de tensão de cisalhamento para o estudo de Ferreira <i>et al.</i> (2019) (b) Contornos de tensão de cisalhamento para o Caso 1 do presente estudo.	63
Figura 5-8: Contornos de vorticidade em Z a h/2 m de altura para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	65
Figura 5-9: Contornos de energia cinética turbulenta adimensional para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	68
Figura 5-10: Contornos energia cinética turbulenta adimensional a h/2 m de altura para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.	70

Figura 5-11: Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.....	73
Figura 5-12: Seção transversal do contorno de velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha de estocagem para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 – Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.	74
Figura 5-13: Vista superior de <i>pathlines</i> coloridas conforme velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha de estocagem para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	76
Figura 5-14: a) Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,25 m da superfície da pilha para o estudo de Turpin e Harion (2009) (b) Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para o Caso 2 do presente estudo.	80
Figura 5-15: (a) Vista superior das <i>pathlines</i> coloridas pela velocidade média adimensional do escoamento a 0,25 m da superfície da pilha para o estudo de Turpin e Harion (2009) (b) Vista superior das <i>pathlines</i> coloridas pela velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para o Caso 2 do presente estudo.	81
Figura 5-16: Contornos de tensão de cisalhamento para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.....	83
Figura 5-17: :(a) Contornos de tensão de cisalhamento para o estudo de Ferreira <i>et al.</i> (2019) (b) Contornos de tensão de cisalhamento para o Caso 2 do presente estudo.	85
Figura 5-18: Contornos de vorticidade em Z a h/2 m de altura para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de	

escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	87
Figura 5-19: Contornos de energia cinética turbulenta adimensional para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	90
Figura 5-20: Contornos energia cinética turbulenta adimensional a h/2 m de altura para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.	92
Figura 5-21: Histograma de velocidade média adimensional do vento sobre a área da pilha de estocagem, com comparação entre os casos (a) Caso 1 e Caso 2; (b) Caso 3 e Caso 4; (c) Caso 5 e Caso 6; (d) Caso 7 e Caso 8.....	95
Figura 5-22: Histograma de velocidade média adimensional do vento sobre a área da pilha de estocagem, com comparação entre os casos (a) Caso 1 e Caso 5; (b) Caso 2 e Caso 6; (c) Caso 3 e Caso 7; (d) Caso 4 e Caso 8.....	100
Figura 5-23: Quantificação da massa total emitida pelas pilhas de estocagem.....	105
Figura 5-24: Contornos de velocidade de fricção na superfície da pilha para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.	107
Figura 5-25: Contornos de concentração no chão do domínio para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.	109
Figura 5-26: Contornos de velocidade de fricção no chão do domínio para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.	112
Figura 5-27: Contornos de concentração no Plano 1 e Plano 2 para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	115

Figura 5-28: Resultado experimental da erosão eólica em uma pilha de estocagem orientada perpendicularmente à direção do vento no estudo de Ferreira <i>et al.</i> (2019).	119
Figura 5-29: Velocidade das partículas para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	121
Figura 5-30: Contornos de velocidade de fricção na superfície da pilha para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.	124
Figura 5-31: Contornos de concentração no chão do domínio para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.	126
Figura 5-32: Contornos de velocidade de fricção no chão do domínio para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.	129
Figura 5-33: Contornos de concentração no Plano 1 e Plano 2 para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	132
Figura 5-34: Resultado experimental da erosão eólica em uma pilha de estocagem orientada a 60° em relação à direção do vento no estudo de Ferreira <i>et al.</i> (2019).	136
Figura 5-35: Velocidade das partículas para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s	138
Figura 5-36: Comparação entre os contornos de concentração no chão do domínio para os casos (a) Caso 1 e Caso 2; (b) Caso 3 e Caso 4; (c) Caso 5 e Caso 6; (d) Caso 7 e Caso 8.	141
Figura 5-37: Concentração de material na saída do domínio.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Número de nós e elementos de malha para cada configuração de pilha de estocagem.	36
Tabela 4-2: Densidade e diâmetro dos materiais.	46
Tabela 5-1: Configurações testadas.....	49
Tabela 5-2: Aumento percentual da massa emitida na pilha de areia em relação à pilha de carvão.	105
Tabela 5-3: Aumento percentual da massa emitida nos casos de velocidade 10 m/s em relação aos casos de velocidade 6,08 m/s.....	105
Tabela 5-4: Aumento percentual da massa emitida nos casos de orientação a 60° em relação aos casos de orientação a 90°.	106

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Introdução à erosão eólica	17
3.2. Escoamento ao redor de obstáculos	18
3.3. Simulação numérica de escoamentos utilizando modelos de turbulência RANS	20
3.4. Estimativa da taxa de emissão de material particulado devido à erosão eólica de estocagem de materiais granulados	22
3.5. Transporte de partículas utilizando simulação CFD	24
3.6. Domínio precursor.....	26
4. METODOLOGIA	28
4.1. Domínio computacional.....	28
4.2. Definições da simulação numérica.....	32
4.3. Malha computacional	34
4.4. Condições de contorno	36
4.5. Estimativa da taxa de emissão de material particulado	41
4.6. Injeção de partículas	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1. Escoamento ao redor da pilha de estocagem	49
5.1.1. Escoamento ao redor da pilha de estocagem orientada perpendicularmente à direção do vento	50
5.1.2. Escoamento ao redor da pilha de estocagem orientada a 60° em relação à direção do vento	72

5.1.3. Comparação entre valores de velocidade.....	94
5.2. Emissão e dispersão do material granulado.....	104
5.2.1. Emissão e dispersão de material granulado na pilha de estocagem orientada perpendicularmente à direção do vento.....	106
5.2.2. Emissão e dispersão de material granulado na pilha de estocagem orientada a 60° em relação à direção do vento	123
5.2.3. Comparação entre os casos	140
6. CONCLUSÃO	146
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

1. INTRODUÇÃO

O armazenamento de material granular em pilhas de estocagem localizadas em pátios abertos é uma prática comumente utilizada, sendo que essas pilhas são uma fonte significativa de poluentes atmosféricos, pois são afetadas por rajadas de vento. O vento causa a erosão da superfície da pilha, e leva as partículas transportadas pelo vento a poluírem as áreas próximas (TORNO et al., 2010). A esse processo é dado o nome de erosão eólica, que se refere ao desprendimento, transporte e deposição de sedimento pelo vento. A emissão de partículas das pilhas de estocagem não resulta apenas em problemas ambientais (e.g. degradação da qualidade do ar) e riscos para a saúde humana, mas também leva a uma perda de matéria-prima para as indústrias (CONG, 2011).

Para Zobeck e Van Pelt (2011), o desprendimento de partículas do leito ocorre quando o vento exerce forças de arrasto e sustentação para superar as forças gravitacionais e de coesão que mantêm as partículas na superfície. Esse desprendimento também ocorre quando partículas em rolamento ou salto causam a liberação de outras partículas devido ao impacto. A velocidade do vento na qual as partículas começam a se mover é chamada de velocidade de fricção limite, e após o vento exceder esse valor, as partículas se movem de três maneiras principais: rolamento, salto e suspensão.

De acordo com Toraño *et al.* (2007), diversos fatores influenciam a quantidade de poeira gerada, como direção e velocidade do vento, elevação da superfície exposta ao vento, parâmetros da partícula (diâmetro, densidade, formato, umidade etc.), presença de elementos não-erodíveis, e perturbação da superfície. 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).

Cong *et al.* (2012) analisaram a emissão de poeira em pilhas de formato cônico e de topo achatado empregando a simulação de fluidos computacional (CFD). Os autores verificaram que as alterações no arranjo espacial das pilhas, bem como em suas configurações, podem auxiliar na redução da emissão de materiais particulados.

Turpin e Harion (2009) avaliaram o escoamento sobre pilhas de topo plano, com variação da altura de truncamento da pilha e direção do vento incidente, integrando os resultados ao modelo USEPA de fatores de emissão para avaliar a taxa de emissão de partículas de cada configuração de pilha, e concluíram que a situação ideal, com o objetivo de reduzir a emissão de poeira, é uma pilha com crista afiada e situada perpendicularmente ao vento incidente.

A aplicação da simulação de fluidos computacional (CFD) visa avaliar o comportamento do escoamento, a dispersão, a deposição, e ressuspensão das partículas emitidas pelas fontes estudadas. Jiang *et al.* (2017) investigaram a estrutura do escoamento turbulento e padrão de transporte na região a sotavento de uma duna de areia, rastreando a trajetória de cada partícula, e concluindo que as dunas alteram significativamente a estrutura do escoamento turbulento e o movimento da areia levada pelo vento. Badr e Harion (2005) utilizaram simulações numéricas para descrever o escoamento sobre duas geometrias de pilhas com diferentes direções do vento, e compararam os resultados com estudos experimentais em túnel de vento.

A seção 13.2.5 do AP-42 *Compilation of Air Pollutant Emission Factors* apresenta a metodologia de cálculo de um fator de emissão de material particulado característico para a pilha de estocagem. Tal metodologia é amplamente utilizada na literatura, sendo referenciada por Toraño *et al.* (2007), Diego *et al.* (2009), Turpin e Harion (2010), Cong *et al.* (2012), e Novak *et al.* (2015).

A validação do escoamento ao redor de pilhas de estocagem e dispersão de partículas pode ser obtido através de experimentos em túnel de vento, como Cierco *et al.* (2008), Zhang, Wang e Lee (2007), e Furiéri *et al.* (2013).

O presente estudo tem por objetivo avaliar o fenômeno da erosão eólica em pilhas de estocagem através de simulação numérica computacional, incluindo os efeitos da turbulência por meio de modelo RANS, com dados de entrada de velocidade, energia cinética turbulenta e taxa de dissipação específica da energia turbulenta gerados em um domínio precursor com condições periódicas, utilizando modelo USEPA para a quantificação da emissão de partículas devido à erosão eólica em pilhas de estocagem, em conjunto com abordagem Euler-Lagrange para a modelagem da

movimentação das partículas no escoamento. As configurações testadas consistem em duas velocidades de escoamento (10,00, 6,08 m/s), dois ângulos de incidência do vento (90° e 60°), e dois materiais componentes das pilhas de estocagem (carvão e areia). Os resultados esperados visam auxiliar na compreensão dos mecanismos do escoamento ao redor da pilha de estocagem, bem como avaliar se a simulação numérica é capaz de recriar com fidelidade os fenômenos do escoamento atmosférico e erosão eólica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Investigar os mecanismos do escoamento atmosférico ao redor de uma pilha de estocagem e o transporte de material ressuspenso devido à erosão eólica em decorrência do vento incidente através de simulação numérica computacional em um domínio correspondente a um túnel de vento empregando modelo de turbulência RANS.

2.2. Objetivos Específicos

- Utilizar um domínio precursor com condição de contorno periódica para obter os dados de velocidade e turbulência que alimentarão a simulação principal;
- Realizar a simulação numérica do escoamento atmosférico ao redor da pilha de estocagem;
- Quantificar a emissão de material particulado a partir da modelagem da velocidade sobre a superfície da pilha de estocagem;
- Estudar o transporte do material particulado emitido a partir da pilha de estocagem;
- Avaliar a influência da velocidade do escoamento e do ângulo de incidência do vento no escoamento sobre a pilha e na dispersão de partículas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução à erosão eólica

Para Shao (2008), a erosão eólica é um processo de movimento de partículas do solo forçado pelo vento. Esse é um fenômeno complexo pois é afetado por diversos fatores que incluem condições atmosféricas (e.g. vento, precipitação e temperatura), propriedades do solo (e.g. textura, composição e agregação), características da superfície terrestre (e.g. topografia, umidade, vegetação) e uso do solo (agricultura, pastagem e mineração).

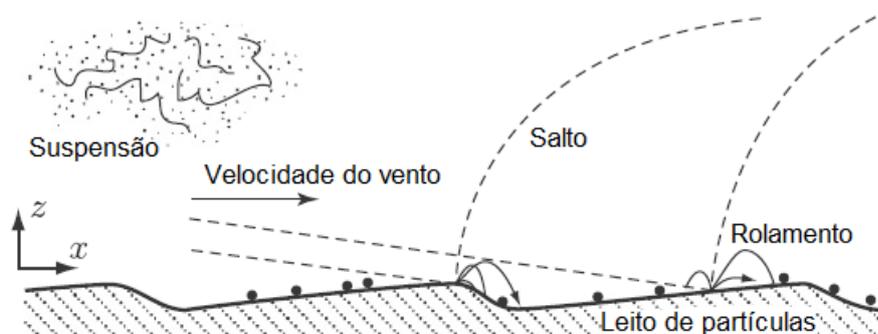
Seinfeld e Pandis (2006) classificam o material particulado proveniente da erosão eólica como partículas fugitivas, ou seja, aquelas que não são emitidas de um ponto definido. É possível classificar dentro desse espectro as emissões fugitivas de poeira industrial decorrentes da erosão eólica de pilhas de estocagem, vias não pavimentadas e tráfego de veículos sobre as vias.

O transporte eólico de particulado envolve a elevação do material da superfície terrestre, a dispersão atmosférica e a deposição de volta à superfície. O efeito combinado desses processos é significativo por uma ampla gama de razões, principalmente devido ao seu impacto ambiental, incluindo perda de matéria-prima, degradação da qualidade do ar e riscos à saúde humana. O transporte de partículas também gera um problema econômico (perda de material explorado) para indústrias. Todas essas razões motivam esforços para estudar o transporte eólico, principalmente em áreas industriais (BADR e HARION, 2005).

A erosão eólica é consequência de dois tipos de forças: as forças aerodinâmicas que tendem a remover partículas da superfície, e forças, como a gravidade e coesão interpartícula, que resistem a essa remoção. A primeira pode ser quantificada pela velocidade de fricção u^* , uma medida do cisalhamento do vento na superfície, e a última pela velocidade de fricção limite u_t^* , que define a mínima velocidade de fricção necessária para a ocorrência da erosão eólica. Enquanto u^* é relacionado às condições de escoamento da atmosfera e propriedades aerodinâmicas da superfície, u_t^* está relacionado a uma série de propriedades da superfície, como textura e umidade do solo e cobertura vegetal (SHAO, 2008).

Conforme descrito por Duran *et al.* (2011) e exposto na **Figura 3-1**, o transporte de partículas a partir de um leito é classificado seguindo a natureza das forças que atuam nos grãos. Quando forças hidrodinâmicas são dominantes, como para partículas finas, os grãos são transportados em suspensão. Quando as partículas são grandes o suficiente para que a gravidade também seja influente, os grãos experimentam saltos sucessivos e o modo de transporte é chamado de salto. Partículas maiores se movem de maneira que o contato com o leito é mantido, e gravidade, forças hidrodinâmicas e de contato são importantes. Finalmente, quando o salto é suficientemente forte, grãos do leito são ejetados pelo impacto dos grãos saltantes e se movem com um pequeno salto, e esse movimento é chamado de rolamento, modo que é então dominado pela gravidade e forças de contato.

Figura 3-1: Modos de transporte das partículas devido ao efeito da erosão eólica: (a) suspensão, (b) salto e (c) rolamento. Adaptado de Duran *et al.* (2011).

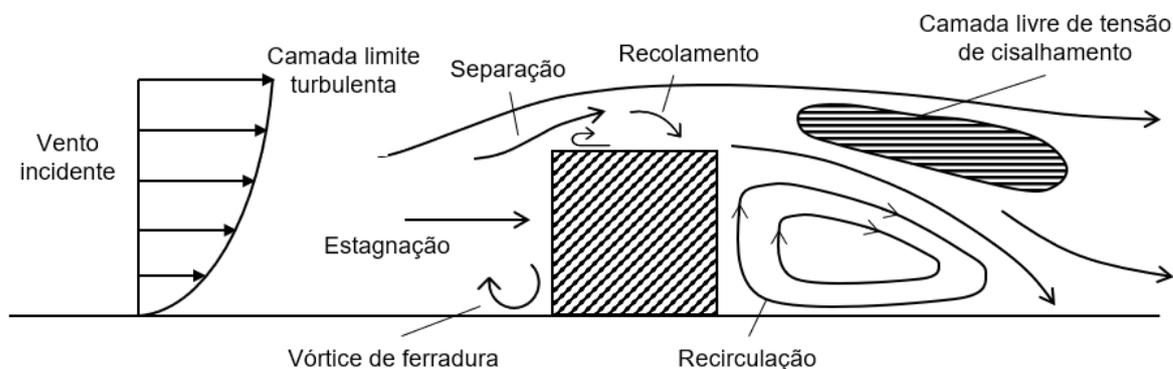


3.2. Escoamento ao redor de obstáculos

Para Murakami (1993), o campo de escoamento ao redor de um obstáculo localizado na camada limite é de grande complexidade, visto que é definido por estagnação, separação, recolamento, circulação, vórtice de Karman, etc., como pode ser visto na **Figura 3-2**. Tal estudo aplicou três modelos de turbulência (κ - ϵ , ASM e LES) ao escoamento ao redor de um corpo rombudo, e suas performances relativas foram examinadas. Em relação ao campo de velocidade média ao redor do corpo, as correspondências entre o experimento em túnel de vento e simulação dadas pelos três modelos de turbulência são boas, com pequenas diferenças em áreas como a reprodução da separação no canto frontal. Porém, várias discrepâncias foram

encontradas nos resultados das simulações ao comparar as distribuições de pressão e turbulência.

Figura 3-2: Representação esquemática do escoamento ao redor de um cubo.
Adaptado de Murakami (1993).



Conforme Santos *et al.* (2009), a presença de um obstáculo perturbando o escoamento atmosférico não apenas perturba o campo de vento médio, como também aumenta a turbulência nas proximidades, gerando uma grande quantidade de tensão de cisalhamento no escoamento.

Song *et al.* (2014) investigou as estruturas do escoamento atrás de cercas porosas utilizadas para abrigar pilhas de estocagem, de maneira a revelar as relações entre o efeito de proteção da cerca e a distribuição da tensão de cisalhamento em cada superfície da pilha, além de tentar fornecer a porosidade ideal da cerca baseado em uma compreensão mais profunda da distribuição da tensão de cisalhamento em cada superfície. Os resultados revelaram que a colocação da cerca porosa, em relação à pilha de estocagem, impactou a estrutura aerodinâmica do campo de escoamento próximo. Foi observada a formação de um campo de escoamento altamente turbulento devido a interação entre o escoamento que passa pelos orifícios da cerca e o escoamento que passa por cima das cercas. A porosidade da cerca teve um papel crucial na formação do campo de velocidades a sotavento, visto que, para porosidades menores, o escoamento não acelerou ao longo do barlavento da pilha, e, ao invés disso, houve a formação de uma zona de recirculação na região entre a cerca e a pilha.

Ferreira *et al.* (2019) investigou a erosão eólica em pilhas de estocagem formadas por partículas de areia erodíveis e não erodíveis utilizando experimentos em túnel de vento, com simulações numéricas utilizadas para fornecer informações sobre o escoamento, como a distribuição da tensão de cisalhamento. Foram avaliados casos com duas orientações de pilha em relação à direção do vento (60° e 90°) e três arranjos (uma pilha isolada e duas pilhas sucessivas separadas por intervalos de 0,9h e 1,8h). Para o arranjo perpendicular à direção do vento, foram observadas zonas altamente erodidas onde o escoamento incidente acelerou na crista e nas laterais da pilha, e zonas de menor erosão a sotavento da pilha, após uma região de separação do escoamento. Para o arranjo orientado a 60° em relação à direção do vento, a erosão foi mais forte devido aos maiores valores de tensão de cisalhamento e os efeitos do vórtice na parede a sotavento da pilha.

3.3. Simulação numérica de escoamentos utilizando modelos de turbulência RANS

Enquanto a turbulência é, a princípio, descrita pelas equações de Navier-Stokes, não é viável na maioria das situações resolver a ampla gama de escalas de tempo e espaço através da Simulação Numérica Direta (DNS), uma vez que os requisitos de CPU excedem o poder computacional disponível em um futuro próximo. Por essa razão, os procedimentos de cálculo de médias devem ser aplicados às equações de Navier-Stokes para filtrar todo, ou pelo menos parte, do espectro turbulento. O procedimento de média mais aplicado é a média de Reynolds das equações, resultando nas equações Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS). Por esse processo, todas as estruturas turbulentas são eliminadas do escoamento e uma variação suave dos campos médios de velocidade e pressão pode ser obtida (ANSYS, 2013b).

Ntinis *et al.* (2018) testaram a acurácia dos modelos de turbulência Standard κ - ϵ , Realizable κ - ϵ , RNG κ - ϵ , Standard κ - ω , SST κ - ω e RSM em três tipos de teto de edifício agrícola: tipo arco, tipo inclinado e tipo plano. A simulação foi comparada com resultados de experimentos em túnel de vento. No estudo, os valores experimentais de velocidade e energia cinética turbulenta foram quantificados e comparados com os resultados das simulações realizadas com os diferentes modelos de turbulência. Foi

encontrada uma concordância razoável entre os resultados experimentais e as simulações em relação à velocidade e energia cinética turbulenta, com os modelos CFD subestimando ligeiramente essas magnitudes. As semelhanças foram melhores à montante de cada edifício, enquanto as discrepâncias foram observadas sobre a jusante e sobre o telhado. Em relação ao telhado em arco, o modelo RSM teve melhor resultado na predição da velocidade e o SST κ - ω teve melhor resultado na energia cinética turbulenta. No caso do telhado inclinado, todos os modelos tiveram acurácia semelhante no campo de velocidade, mas a energia cinética turbulenta variou consideravelmente entre eles, com o modelo SST κ - ω obtendo a melhor performance. Para o telhado plano, os modelos Standard κ - ϵ , Realizable κ - ϵ , RNG κ - ϵ tiveram melhores resultados para velocidade, mas o SST κ - ω teve melhor performance para energia cinética turbulenta. No geral, os resultados mostraram que o modelo SST κ - ω foi o modelo mais adequado para a predição de energia cinética turbulenta, enquanto os modelos Realizable κ - ϵ e RNG κ - ϵ foram mais adequados no caso da velocidade. Por fim, existiu um alto erro de previsão na região após o telhado dos edifícios, que em algumas zonas era mais alto do que os valores médios, levando a uma forte imprecisão dos modelos de turbulência na simulação da velocidade e energia cinética turbulenta.

Ben Ramoul *et al.* (2019) investigou as características do escoamento e dispersão de poluentes ao redor de edifícios utilizando três modelos de turbulência RANS (Standard κ - ϵ , Realizable κ - ϵ , e RNG κ - ϵ). Duas configurações físicas são consideradas no estudo: um único obstáculo isolado e dois obstáculos formando um cânion urbano. Quando os resultados da simulação numérica foram comparados com experimentos em túnel de vento, notou-se que o modelo de turbulência RNG κ - ϵ obteve a melhor concordância com os dados experimentais. Além disso, foi descoberto que o modelo RNG κ - ϵ com coeficientes $C_{\epsilon_1}=1,3$ e $C_{\mu}=0,09$ oferece o melhor acordo entre os resultados quantitativos e qualitativos quando comparado às análises experimentais.

Ferreira *et al.* (2020) realizaram experimentos em túnel de vento e simulação numérica com modelo de turbulência SST κ - ω para avaliar o comportamento físico do escoamento ao interagir com uma pilha de estocagem, e quantificar a emissão de uma pilha de estocagem na presença de um edifício cúbico isolado. As simulações numéricas foram realizadas para fornecer a distribuição da tensão de cisalhamento

na superfície da pilha e a trajetória do escoamento, que podem estar associadas aos padrões de erosão observados nos experimentos e até mesmo serem utilizadas como dados de entrada para modelos matemáticos de emissão.

Schulz *et al.* (2020) utilizou o modelo de turbulência κ - ω SST para avaliar a influência do volume, da velocidade do gás, do ângulo de repouso, da altura de corte do topo (altura de truncamento) de uma pilha cônica e do diâmetro da partícula por meio de CFD e método de elemento discreto (DEM). Os autores não verificaram alteração significativa na emissão de partículas quando o volume da pilha cônica foi alterado. Com relação à velocidade do gás, fluido em escoamento, os resultados indicaram uma relação linear entre a velocidade do mesmo e as taxas emitidas. Com relação à altura de truncamento da pilha cônica, o estudo demonstrou que quanto menor a altura de truncamento em relação à altura da pilha cônica, menor a taxa de emissão. Quanto ao ângulo de repouso, uma relação positiva entre o aumento do ângulo com o aumento da emissão foi encontrada, e concluiu-se que com a elevação do ângulo de repouso, ocorre o aumento da velocidade de atrito na parte superior da superfície da pilha, e, portanto, ocasiona uma maior emissão de poeira. Por sua vez, diâmetros menores de partículas ocasionaram maior força de interação entre elas, levando a menor emissão.

3.4. Estimativa da taxa de emissão de material particulado devido à erosão eólica de estocagem de materiais granulados

Uma quantidade significativa de poeira surge da perturbação mecânica de material granulado exposto ao ar. A poeira gerada a partir dessas fontes abertas é denominada “fugitiva” pois não é lançada na atmosfera em um fluxo confinado. Fontes comuns de poeira fugitiva incluem vias não pavimentadas, operações agrícolas, pilhas de estocagem e operações de construção (USEPA, 1995).

Cong *et al.* (2012) avaliou o efeito de parâmetros morfológicos na emissão de poeira em um pátio de estocagem real e de geometria complexa. Para isso, utilizou simulação numérica para prever os padrões de escoamento ao redor das pilhas presentes no pátio, e, de posse da velocidade do vento obtida através da simulação, empregou o modelo proposto por USEPA (2006) para quantificar a emissão de poeira devido à

erosão eólica das pilhas de estocagem. O estudo concluiu que a existência de um arranjo de pilhas em um pátio resulta em uma menor emissão de poeira por pilha, quando comparada a emissão resultante da erosão eólica em uma pilha isolada. No entanto, o aumento do espaçamento entre pilhas leva a um aumento da emissão. Por fim, observou-se que as pilhas de topo achatado emitem menos poeira devido à erosão eólica quando comparadas com pilhas cônicas.

Novak et al. (2015) aliou a dinâmica de fluidos computacional, utilizada para calcular o campo de velocidades ao redor de pilhas sob a proteção de barreiras de vento, com o modelo USEPA para o cálculo da emissão de poeira em pilhas de estocagem. O estudo concluiu que uma medida eficiente de redução da velocidade do vento sobre as pilhas é a colocação de barreiras porosas entre as pilhas, orientadas transversalmente às direções principais do vento. No entanto, tais barreiras, se colocadas em pátios de estocagem reais, podem impor limitações significativas para o maquinário de empilhamento e recuperação. A irrigação e a pulverização com líquidos formadores de crosta continuam a ser uma etapa necessária para a prevenção da erosão eólica e das emissões fugitivas. No entanto, os mapas de velocidades dos ventos criados pelas simulações numéricas permitem a identificação de pontos críticos para ocorrência de emissão de poeira e, desta forma, auxiliam na otimização da pulverização e redução dos custos associados.

Petit, Cavalcanti e Tavares (2021) observaram que pelotas de minério de ferro sofrem degradação durante o processo de movimentação devido a impactos de baixa energia, e esse processo leva à quebra das pelotas, criando partículas finas que acumulam ao longo do processo. A emissão de poeira se torna crítica em locais específicos, como chutes de transferência e pilhas de estocagem. Foi realizada a modelagem da geração de poeira que ocorre na estocagem de pelotas de minério de ferro utilizando uma metodologia que combina análise experimental para quantificar a degradação das pelotas e modelagem matemática dos mecanismos de emissão de poeira no pátio de estocagem. Primeiramente, foram realizados testes laboratoriais para caracterizar a quantidade e distribuição de tamanho dos finos que resultam da degradação das pelotas. Após isso o escoamento sobre a pilha de estocagem foi simulado com o auxílio de modelagem CFD com o software Fluent, empregando modelo de turbulência Standard κ - ϵ . Por fim, utilizaram equações baseadas nas

metodologias USEPA para quantificar o valor da velocidade de fricção do vento sobre a pilha, para o cálculo da emissão de particulado durante a formação da pilha e emissão de particulado proveniente da erosão eólica. Foi verificado que a metodologia utilizada no estudo é particularmente sensível à umidade do material, sendo necessário utilizar a umidade como parâmetro de ajuste aos dados experimentais, e, dessa maneira, foi obtida uma boa correlação entre os dados estimados e os dados medidos.

Duan *et al.* (2021) analisaram as características da dispersão de partículas ao redor de uma pilha de carbonato de sódio sob a ação de um vento unidirecional através de testes em túnel de vento e simulação numérica. O campo de escoamento foi analisado em experimento em túnel de vento sob diferentes velocidades, e então utilizado para validar o modelo numérico. Após a validação da simulação, a metodologia USEPA foi utilizada para quantificar a emissão de material proveniente da erosão eólica da pilha, e esse valor foi utilizado como dado de entrada para a simulação numérica da dispersão das partículas. Os resultados mostraram uma alta concentração de poeira na região após a pilha, e a distância da dispersão do material pode aumentar com o aumento da velocidade do vento. O aumento do diâmetro da partícula aumenta a perda de energia cinética das partículas no fluido e, para a mesma velocidade inicial, diminui a distância de dispersão.

3.5. Transporte de partículas utilizando simulação CFD

Conforme ANSYS (2013a), avanços na mecânica dos fluidos computacional forneceram a base para uma visão mais aprofundada da dinâmica dos escoamentos multifásicos. O modelo Lagrangeano de fase discreta segue a abordagem de Euler-Lagrange, na qual a fase fluida é tratada como um meio contínuo através da resolução das equações de Navier-Stokes, enquanto a fase dispersa é solucionada através do rastreamento um grande número de partículas, bolhas ou gotículas através do campo de escoamento calculado.

Stovern *et al.* (2014) utilizou um software CFD, ANSYS Fluent, para investigar o transporte eólico e taxa de deposição dos aerossóis emitidos dos rejeitos da mina Iron King para as regiões circundantes. A simulação do escoamento utilizou o modelo de turbulência standard κ - ϵ , e a trajetória individual das partículas foi simulada a partir de

um modelo Lagrangeano de fase discreta. Foi observado que a maioria das partículas injetadas na simulação apresentaram a tendência de se depositar muito perto da região de rejeito, devido a estruturas de vento que surgem do fato da região de rejeito ter uma posição elevada em relação à zona circundante. Algumas partículas foram transportadas por uma distância maior, e menos de 5% escaparam do domínio de simulação.

Rani, Aziz e Gimbin (2015) modelaram a distribuição de partículas em um silo durante seu preenchimento, de maneira a avaliar a probabilidade de uma explosão de poeira. O estudo utilizou o modelo de turbulência RNG κ - ϵ para o escoamento, e um modelo Lagrangeano de fase discreta para a simulação da dispersão das partículas. A concentração de partículas foi quantificada em 5 posições diferentes dentro do silo e, ao comparar os dados experimentais com os dados simulados, notou-se uma boa correlação. Os resultados da simulação mostraram a maior concentração de partículas foi encontrada na região central do silo, e tende a diminuir conforme se aproxima da parede, e a concentração média em todas as regiões do silo excede o limite mínimo para explosão. Portanto, é provável que ocorra uma explosão de poeira se fontes de ignição suficientes estiverem presentes simultaneamente.

He *et al.* (2018) avaliaram o escoamento atmosférico e a dispersão de partículas ao redor de uma duna de areia levando em consideração a existência de uma ponte construída dentro da região de fluxo reverso. O objetivo do estudo foi investigar a estrutura do escoamento, transporte e deposição de areia sobre a encosta a sotavento da duna quando se constrói uma ponte no interior da região de fluxo reverso. O modelo de turbulência standard κ - ϵ foi aplicado para a modelagem do escoamento, e o movimento das partículas foi calculado com o modelo de fase discreta. Os resultados mostraram que, comparado com o caso da duna isolada, a inserção de uma ponte alta a sotavento da duna leva a um aumento na deposição de partículas nessa região e uma região de fluxo reverso mais longa, enquanto a inserção de uma ponte baixa apresenta pouco efeito na deposição de areia e na região de fluxo reverso.

3.6. Domínio precursor

É possível obter as condições de contorno da seção de entrada de uma simulação numérica através do método da simulação precursora, que consiste em obter os perfis de entrada das variáveis de interesse a partir de simulações numéricas preliminares em um domínio precursor no qual uma condição periódica é aplicada como condição de contorno nas seções de entrada e saída, de maneira a produzir um escoamento completamente desenvolvido, e tal escoamento é utilizado como condição de entrada para a simulação em análise, também chamada de simulação sucessora.

De acordo com Tabor e Baba-Ahmedi (2010), o método da simulação precursora envolve a execução de um cálculo separado, precursor, de um escoamento para gerar uma “biblioteca” de dados de turbulência que podem ser introduzidos na simulação principal como os dados de entrada. Esse método tem como vantagem o fato de que as condições de entrada da simulação principal são retiradas de uma simulação genuína de turbulência e, portanto, possuem muitas das características necessárias, incluindo flutuações temporais e espaciais. Os dados da simulação precursora são gerados utilizando condição de contorno periódica, onde o campo de velocidades em um plano normal à direção do fluxo é armazenado em cada *time step*, e a sequência de planos é então lida como dado de entrada para um novo cálculo do escoamento.

Blocken *et al.* (2007) definem o termo “camada limite atmosférica horizontalmente homogênea” como a ausência de gradientes no sentido do escoamento nos perfis verticais de velocidade média do vento e de turbulência. Ou seja, uma camada limite atmosférica horizontalmente homogênea terá esses perfis mantidos na distância ao longo do escoamento. Franke *et al.* (2007), ao lidar com escoamentos no ambiente urbano, expõe que, no caso de uma camada limite horizontalmente homogênea, os perfis de velocidade média e de turbulência não devem sofrer alterações ao longo do domínio até que seja encontrado um obstáculo (como uma edificação), e um método para gerar perfis de entrada que não mudarão dentro do domínio computacional é primeiro realizar a simulação em um domínio vazio com a mesma grade e condição de contorno periódica para obter perfis constantes.

Conforme ANSYS (2013a), escoamentos periódicos ocorrem quando a geometria de interesse e o padrão esperado da solução do escoamento tem uma natureza de repetição periódica. Quando se admite a queda de pressão entre os limites periódicos, têm-se como resultado um escoamento completamente desenvolvido, também chamado de escoamento periódico no sentido da corrente. Em tais configurações de escoamento, a geometria varia de uma maneira repetitiva ao longo da direção do escoamento, levando a um regime de escoamento periódico completamente desenvolvido no qual o padrão do escoamento se repete em ciclos sucessivos. Exemplos de escoamentos periódicos no sentido da corrente incluem escoamentos em tubulações e dutos. Essas condições periódicas existem quando o padrão de escoamento se repete ao longo de um comprimento L , com uma queda de pressão constante em cada módulo de repetição ao longo da direção da corrente.

Vasaturo *et al.* (2018) realizou uma simulação da camada limite atmosférica neutra com modelo LES utilizando três métodos de geração de dados de entrada: um método precursor com condição de contorno periódica, e dois métodos sintéticos: o *Vortex Method* e método RFG. O desempenho de cada método é avaliado para três alturas de rugosidade, correspondentes a terrenos rurais, suburbanos e urbanos. Os resultados mostram que o método precursor é o que melhor preserva a homogeneidade do escoamento na direção da corrente para todas as alturas de rugosidade consideradas, com desvios absolutos médios de até 0,7 % para velocidade média e 3,5 % para energia cinética turbulenta na saída do domínio computacional.

4. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada no presente trabalho para a realização da simulação numérica do fenômeno da erosão eólica em pilhas de estocagem. São apresentados o domínio computacional, as definições da simulação numérica, a malha computacional aplicada ao domínio, as condições de contorno, o cálculo da taxa de emissão de partículas, e metodologia para a injeção de partículas na pilha.

4.1. Domínio computacional

O domínio fluido de modelagem é baseado em um túnel de vento de dimensões 2 m de comprimento, 0,55 m de largura e 0,54 m de altura, cuja estrutura real é vista na **Figura 4-1**, dentro do qual é inserida uma pilha de estocagem em escala 1:200.

Um parâmetro que deve ser considerado no momento da determinação das dimensões da pilha de estocagem a ser inserida no túnel de vento é o *blockage ratio*, definido por Badr e Harion (2005) como a relação entre a área frontal projetada do objeto colocado no túnel de vento e a área da seção de teste. Para Barlow, Rae e Pope (1999), a proporção da área frontal do artigo de teste para a área de fluxo transversal é efetivamente zero na maioria das operações reais, enquanto para testes em túnel de vento, onde essa proporção reflete o tamanho relativo do artigo de teste em relação à seção de teste, é geralmente escolhido o intervalo de 1% – 10%, com 5% sendo o valor típico. Um efeito dessa relação ser finita é que as tensões superficiais são maiores do que para a condição de ar livre correspondente no caso de uma seção de teste fechada.

As dimensões da pilha de estocagem e sua localização no interior do túnel de vento seguiu a proposta de literatura de Ferreira *et al.* (2019), com modificações feitas de maneira a alcançar um *blockage ratio* menor ou igual ao valor típico. Frente ao exposto, as **Figuras 4-2 e 4-3** apresentam o túnel de vento e a pilha de estocagem (de carvão e areia, respectivamente) utilizados na simulação, com valor de *blockage ratio* igual a 3,96 % para a pilha composta por carvão, e 3,83 % para a pilha composta por areia, ambos de acordo com o valor <5,00 % recomendado por literatura. Assim,

é garantida a independência aerodinâmica do escoamento sobre a pilha testada em relação ao efeito das paredes do domínio (TURPIN & HARION, 2009).

Figura 4-1: Túnel de vento representado pela geometria no *software* Fluent.



Figura 4-2: Vistas do túnel de vento e pilha de estocagem com altura $h = 0,05$ m para pilha de estocagem de carvão. a) Vista frontal do túnel de vento; b) Vista lateral do túnel de vento; c) Detalhe da pilha de estocagem; d) Dimensões da pilha de estocagem a 90° ; e) Dimensões da pilha de estocagem a 60° .

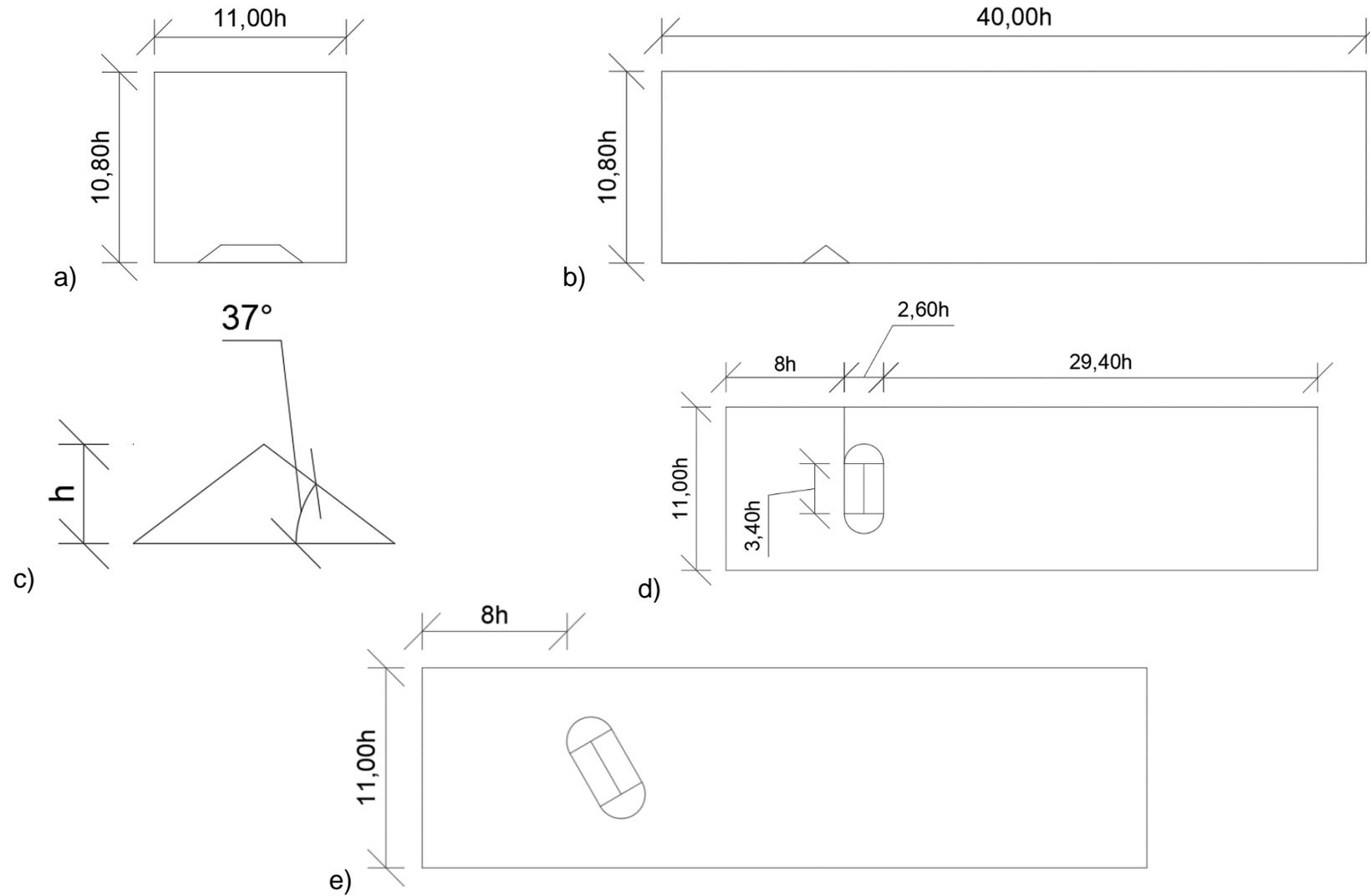
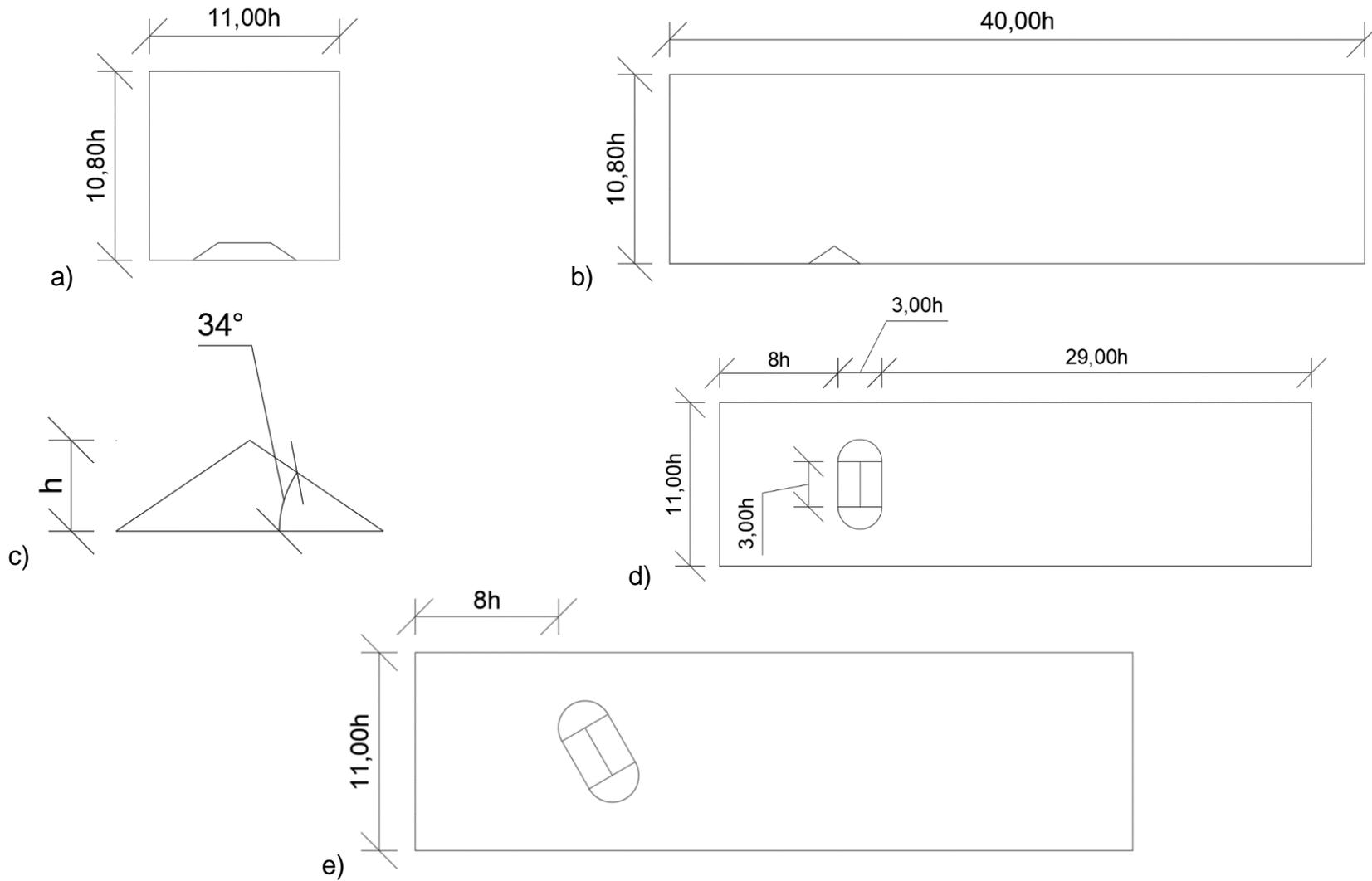


Figura 4-3: Vistas do túnel de vento e pilha de estocagem com altura $h = 0,05$ m para pilha de estocagem de areia. a) Vista frontal do túnel de vento; b) Vista lateral do túnel de vento; c) Detalhe da pilha de estocagem; d) Dimensões da pilha de estocagem a 90° ; e) Dimensões da pilha de estocagem a 60° .



4.2. Definições da simulação numérica

A fim de solucionar numericamente as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, **Equações 1 e 2** (MOUKALLED *et al.*, 2016), respectivamente, foi empregado o *software* comercial Ansys Fluent 19.1. A geometria e a malha computacional foram construídas no Workbench 19.1, e ambas foram exportadas para uso no Fluent.

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ 2\mu \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho\overline{u'_i u'_j} \right\} + \rho g_i \quad (2)$$

Onde,

ρ = massa específica (kg/m³);

\bar{u}_i = velocidade média de cada componente (m/s);

\bar{p} = pressão média (Pa);

μ = viscosidade dinâmica (Pa*s);

g_i = aceleração da gravidade (m/s²).

O termo da **Equação 1** expressa a não deformação do fluido. Por sua vez, os termos da **Equação 2**, da esquerda para a direita, representam, sequencialmente, a variação da quantidade de movimento no tempo (termo transiente), o transporte da quantidade de movimento em função do escoamento (termo advectivo), o termo de geração de quantidade de movimento devido à pressão, os termos difusivos e as forças de corpo, que também seria termo fonte.

Os modelos de turbulência RANS oferecem a abordagem mais econômica para computar escoamentos industriais turbulentos complexos. Esses modelos simplificam o problema com a solução de duas equações de transporte adicionais, e introduzem a viscosidade turbulenta para computar as tensões de Reynolds (ANSYS, 2013b). O modelo RANS de turbulência utilizado foi o κ - ω SST, visto que esse modelo foi utilizado em trabalhos com geometrias similares, apresentando bons resultados

(BADR e HARION (2007), TURPIN e HARION (2009), FURIERI *et al.* (2012), FERREIRA *et al.* (2019)).

Conforme ANSYS (2013a), o modelo κ - ω SST foi desenvolvido por Menter (1994) para combinar efetivamente a formulação robusta e precisa do modelo κ - ω na região próxima à parede com a independência do escoamento livre do modelo κ - ϵ .

A energia cinética turbulenta (κ) e a taxa de dissipação específica (ω) são obtidas através das **Equações 3 e 4**, respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

Nessas equações, o termo G_k representa a produção de energia cinética turbulenta devido ao gradiente de velocidade médio. G_ω representa a geração de ω . Γ_k e Γ_ω representam a difusão de k e ω , respectivamente. Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω devido a turbulência. D_ω representa o termo de difusão cruzado. S_k e S_ω são termos fonte (ANSYS, 2013a).

As equações mencionadas foram resolvidas no domínio computacional aplicando o método dos volumes finitos. Tal método consiste na integração das equações diferenciais parciais e sua transformação em equações aplicadas em um elemento, o que compreende a mudança de integrais de superfície e de volume em relações algébricas discretas ao longo dos elementos e suas faces. Na sequência, perfis de interpolação são escolhidos para aproximar a variação das variáveis dentro do elemento com os valores das suas faces e então transformar as relações algébricas em equações (MOUKALLED *et al.*, 2016).

O acoplamento pressão-velocidade foi resolvido com o SIMPLEC, conforme aplicado por Badr e Harion (2005). Devido ao forte acoplamento entre a velocidade e pressão na equação de Navier-Stokes, se faz necessário a adoção de um algoritmo que, por

meio de iterações, soluciona o campo de pressão e de velocidade, de maneira a garantir a conservação da massa e da quantidade de movimento (MOUKALLED *et al.*, 2016).

O cálculo dos gradientes das variáveis analisadas foi realizado conforme o método *Green-Gauss Cell Based*, onde, conforme ANSYS (2013a), o valor da face é retirado da média aritmética dos valores nos centros das células vizinhas.

Além disso, os esquemas de discretização de segunda ordem foram utilizados para a solução numérica. Para os termos de pressão, empregou-se a segunda ordem. Já os esquemas de segunda ordem *upwind* foram utilizados para solucionar o momentum, energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta. O esquema de segunda ordem para pressão refaz a pressão na face usando um esquema de diferença centrada. Já os esquemas de segunda ordem *upwind* determinam os valores nas faces dos elementos usando uma abordagem multidimensional. Neste esquema, a alta precisão é alcançada nas faces através da expansão da série de Taylor de solução centrada sobre o centroide do elemento (ANSYS, 2013a).

Os resíduos aceitos foram de cerca de 10^{-4} para a continuidade e de 10^{-6} para as demais variáveis.

4.3. Malha computacional

A malha computacional construída foi do tipo não estruturada, conforme proposto por Kim e Boysan (1999), visto que esse tipo de malha permite uma economia de tempo durante a modelagem de geometrias e escoamentos complexos. O refinamento da malha é necessário para a melhor representação dos gradientes das propriedades físicas, especialmente nas regiões de parede e do obstáculo presente nos casos contemplados neste estudo. O refinamento da grade é o principal mecanismo para a melhoria da precisão dos resultados (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007). Portanto, além dos elementos tetraédricos componentes da malha não-estruturada, foi criado um refinamento da malha composto por *inflation layers* de elementos prismáticos retangulares ao longo das paredes do domínio. O refinamento com

inflation layers cria elementos capazes de capturar os gradientes das propriedades físicas normais às paredes com maior acurácia. A altura do primeiro elemento foi obtida conforme **Equação 5**, considerando $y^+ < 5$, $u^* = 1$ m/s, e $\nu = 1,46E-05$ m²/s.

$$y^+ = \frac{yu^*}{\nu} \quad (5)$$

Onde,

y = Altura do centroide do primeiro elemento (m);

u^* = Velocidade de fricção (m/s);

ν = Viscosidade cinemática do ar (m²/s).

Além do refinamento com elementos prismáticos, é realizado um refinamento dos elementos tetraédricos ao longo das paredes que representam o chão do túnel de vento e a pilha.

As **Figuras 4-4** e **4-5** exibem a malha computacional empregada nas simulações computacionais, com elementos dos tipos tetraédricos e prismáticos retangulares. As referidas figuras também destacam o detalhamento da malha computacional para ilustrar o refinamento

Figura 4-4: Malha computacional.

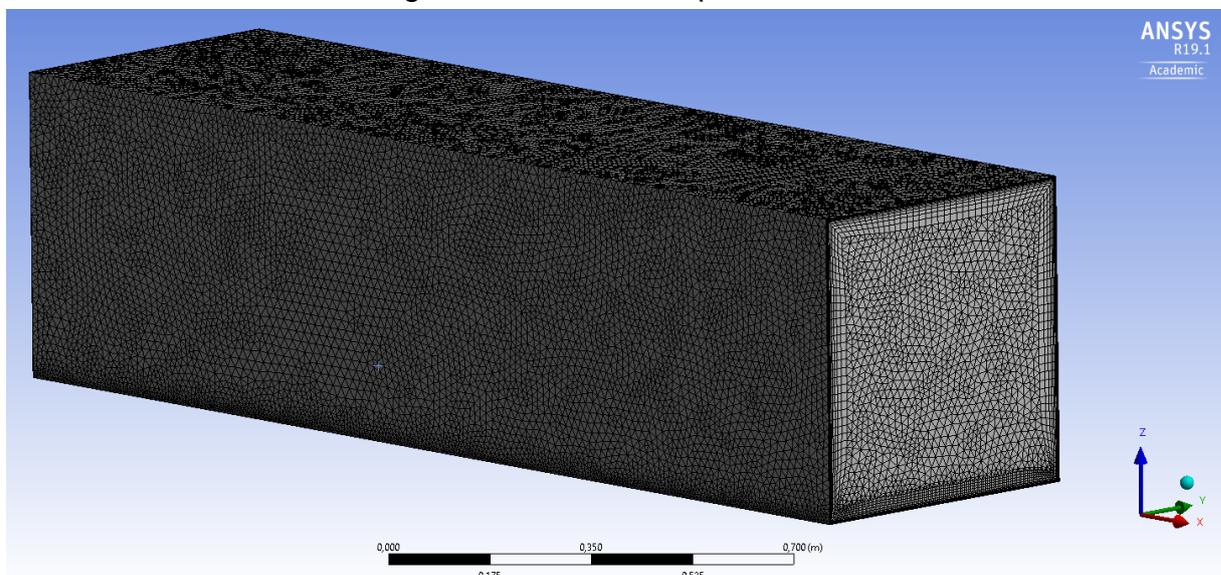
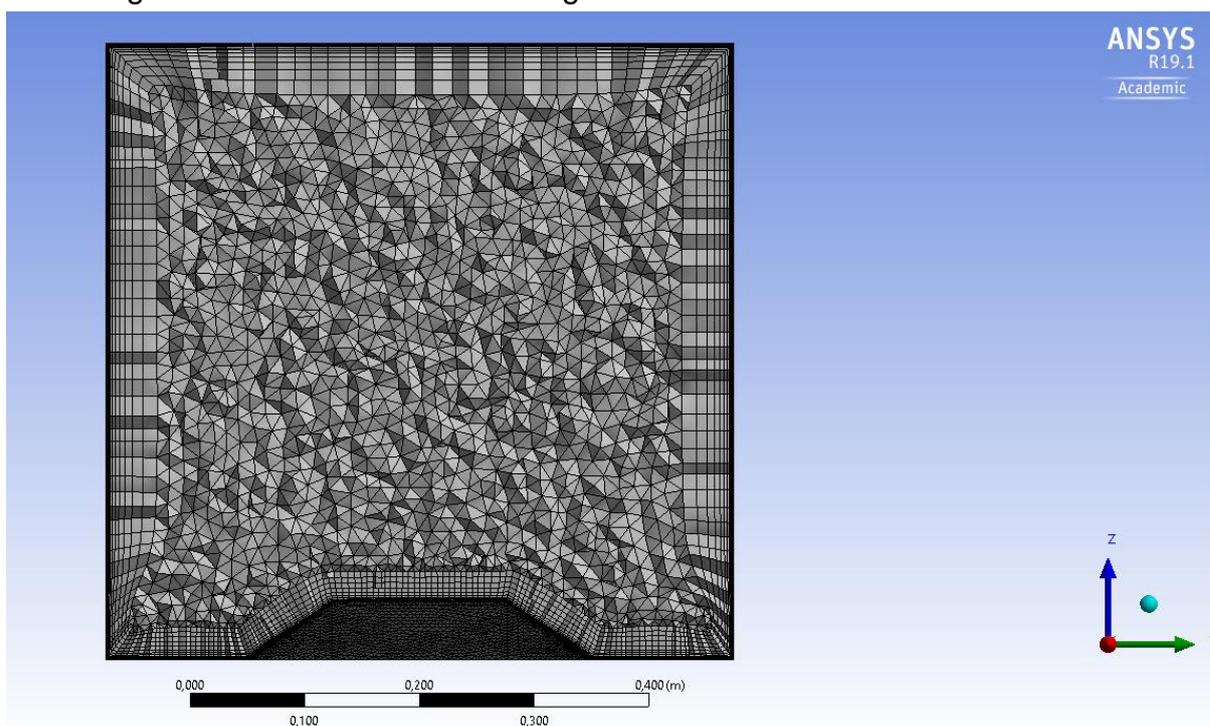


Figura 4-5: Corte transversal da geometria com detalhamento da malha.



A **Tabela 4-1** apresenta a quantificação dos nós e elementos de malha para cada configuração testada.

Tabela 4-1: Número de nós e elementos de malha para cada configuração de pilha de estocagem.

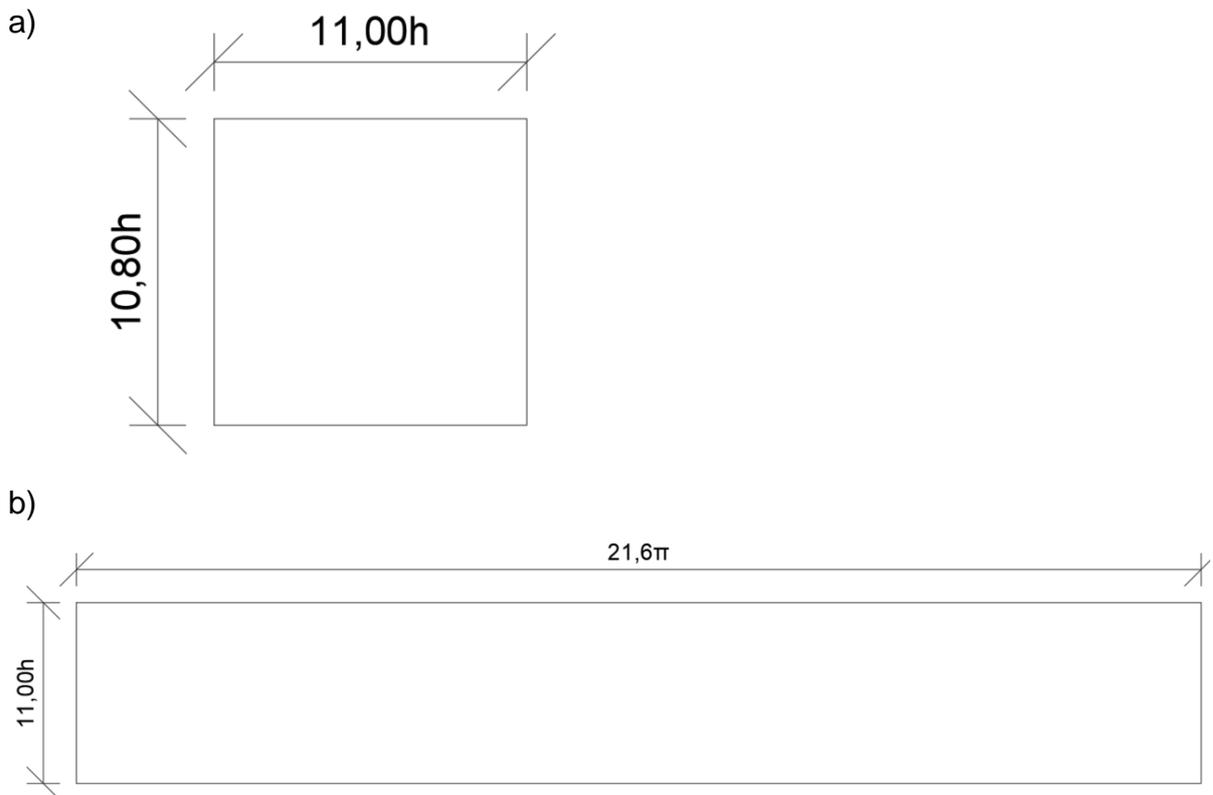
Material	Orientação em relação ao vento incidente	Nós	Elementos
Areia	90°	1.198.706	3.228.463
	60°	1.201.981	3.236.938
Carvão	90°	1.205.075	3.243.695
	60°	1.204.090	3.240.227

4.4. Condições de contorno

As condições de contorno da seção de entrada para velocidade, energia cinética turbulenta (κ) e taxa de dissipação específica (ω) foram obtidas a partir de simulações numéricas preliminares em um domínio precursor. Para tal domínio precursor, foi aplicada uma condição de contorno periódica nas seções de entrada e saída, de maneira a produzir um escoamento completamente desenvolvido, e esse escoamento foi utilizado como condição de entrada para a simulação analisada nesse estudo.

Nessa simulação precursora, foi imposta uma taxa de massa correspondente à velocidade do escoamento livre. A **Figura 4-6** apresenta as dimensões do domínio precursor utilizado, e observa-se que a seção transversal do domínio precursor coincide com a seção transversal da simulação principal

Figura 4-6: Vistas do domínio precursor, considerando $h = 0,05$ m. a) Vista frontal do domínio precursor; b) Vista superior do domínio precursor.



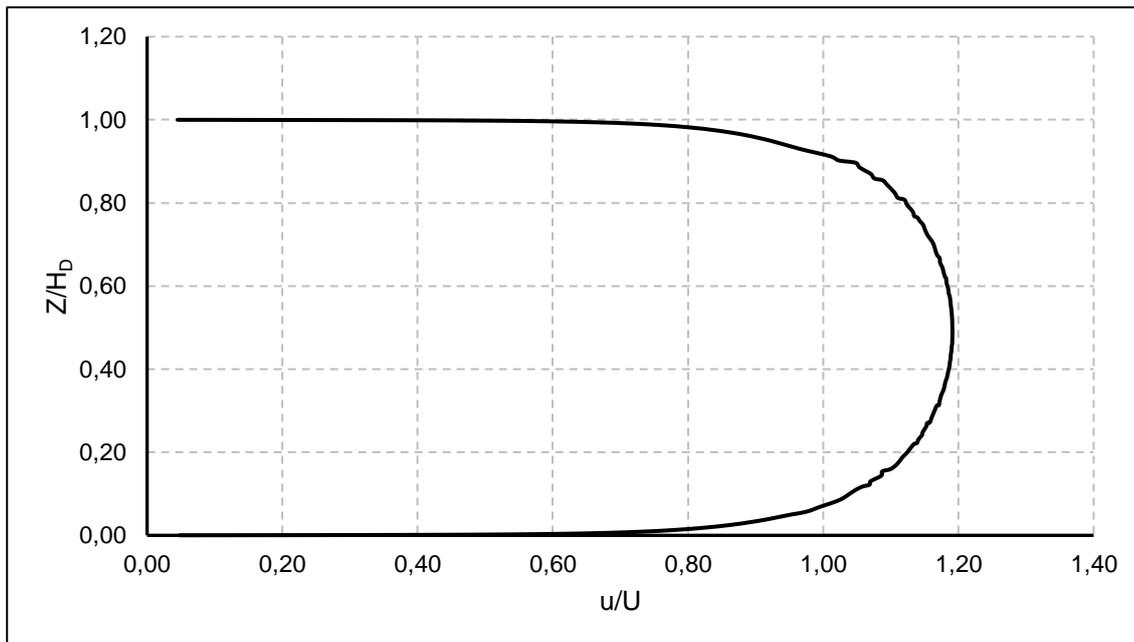
Visto que a geometria representa a seção de teste do túnel de vento apresentado na **Figura 4-1**, condições de não-deslizamento foram aplicadas sobre a pilha, paredes laterais, superior e inferior. A condição de não-deslizamento é a *default*, e indica que o fluido adere à parede e se move com a mesma velocidade, se ela estiver se movendo (ANSYS, 2013b). No caso simulado, as paredes são imóveis, portanto a velocidade do escoamento nas paredes onde a condição de não deslizamento foi aplicada é nula. Na seção de saída, a condição *outflow* foi considerada, visto que tal condição é utilizada para modelar a saída de escoamentos onde os detalhes de velocidade e pressão não são conhecidos antes da solução do problema, e apropriada para o caso de um escoamento completamente desenvolvido.

A **Figura 4-7** ilustra os perfis verticais de entrada adimensionalizados para a velocidade na direção x , energia cinética turbulenta e taxa de dissipação específica dessa energia.

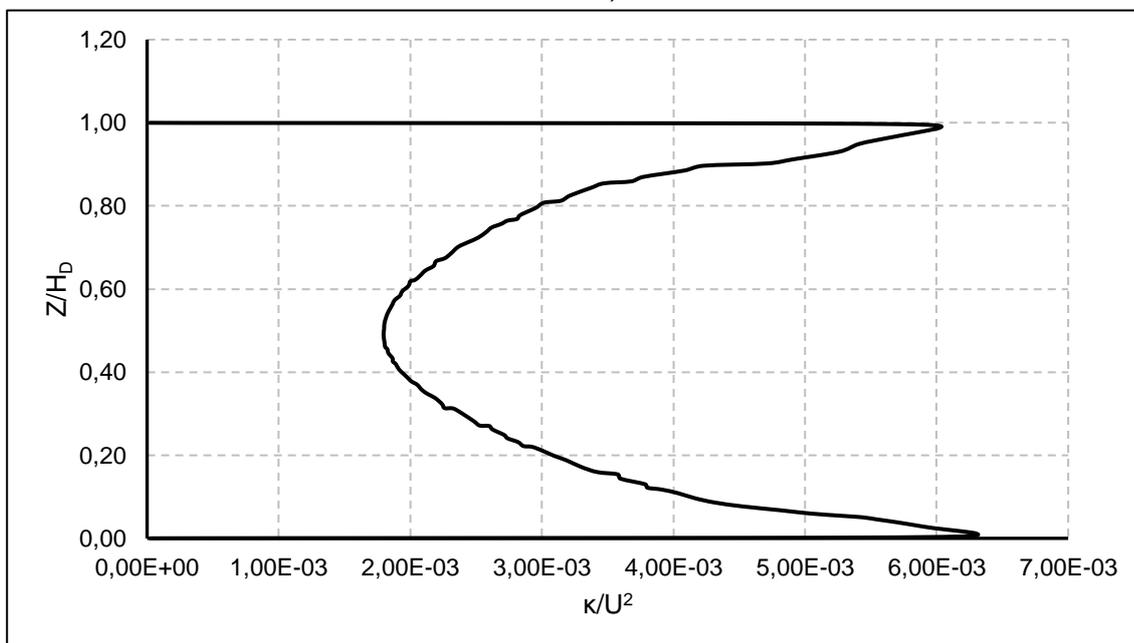
A adimensionalização da altura foi realizada através da divisão entre a altura em relação à parede (Z) e a altura do domínio (H_D). No caso da velocidade, essa foi adimensionalizada pela relação entre a velocidade na direção x (u) e a velocidade do escoamento livre (U). Para a energia cinética turbulenta, a adimensionalização foi realizada através da divisão entre κ e U^2 . A adimensionalização da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ϵ) foi determinada pela relação entre ϵ e U^3/l , sendo l o comprimento de mistura definido como $0,07L$, onde L é o comprimento característico da seção de entrada do túnel de vento. Por fim, a adimensionalização da taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta foi alcançada através da divisão entre ω e U/l .

Figura 4-7: Perfis de entrada adimensionalizados para (a) Velocidade na direção x; (b) Energia cinética turbulenta; (c) Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta; (d) Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta.

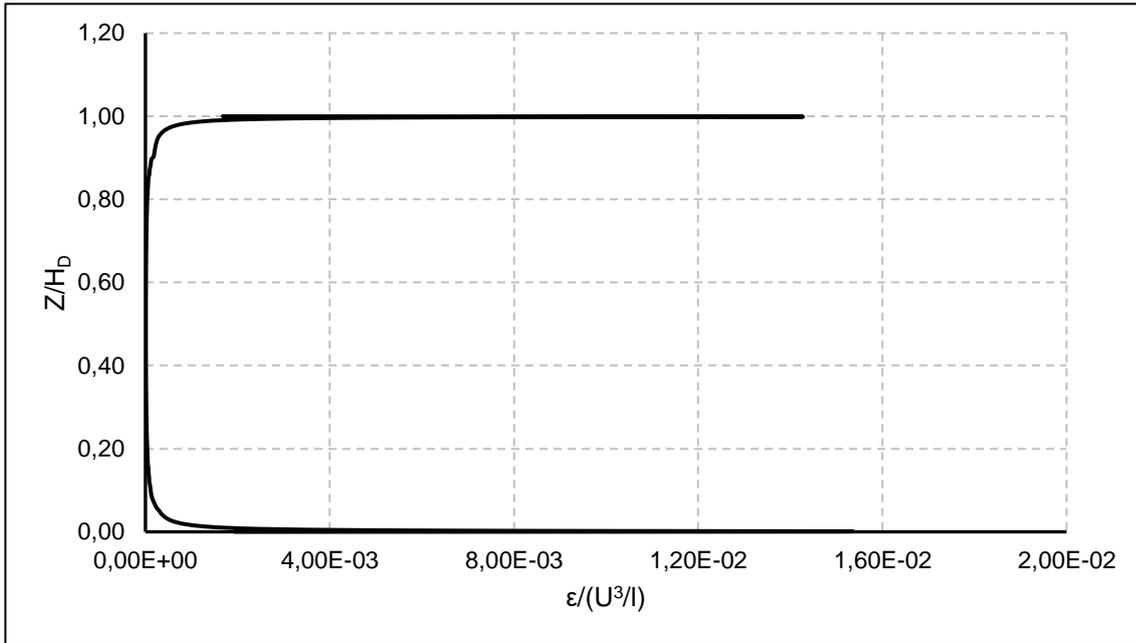
a)



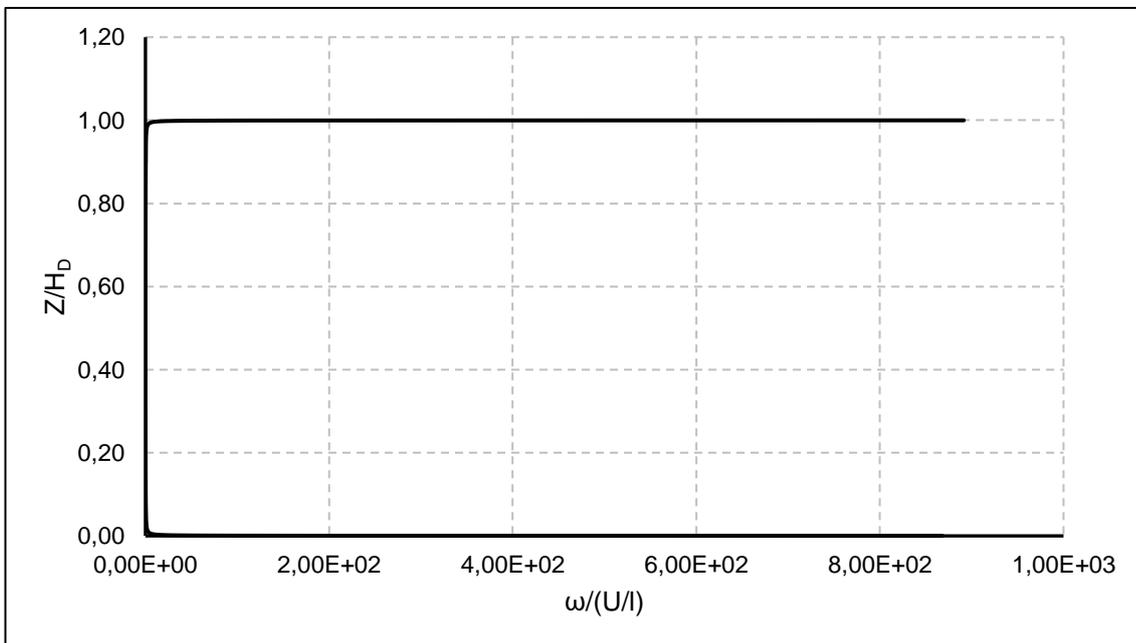
b)



c)



d)



4.5. Estimativa da taxa de emissão de material particulado

A metodologia mais utilizada para a quantificação das emissões fugitivas de pilhas de estocagem é proposta pela seção 13.2.5 *Industrial Wind Erosion* (USEPA, 2006) do *AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Com base nessa metodologia, a velocidade de fricção sobre a pilha é obtida conforme **Equação 6**.

$$u^* = \frac{0,4 (u_s/u_r)}{\ln(z/z_0)} u_{10}^+ \quad (6)$$

Onde,

u^* = Velocidade de fricção (m/s);

u_s = Velocidade incidente a uma altura z sobre a superfície (m/s);

u_r = Velocidade do escoamento livre (m/s);

u_{10}^+ = Velocidade de rajada a uma altura de 10 m (m/s);

z = altura acima da superfície de teste (m);

z_0 = Altura de rugosidade da superfície (m)

Conforme metodologia citada, a altura acima da superfície de teste z deve ser 0,25 m. Visto que o presente estudo considera um modelo em escala 1:200, adota-se $z = 0,00125$ m. Considerando que as pilhas de estocagem avaliadas são compostas por partículas com diâmetro máximo de 1.000 μm , a altura da rugosidade da superfície dessas pilhas tem valor de $3,33\text{E}^{-05}$ m.

A partir dos resultados da simulação numérica do escoamento incidente sobre a pilha de estocagem, são extraídos os valores de u_s na altura z sobre cada uma das células que compõem a superfície, e dessa maneira é possível calcular o potencial de erosão individual de cada célula. O potencial de erosão para uma superfície seca e exposta é dado pela **Equação 7**.

$$P = 58 * (u^* - u_t^*)^2 + 25 * (u^* - u_t^*) \quad (7)$$

$$P = 0 \text{ se } u^* \leq u_t^*$$

Onde,

P = Potencial de erosão (g/m^2);

u^* = Velocidade de fricção (m/s);

u_t^* = Velocidade de fricção limite (m/s).

A velocidade de fricção limite do carvão foi considerada 0,35 m/s, conforme avaliado em experimento com túnel de vento por Turpin e Harion (2009), enquanto a velocidade de fricção limite da areia foi 0,24 m/s, conforme calculado por Tominaga *et al.* (2018).

A emissão que ocorre em cada célula da superfície da pilha é calculada conforme **Equação 8**.

$$e = P * A \quad (8)$$

Onde,

e = Emissão de material por célula (g);

A = Área da célula (m²).

A emissão total da pilha é obtida através do somatório da emissão em cada uma de suas células, de acordo com a **Equação 9**.

$$E = \sum_{i=1}^N e_i \quad (9)$$

Onde,

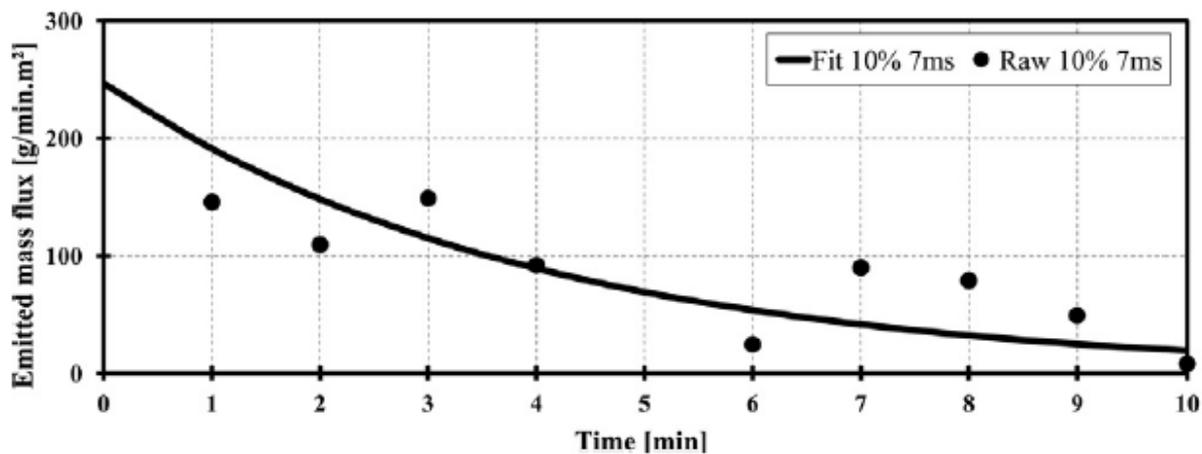
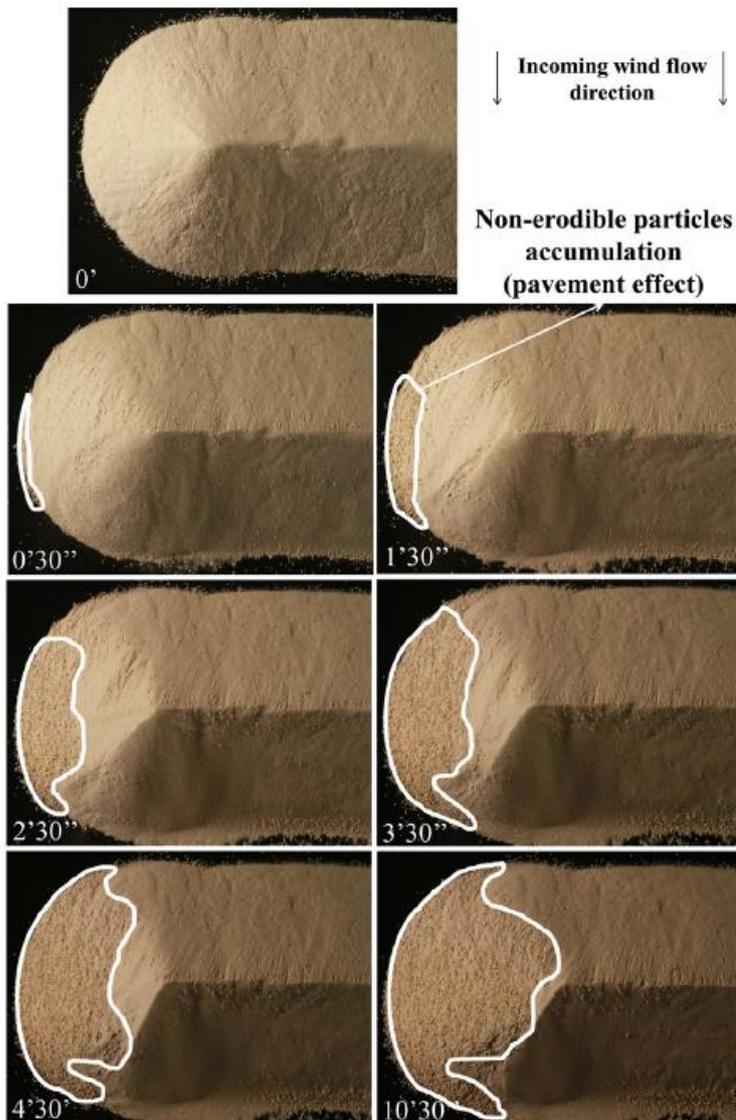
E = Emissão total de material (g);

N = Número de células.

Furieri *et al.* (2013) analisaram que, no caso de pilhas com uma mistura de partículas erodíveis e não-erodíveis, a taxa de emissão tende a decrescer com o tempo devido à presença das partículas não-erodíveis causar o fenômeno de pavimentação, que é a cobertura da superfície erodível pelas partículas não erodíveis, o que impede que as partículas erodíveis sejam suspensas. O estudo avaliou a variação temporal do fluxo de massa emitido pelas pilhas de estocagem, em conjunto com a evolução do fenômeno de pavimentação observado em fotografias, conforme apresentado na **Figura 4-8**, onde as linhas brancas limitam a agregação de partículas não erodíveis.

A região limitada pelas linhas brancas não apresentou nenhuma modificação significativa após aproximadamente 10 minutos, o que está de acordo com o fato de o fluxo de massa emitido diminuir, tendendo a um valor muito baixo. Em vista disso, o cálculo da taxa de emissão das pilhas do presente estudo considerou que a emissão cessa em 10 minutos, conforme **Equação 10**.

Figura 4-8: Evolução típica de fotografias experimentais em túnel de vento desde o início e evolução temporal do fluxo de massa. Fonte: Furieri *et al.* (2013).



$$TE = \frac{E}{10 * 60} \quad (10)$$

Onde,

TE = Taxa de emissão (g/s).

4.6. Injeção de partículas

Para o cálculo numérico de escoamentos multifásicos, o modelo Lagrangiano de fase discreta do software ANSYS Fluent segue a abordagem Euler-Lagrange, onde a fase fluida é tratada como um meio contínuo através da resolução das equações de Navier-Stokes, enquanto a fase dispersa é resolvida rastreando um grande número de partículas, bolhas ou gotículas através do campo de escoamento calculado

A erodibilidade das partículas foi avaliada pelo *take-off criterion* proposto por Shao e Lu (2000), que apresentou a **Equação 11**, que relaciona a velocidade de fricção limite u_t^* e o diâmetro da partícula D.

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

Onde,

u_t^* = Velocidade de fricção limite (m/s);

ρ_p = Densidade da partícula (kg/m³);

ρ = Densidade do fluido (kg/m³);

g = Aceleração da gravidade (m/s²);

D = Diâmetro da partícula (m);

γ = Energia da superfície que caracteriza a coesão (kg/s²).

Shao e Lu (2000) recomendaram a faixa entre 1,65E⁻⁰⁴ e 5,00E⁻⁰⁴ kg/s² para γ . Para esse estudo, foi utilizado o valor $\gamma = 2,86E^{-04}$, obtido por Kok e Renno (2006) ao ajustar experimentalmente a **Equação 11** ao valor limite necessário para levantar partículas erodíveis.

O *take-off criterion* permite estimar a faixa de tamanho de partículas suscetíveis à erosão. Para uma determinada velocidade de fricção u^* , existirá uma faixa de valores de diâmetro em que as partículas são emitidas. Fora dessa faixa, as partículas permanecem na superfície devido à força da gravidade nas partículas maiores, e forças de coesão interpartícula nas partículas menores.

Considerando a velocidade de fricção limite do carvão igual a 0,35 m/s, conforme avaliado em experimento com túnel de vento por Turpin e Harion (2009), e a velocidade de fricção limite da areia igual a 0,24 m/s, conforme calculado por Tominaga *et al.* (2018), tais valores foram inseridos na **Equação 11**, de maneira a obter a faixa de diâmetros de partículas suscetíveis à erosão para cada material. A **Tabela 4-2** apresenta as informações de densidade e diâmetro erodível para os materiais componentes das pilhas de estocagem simuladas.

Tabela 4-2: Densidade e diâmetro dos materiais.

Material	Densidade (kg/m ³)	Diâmetro máximo (µm)	Diâmetro mínimo (µm)
Carvão	1.500	820	24
Areia	2.650	152	72

De maneira a representar a emissão de material particulado na pilha de estocagem, partículas inertes foram injetadas na simulação a partir da superfície da pilha utilizando um modelo de fase discreta. Para o modelo de fase discreta, foi aplicado o *Discrete Random Walk Model*, que simula a interação de uma partícula com uma sucessão de vórtices turbulentos de fase fluida (ANSYS, 2013a). Para esse modelo, cada vórtice é caracterizado por uma flutuação de velocidade aleatória (u' , v' e w') e uma escala temporal (τ_e). Os valores de u' , v' e w' que prevalecem durante o tempo de vida do vórtice turbulento são obtidos assumindo que eles obedecem a uma distribuição de probabilidade gaussiana, portanto:

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (12)$$

Onde ζ é um número aleatório normalmente distribuído, e os demais termos do lado direito da equação é o valor RMS das flutuações da velocidade. Visto que a energia

cinética turbulenta é conhecida em cada ponto do escoamento, os valores de RMS podem ser assumidos como:

$$\sqrt{\overline{u'^2}} = \sqrt{\overline{v'^2}} = \sqrt{\overline{w'^2}} = \sqrt{2k/3} \quad (13)$$

O tempo de vida característico do vórtice pode ser definido como a constante:

$$\tau_e = 2T_L \quad (14)$$

Onde T_L é dado pela equação:

$$T_L = C_L \frac{\kappa}{\varepsilon} \quad (15)$$

Onde a constante de escala de tempo C_L pode ser adotada como seu valor *default* 0,15.

O número máximo de *steps*, fator utilizado para abortar cálculos de trajetória quando a partícula nunca sai do domínio fluido, foi 50.000. Quando um número de *steps* máximo é excedido, o software abandona o cálculo da trajetória, eliminando a possibilidade de uma partícula ser presa em uma região de recirculação e ser rastreada infinitamente

A injeção de partículas foi realizada de maneira perpendicular à superfície da pilha e com velocidade nula, de maneira que sua velocidade seja unicamente atribuída ao transporte devido ao escoamento. A distribuição dos diâmetros das partículas injetadas seguiu a distribuição de Rosin-Rammler, onde a gama completa de diâmetros é dividida em um número adequado de intervalos discretos.

Em vista do objetivo de realizar a simulação numérica replicando o domínio de um túnel de vento, utilizou-se a condição de contorno de saída de partículas (*escape*) na entrada e na saída do domínio, visto que essa condição permite que a partícula saia do domínio quando encontra a fronteira, e, nas demais fronteiras, foi aplicada a condição de reflexão (*reflect*), na qual a partícula ricocheteia na fronteira, dado que

tais superfícies em um túnel de vento são compostas por paredes que não permitem a saída de partículas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e discute os principais aspectos da simulação numérica da erosão eólica de materiais granulados emitidos por pilhas de estocagem. Nesse sentido, a Seção 5.1 apresenta os resultados da simulação numérica do escoamento ao redor de uma pilha de estocagem e realiza a validação dessa simulação através de comparação com resultados demonstrados em literatura. A Seção 5.2 contém análise e discussão dos resultados relativos à emissão e dispersão das partículas emitidas por erosão eólica a partir de pilhas de estocagem.

As várias configurações testadas no presente estudo são apresentadas na **Tabela 5-1**.

Tabela 5-1: Configurações testadas.

Nº do caso	Material	Velocidade do escoamento livre (m/s)	Ângulo de incidência do vento (°)
1	Areia	6,08	90
2			60
3		10,00	90
4			60
5	Carvão	6,08	90
6			60
7		10,00	90
8			60

5.1. Escoamento ao redor da pilha de estocagem

Essa seção trata da avaliação dos mecanismos do escoamento atmosférico ao redor da pilha de estocagem orientada a 90° em relação à direção do vento (Seção 5.1.1) e a 60° em relação à direção do vento (Seção 5.1.2). Os resultados numéricos são apresentados na forma adimensional, sendo a velocidade local (U) dividida pela velocidade do escoamento livre (U_{ref}), a tensão de cisalhamento local (τ) dividida por uma tensão de cisalhamento referência (τ_{ref}) obtida em uma zona onde o escoamento não foi perturbado pela presença da pilha, e a energia cinética turbulenta (κ) dividida pelo quadrado da velocidade do escoamento livre (U_{ref})

5.1.1. Escoamento ao redor da pilha de estocagem orientada perpendicularmente à direção do vento

A **Figura 5-1** traz a vista superior dos contornos de velocidade média adimensional do escoamento obtida a 0,00125 m da superfície da pilha de estocagem para os Casos 1, 3, 5 e 7, enquanto a **Figura 5-2** traz os contornos de velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha para os mesmos casos.

Na porção anterior à pilha, nota-se uma desaceleração do escoamento até um ponto de estagnação, situação causada pela presença da pilha como obstáculo ao escoamento. Na face de barlavento da pilha, observa-se uma aceleração do escoamento e um aumento do gradiente de velocidade, que aumenta progressivamente do inferior até o topo da pilha. O maior valor de velocidade é encontrado no topo e laterais da pilha, implicando em um maior potencial de erosão nessas áreas. A área à sotavento do obstáculo registra uma zona com velocidades de menor magnitude, e ao analisar a **Figura 5-3** é possível perceber que se trata de uma zona de recirculação do escoamento. Após essa região, o escoamento é retomado até que não ocorra mais influência da pilha.

Na comparação entre os casos simulados, observa-se que o comportamento do gradiente de velocidade dentro do domínio é semelhante entre as situações, obedecendo ao padrão citado no parágrafo anterior. Com o aumento de aproximadamente 64% na velocidade do escoamento livre, não há uma diferença significativa nas magnitudes de velocidade adimensional.

Figura 5-1: Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s

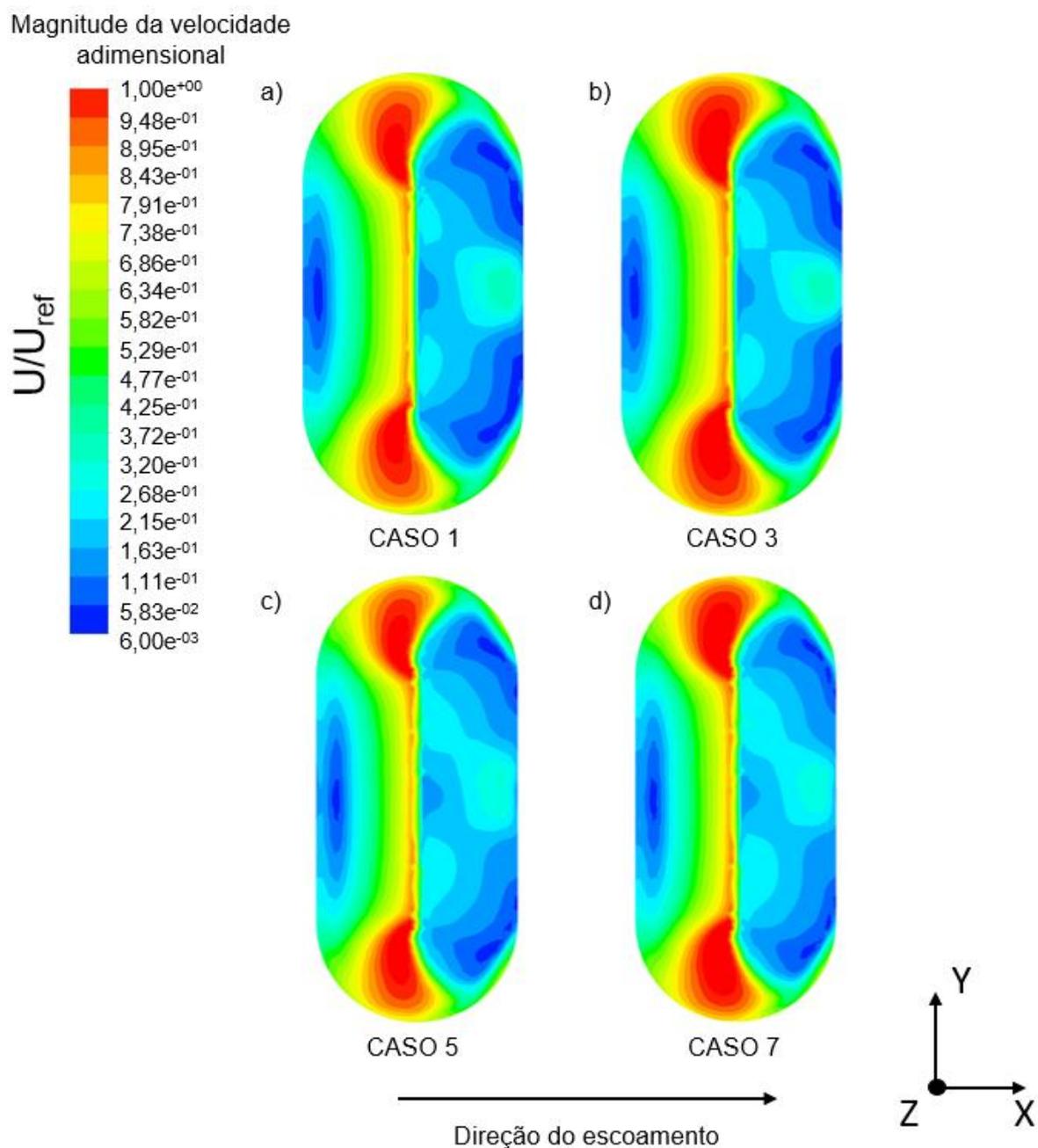
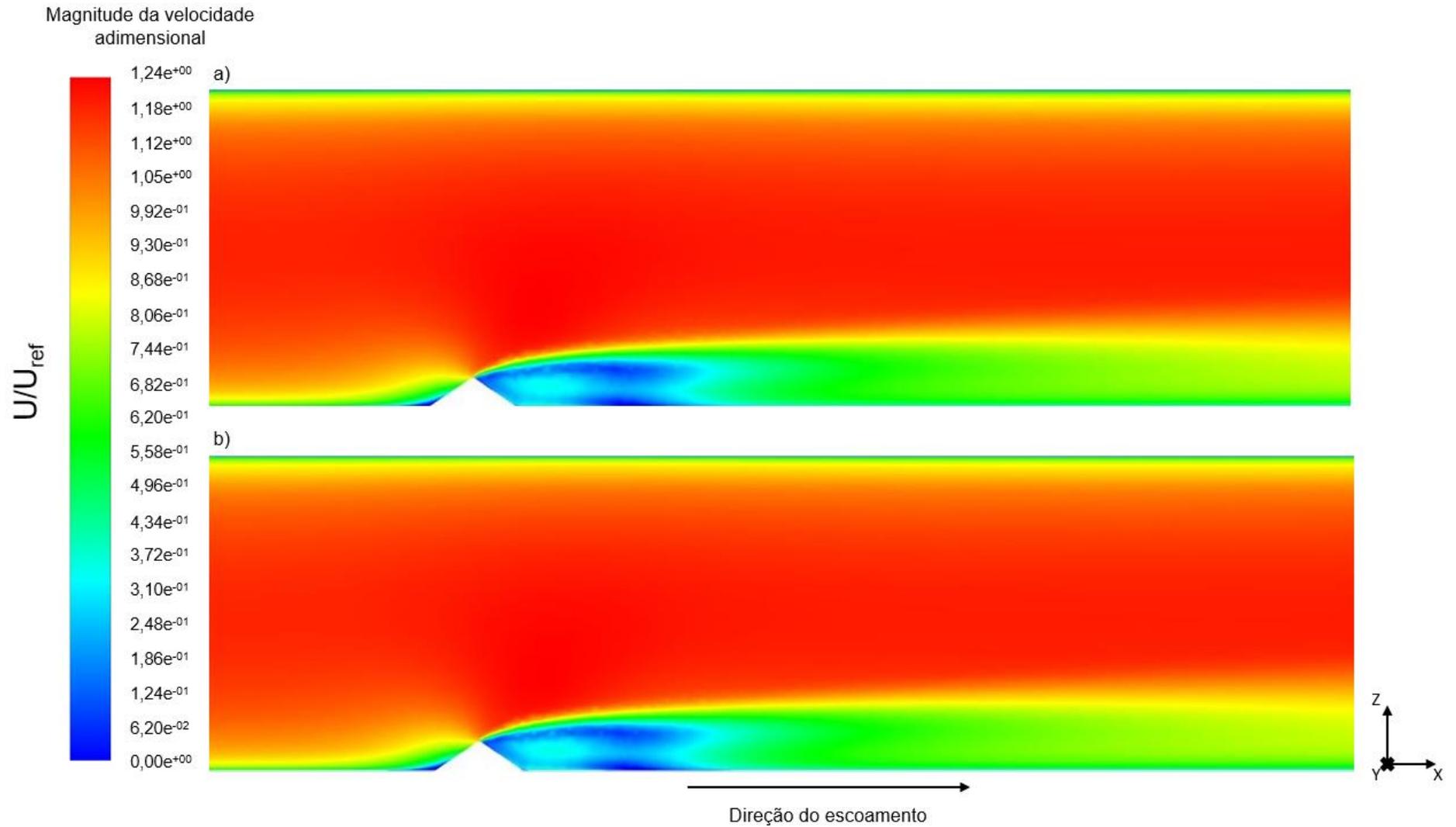


Figura 5-2: Seção transversal do contorno de velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha de estocagem para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 – Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.



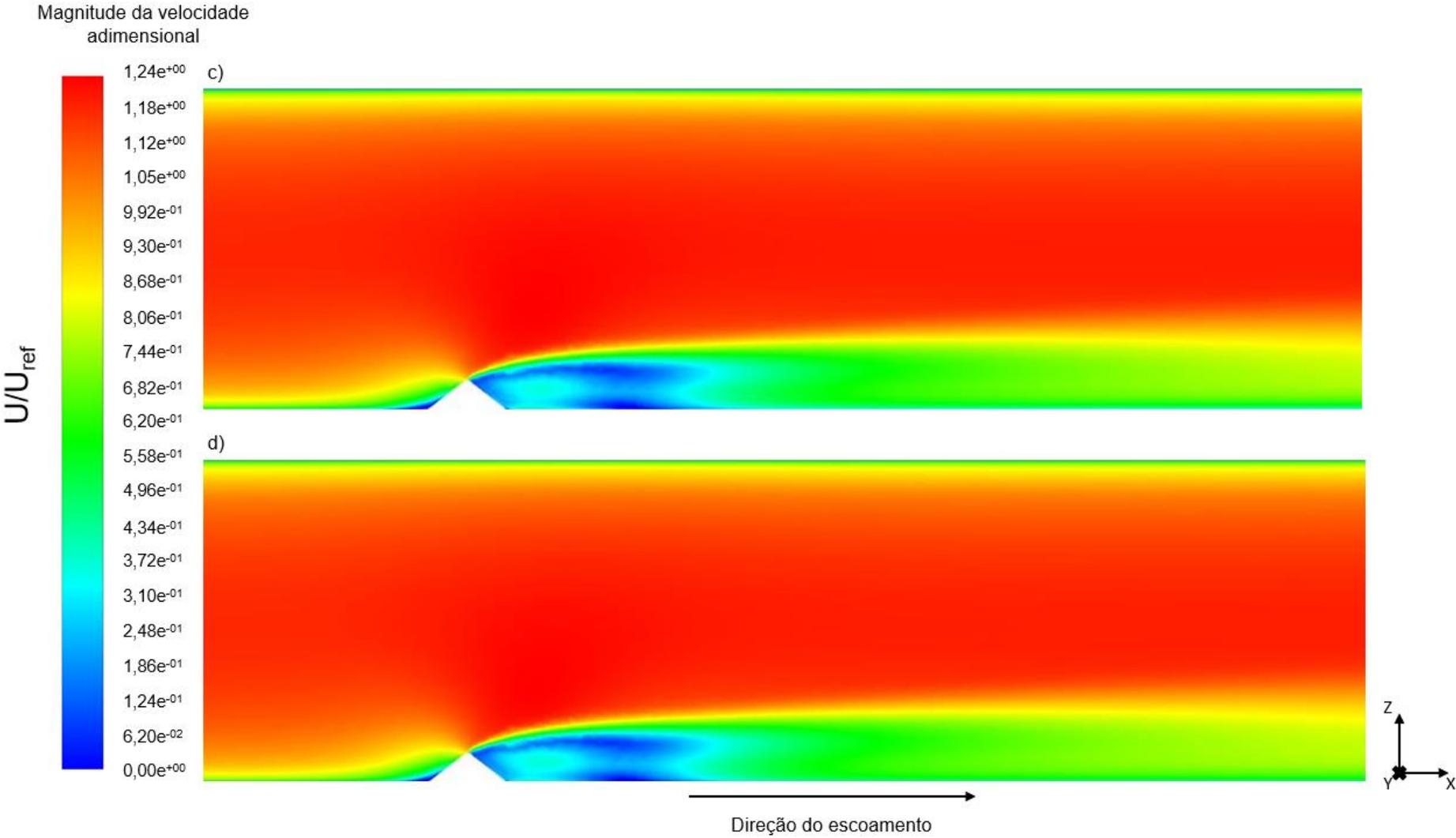
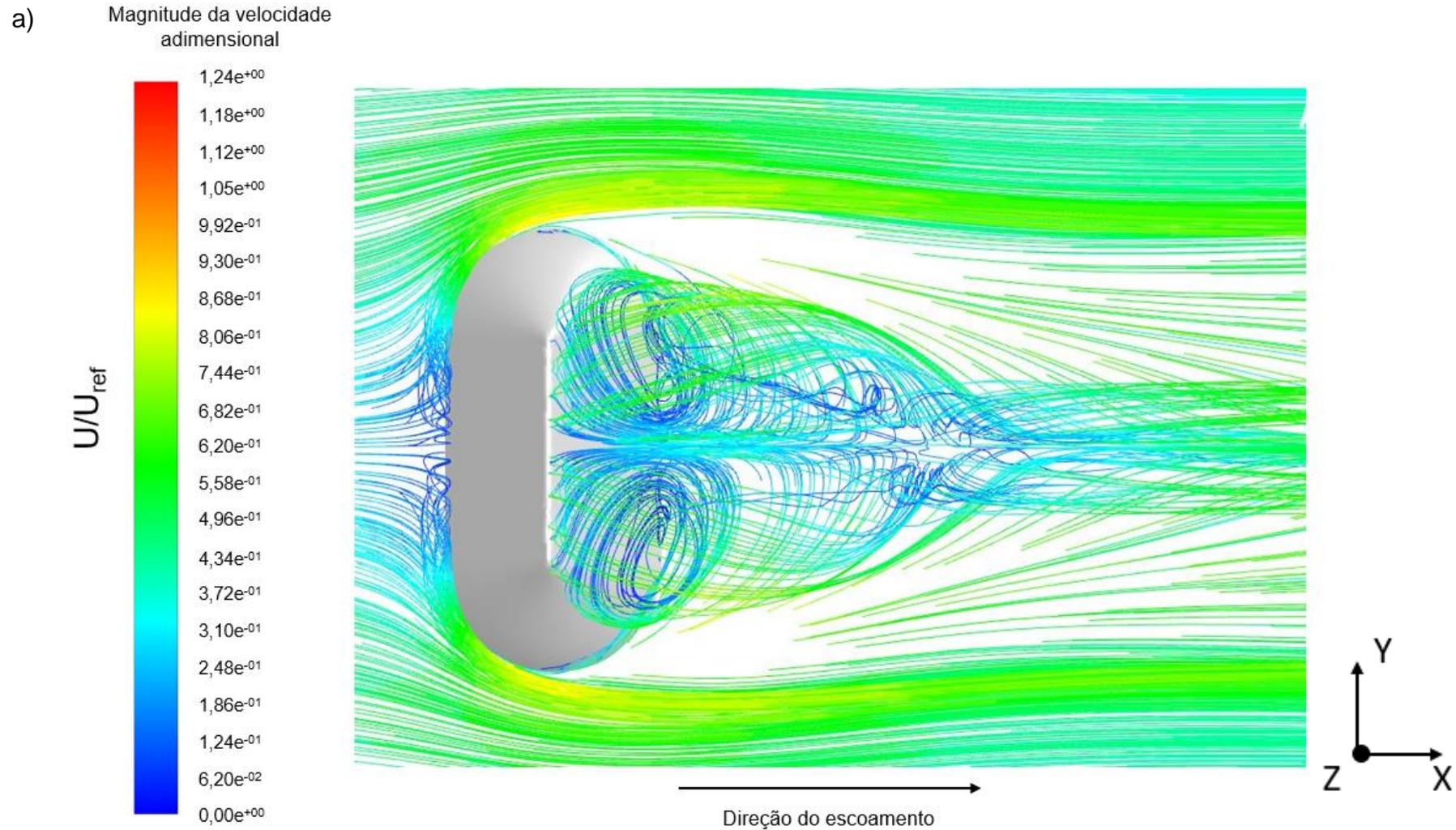
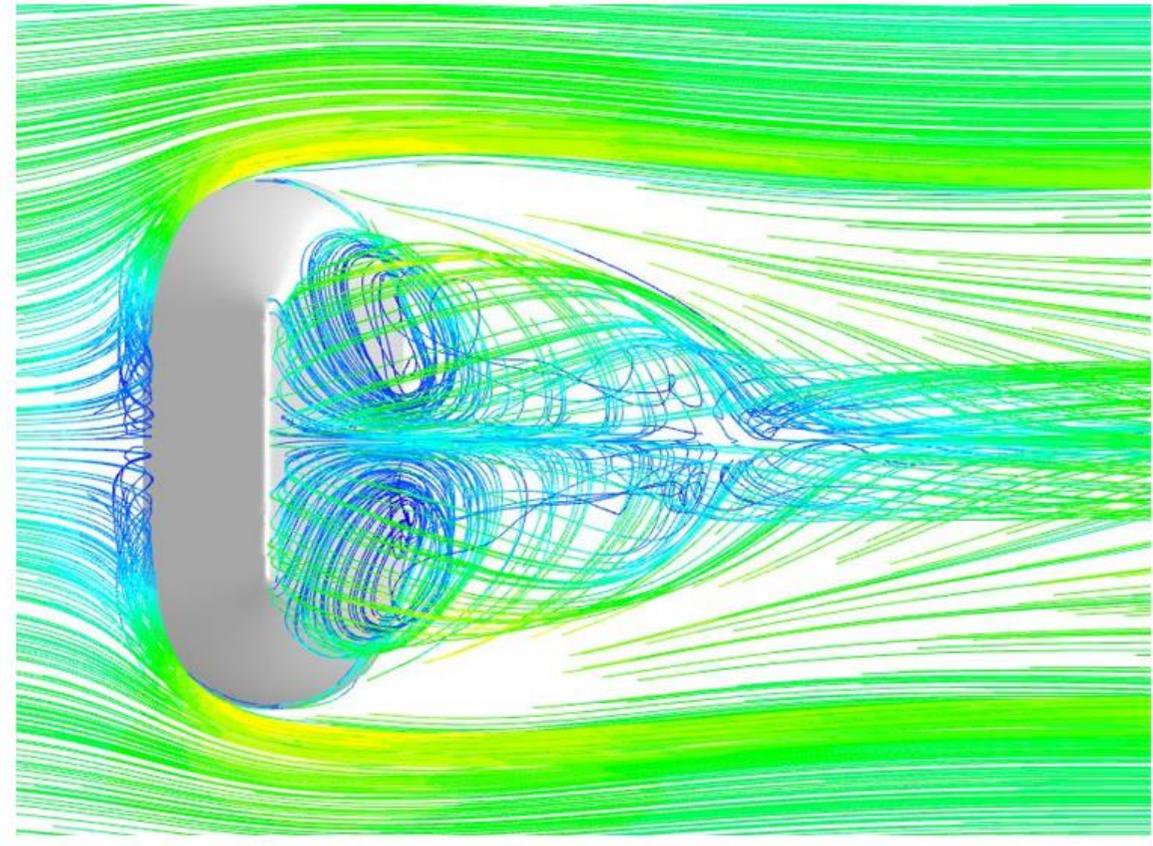
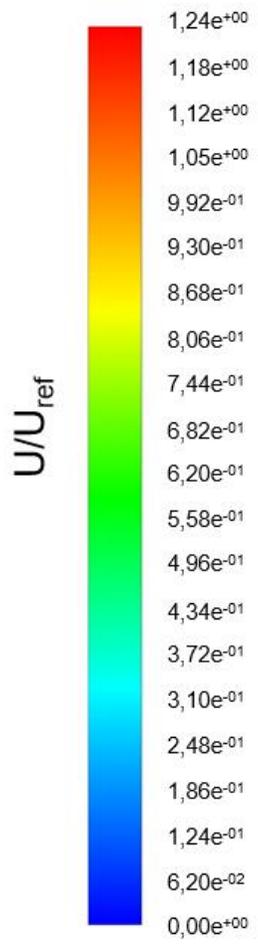


Figura 5-3: Vista superior de *pathlines* coloridas conforme velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha de estocagem para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s

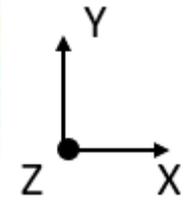


b)

Magnitude da velocidade adimensional

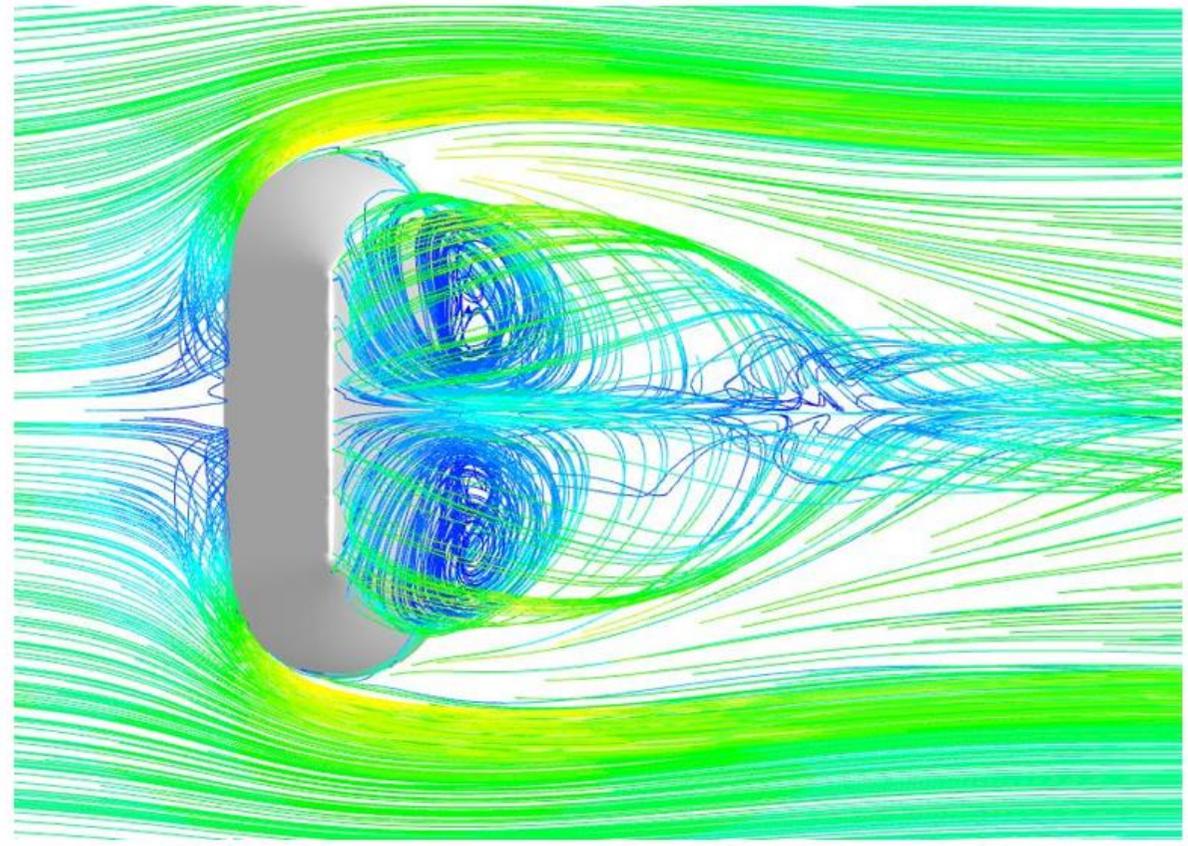
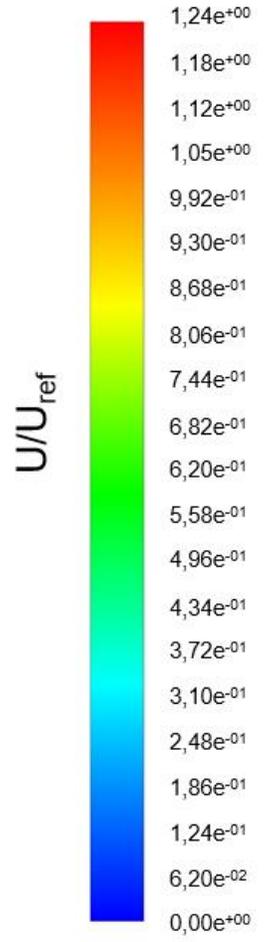


Direção do escoamento



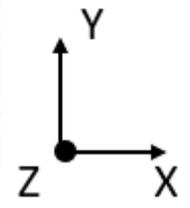
c)

Magnitude da velocidade adimensional

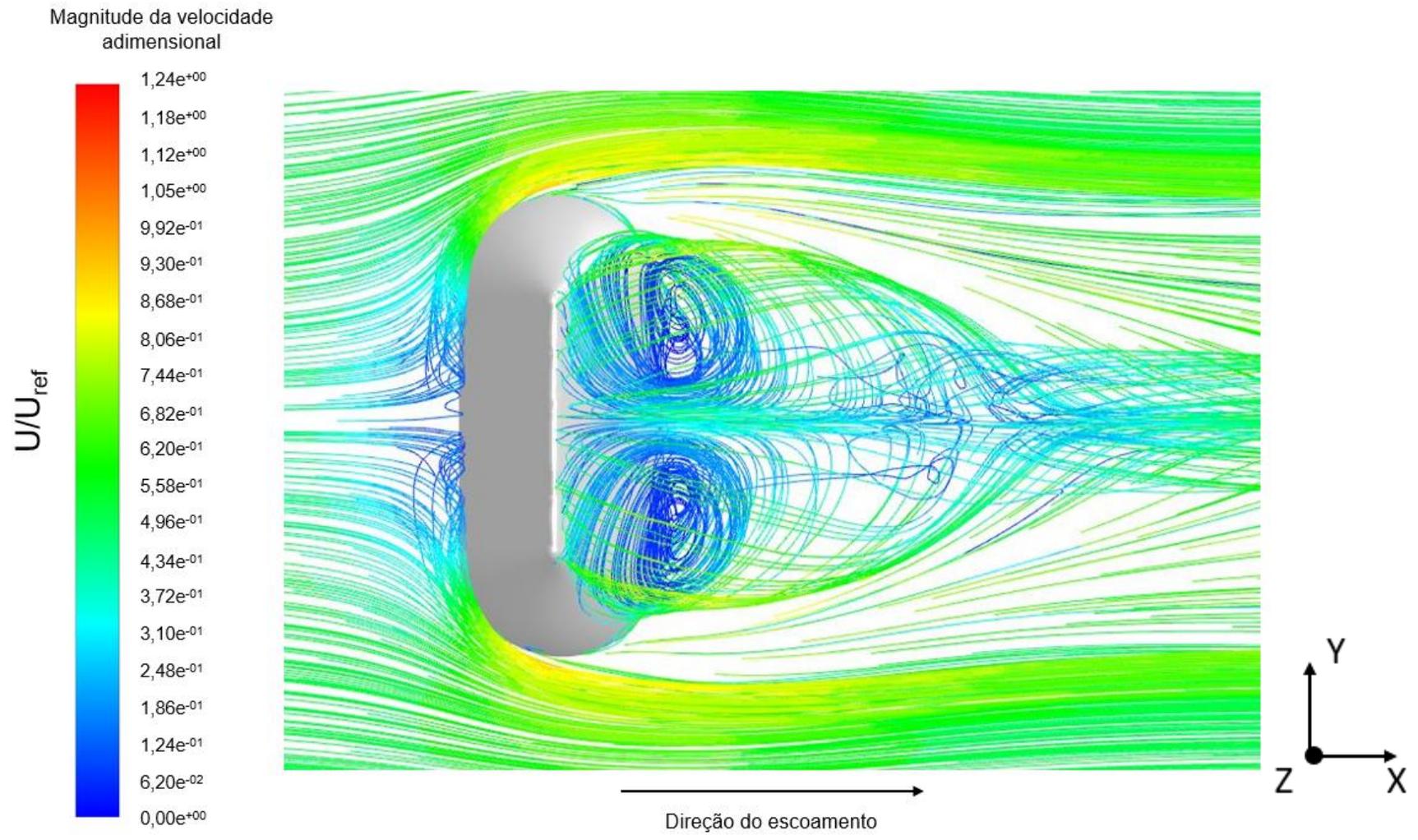


→

Direção do escoamento



d)



As **Figuras 5-4 e 5-5** ilustram as comparações entre os resultados obtidos no presente estudo e aqueles obtidos no trabalho de Turpin e Harion (2009). No trabalho citado também foram encontrados os fenômenos de aceleração do escoamento e aumento do gradiente de velocidade na face de barlavento da pilha, bem como o registro de maiores valores de velocidade no topo e laterais da pilha, e ainda uma zona de menor velocidade à sotavento da pilha. Também foi observada uma zona de recirculação após o obstáculo, com registros de menores valores de velocidade.

Figura 5-4: a) Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,25 m da superfície da pilha para o estudo de Turpin e Harion (2009) (b) Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para o Caso 1 do presente estudo.

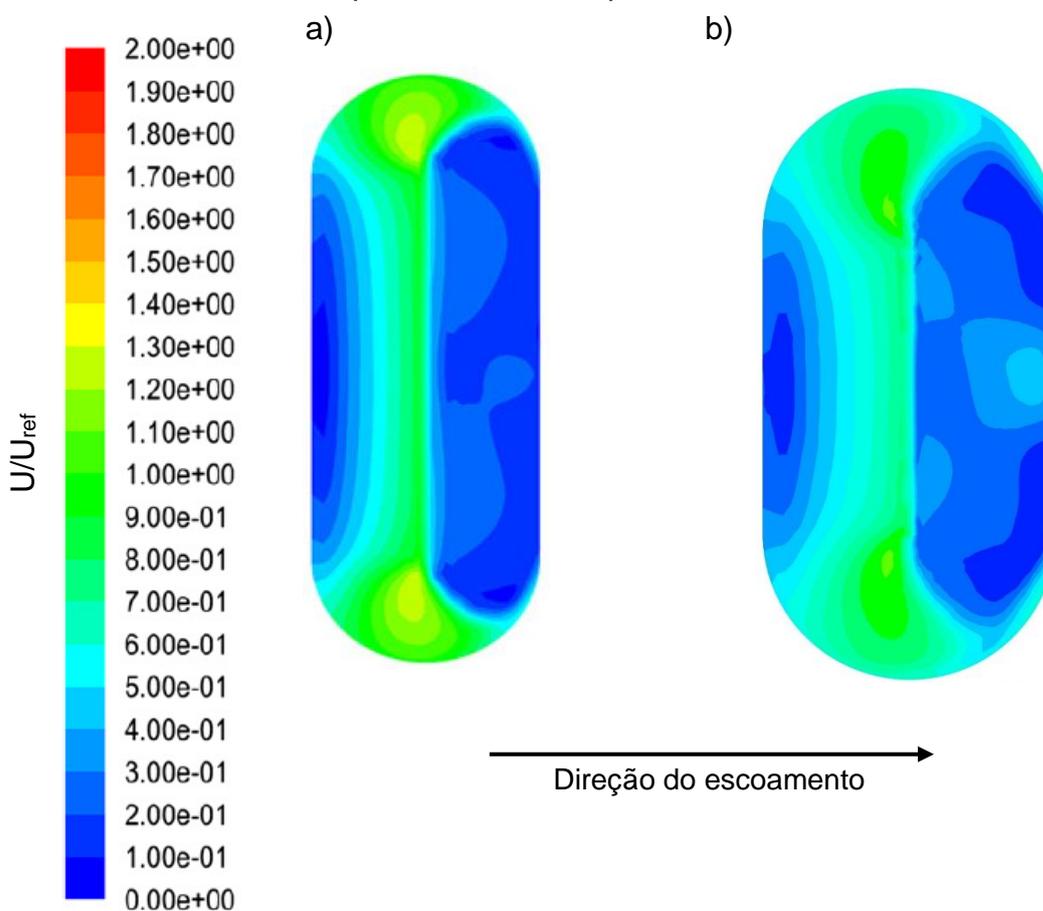
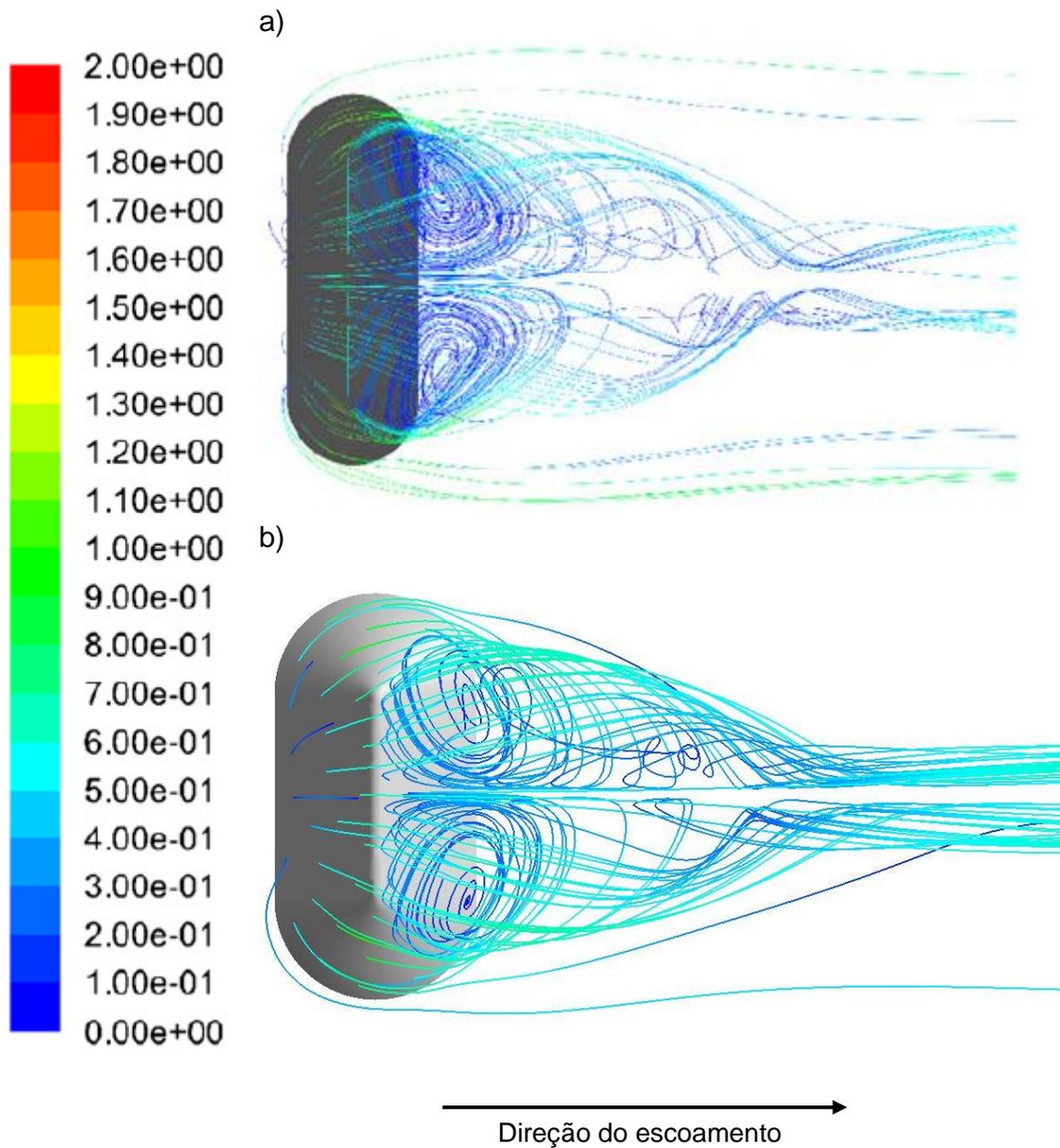
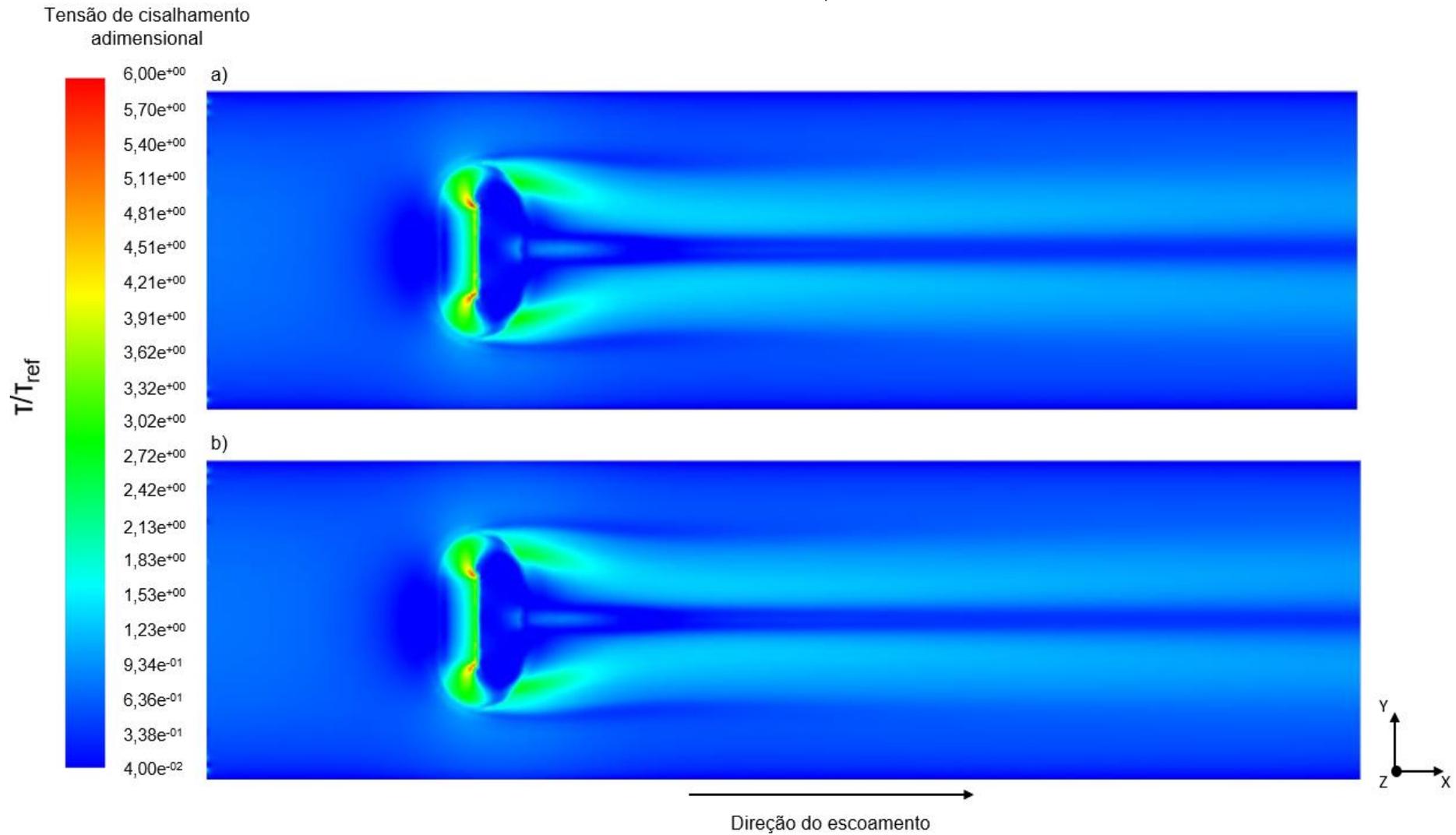


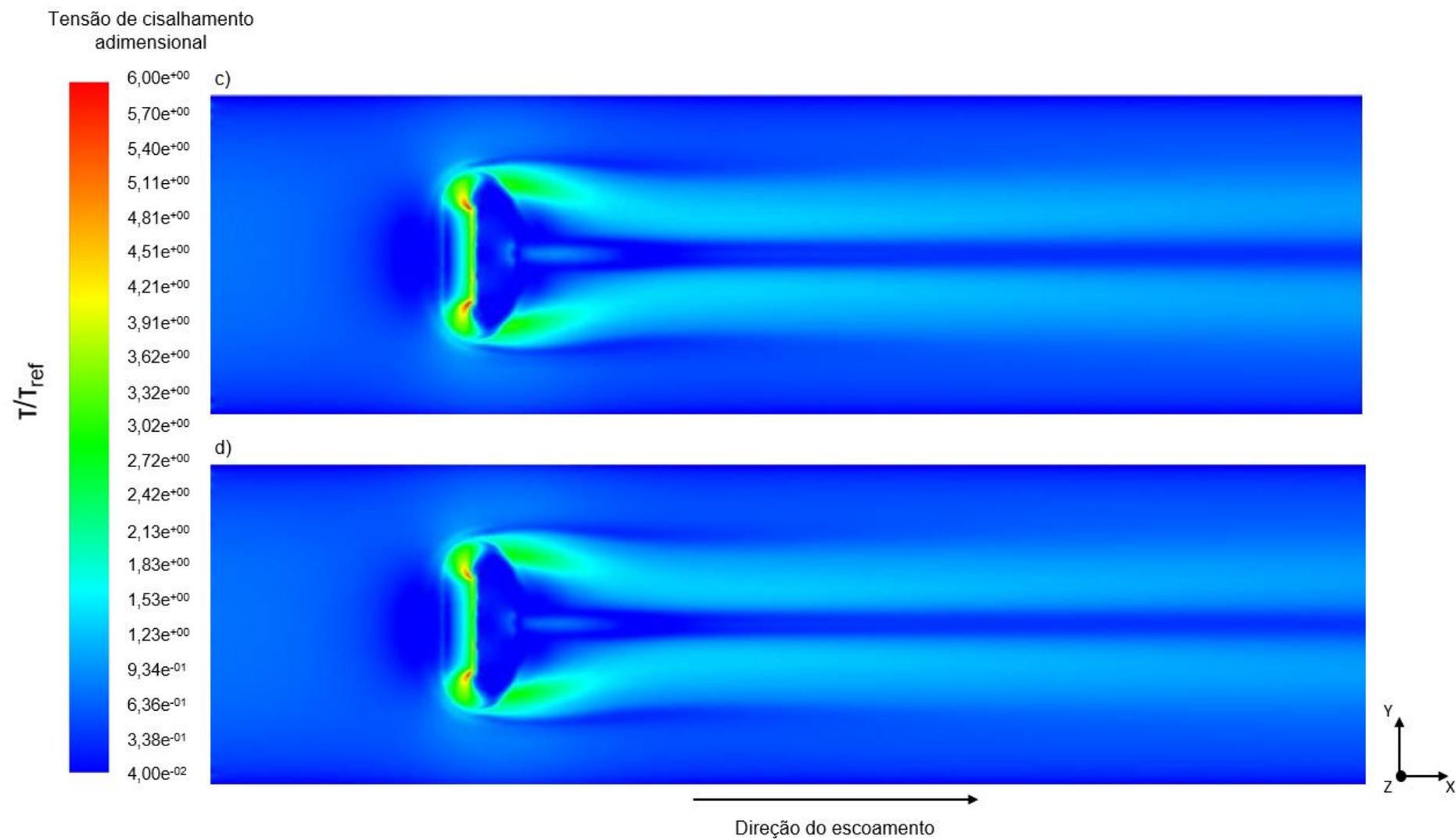
Figura 5-5: (a) Vista superior das *pathlines* coloridas pela velocidade média adimensional do escoamento a 0,25 m da superfície da pilha para o estudo de Turpin e Harion (2009) (b) Vista superior das *pathlines* coloridas pela velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para o Caso 1 do presente estudo.



A **Figura 5-6** apresenta os contornos da tensão de cisalhamento adimensional sobre a superfície da pilha de estocagem para os Casos 1, 3, 5 e 7. Percebe-se o aumento da tensão de cisalhamento nas laterais e no topo da pilha, locais onde os valores de velocidade incidente são mais altos. Os maiores valores de tensão cisalhante encontram-se nessa região devido à aceleração do escoamento, que se inicia nas faces laterais da pilha e se prolonga para seu topo. Também é importante observar as tensões de cisalhamento próximas de zero à sotavento da pilha, região que corresponde à uma zona de baixa velocidade e de recirculação do escoamento.

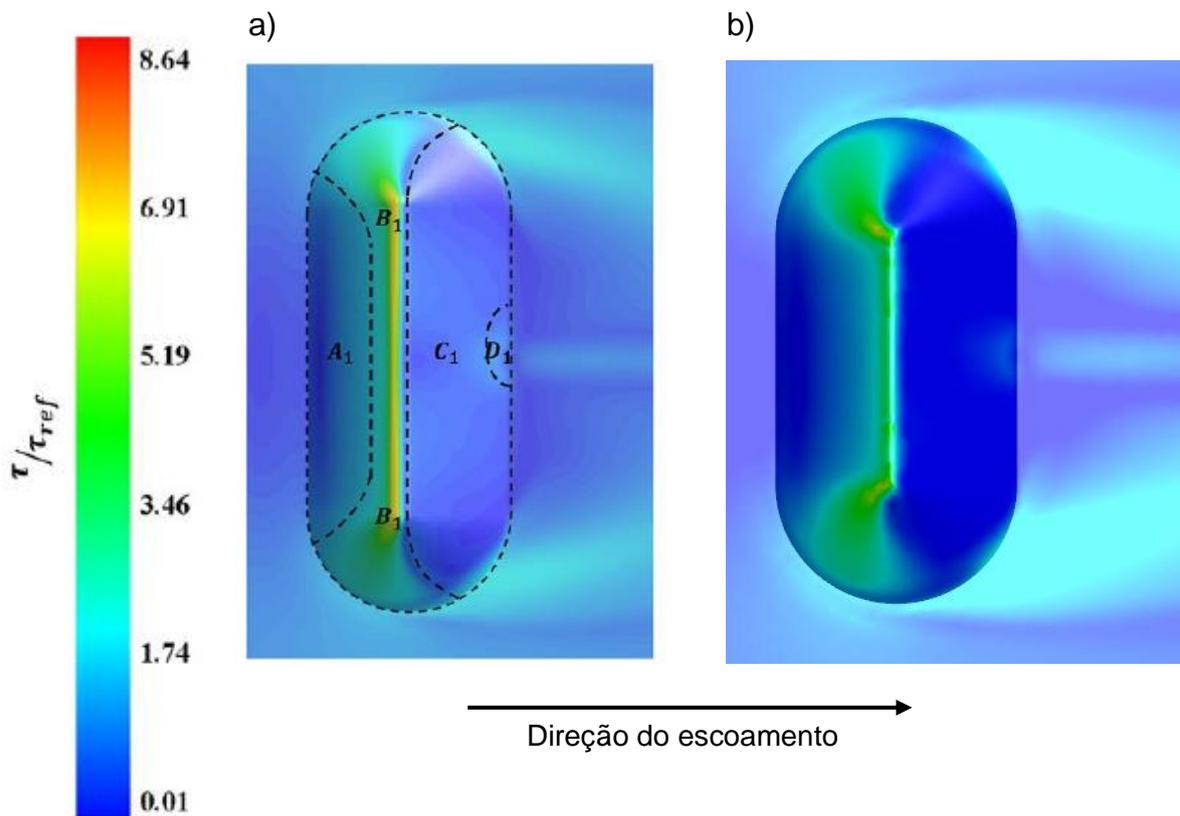
Figura 5-6: Contornos de tensão de cisalhamento para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s





Os contornos de tensão de cisalhamento ao redor da pilha de estocagem obtidos no presente estudo podem ser comparados ao obtido por Ferreira *et al.* (2019), conforme **Figura 5-7**. Tal estudo também registrou os maiores valores de tensão de cisalhamento na face de barlavento e no topo da pilha, com valores próximos à zero a sotavento. Ressalta-se que o estudo de Ferreira *et al.* (2019) analisou o escoamento ao redor de uma pilha de estocagem de topo arredondado, enquanto presente estudo considerou uma pilha de estocagem de topo pontiagudo.

Figura 5-7:(a) Contornos de tensão de cisalhamento para o estudo de Ferreira *et al.* (2019) (b) Contornos de tensão de cisalhamento para o Caso 1 do presente estudo.

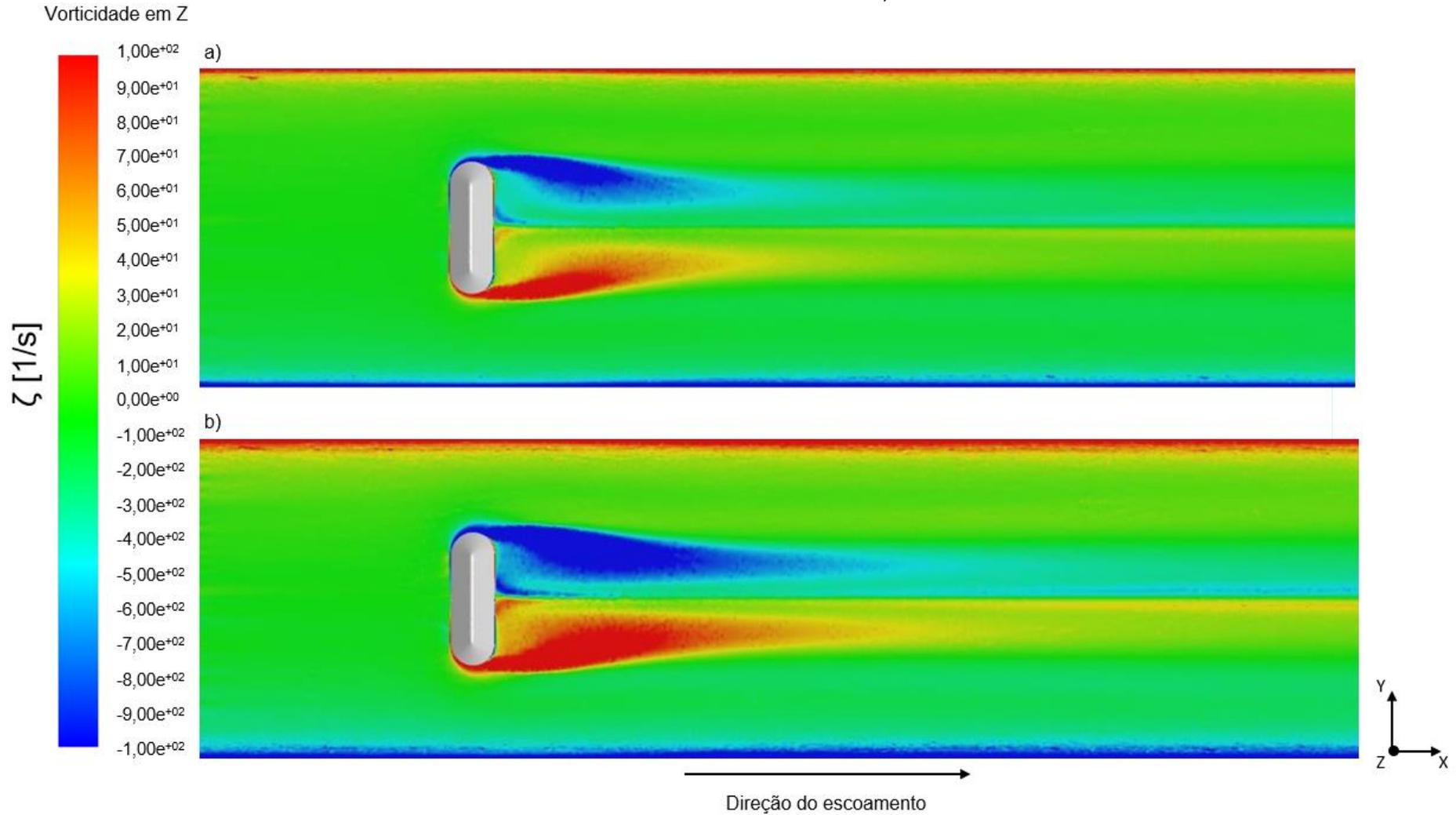


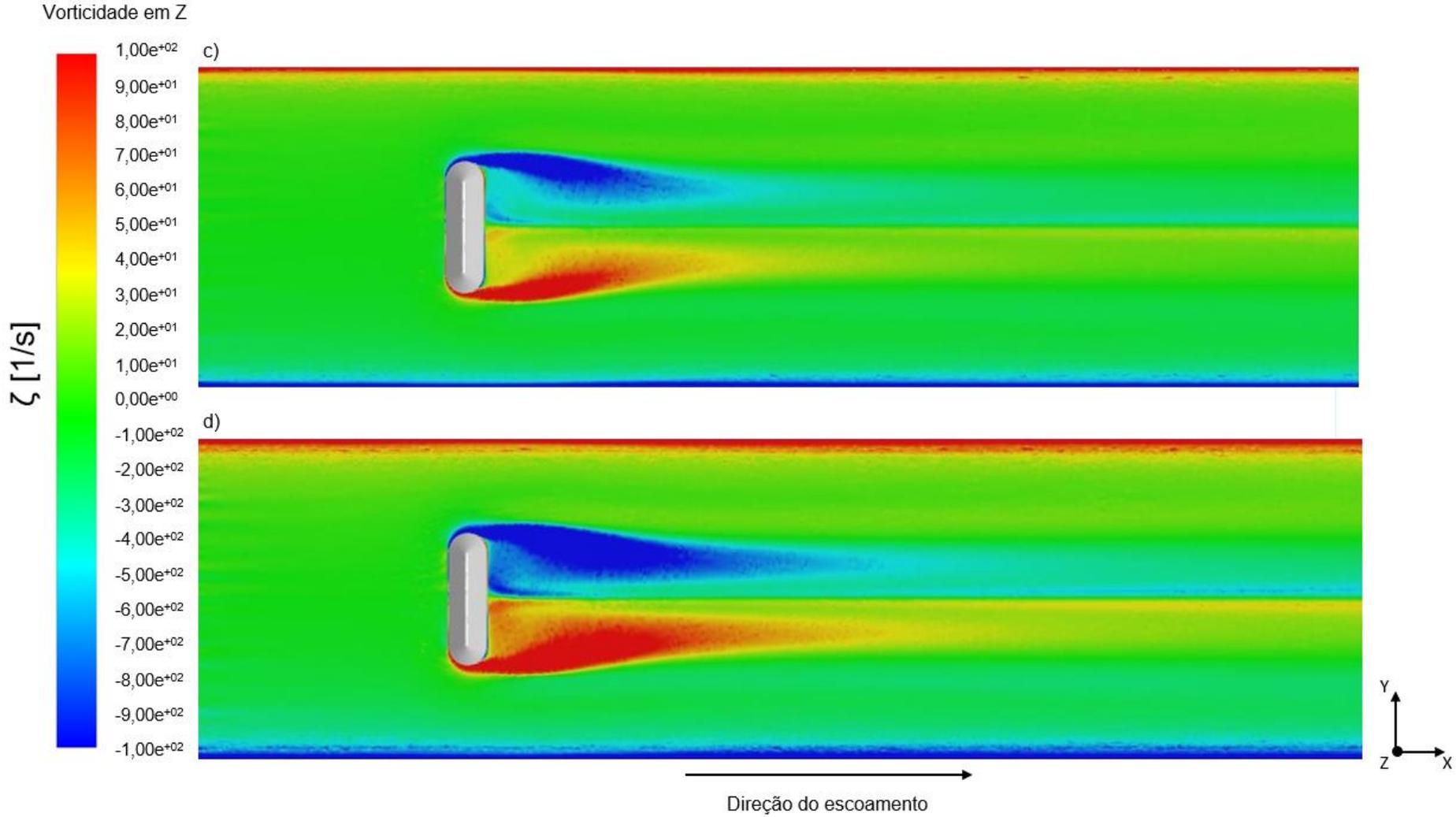
De acordo com Fox, McDonald e Pritchard (2015), a vorticidade é uma medida da rotação de um elemento fluido conforme ele se move no campo de escoamento, e pode ser definida através da **Equação 16**.

$$\zeta = \nabla \times \vec{V} \quad (16)$$

A componente Z da vorticidade é apresentada na **Figura 5-8** em um plano XY a uma altura $h/2$ m para os casos avaliados nesse estudo. É possível visualizar uma divisão nos sentidos da vorticidade na região posterior à pilha, com rotação no sentido horário na metade superior da pilha, e anti-horário na metade inferior. Entende-se, portanto, que a parcela de fluido rotaciona de maneira a ir ao encontro da superfície da pilha, gerando duas zonas de recirculação de sentidos opostos, o que corrobora a situação visualizada na **Figura 5-3**. A estrutura de vórtices presente na região após a pilha proporciona uma zona de baixa velocidade em conjunto com a zona de recirculação, e, além disso, é possível identificar que o aumento da velocidade do escoamento é responsável pela geração de uma região de recirculação de maior tamanho do que a observada no escoamento de menor velocidade,

Figura 5-8: Contornos de vorticidade em Z a $h/2$ m de altura para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s



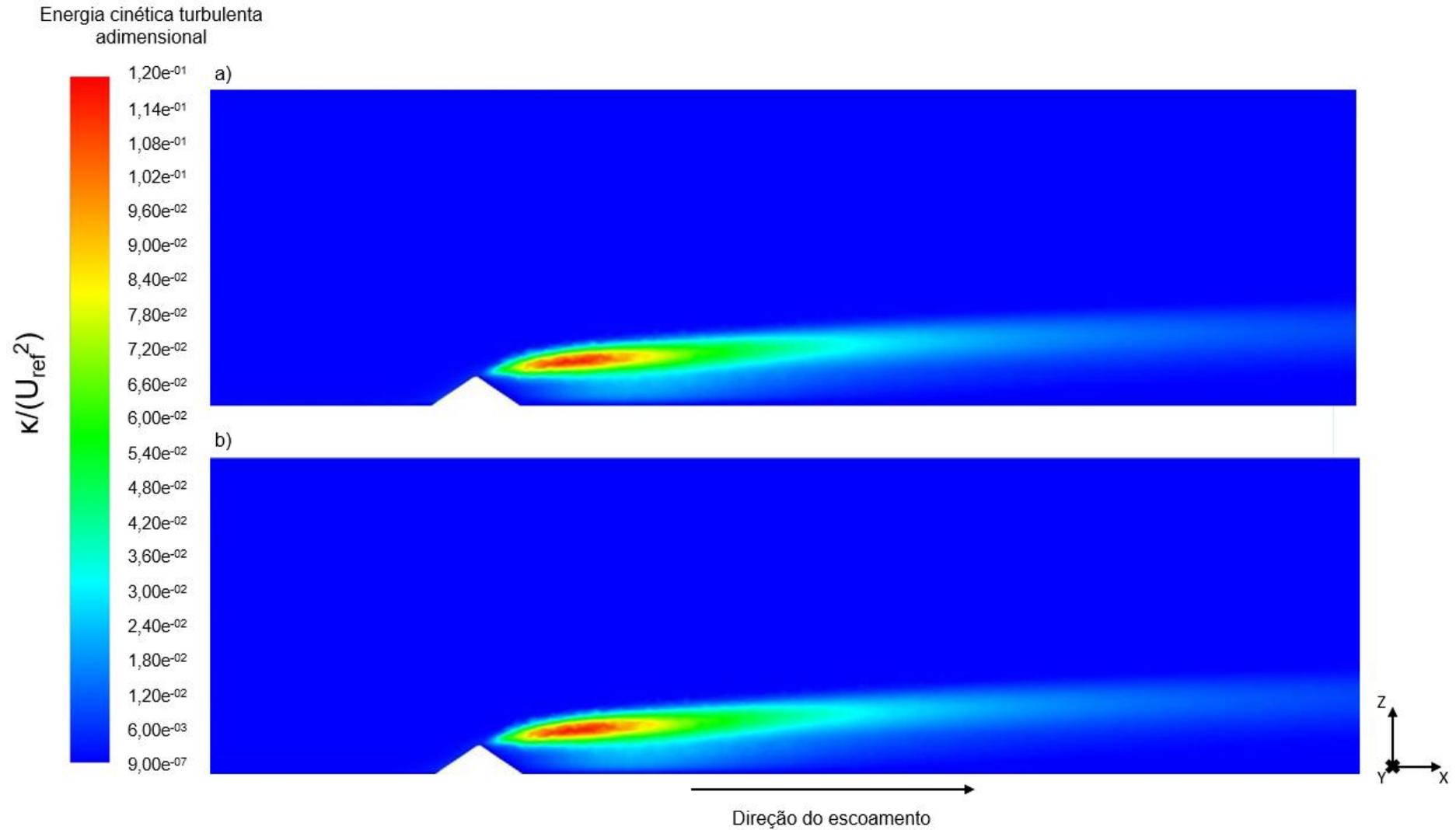


A energia cinética turbulenta é definida por Wilcox (1993) como a flutuação da energia cinética por unidade de massa, conforme apresentado na **Equação 17**.

$$\kappa = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (17)$$

A energia cinética turbulenta adimensional é apresentada para cada caso contemplado no estudo em um plano vertical que atravessa a metade da pilha (**Figura 5-9**) e em um plano a uma altura $h/2$ m acima do chão do domínio (**Figura 5-10**). A zona de recirculação logo após a pilha é caracterizada pela presença de vórtices, e apresenta elevados valores de energia cinética turbulenta. À medida que o escoamento avança e há uma redução da influência do obstáculo sobre seu comportamento, existe a tendência de retomada dos valores médios do escoamento, com redução da energia cinética turbulenta. Na comparação entre os casos simulados, observa-se que os contornos da variável adimensional dentro do domínio são semelhantes entre as situações, obedecendo ao padrão citado anteriormente.

Figura 5-9: Contornos de energia cinética turbulenta adimensional para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s



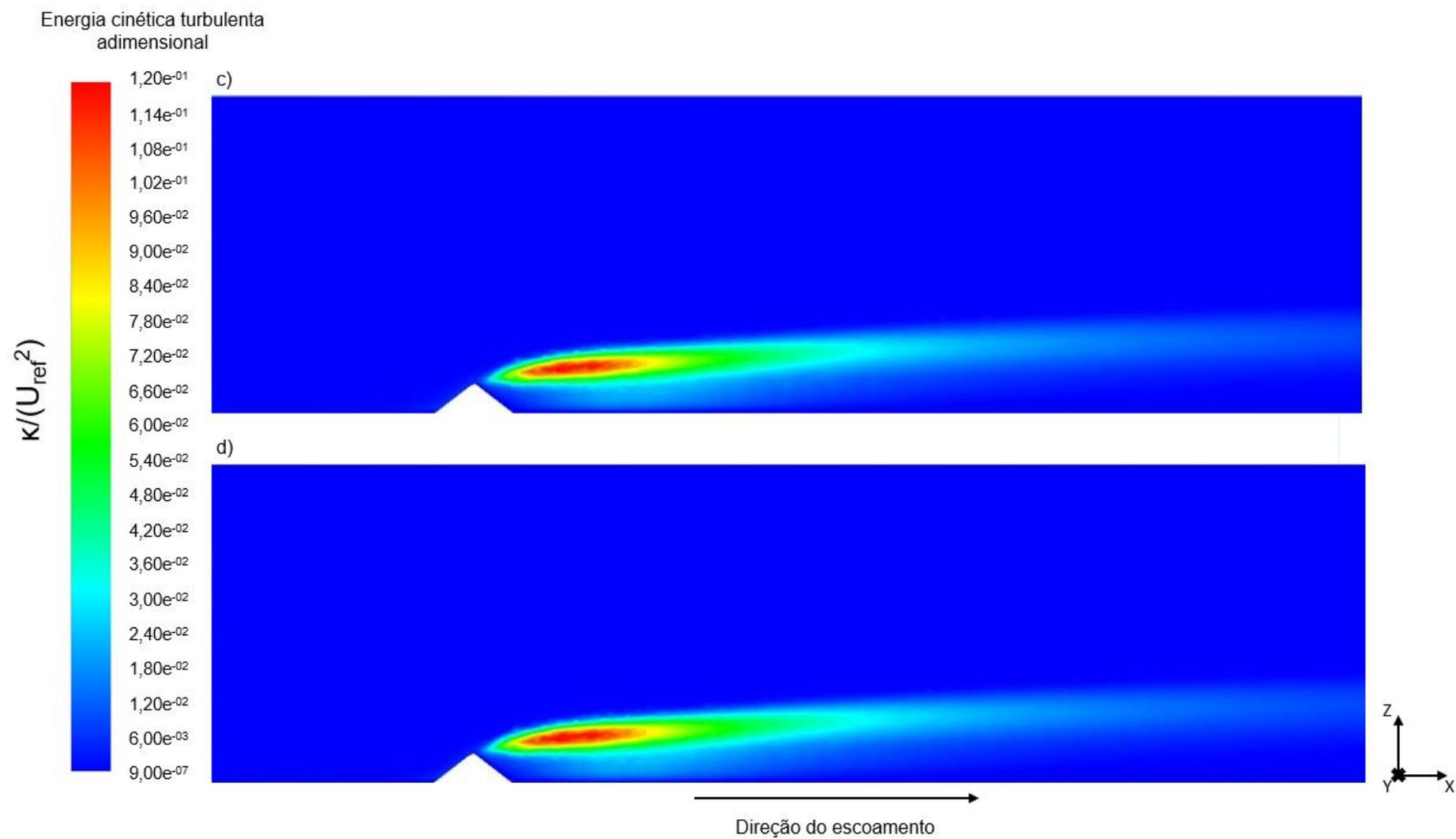
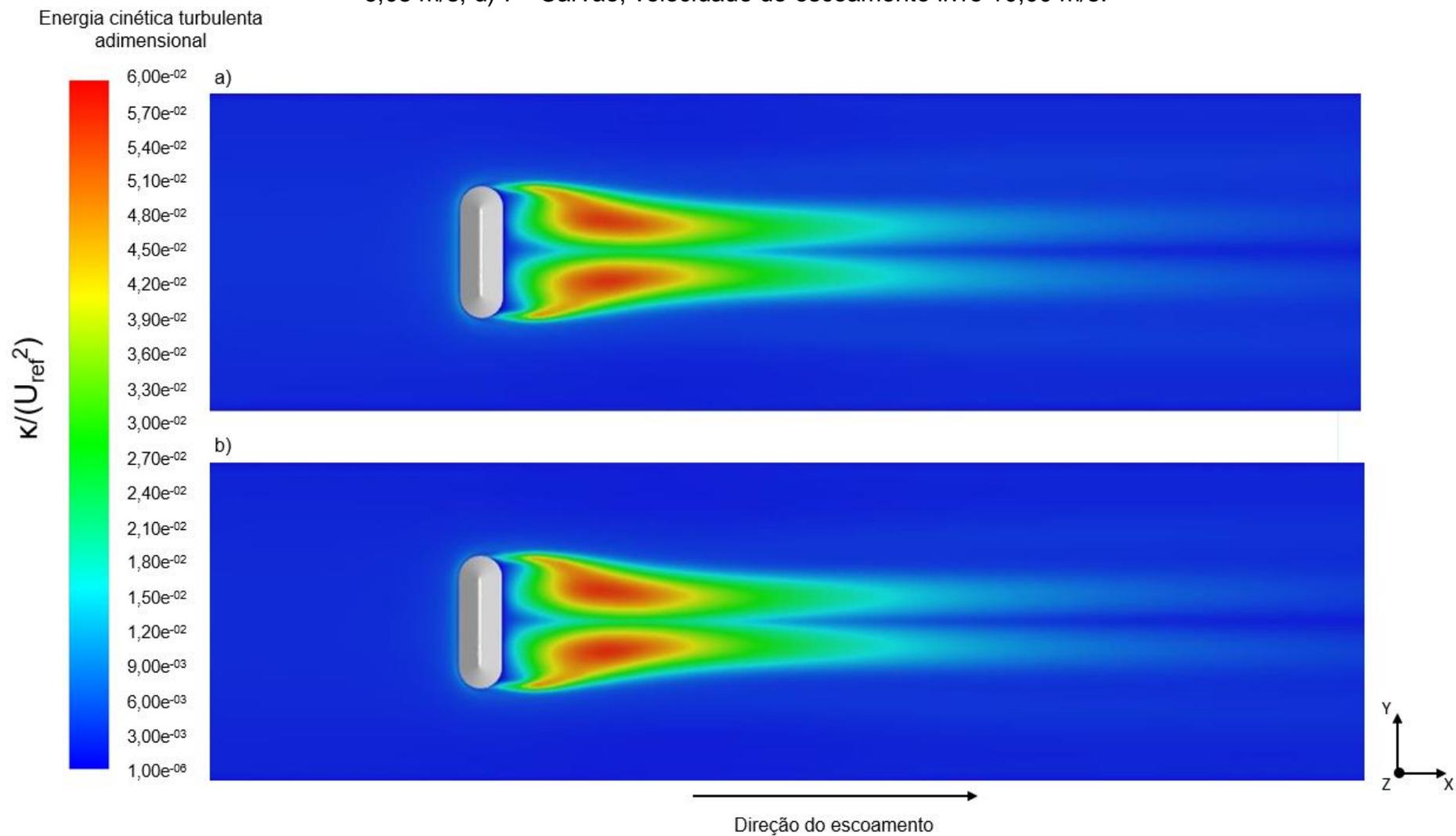
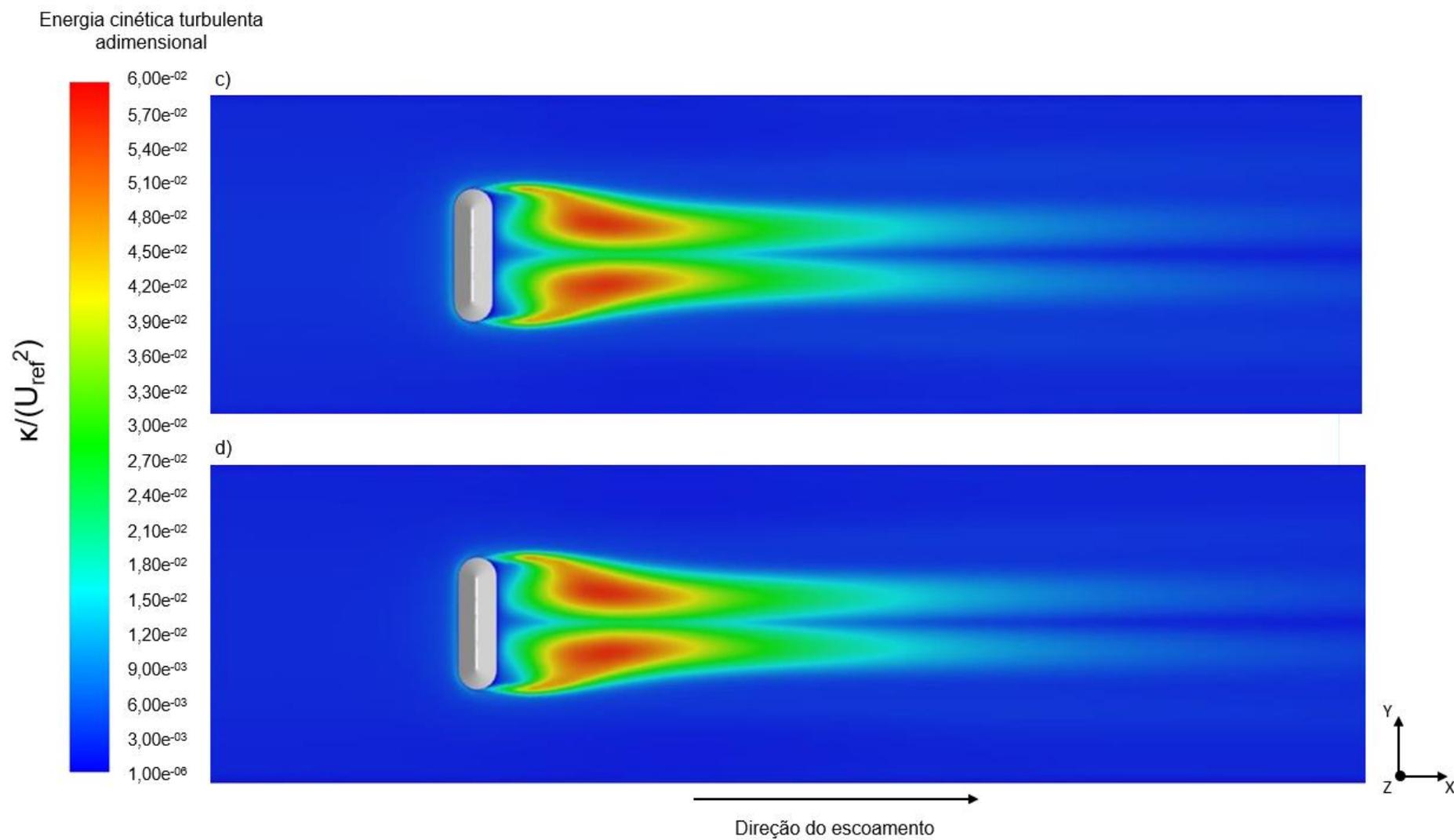


Figura 5-10: Contornos energia cinética turbulenta adimensional a $h/2$ m de altura para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.





5.1.2. Escoamento ao redor da pilha de estocagem orientada a 60° em relação à direção do vento

Os contornos de velocidade média adimensional do escoamento obtidos a 0,00125 m da superfície da pilha de estocagem podem ser observados na **Figura 5-11** para os Casos 2, 4, 6 e 8, e os contornos de velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha são apresentados na **Figura 5-12** para os mesmos casos.

De maneira semelhante à seção anterior, observa-se uma desaceleração do escoamento na zona anterior à pilha, e logo após uma aceleração do escoamento e aumento do gradiente de velocidade na superfície lateral, com os maiores valores de velocidade registrados na zona lateral voltada para o vento incidente e no topo da pilha. A região à sotavento da pilha de estocagem apresenta uma zona de menores valores de velocidade, e as *pathlines* traçadas na **Figura 5-13** ajudam a entender que se trata de uma zona de recirculação. Após essa zona de recirculação, têm-se o recolamento da camada limite e o escoamento retorna à sua direção inicial.

De maneira semelhante à seção anterior, o comportamento do gradiente de velocidade dentro do domínio é semelhante entre as situações, independente da velocidade do escoamento livre simulada.

A comparação entre os contornos e *pathlines* obtidos para os casos de pilha orientada a 90° e a 60° permite inferir que os valores de velocidade média foram maiores para a orientação a 60° do que para a orientação a 90°, e a zona de recirculação a sotavento do obstáculo foi diminuída.

Figura 5-11: Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s

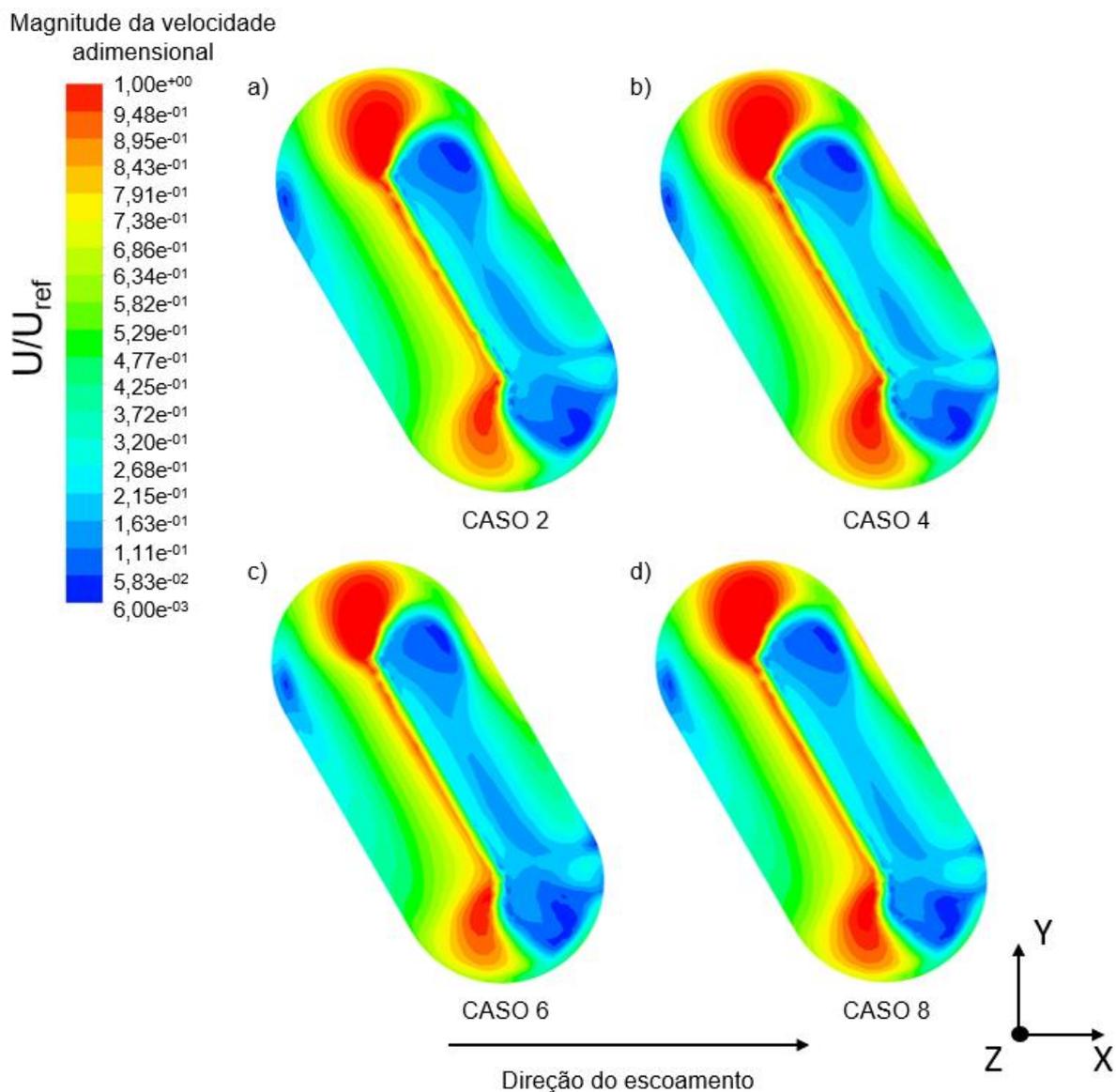
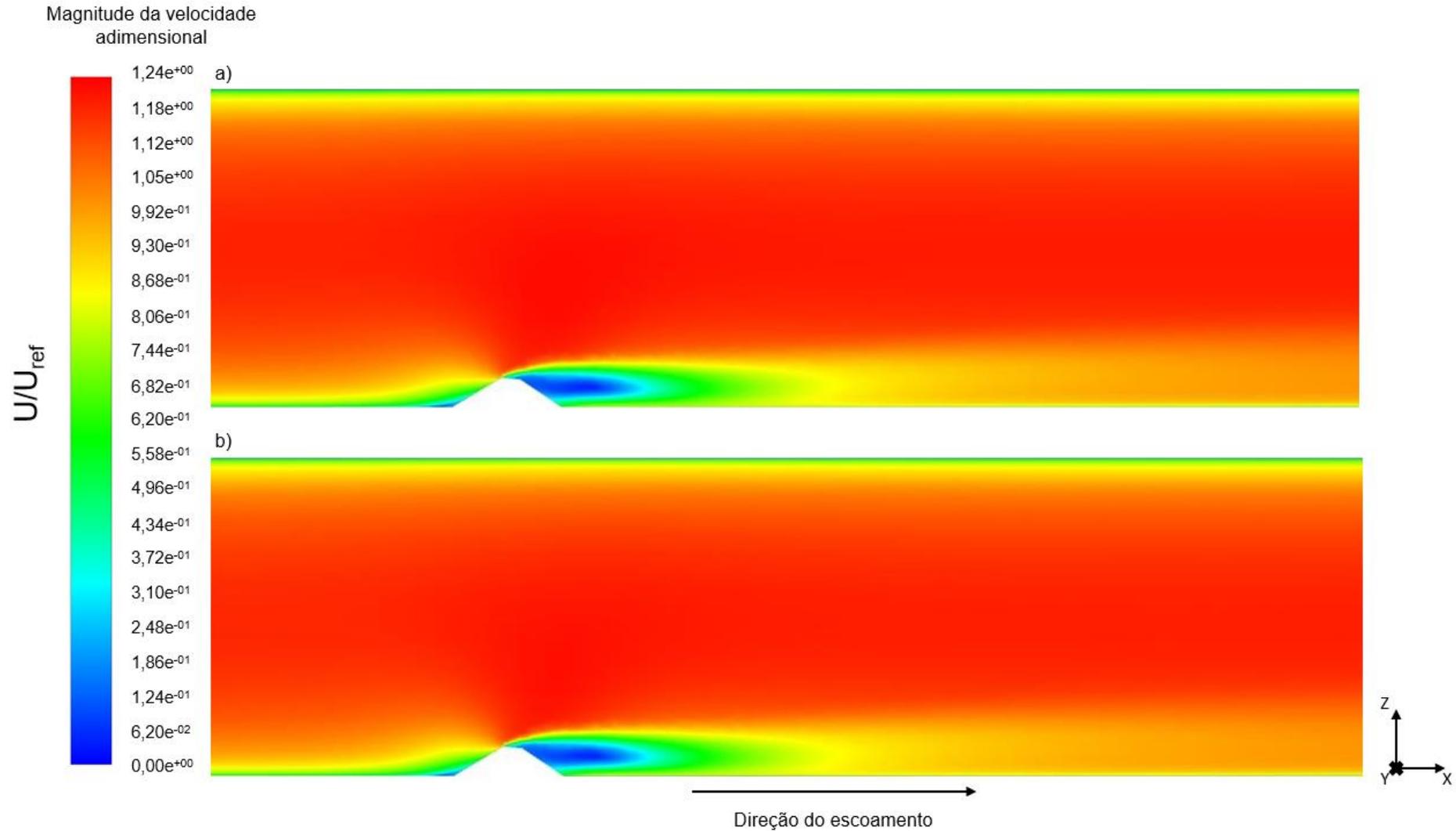


Figura 5-12: Seção transversal do contorno de velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha de estocagem para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 – Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.



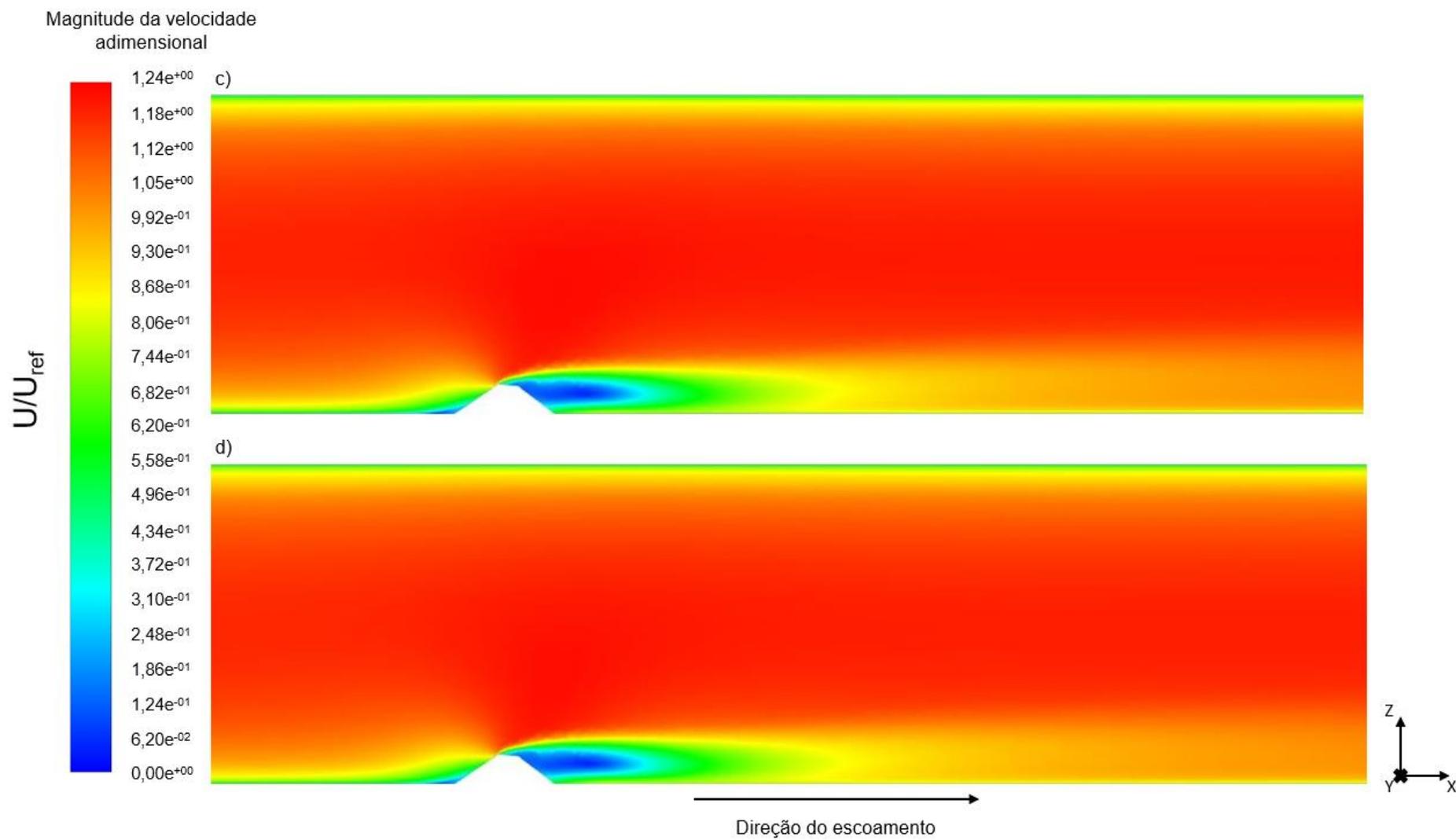
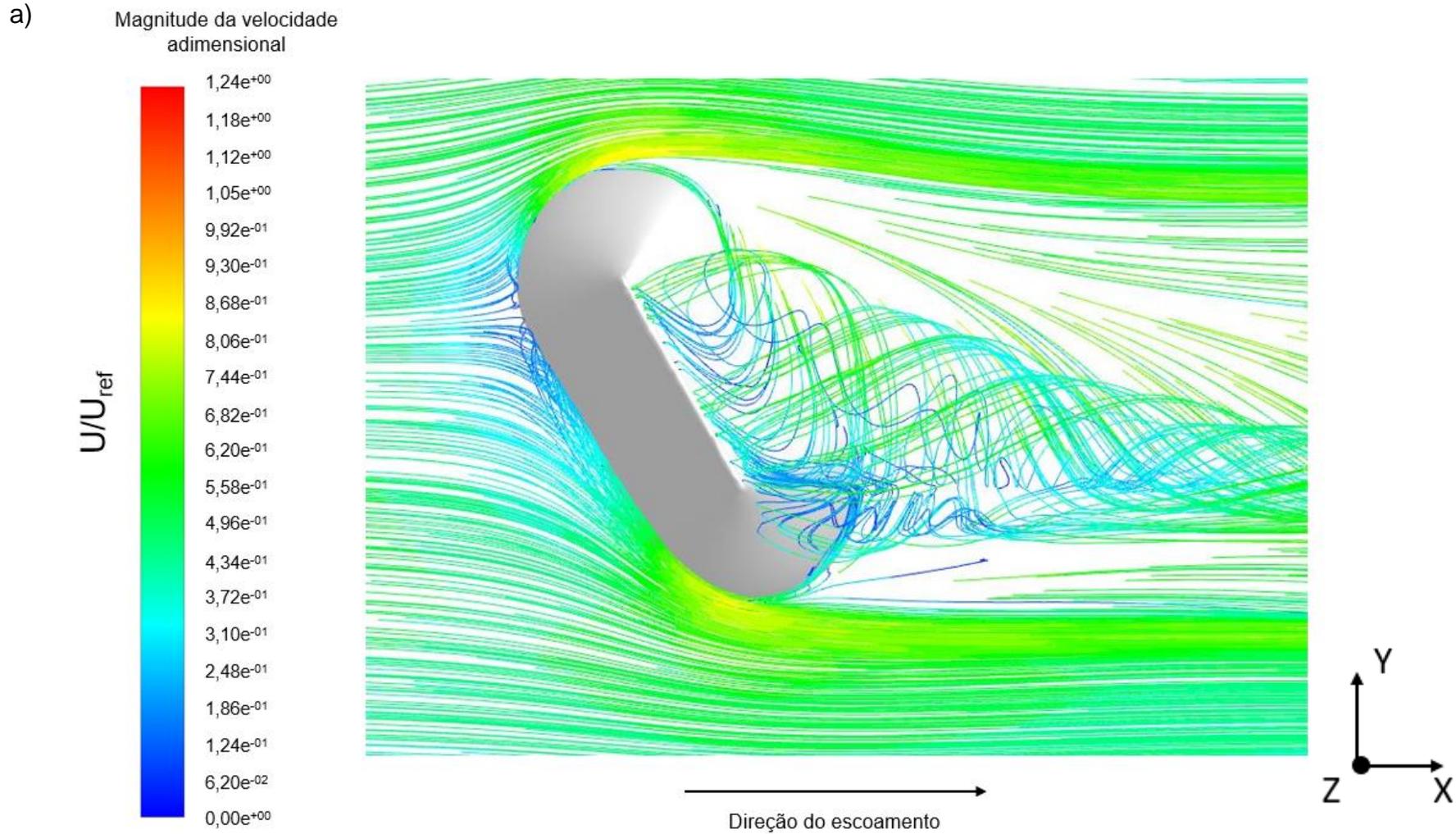
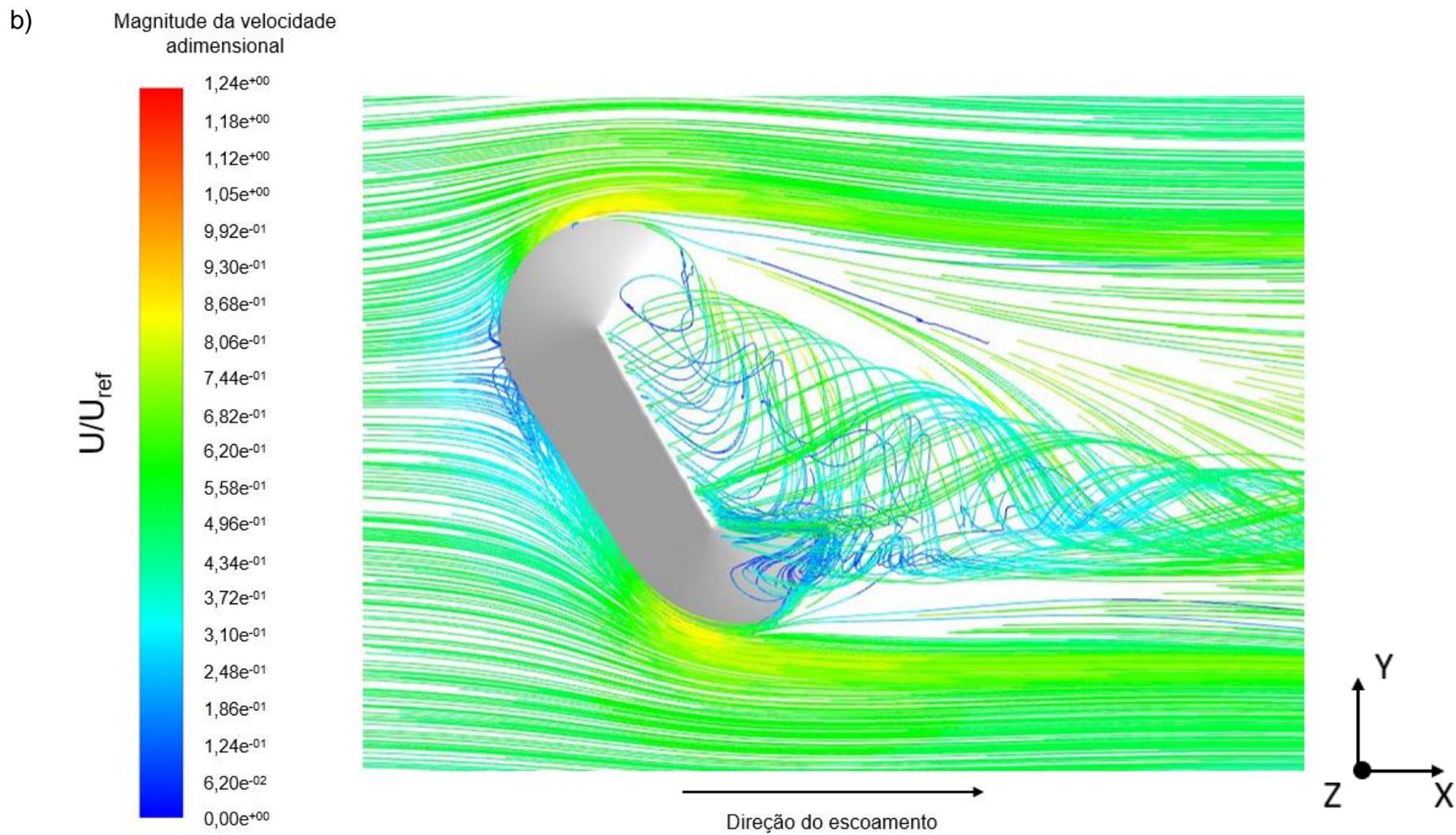
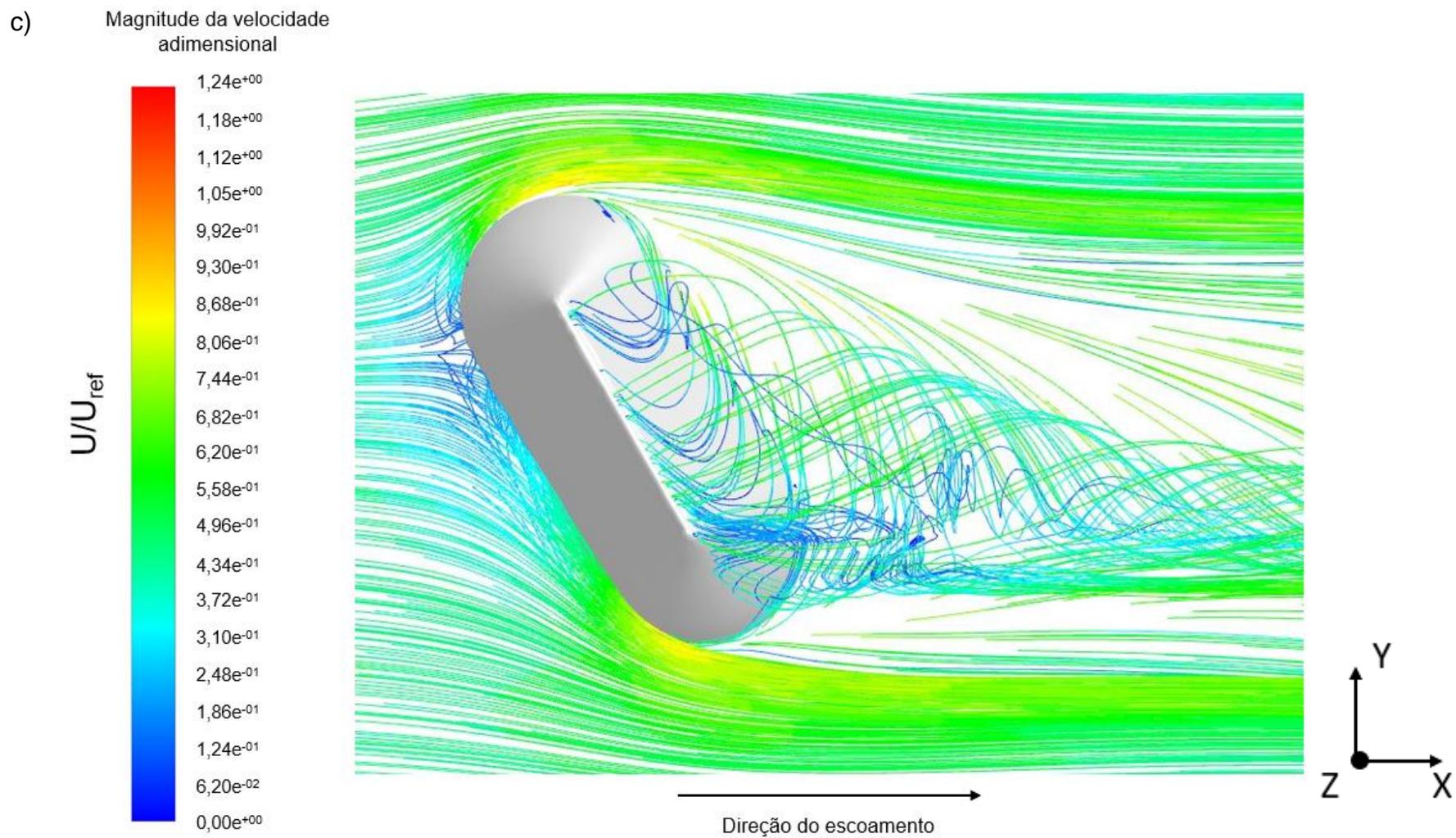
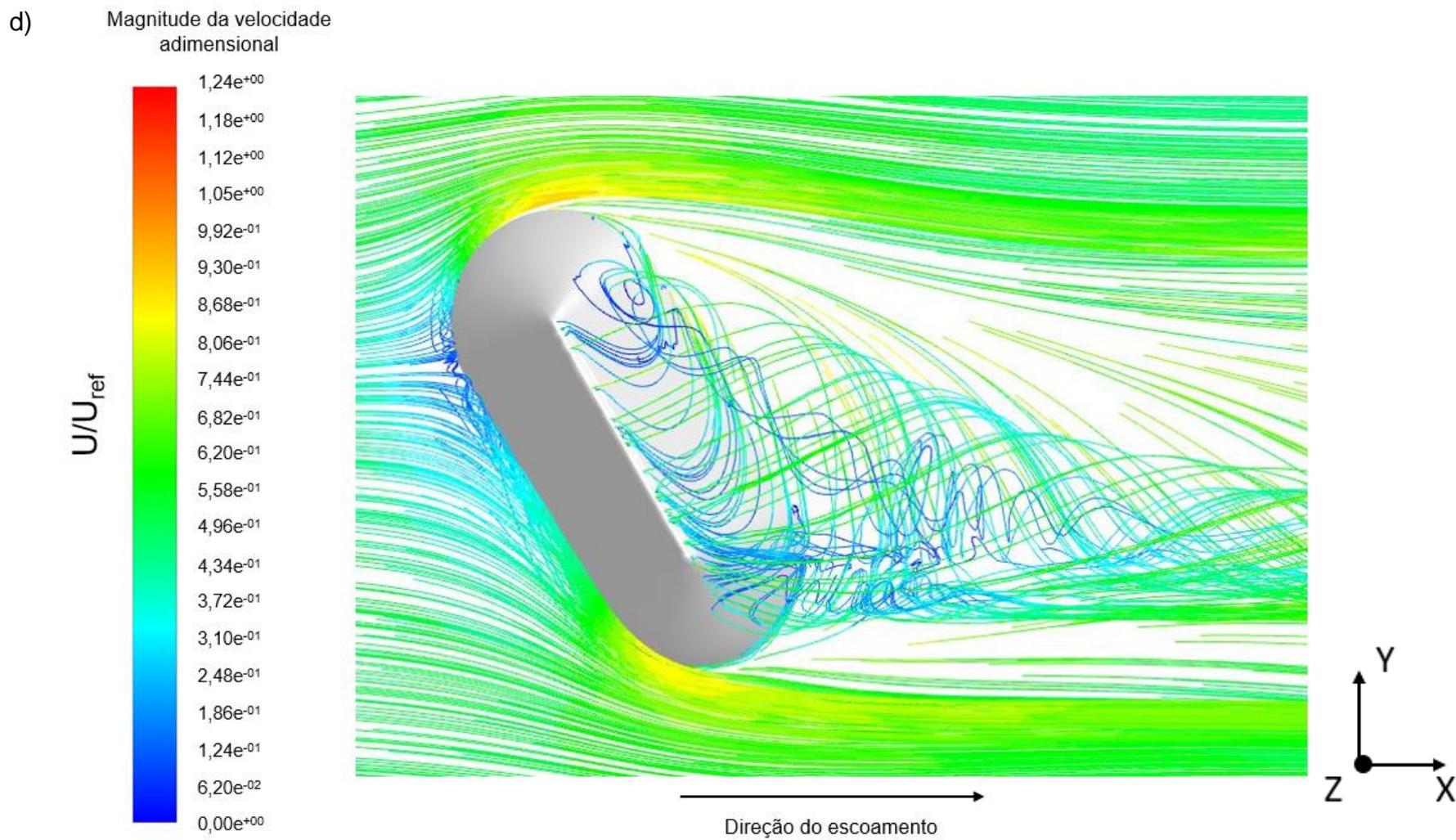


Figura 5-13: Vista superior de *pathlines* coloridas conforme velocidade média adimensional do escoamento ao redor da pilha de estocagem para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s









As **Figuras 5-14** e **5-15** ilustram as comparações entre os resultados obtidos no presente estudo e aqueles obtidos no trabalho de Turpin e Harion (2009). Nota-se que no trabalho citado também foram encontrados os fenômenos de aceleração do escoamento e aumento do gradiente de velocidade nas laterais da pilha, bem como o registro de maiores valores de velocidade no topo, e ainda uma zona de menor velocidade à sotavento da pilha. Também foi observada uma zona de recirculação após o obstáculo, com registros de menores valores de velocidade, e é possível visualizar a maneira como as *pathlines* diferem das simuladas para pilhas a 90°.

Figura 5-14: a) Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,25 m da superfície da pilha para o estudo de Turpin e Harion (2009) (b) Contornos de velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para o Caso 2 do presente estudo.

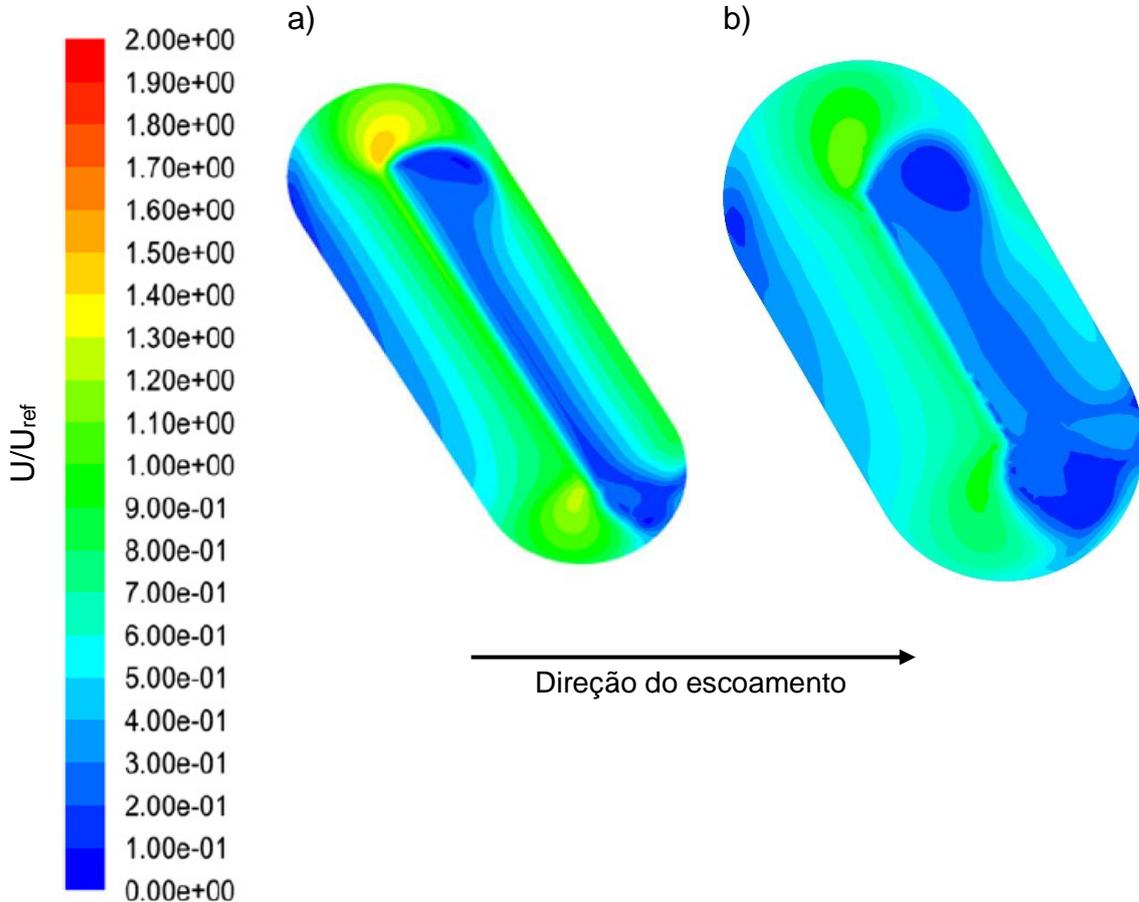
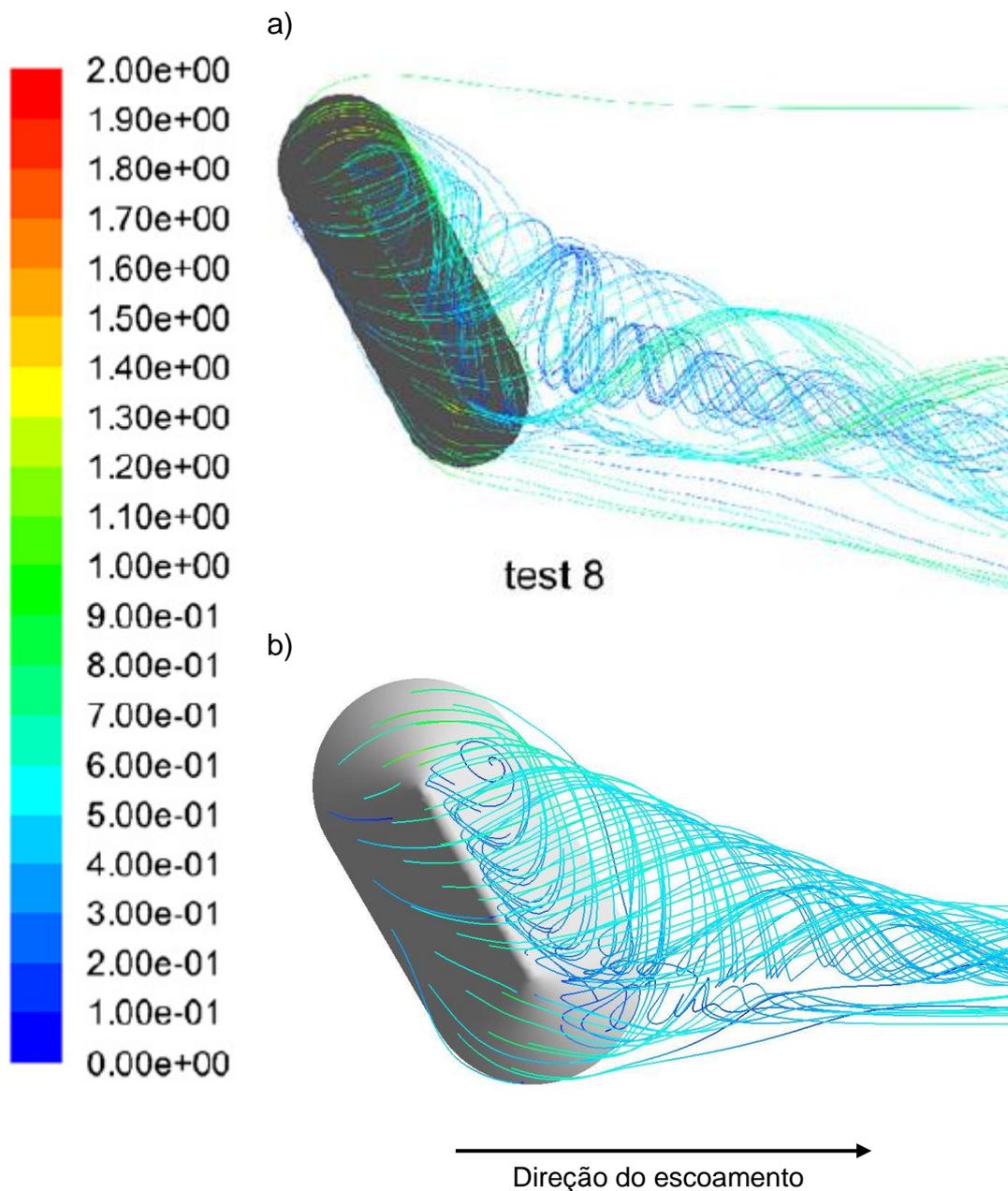
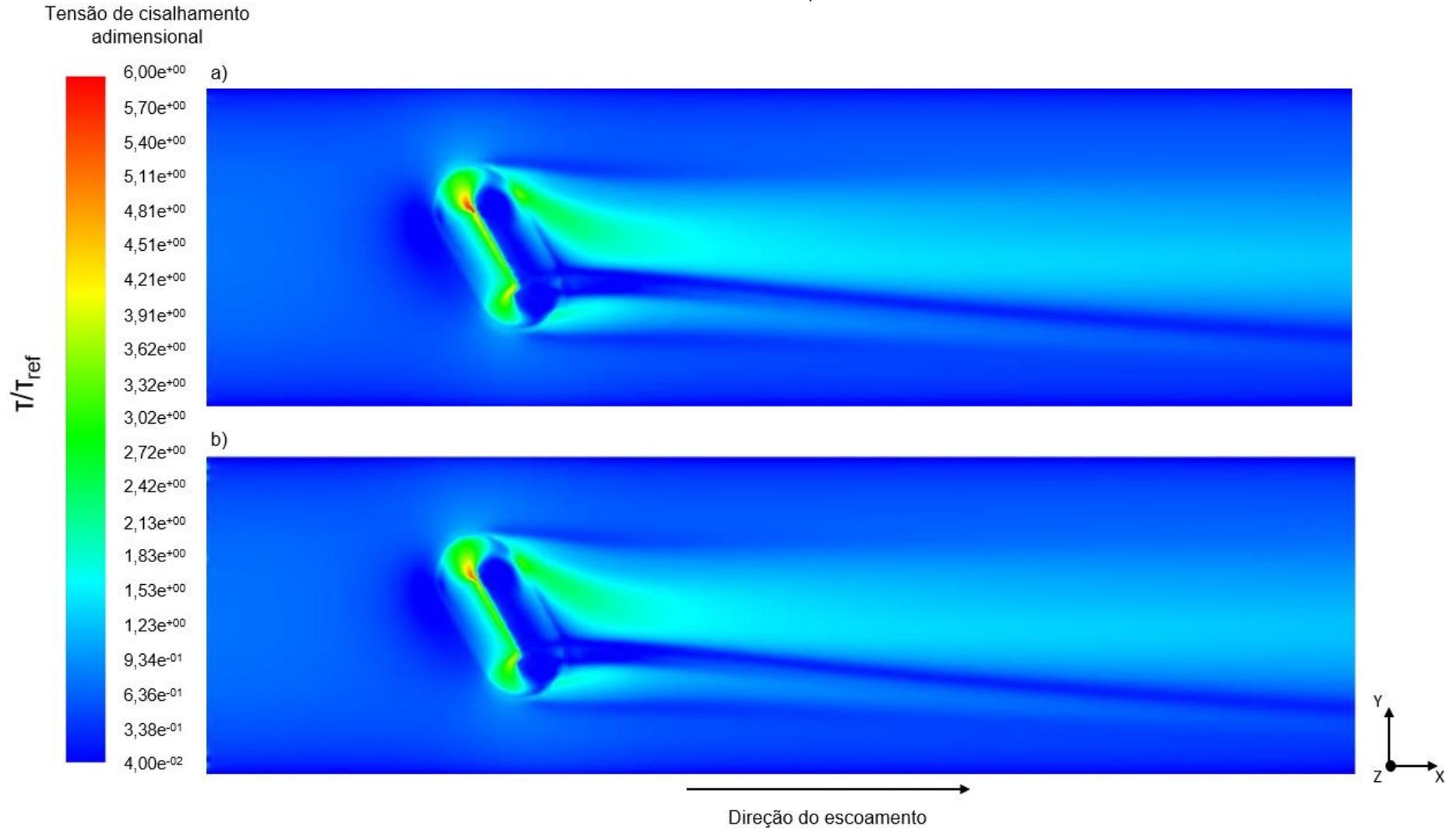


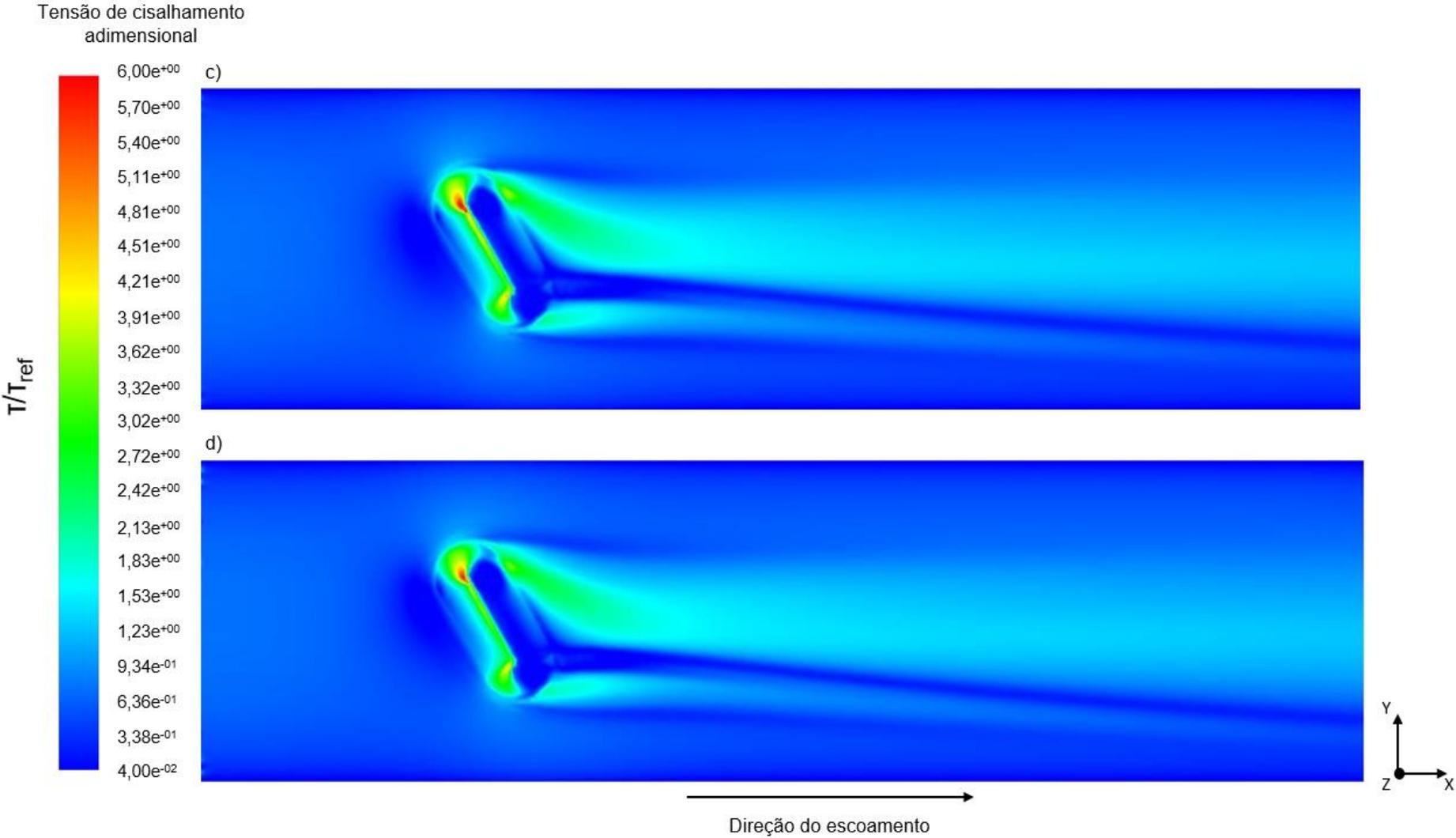
Figura 5-15: (a) Vista superior das *pathlines* coloridas pela velocidade média adimensional do escoamento a 0,25 m da superfície da pilha para o estudo de Turpin e Harion (2009) (b) Vista superior das *pathlines* coloridas pela velocidade média adimensional do escoamento a 0,00125 m da superfície da pilha para o Caso 2 do presente estudo.



A **Figura 5-16** apresenta os contornos da tensão de cisalhamento adimensional sobre a superfície da pilha de estocagem para os Casos 2, 4, 6 e 8. Os maiores valores de tensão de cisalhamento foram encontrados nas laterais da pilha que estão sujeitas ao vento incidente, sobrepondo-se às regiões de maior aceleração do escoamento. Além disso, nota-se um maior contorno de tensão de cisalhamento adimensional máxima, indicando que os valores encontrados para a pilha orientada a 60° foram maiores do que os encontrados para a pilha orientada a 90° .

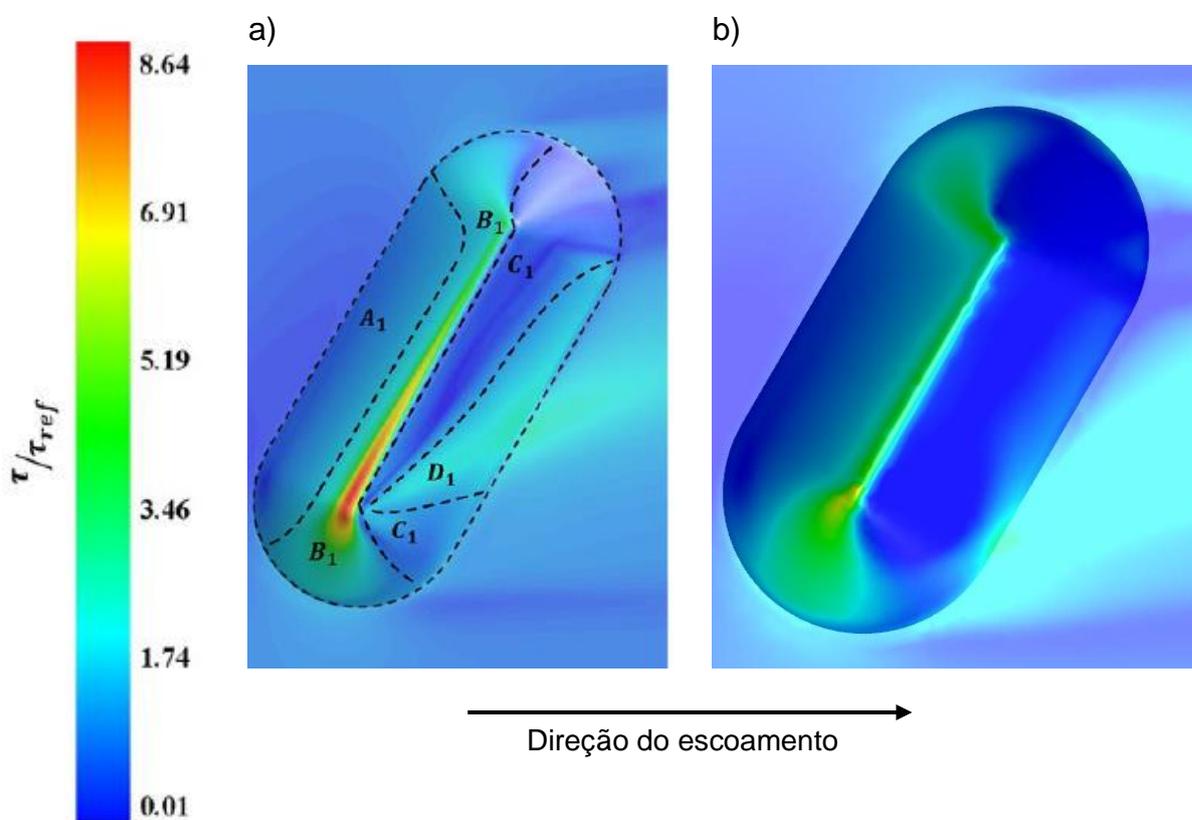
Figura 5-16: Contornos de tensão de cisalhamento para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.





Os contornos de tensão de cisalhamento ao redor da pilha de estocagem obtidos no presente estudo podem ser comparados ao obtido por Ferreira *et al.* (2019), conforme **Figura 5-17**. Percebe-se o mesmo comportamento das tensões no topo da pilha, onde a região do topo cuja face está inclinada para o vento incidente possui maiores valores, enquanto a região do topo que está inclinada para o lado oposto apresenta menores valores de tensão em relação à primeira. Ressalta-se que o estudo de Ferreira *et al.* (2019) analisou o escoamento ao redor de uma pilha de estocagem de topo arredondado, enquanto presente estudo considerou uma pilha de estocagem de topo pontiagudo.

Figura 5-17: (a) Contornos de tensão de cisalhamento para o estudo de Ferreira *et al.* (2019) (b) Contornos de tensão de cisalhamento para o Caso 2 do presente estudo.

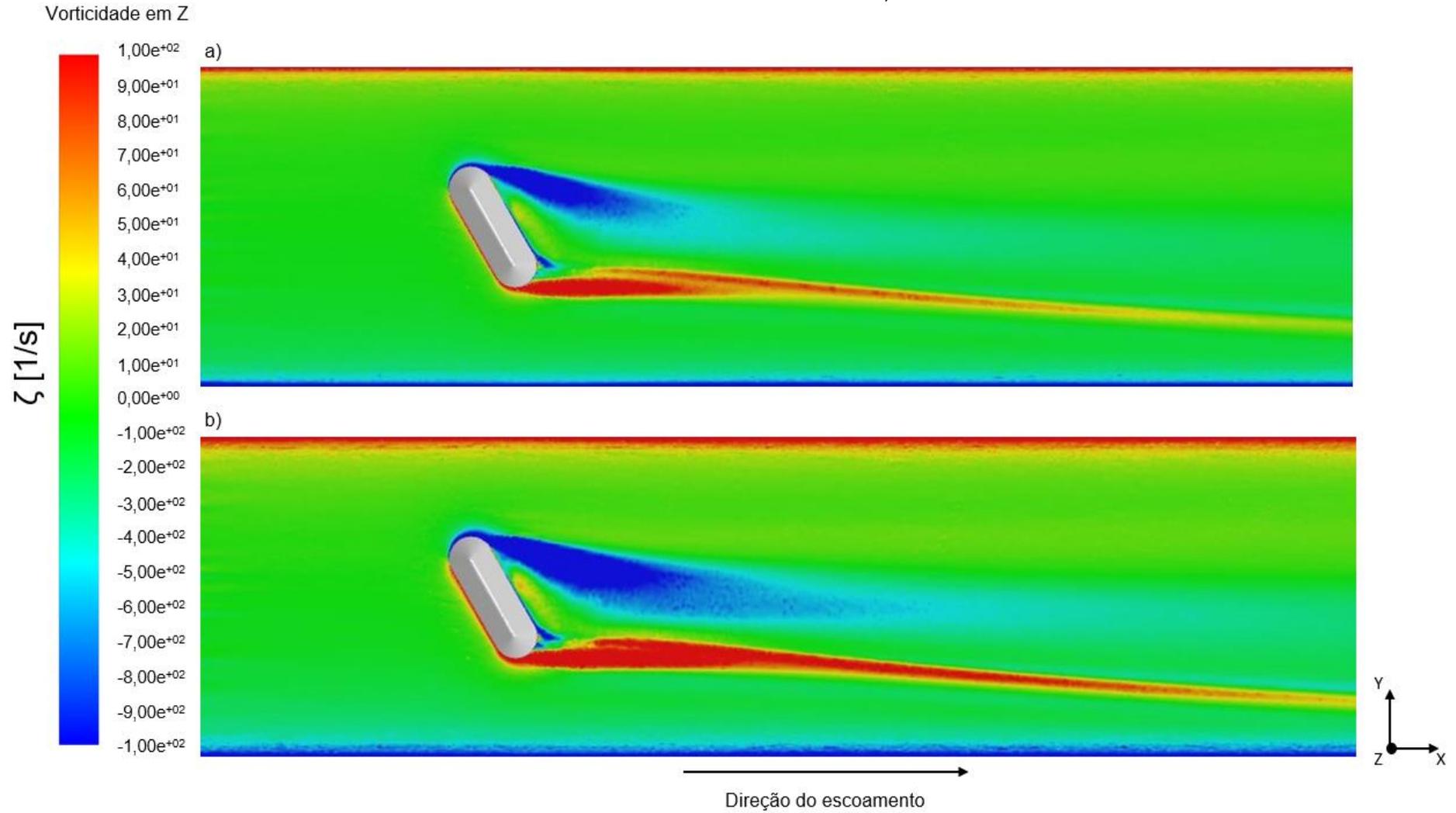


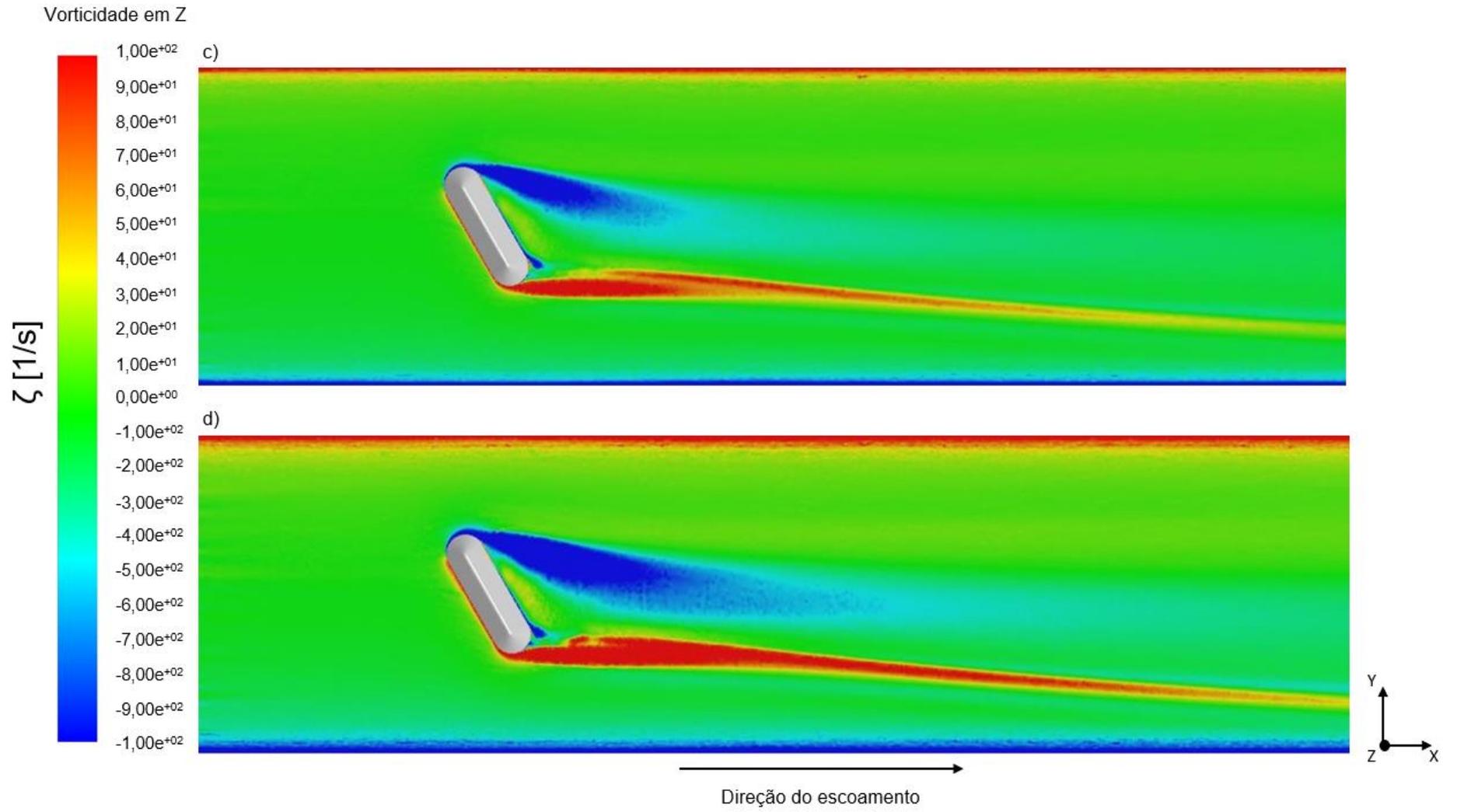
A vorticidade é definida por Fox, McDonald e Pritchard (2015) como uma medida da rotação de um elemento fluido conforme ele se move no campo de escoamento, e pode ser definida através da **Equação 18**.

$$\zeta = \nabla \times \vec{V} \quad (18)$$

A **Figura 5-18** traz a componente Z da vorticidade em um plano XY a uma altura $h/2$ m para os casos avaliados nesse estudo. É possível visualizar uma divisão nos sentidos da vorticidade na região posterior à pilha, com rotação no sentido horário na metade superior da pilha, e anti-horário na metade inferior. Entende-se, portanto, que a parcela de fluido rotaciona de maneira a ir ao encontro da superfície da pilha, gerando duas zonas de recirculação de sentidos opostos, o que corrobora a situação visualizada na **Figura 5-13**. A estrutura de vórtices na região após a pilha cria a zona de recirculação, com menores valores de velocidade. Além disso, é possível identificar que o aumento da velocidade do escoamento é responsável pela geração de uma região de recirculação de maior tamanho do que a observada no escoamento de menor velocidade. A comparação entre os contornos de vorticidade obtidos para os casos de pilha orientada a 90° e a 60° permite inferir que a zona de recirculação na pilha de orientação a 60° tem tamanho reduzido quando comparada à de 90° .

Figura 5-18: Contornos de vorticidade em Z a $h/2$ m de altura para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s



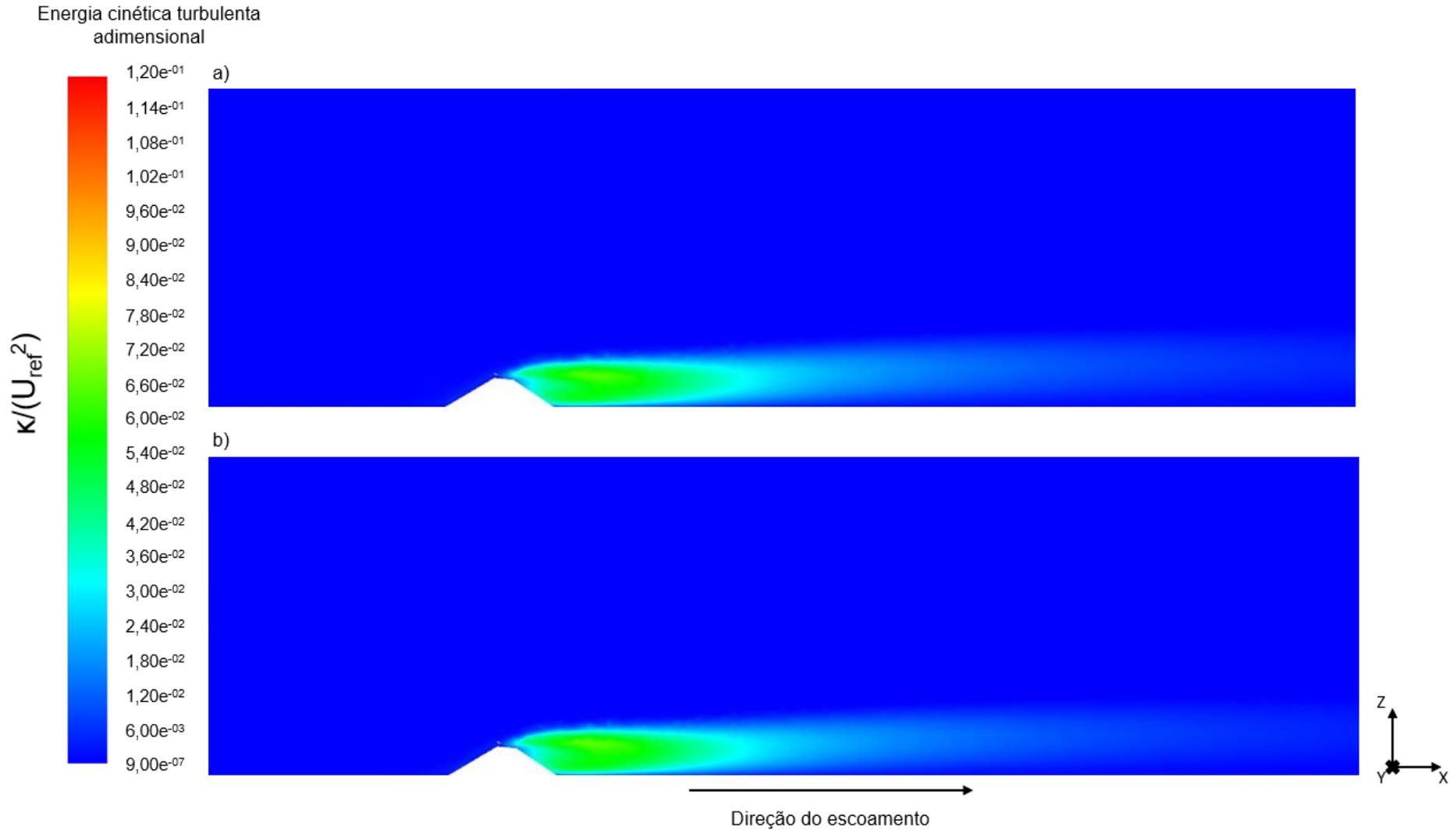


Wilcox (1993) define a energia cinética turbulenta como a flutuação da energia cinética por unidade de massa, conforme **Equação 19**.

$$\kappa = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (19)$$

As **Figuras 5-19** e **5-20** trazem os contornos de energia cinética turbulenta em um plano vertical que atravessa a metade da pilha e em um plano a uma altura $h/2$ m acima do chão do domínio, respectivamente. Nota-se os elevados valores de energia cinética turbulenta na zona de recirculação do escoamento, caracterizada pela presença de vórtices. Conforme o escoamento se afasta do obstáculo, há uma retomada de seus valores médios e diminuição da energia cinética turbulenta.

Figura 5-19: Contornos de energia cinética turbulenta adimensional para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s



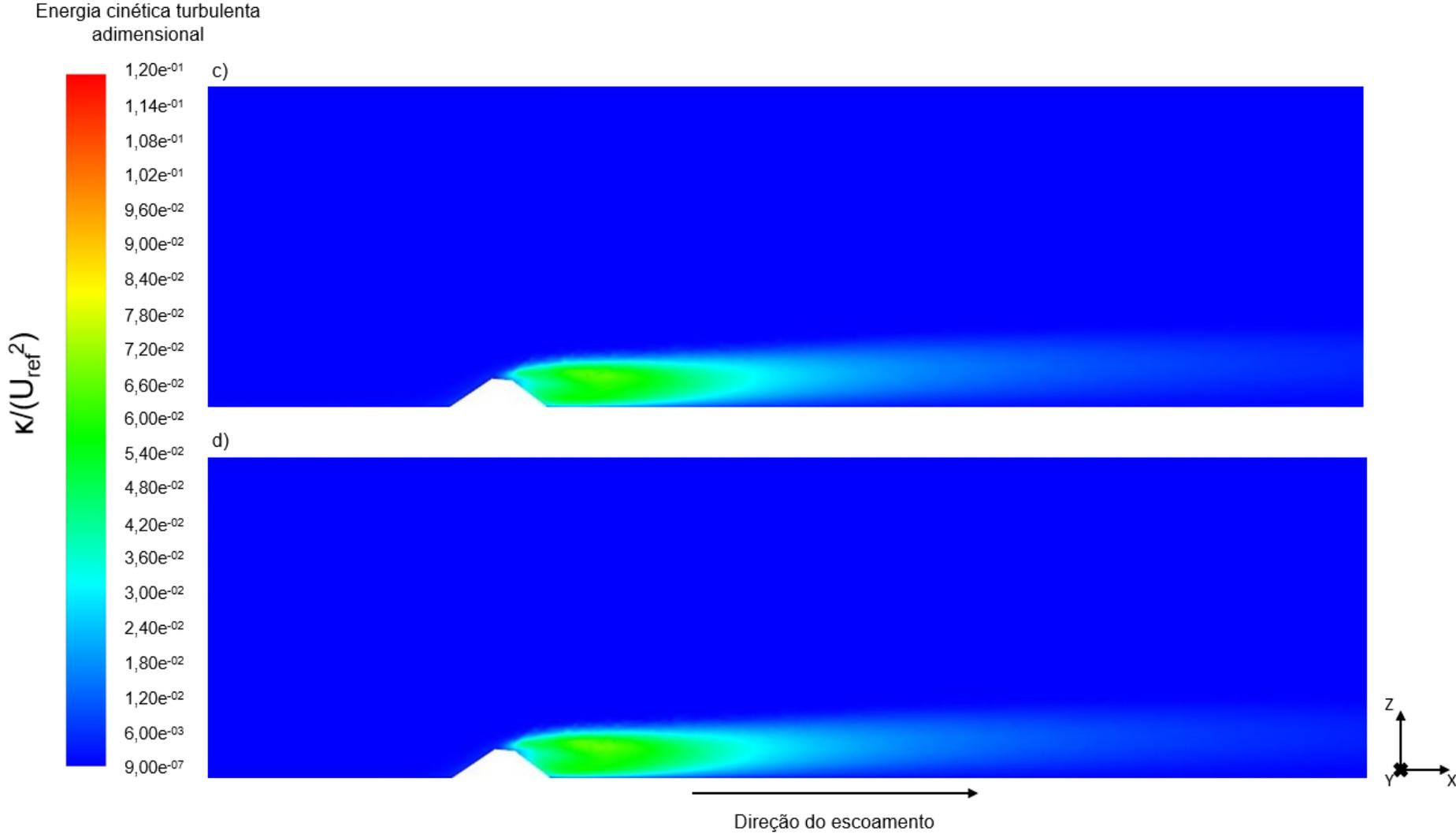
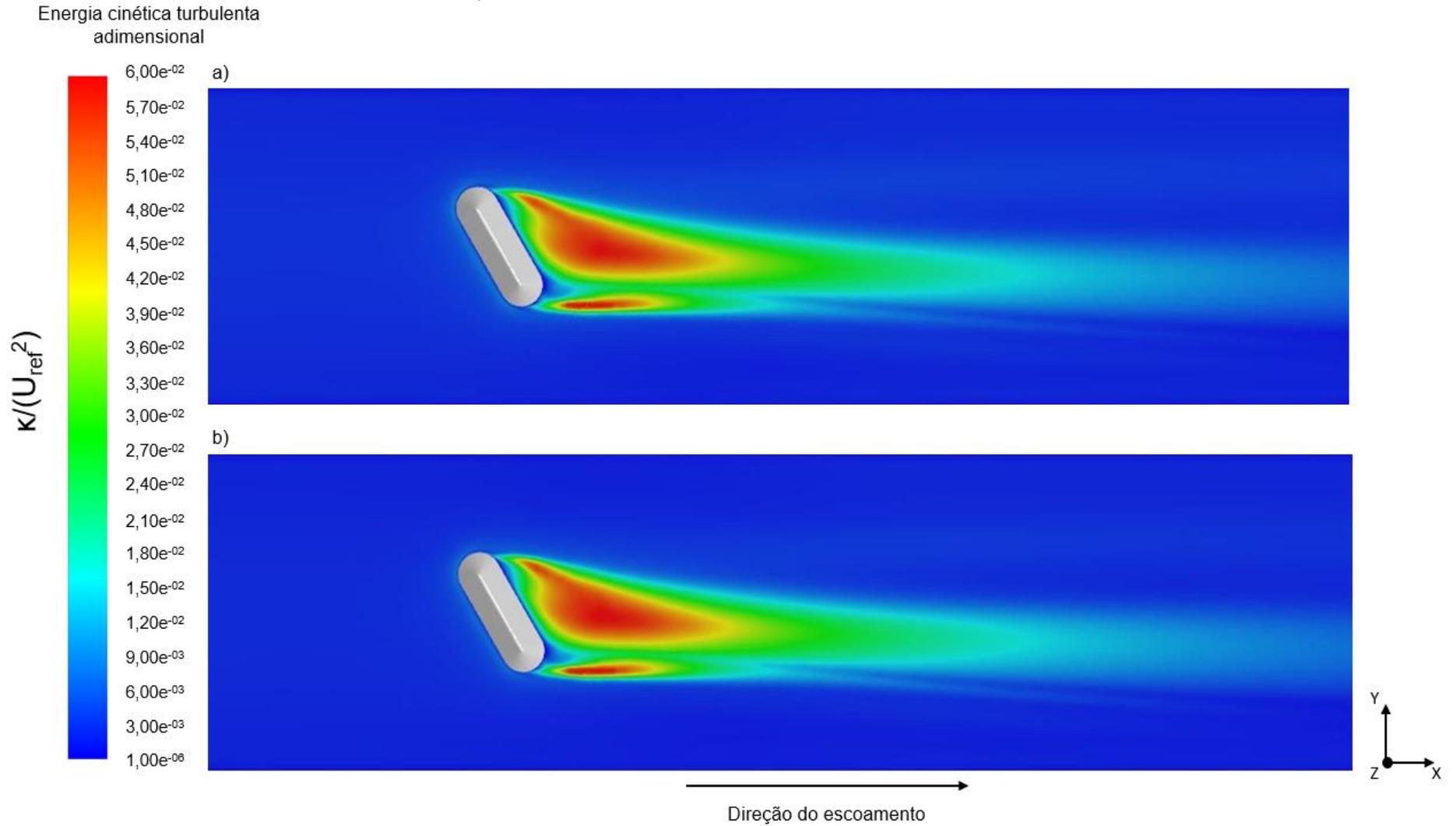
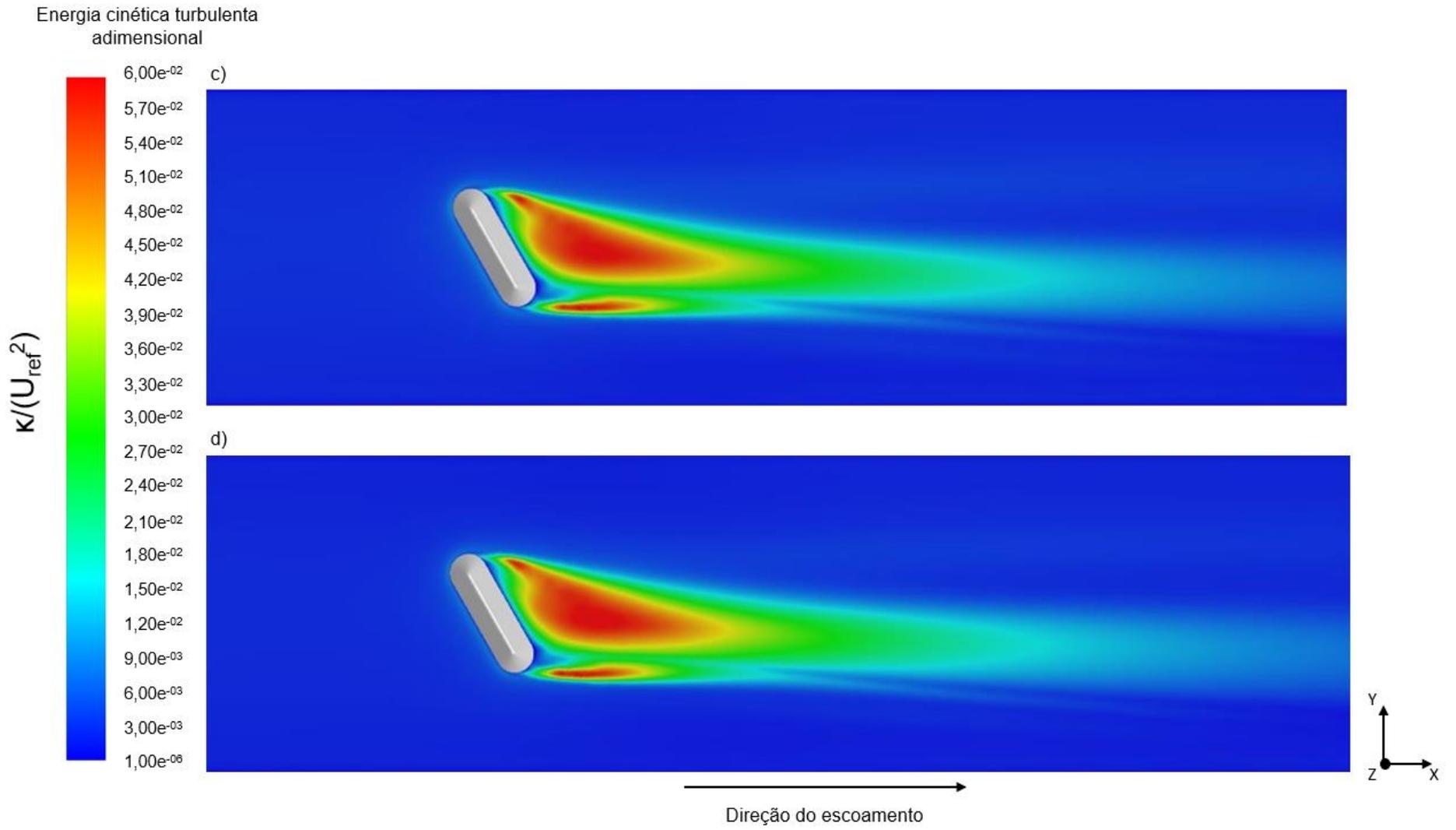


Figura 5-20: Contornos energia cinética turbulenta adimensional a $h/2$ m de altura para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.





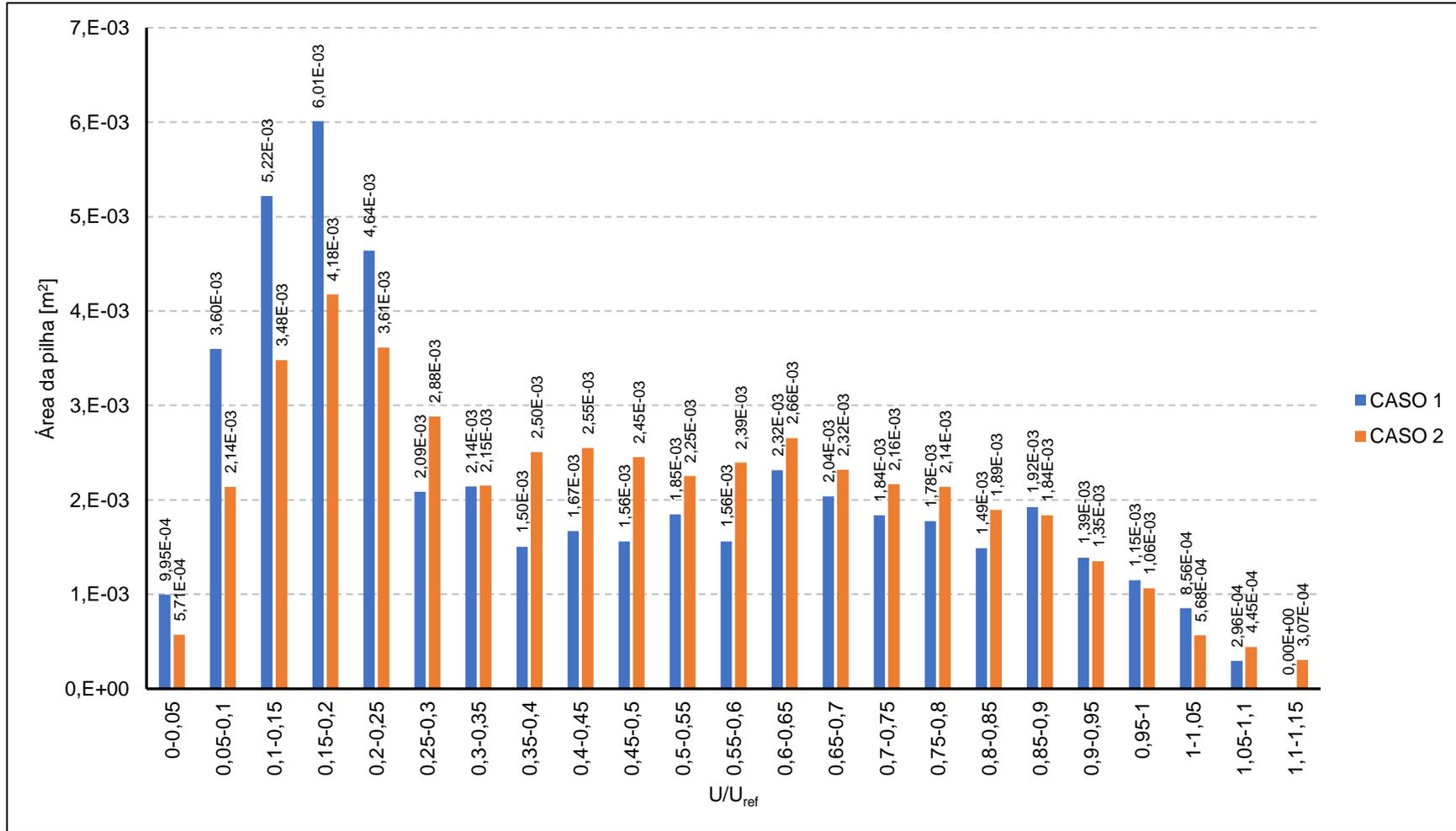
5.1.3. Comparação entre valores de velocidade

Uma análise qualitativa dos contornos de velocidade média adimensional sobre as pilhas de estocagem para os 8 casos testados, apresentados nas duas seções anteriores, permite inferir que os valores de velocidade média incidente nas pilhas foram maiores nos casos de orientação a 60° em relação à direção do vento do que nos casos de orientação a 90° .

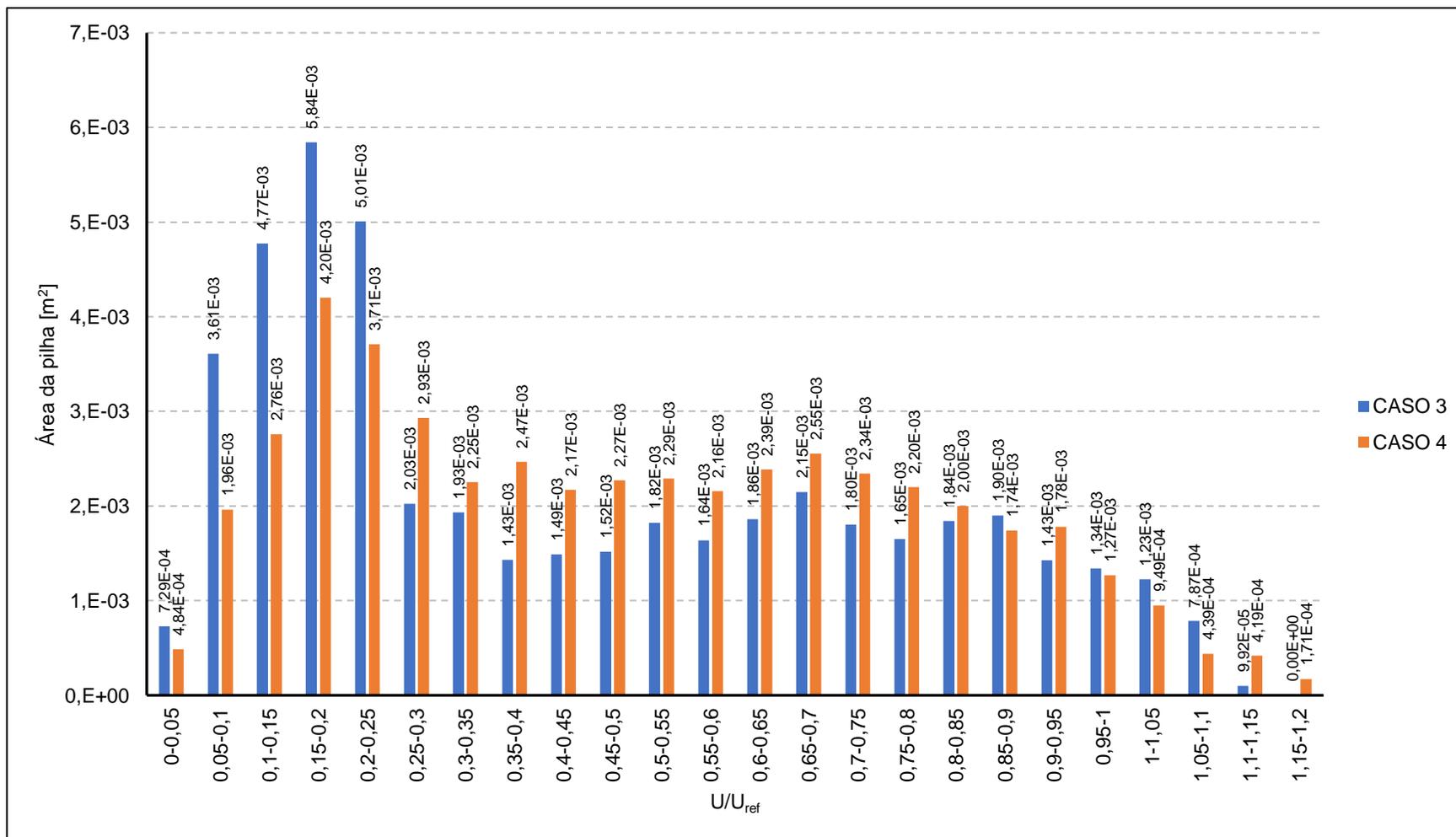
De maneira a apresentar uma análise quantitativa desse fato, a **Figura 5-21** traz os histogramas de velocidade incidente sobre a área da pilha, com comparação entre pilhas de mesmo material e velocidade do vento e apenas com alteração do ângulo de incidência do vento. Observando principalmente as duas últimas classes de velocidade de cada histograma, que representam os maiores valores de velocidade média adimensional registrados, nota-se que os valores de velocidade na orientação a 90° são zero ou mais baixos do que os registrados na orientação a 60° .

Figura 5-21: Histograma de velocidade média adimensional do vento sobre a área da pilha de estocagem, com comparação entre os casos (a) Caso 1 e Caso 2; (b) Caso 3 e Caso 4; (c) Caso 5 e Caso 6; (d) Caso 7 e Caso 8.

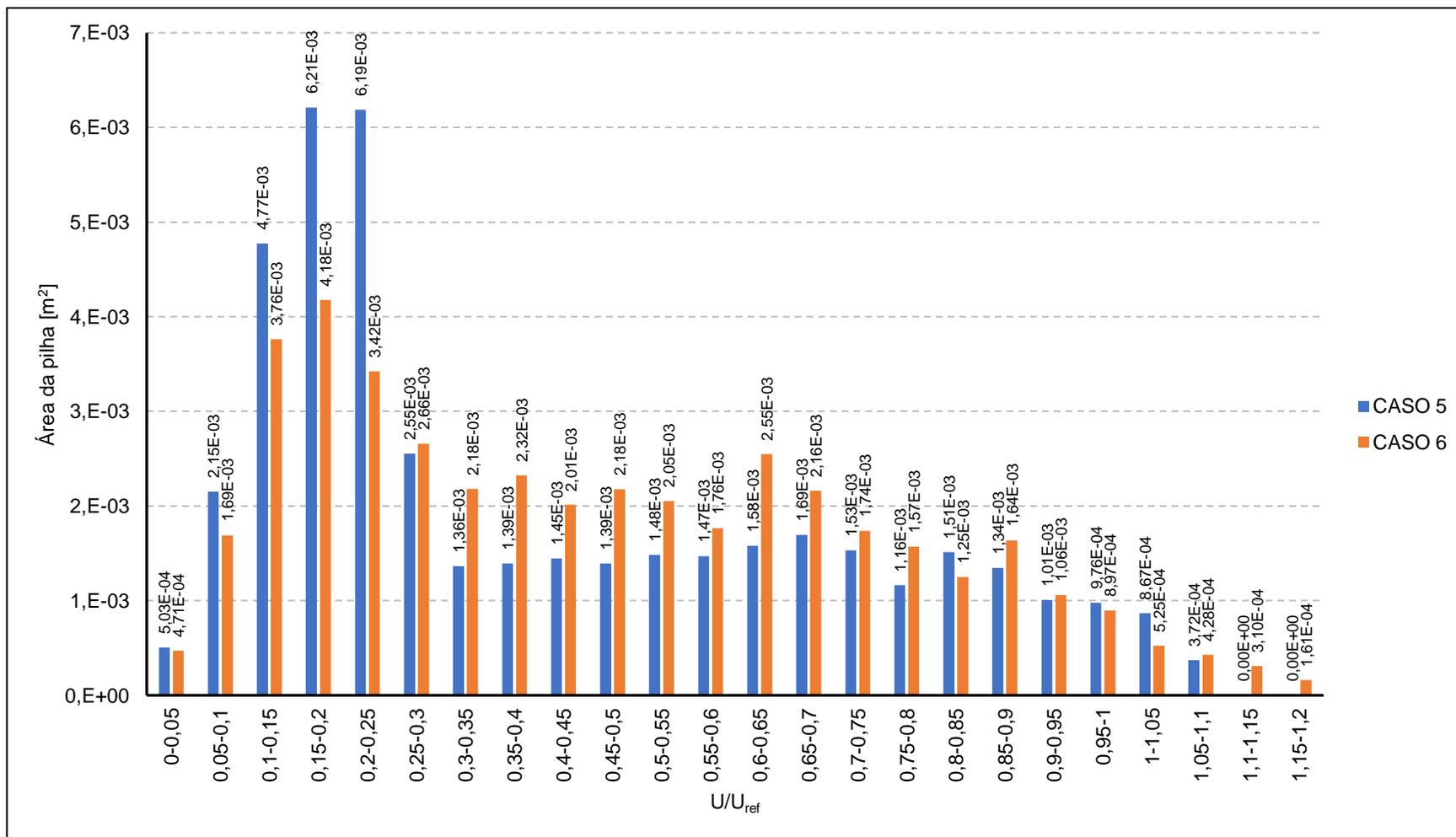
a)



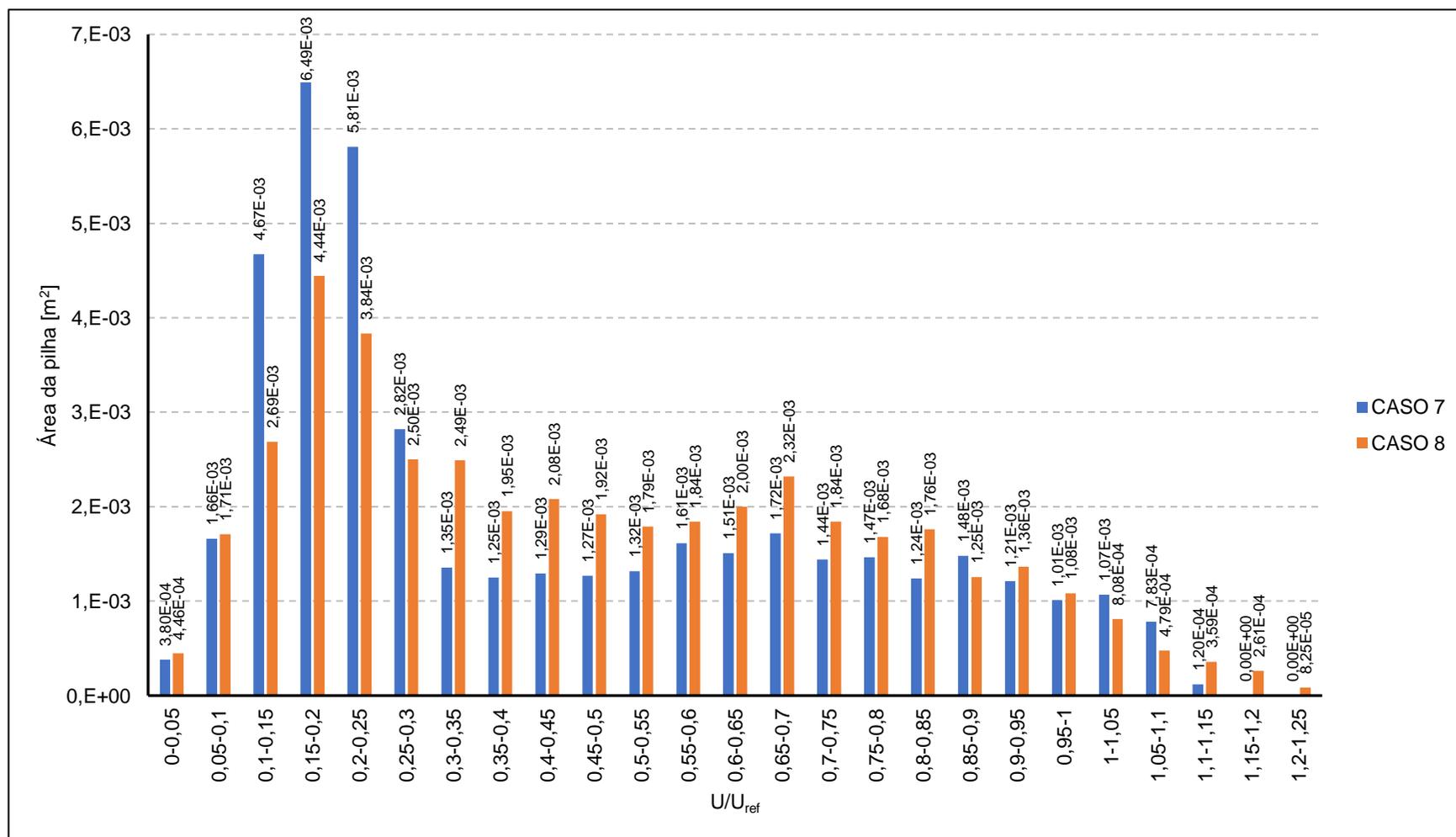
b)



c)



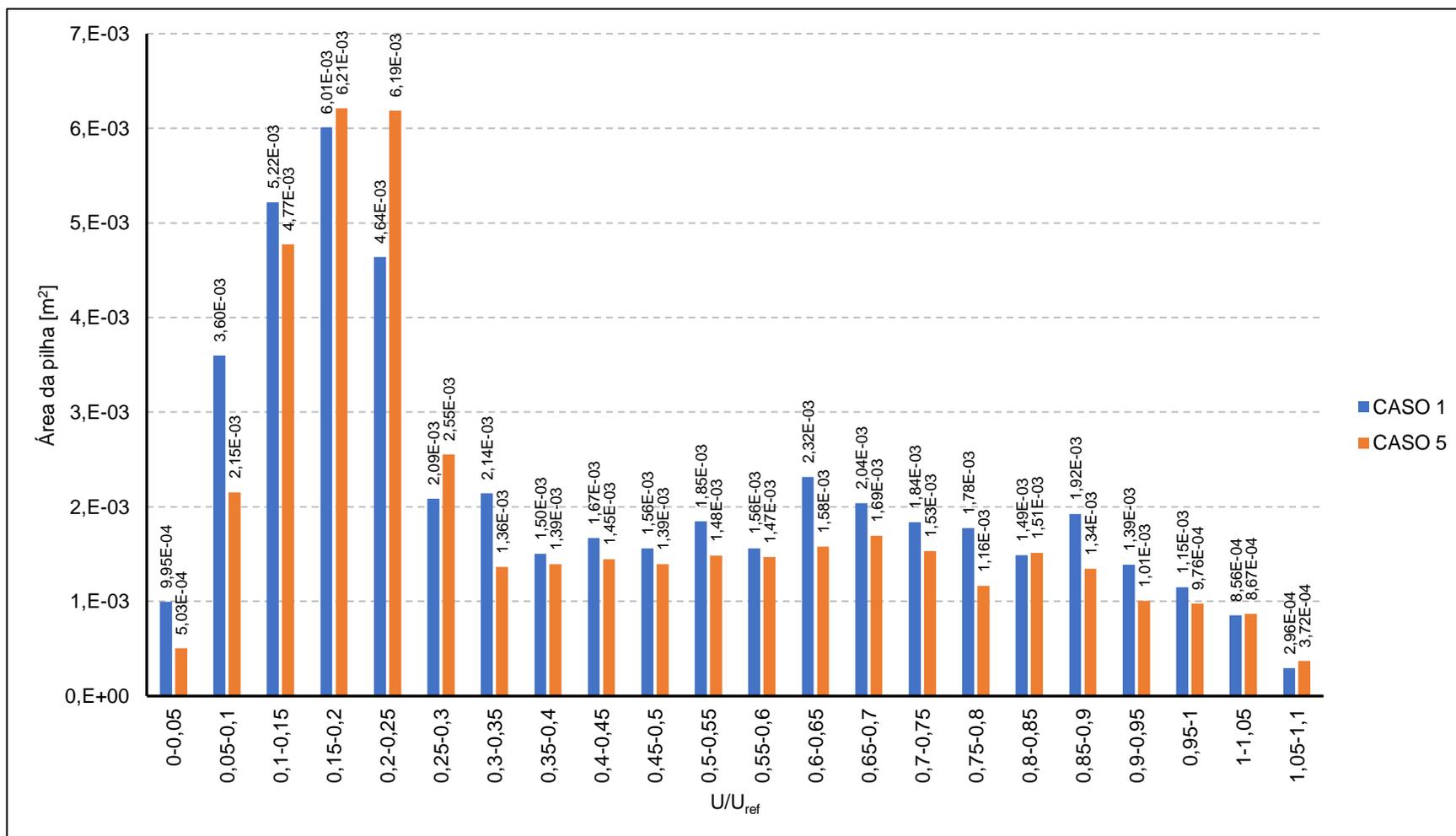
d)



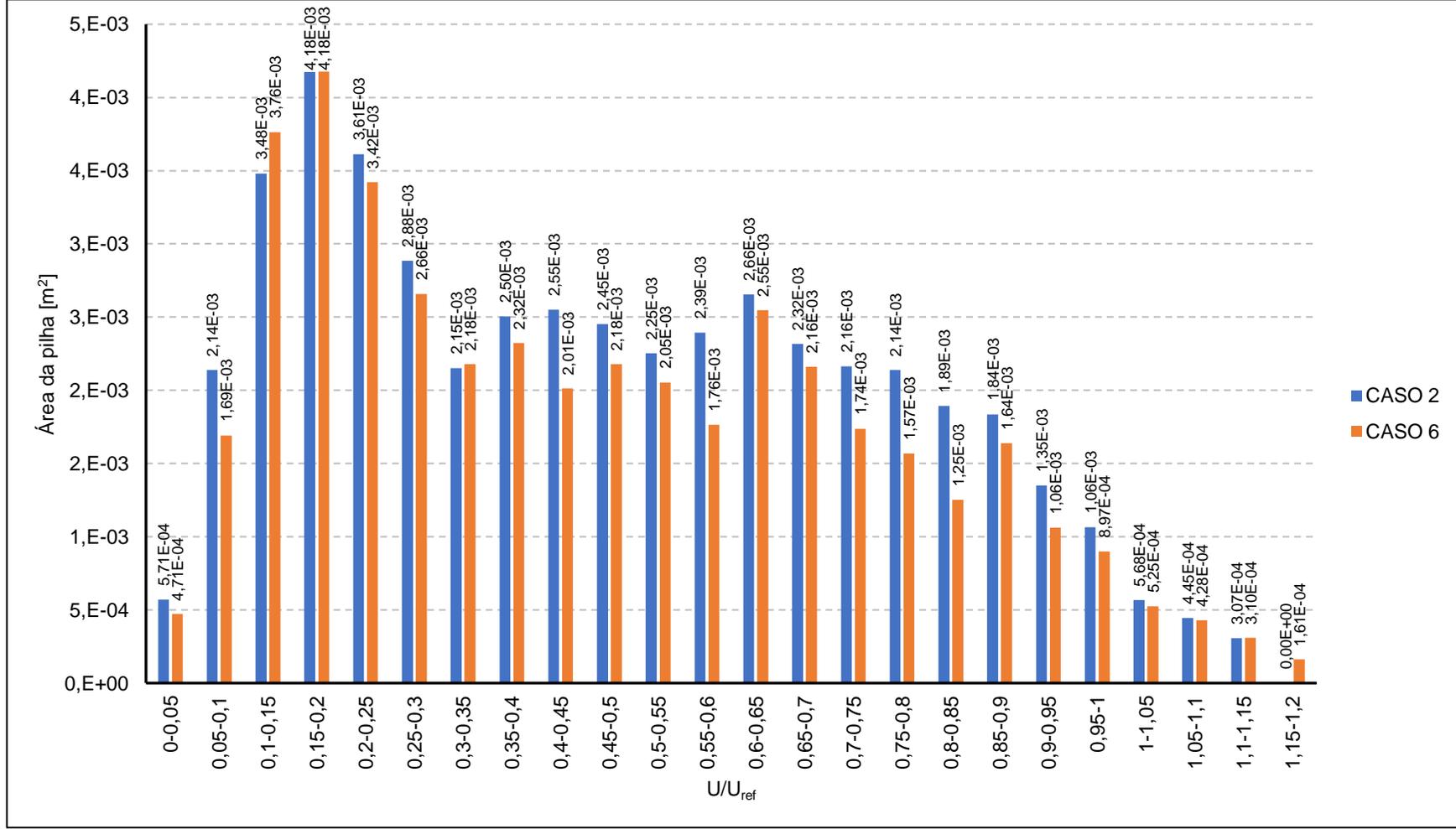
Complementarmente, a **Figura 5-22** traz os histogramas de velocidade incidente sobre a área da pilha, com comparação entre pilhas de mesmo ângulo e velocidade do vento, porém de materiais diferentes. Nota-se que não houve variações muito significativas na área da pilha atingida por determinada faixa de velocidade, indicando que a variação da angulação da pilha não trouxe modificações expressivas nos contornos de velocidade sobre sua superfície.

Figura 5-22: Histograma de velocidade média adimensional do vento sobre a área da pilha de estocagem, com comparação entre os casos (a) Caso 1 e Caso 5; (b) Caso 2 e Caso 6; (c) Caso 3 e Caso 7; (d) Caso 4 e Caso 8.

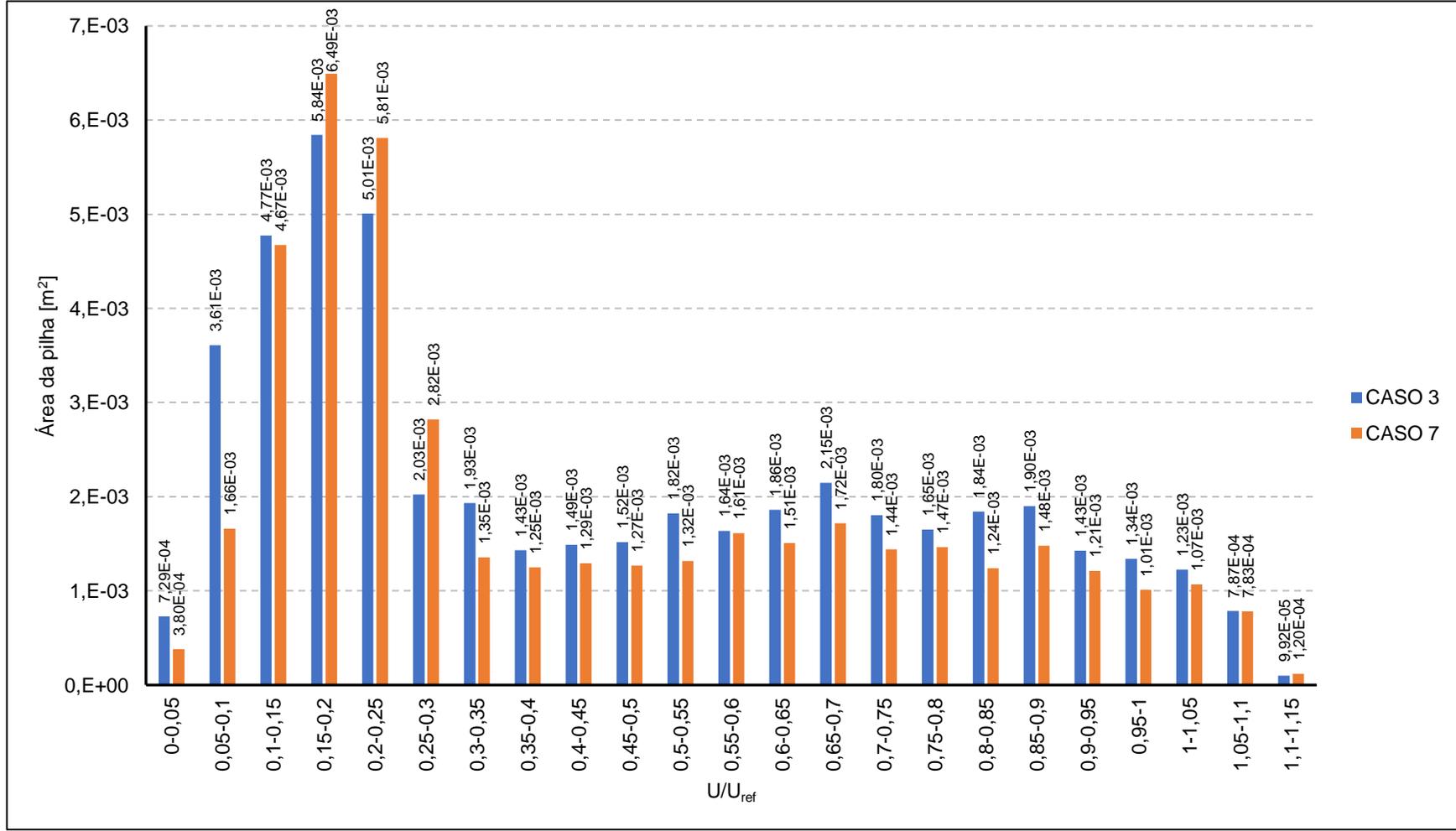
a)



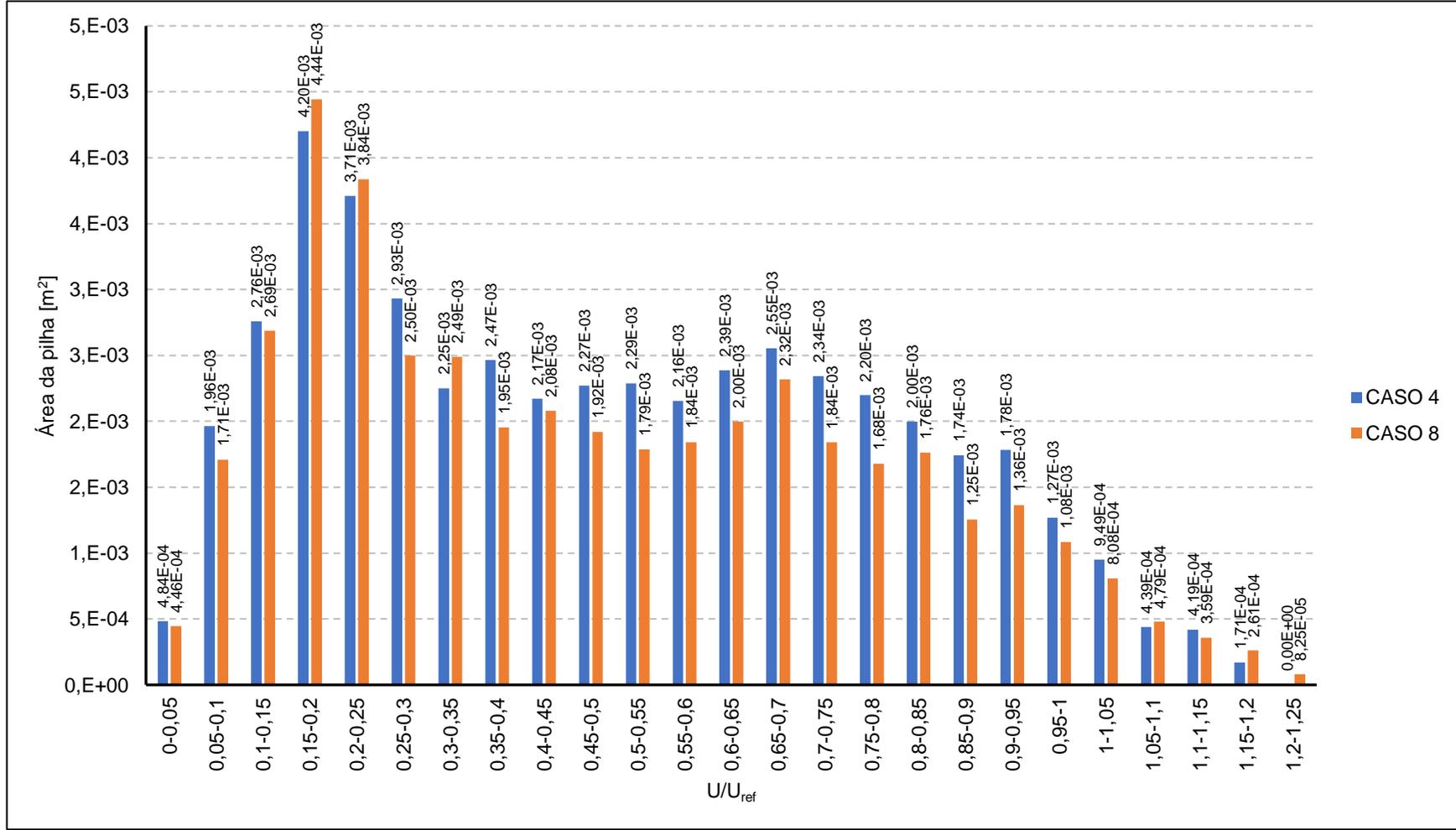
b)



c)



d)



5.2. Emissão e dispersão do material granulado

Essa seção aborda a avaliação da emissão e dispersão de material granulado ao redor da pilha de estocagem orientada a 90° em relação à direção do vento (Seção 5.2.1) e a 60° em relação à direção do vento (Seção 5.2.2).

Após a simulação do escoamento incidente sobre a pilha de estocagem, foi possível quantificar, através da metodologia citada na Seção 4.5, a massa de material granulado emitida em um processo de erosão eólica em cada caso estudado, conforme pode ser visto na **Figura 5-23**.

Ao comparar a emissão em casos de mesma velocidade e ângulo de incidência do vento, porém com materiais diferentes, percebe-se que a pilha de estocagem constituída por areia teve uma maior emissão de material, e tal fato se deve à menor velocidade de fricção limite da areia, quando comparado ao carvão, visto que uma menor velocidade de fricção limite permite que o material seja ressuspenso por um vento de menor intensidade. A **Tabela 5-2** expõe o aumento percentual registrado na pilha de areia em relação à pilha de carvão quando há variação apenas do material componente.

Em relação à velocidade do escoamento livre, observa-se que o aumento da velocidade resultou em um aumento na emissão de material, dado que a velocidade de fricção do vento é diretamente proporcional à sua velocidade de escoamento. O aumento percentual registrado nos casos de velocidade 10 m/s em relação aos casos de 6,08 m/s quando há variação apenas da velocidade do escoamento é apresentado na **Tabela 5-3**.

Por fim, a figura abaixo demonstra uma maior erosão nas configurações em que a pilha de estocagem está orientada a 60° em relação ao vento incidente, quando comparada com a orientação de 90° . Tal situação se deve aos maiores registros de velocidade na superfície da pilha orientada a 60° . A **Tabela 5-4** traz o aumento percentual registrado na pilha orientada a 60° em relação à pilha orientada a 90° quando há variação apenas do ângulo de incidência do vento.

Figura 5-23: Quantificação da massa total emitida pelas pilhas de estocagem.

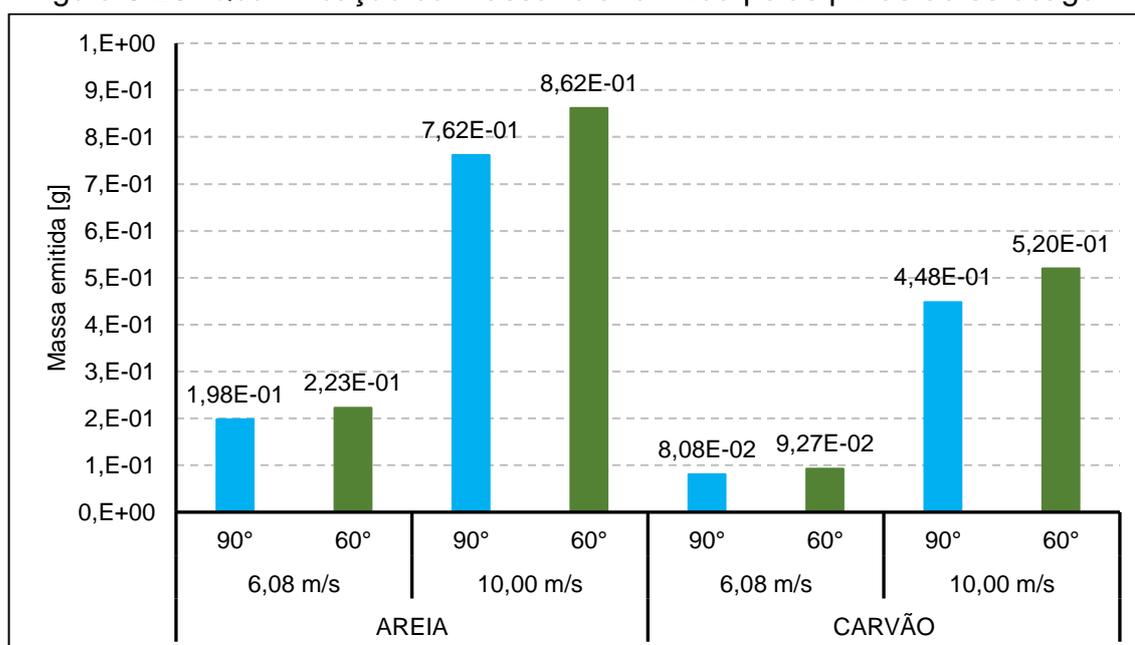


Tabela 5-2: Aumento percentual da massa emitida na pilha de areia em relação à pilha de carvão.

Velocidade do escoamento livre (m/s)	Ângulo de incidência do vento (°)	Aumento percentual
6,08	90	145%
	60	140%
10	90	70%
	60	66%

Tabela 5-3: Aumento percentual da massa emitida nos casos de velocidade 10 m/s em relação aos casos de velocidade 6,08 m/s.

Material	Ângulo de incidência do vento (°)	Aumento percentual
Areia	90	284%
	60	287%
Carvão	90	454%
	60	461%

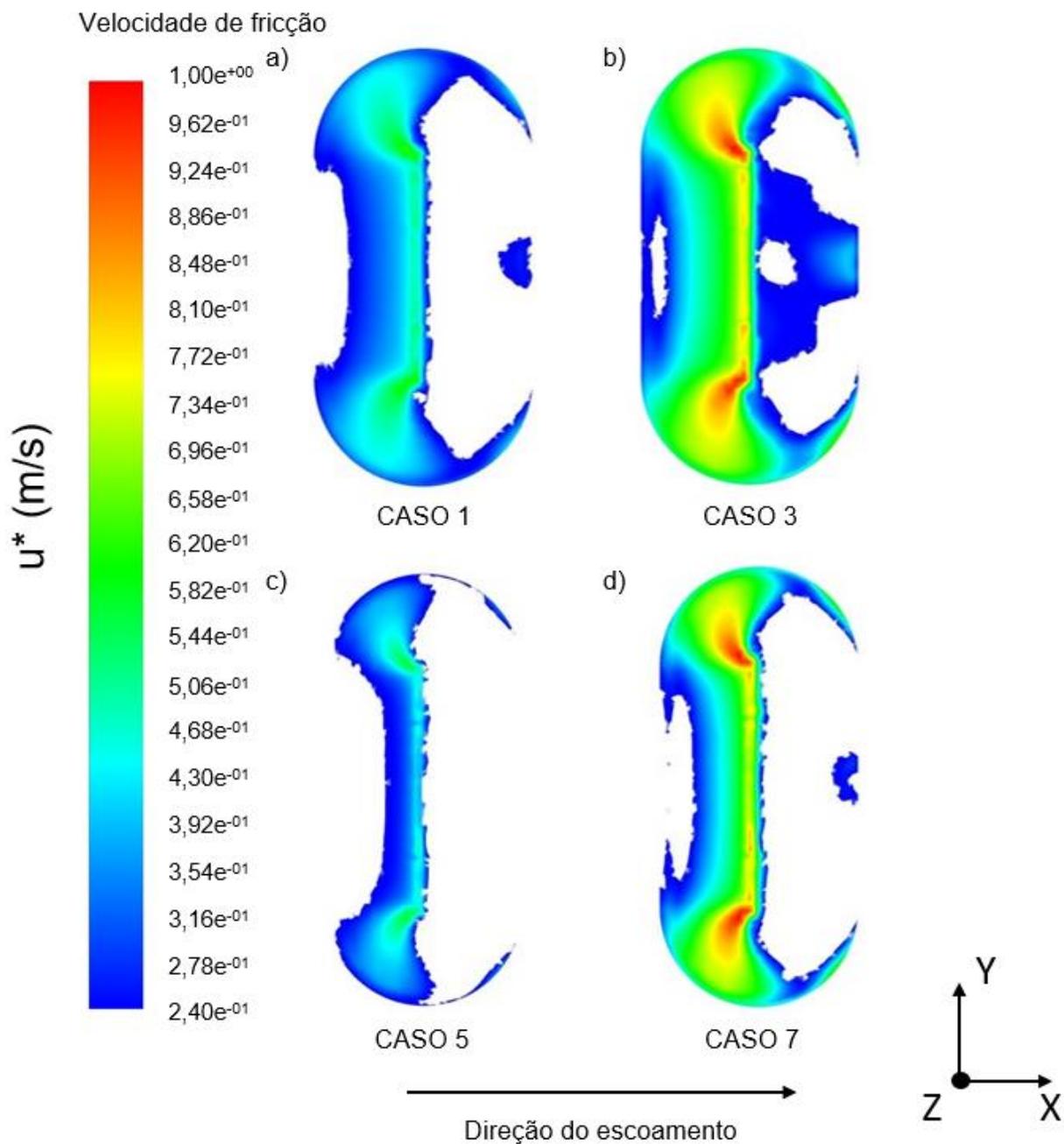
Tabela 5-4: Aumento percentual da massa emitida nos casos de orientação a 60° em relação aos casos de orientação a 90°.

Material	Velocidade do escoamento livre (m/s)	Aumento percentual
Areia	6,08	12%
	10	13%
Carvão	6,08	15%
	10	16%

5.2.1. Emissão e dispersão de material granulado na pilha de estocagem orientada perpendicularmente à direção do vento

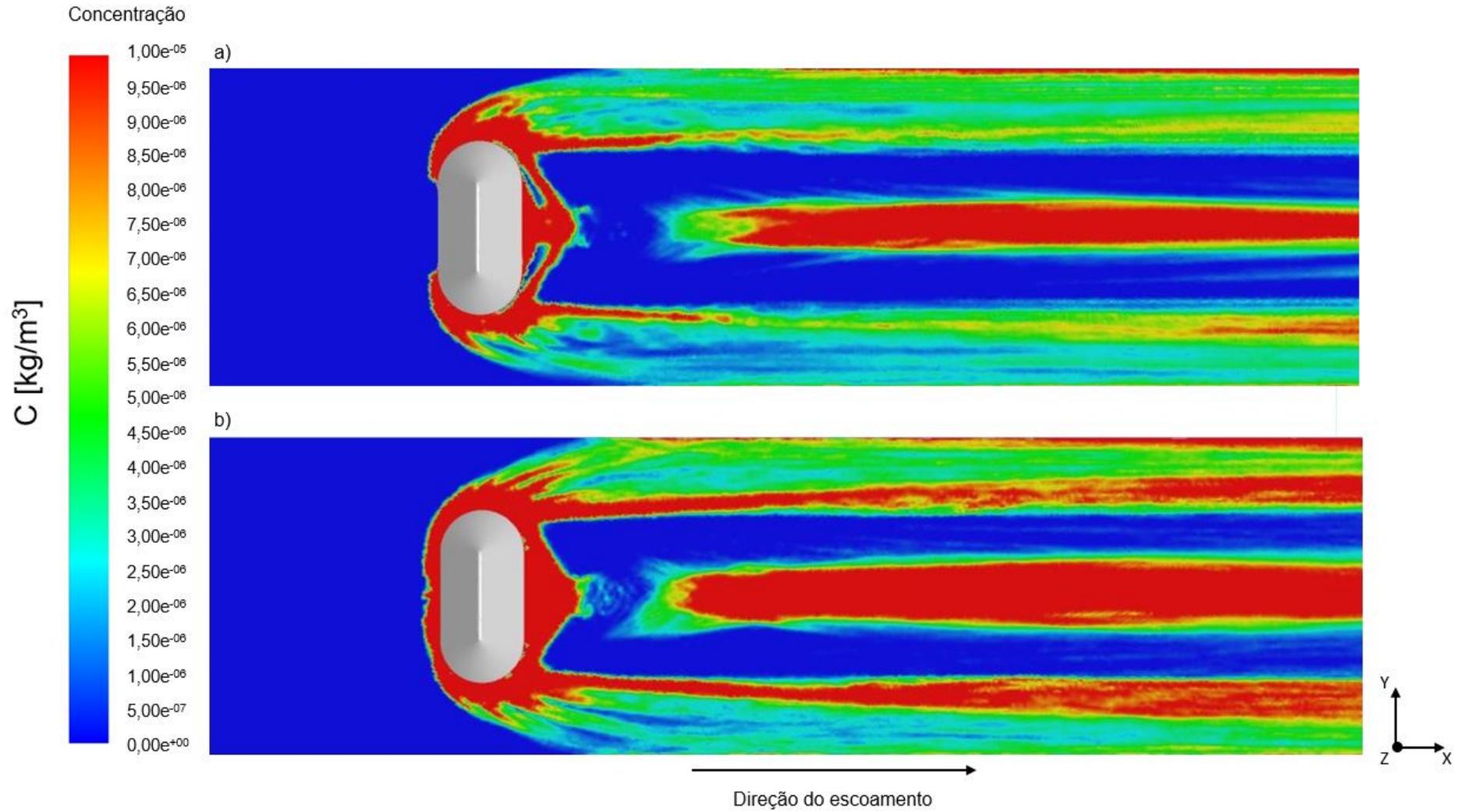
A **Figura 5-24** apresenta o contorno de velocidade de fricção sobre a pilha de estocagem para os casos em que a pilha está situada perpendicularmente à direção do vento, sendo que os contornos tem como menor valor a velocidade de fricção limite do material. Dessa maneira, é possível visualizar as regiões onde o vento incidente ocasionou uma velocidade de fricção maior ou igual ao material, resultando na erosão da pilha. É possível observar uma menor velocidade de fricção na zona de estagnação localizada na face de barlavento da pilha, caracterizada por uma desaceleração do escoamento e tensões de cisalhamento próximas a zero. Conforme o escoamento acelera ao longo das laterais e do topo da pilha, onde são registrados os maiores valores de velocidade e tensão de cisalhamento, há um aumento da velocidade de fricção. A separação da camada limite que ocorre no topo da pilha levou a uma zona com baixas tensões de cisalhamento na região a sotavento da pilha, e conseqüentemente à menores velocidades de fricção. Na região entre os vórtices da zona de recirculação, há a ocorrência de uma pequena zona da face a sotavento da pilha que possui maiores valores de tensão de cisalhamento do que o restante da face.

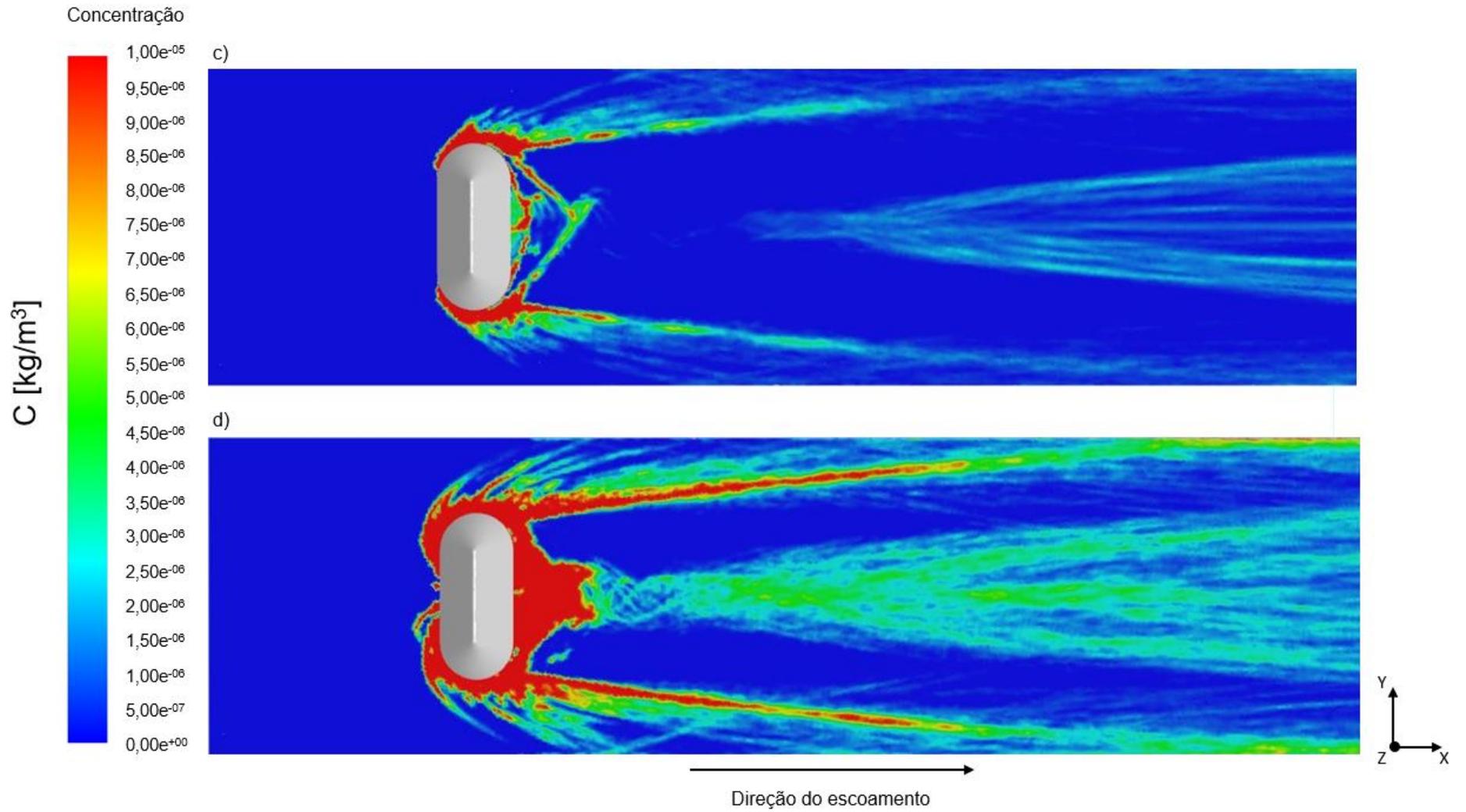
Figura 5-24: Contornos de velocidade de fricção na superfície da pilha para os casos
 a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s;
 c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.



A **Figura 5-25** traz os contornos de concentração no chão do domínio para os casos em que a pilha de estocagem está situada perpendicularmente à direção do vento. Observa-se o acúmulo de partículas na região a sotavento da pilha, que corresponde à zona de recirculação observada na **Figura 5-2**, visto que esse é um local de velocidades próximas a zero e, portanto, propício ao acúmulo de partículas. A ocorrência de altas concentrações no restante do domínio é vista principalmente na faixa longitudinal central, na qual os valores de tensão de cisalhamento se aproximam de zero (ver **Figura 5-6**), justificando o aumento da concentração. O aumento da velocidade do escoamento leva à um aumento da emissão de material, conforme quantificado na **Figura 5-23**, e, devido a isso, os casos com velocidade do escoamento livre de 10,00 m/s apresentam maiores concentrações ao longo do domínio do que os casos com velocidade do escoamento livre de 6,08 m/s. Nota-se também a diferença no padrão de acúmulo de partículas entre os casos de materiais diferentes, onde as avaliações com pilhas de estocagem compostas por carvão apresentam uma concentração de partículas muito menor ao longo do domínio, e tal fato se deve à maior velocidade de fricção limite do carvão, que resulta em uma menor emissão de partículas a partir da pilha (ver **Figura 5-23**).

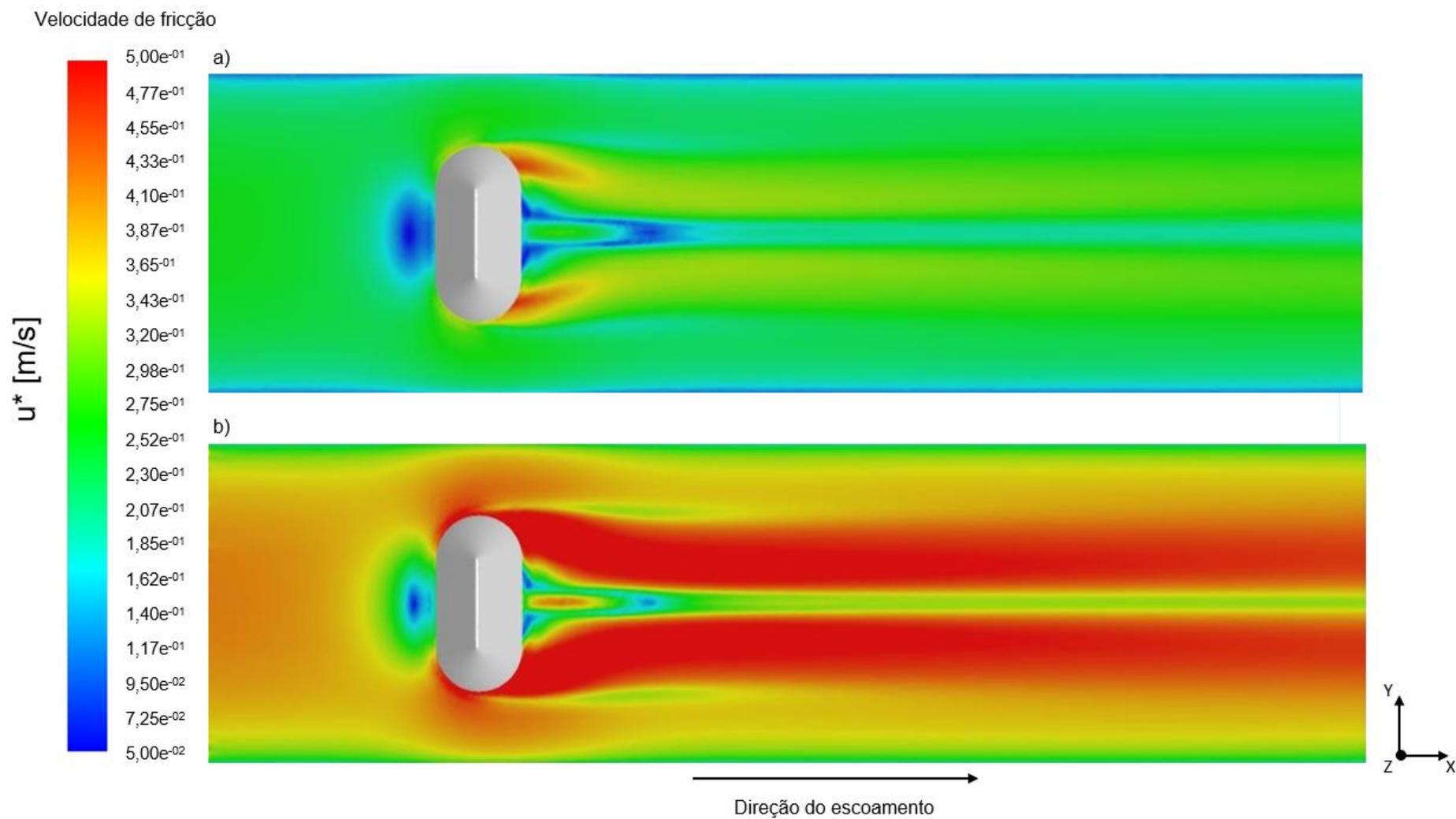
Figura 5-25: Contornos de concentração no chão do domínio para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.

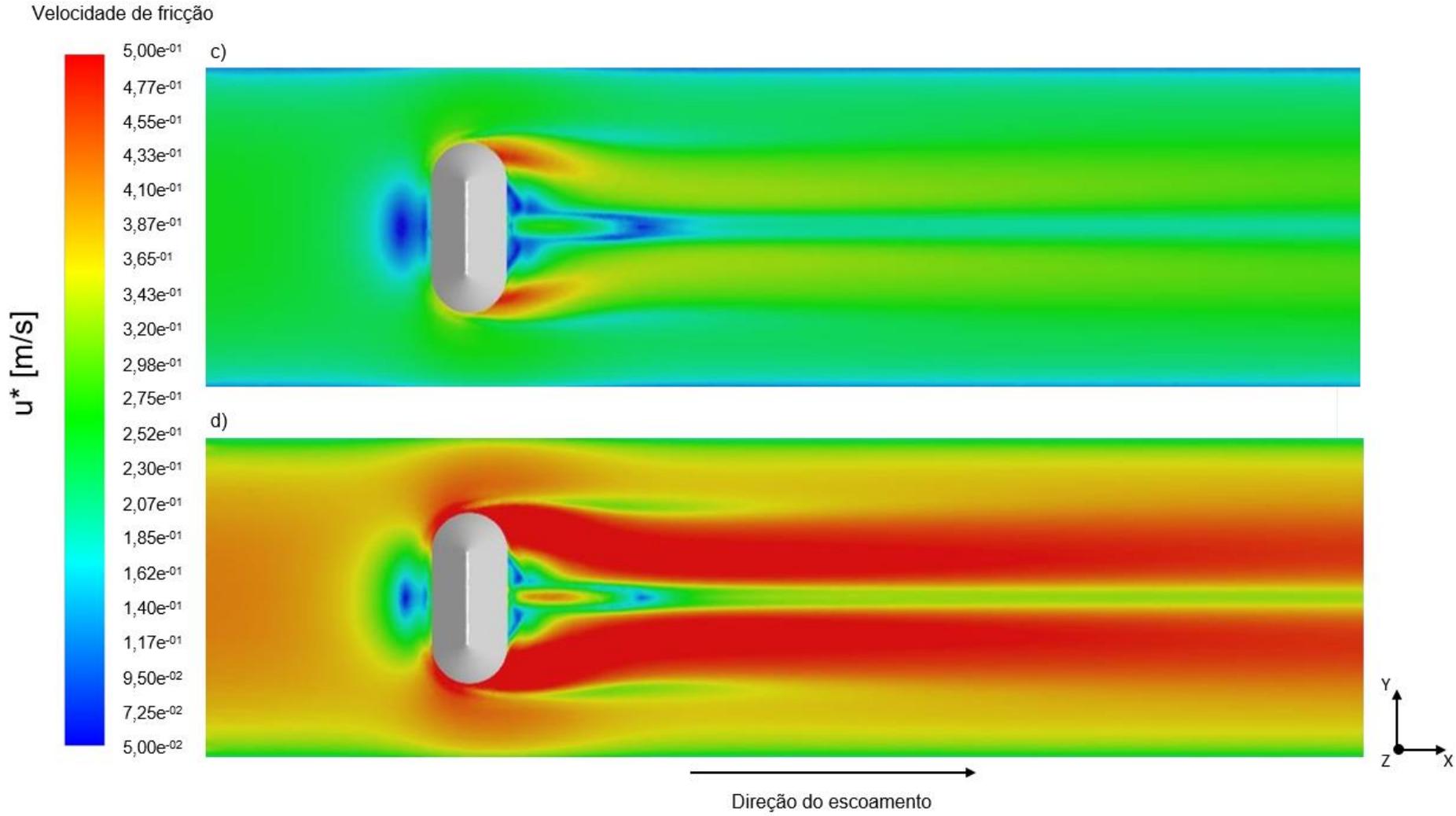




De maneira a complementar a análise da concentração de partículas da Figura anterior, a **Figura 5-26** traz os contornos de velocidade de fricção no chão do domínio. Nota-se que os maiores valores de velocidade de fricção são observados na região logo após as faces laterais da pilha, onde também estão localizados os maiores valores de tensão de cisalhamento registrados no chão do domínio (ver **Figura 5-6**). Observam-se menores valores de velocidade de fricção nas regiões centrais imediatamente anteriores e posteriores à pilha, e é possível inferir que esse comportamento é devido às baixas tensões de cisalhamento observadas nesses pontos, visto que na região anterior à pilha há uma desaceleração do escoamento devido à presença da pilha como obstáculo, e na região posterior há a zona de recirculação do escoamento. É perceptível o aumento da velocidade de fricção nos casos de maior velocidade do escoamento livre, e, portanto, é possível inferir que, além de levar a um aumento na emissão de material na pilha de estocagem, o aumento da velocidade do escoamento causaria a retirada de material da superfície.

Figura 5-26: Contornos de velocidade de fricção no chão do domínio para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.

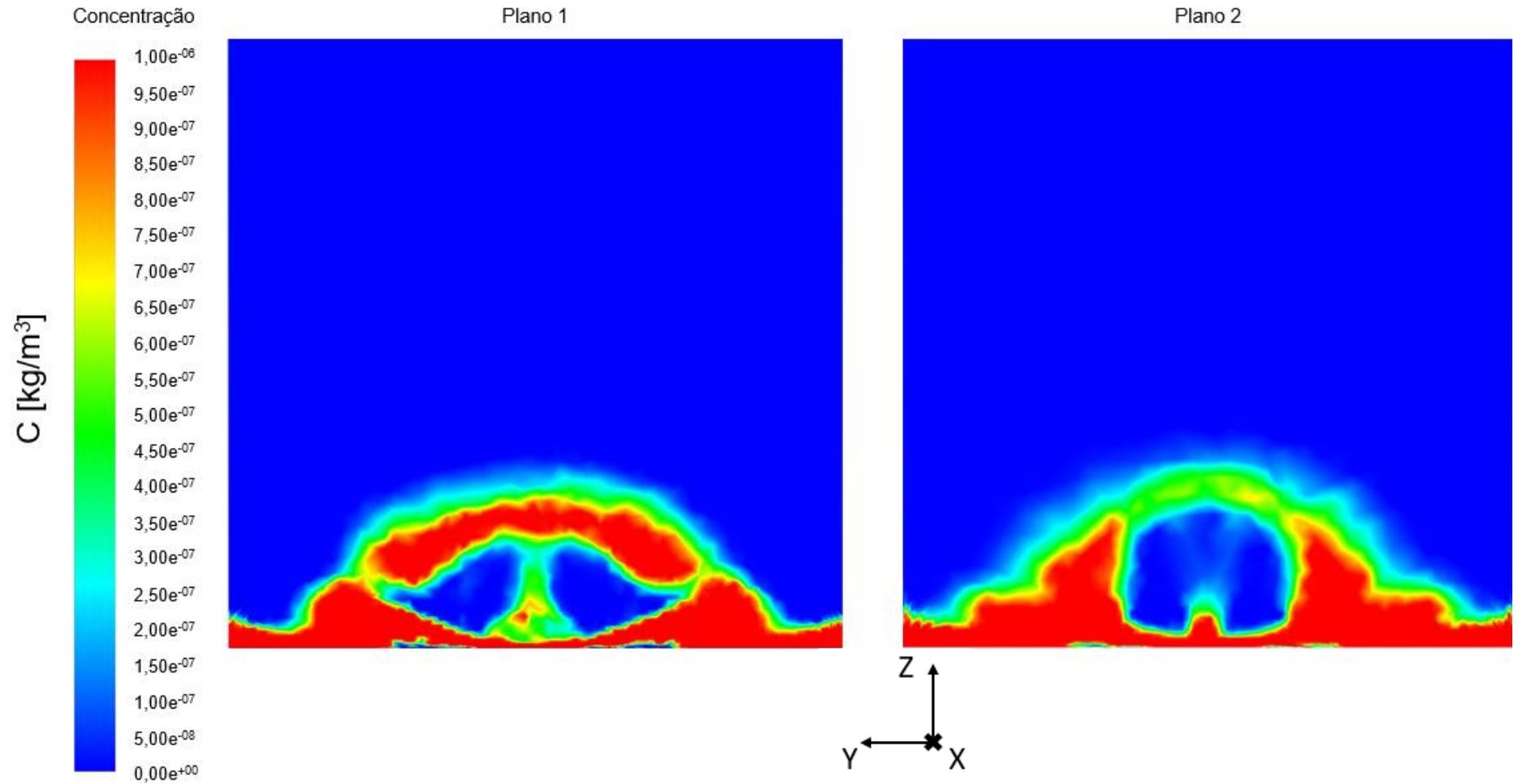




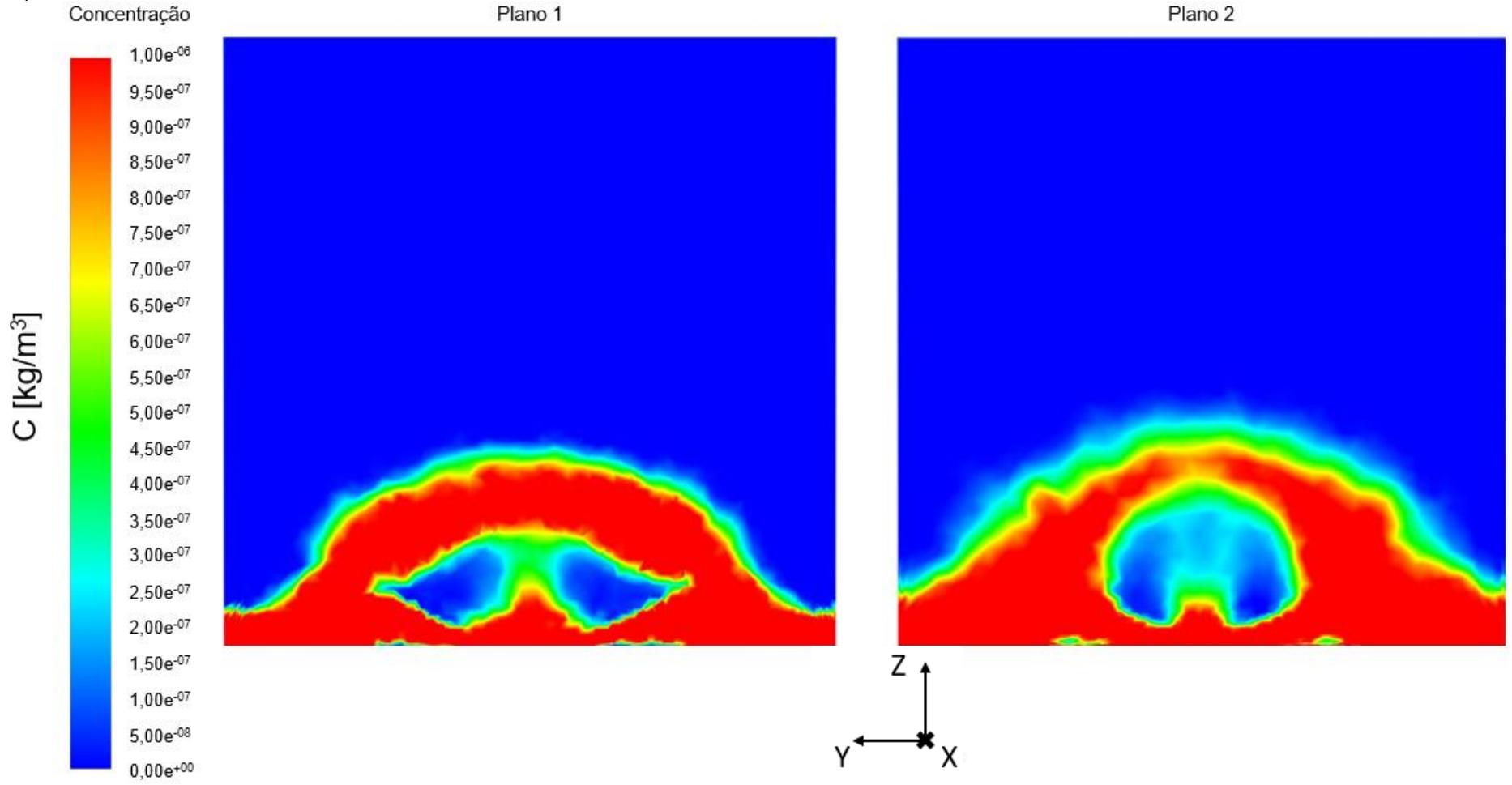
A **Figura 5-27** apresenta as concentrações nos planos verticais correspondentes à metade do comprimento do túnel de vento (Plano 1) e à sua saída (Plano 2), respectivamente, para os casos em que a pilha de estocagem está situada perpendicularmente à direção do vento. Observa-se que as concentrações tendem a ser mais altas próximas ao solo, e é possível visualizar que a concentração de material suspenso é menor no plano mais longínquo (Plano 2) quando comparado ao plano mais próximo da entrada (Plano 1), enquanto as concentrações depositadas no chão do domínio são maiores.

Figura 5-27: Contornos de concentração no Plano 1 e Plano 2 para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s

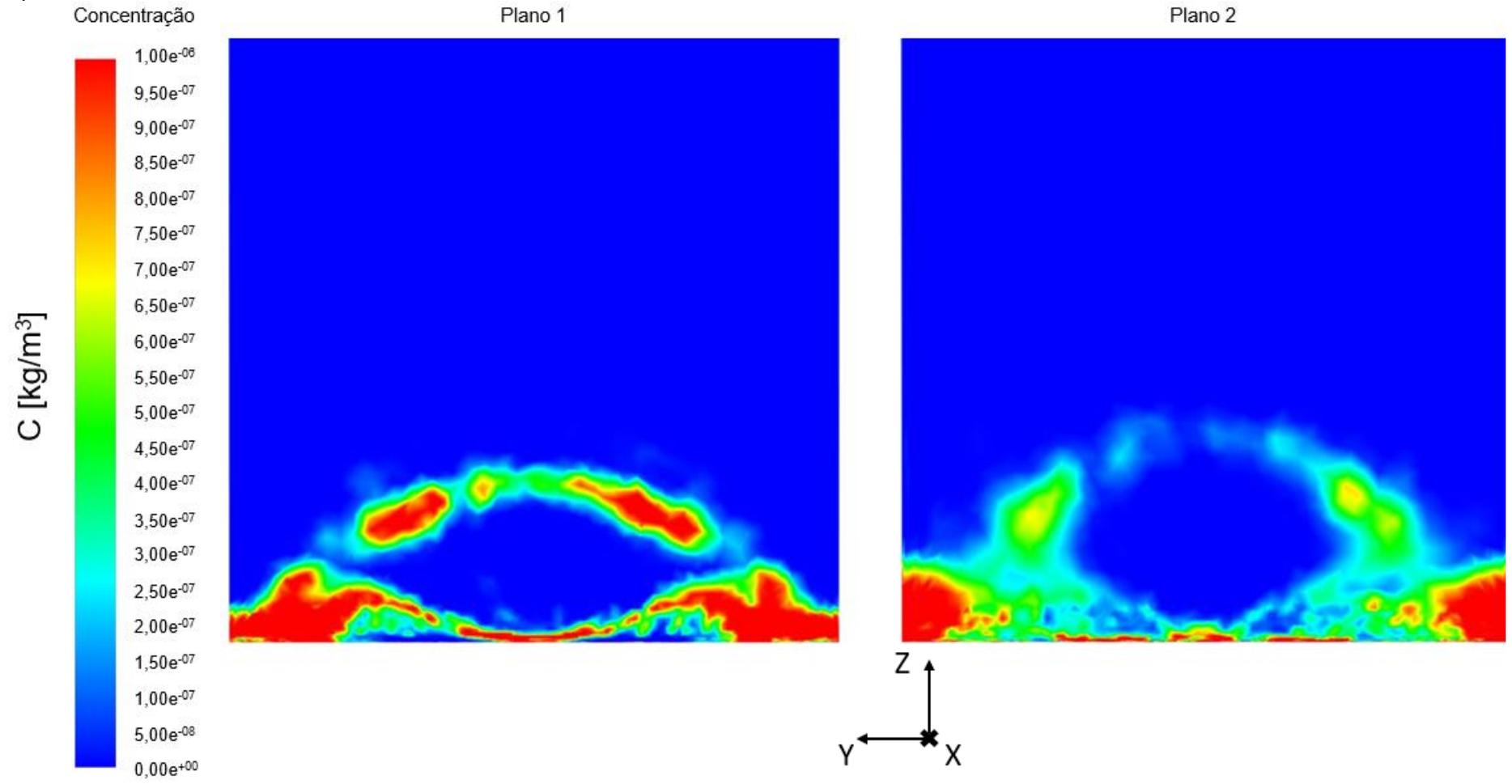
a)



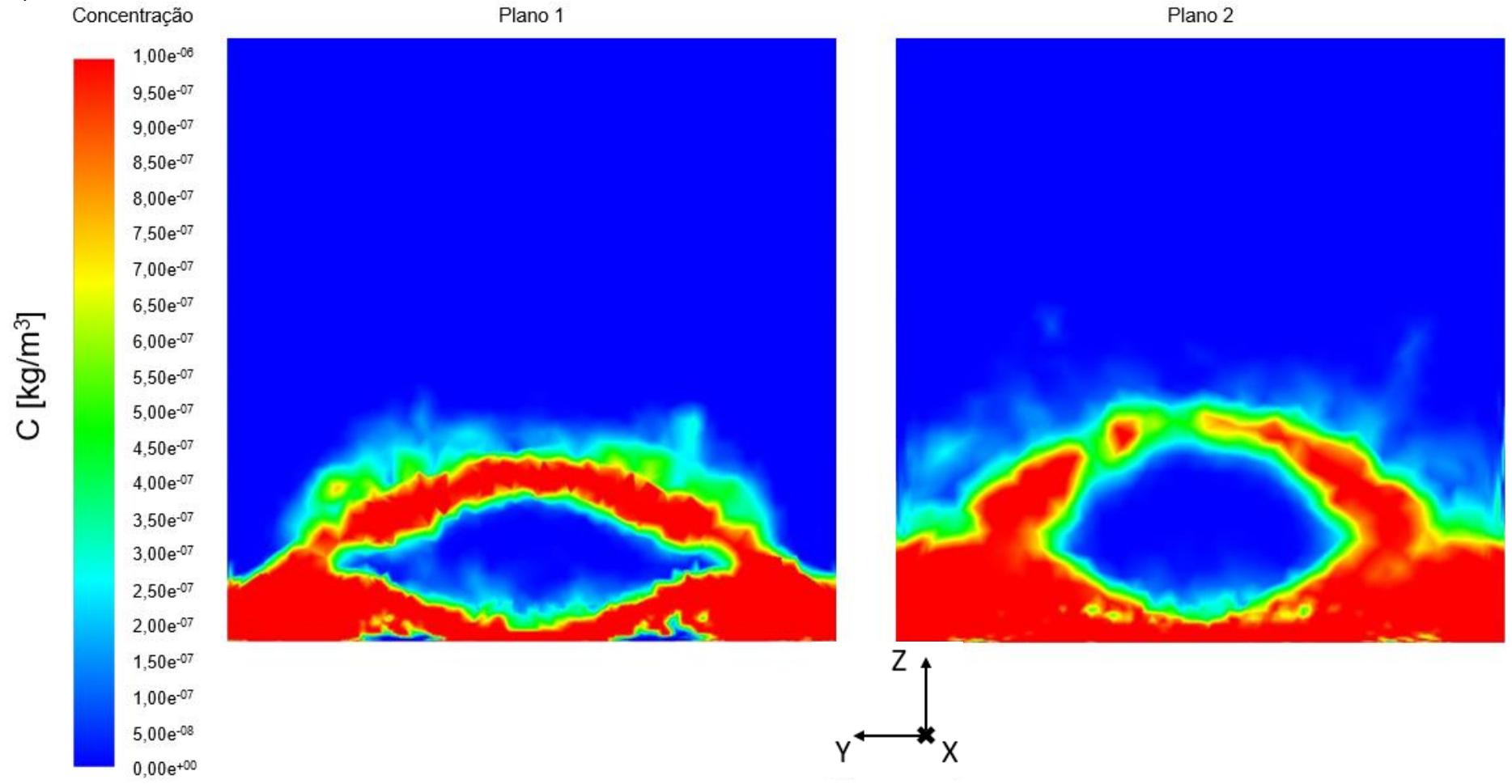
b)



c)

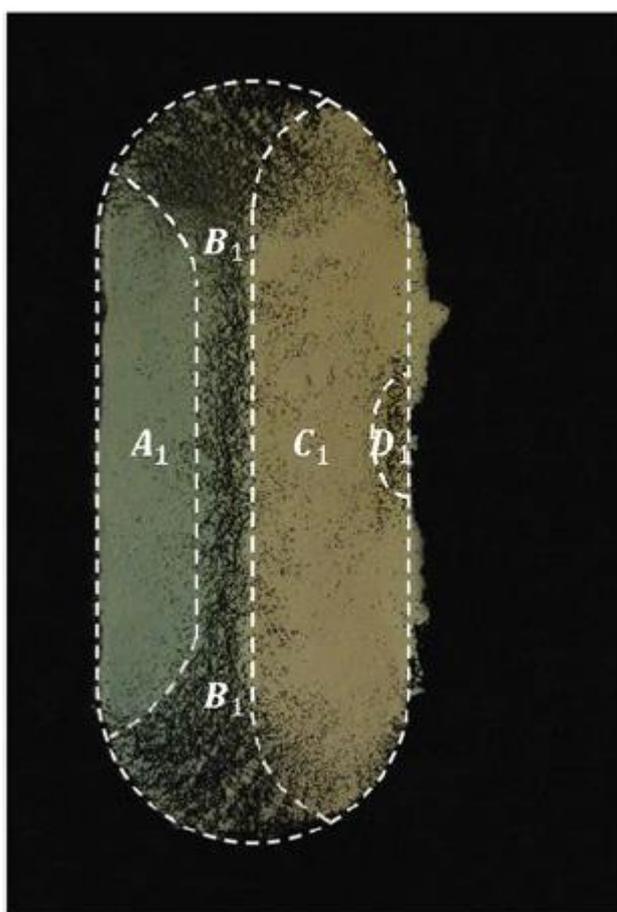


d)



As zonas de erosão eólica encontradas na simulação numérica das pilhas de estocagem orientadas perpendicularmente à direção do vento podem ser comparadas com as zonas encontradas no estudo experimental de Ferreira *et al.* (2019). Na **Figura 5-28**, os padrões de erosão foram identificados pela aglomeração das partículas não-erodíveis (pretas). A distribuição superficial das partículas pretas permitiu a identificação das zonas nas quais a tensão de cisalhamento foi grande o suficiente para erodir as partículas finas (partículas brancas).

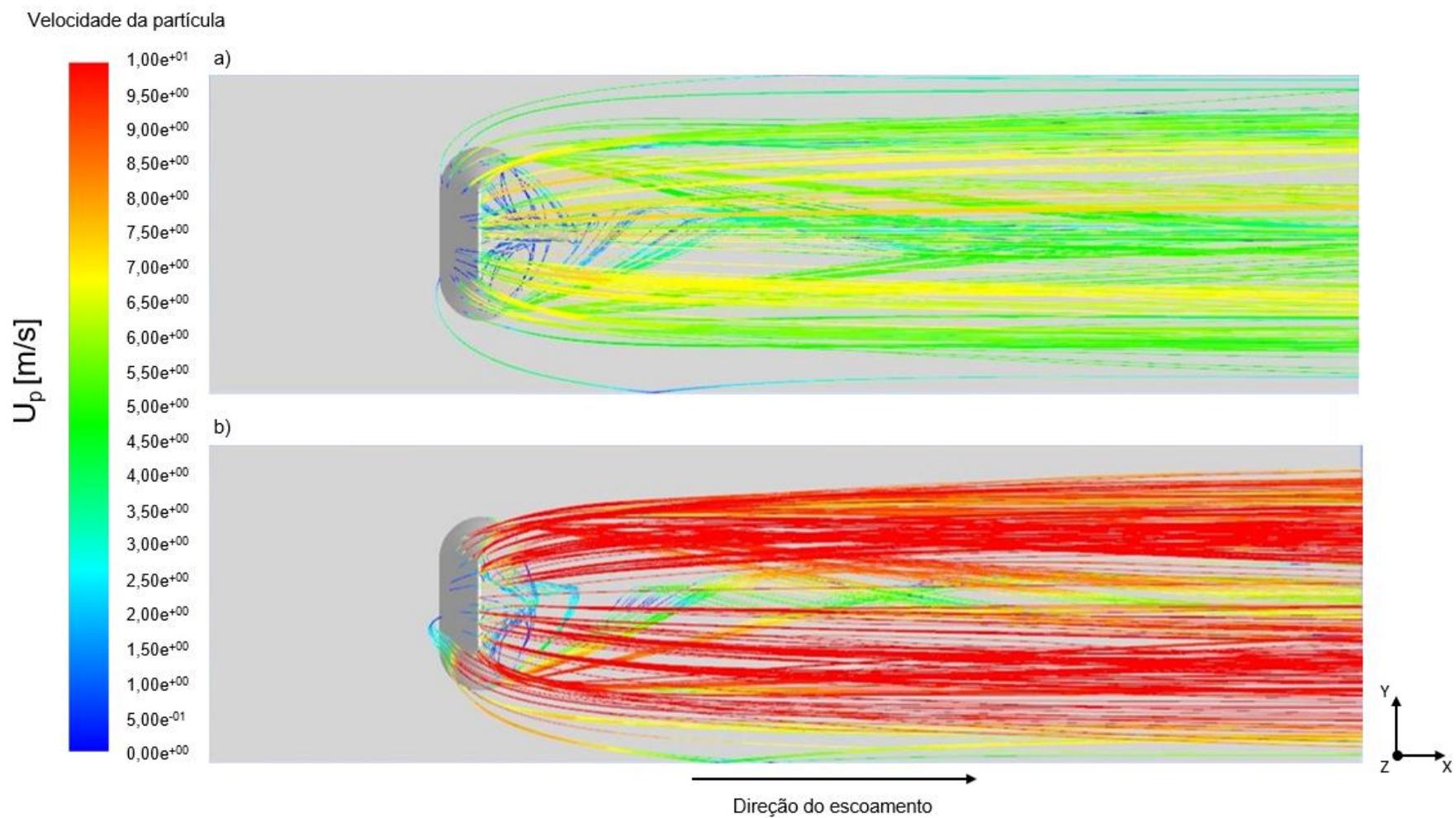
Figura 5-28: Resultado experimental da erosão eólica em uma pilha de estocagem orientada perpendicularmente à direção do vento no estudo de Ferreira *et al.* (2019).



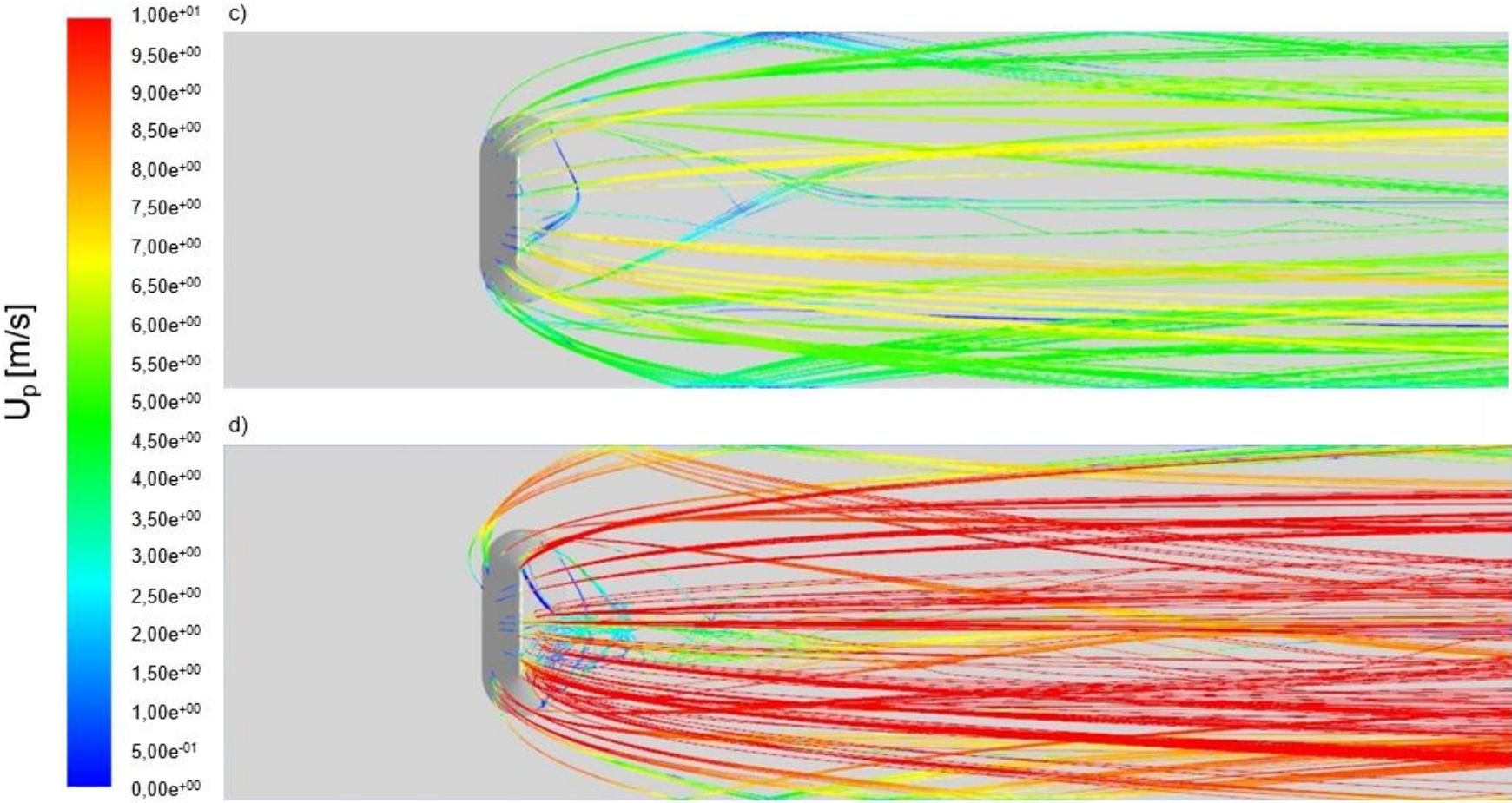
As trajetórias individuais das partículas emitidas pela pilha de estocagem são apresentadas na **Figura 5-29** para os casos analisados. As trajetórias são coloridas conforme a magnitude da velocidade, de maneira a permitir a visualização do comportamento das partículas quando estão situadas em regiões de menor ou maior velocidade do escoamento. É possível visualizar os menores valores de velocidade das partículas nas regiões de recirculação e na faixa longitudinal central, zonas de

baixas velocidades do escoamento e tensões de cisalhamento. Nessas mesmas regiões, há a tendência de acúmulo das partículas no chão do domínio, conforme visto na **Figura 5-25**. Nota-se também que o escoamento de maior velocidade foi capaz de conferir semelhante aumento de velocidade ao material.

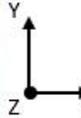
Figura 5-29: Velocidade das partículas para os casos a) 1 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 3 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 5 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 7 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s



Velocidade da partícula



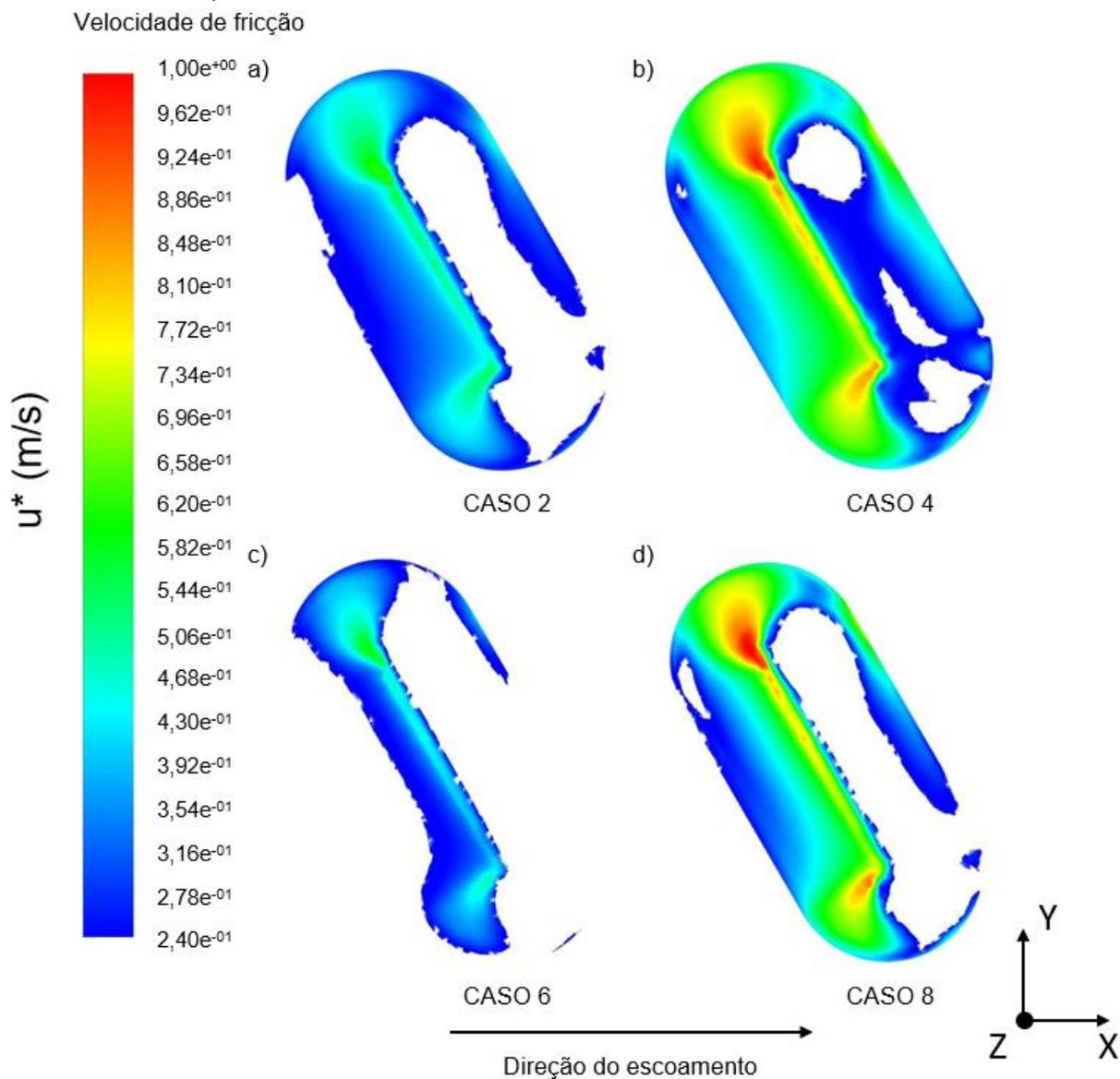
Direção do escoamento



5.2.2. Emissão e dispersão de material granulado na pilha de estocagem orientada a 60° em relação à direção do vento

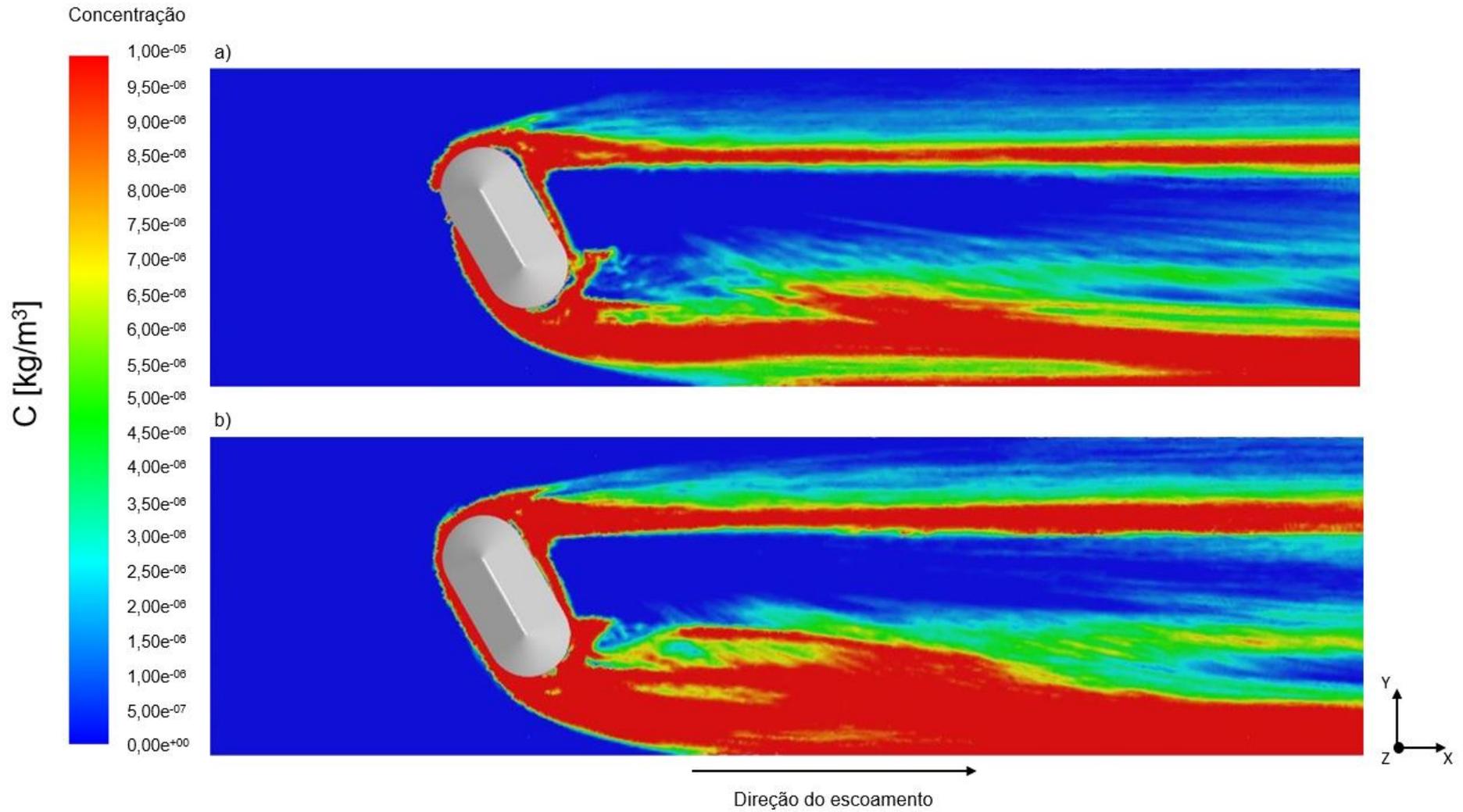
A **Figura 5-30** apresenta o contorno de velocidade de fricção sobre a pilha de estocagem para os casos em que a pilha está orientada a 60° em relação à direção do vento, sendo que os contornos tem como menor valor a velocidade de fricção limite do material. Dessa maneira, é possível visualizar as regiões onde o vento incidente ocasionou uma velocidade de fricção maior ou igual ao material, resultando na erosão da pilha. A face de barlavento da pilha registra uma zona de menores valores de tensão de cisalhamento, enquanto os maiores valores dessa variável foram encontrados nas laterais da pilha que estão sujeitas ao vento incidente, resultando em maiores valores de velocidade de fricção. A separação da camada limite que ocorre no topo da pilha levou a uma zona com baixas tensões de cisalhamento e menor região de erosão em parte da face a sotavento da pilha. O impacto do vórtice presente na zona de recirculação gera uma região de maior tensão de cisalhamento e, conseqüentemente, maior velocidade de fricção.

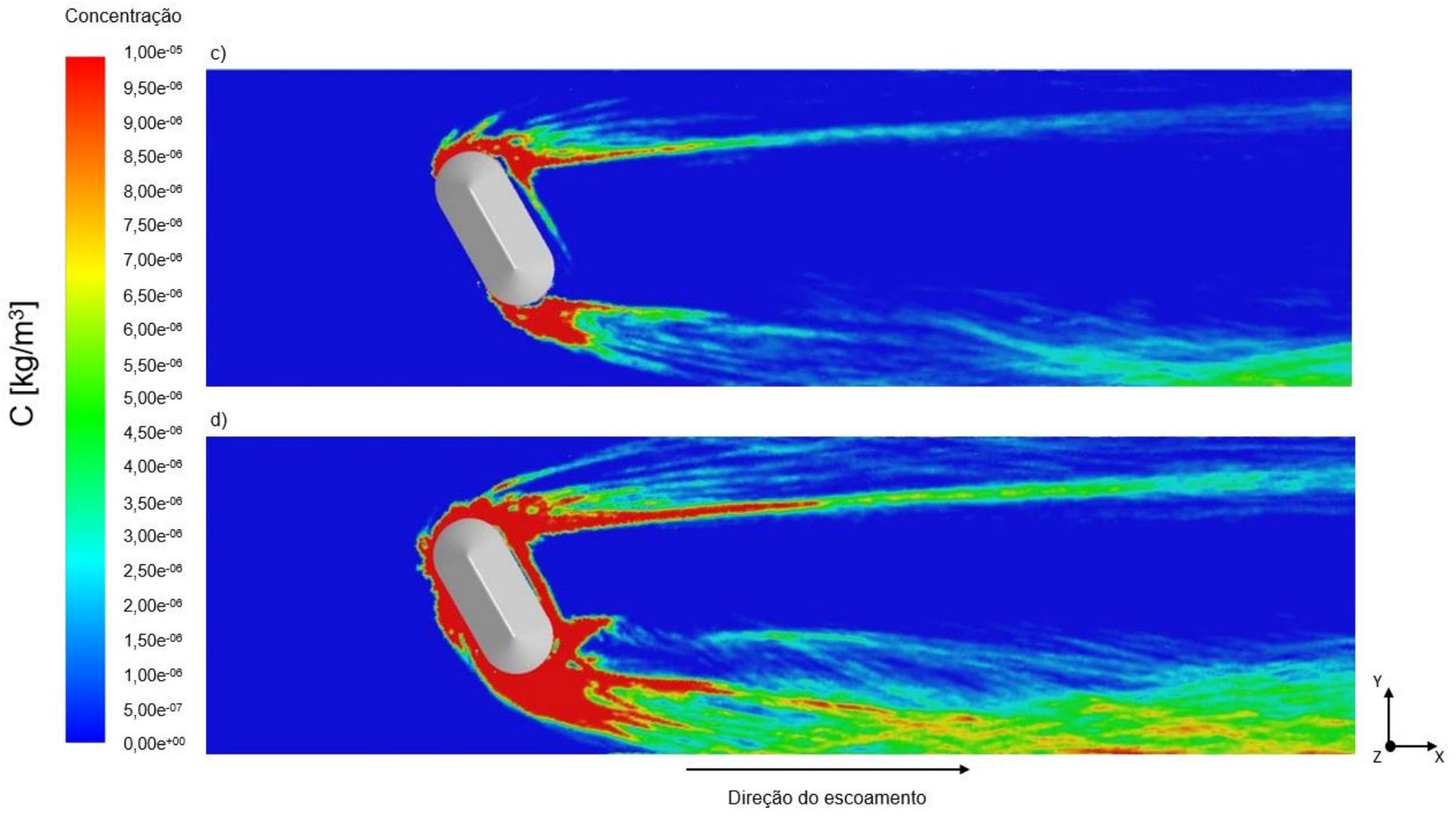
Figura 5-30: Contornos de velocidade de fricção na superfície da pilha para os casos
 a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s;
 c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.



A **Figura 5-31** apresenta os contornos de concentração no chão do domínio para os casos em que a pilha de estocagem está situada a 60° em relação à direção do vento. Há um maior acúmulo de partículas nas faixas longitudinais logo acima e abaixo da pilha, zonas essas que, conforme **Figura 5-16**, apresentam baixos valores de tensão de cisalhamento, enquanto a porção à sotavento da pilha, que apresenta maiores valores de tensão de cisalhamento, registrou concentrações próximas à zero. Nota-se que a zona de recirculação (ver **Figura 5-12**) também apresentou certa concentração de material, visto que tal região possui velocidades menores. Conforme apresentado na quantificação da massa emitida na **Figura 5-23**, os escoamentos de maior velocidade levaram à um aumento da emissão de material e, devido a isso, os casos com velocidade do escoamento livre de 10,00 m/s apresentam maiores concentrações ao longo do domínio do que os casos com velocidade do escoamento livre de 6,08 m/s. Ao analisar o acúmulo de partículas nas pilhas de materiais diferentes, nota-se que as pilhas de estocagem compostas por carvão apresentam uma concentração de partículas muito menor ao longo do domínio, e isso se deve à maior velocidade de fricção limite do carvão, que resulta em uma menor emissão de partículas a partir da pilha (ver **Figura 5-23**).

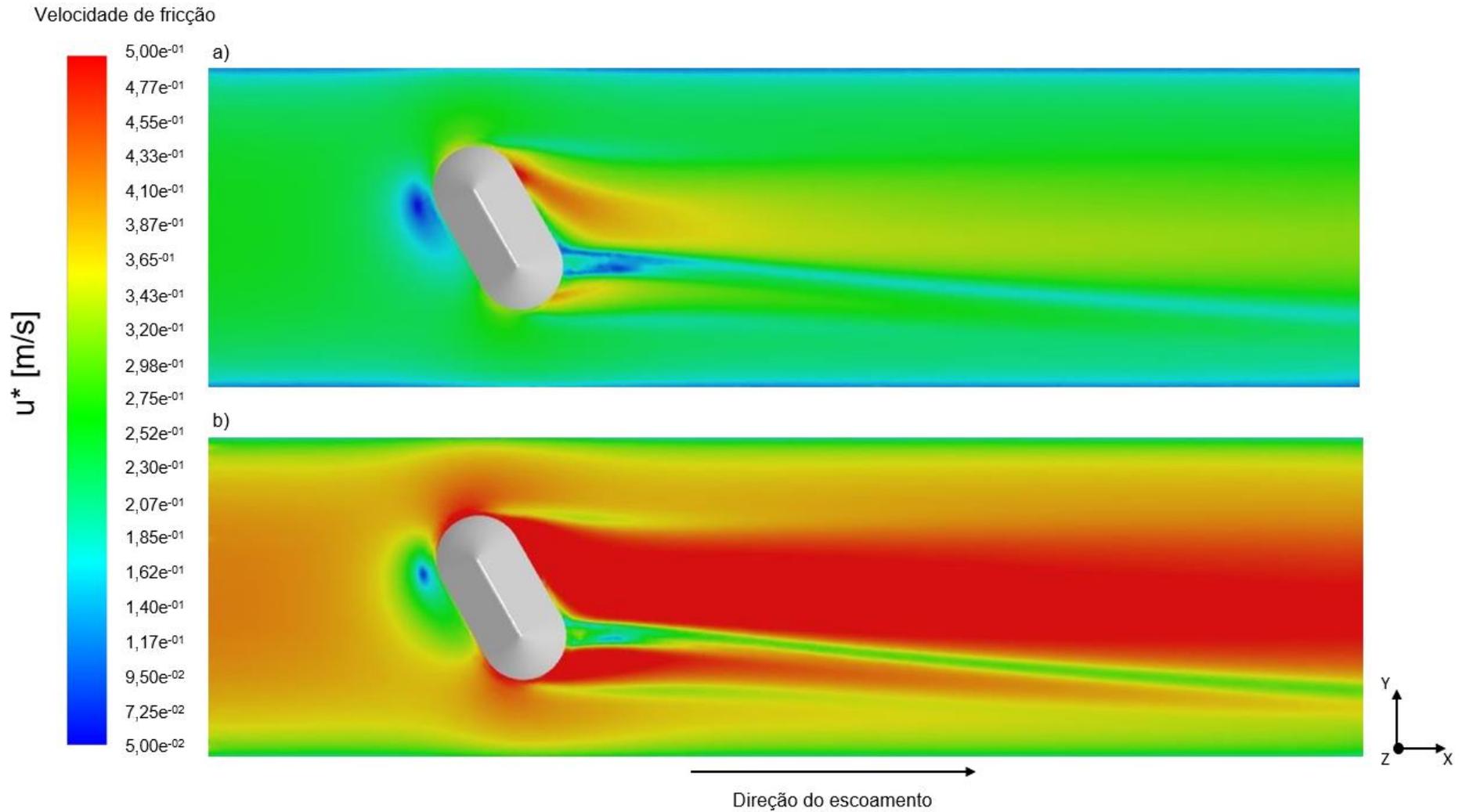
Figura 5-31: Contornos de concentração no chão do domínio para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.

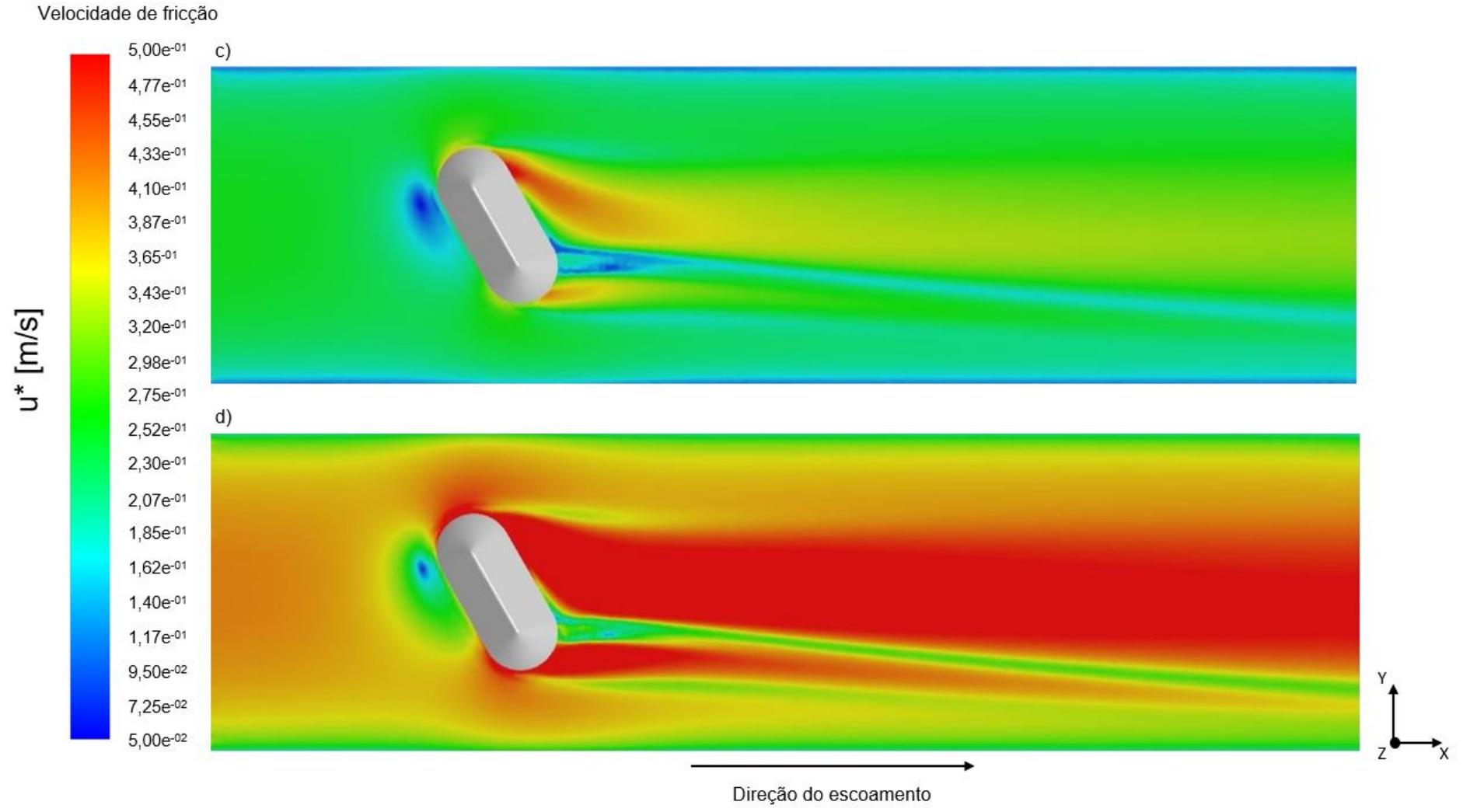




Os contornos de velocidade de fricção no chão do domínio, apresentados na **Figura 5-32**, permitem compreender que os maiores valores de velocidade de fricção são observados nas regiões logo após as faces laterais da pilha, onde também são observados os maiores valores de tensão de cisalhamento no chão do domínio (ver **Figura 5-16**). Há o registro de menores valores de velocidade de fricção na região anterior à pilha, correspondente à uma zona de desaceleração do escoamento por conta da existência da pilha como obstáculo, e na região posterior à pilha correspondente à zona de recirculação do escoamento. É perceptível o aumento da velocidade de fricção nos casos de maior velocidade do escoamento livre, e, portanto, é possível inferir que, além de levar a um aumento na emissão de material na pilha de estocagem, o aumento da velocidade do escoamento causaria a retirada de material da superfície.

Figura 5-32: Contornos de velocidade de fricção no chão do domínio para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s.

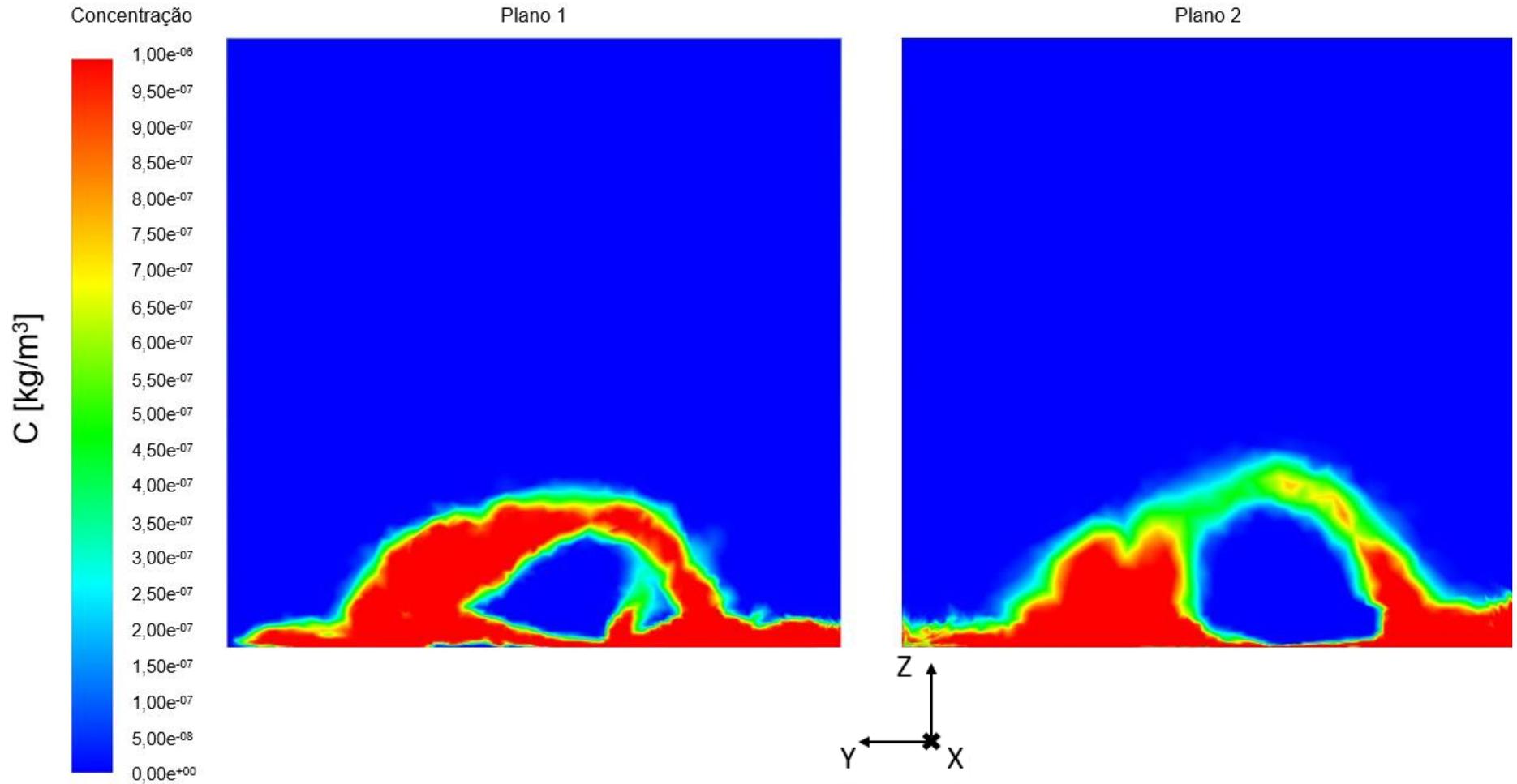




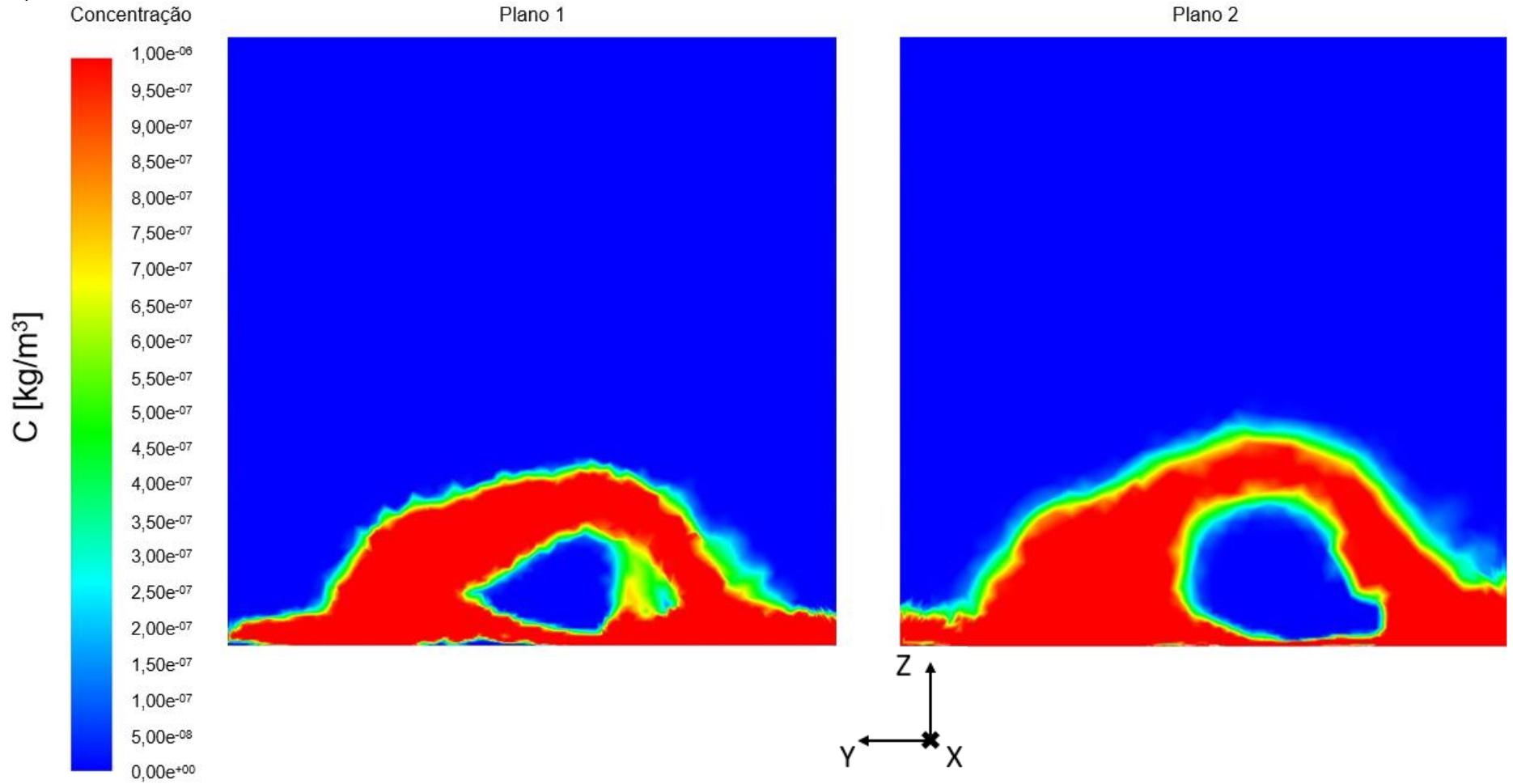
A **Figura 5-33** apresenta as concentrações nos planos verticais correspondentes à metade do comprimento do túnel de vento (Plano 1) e à sua saída (Plano 2), respectivamente, para os casos em que a pilha de estocagem orientada a 60° em relação à direção do vento. O acúmulo de material tende a ser maior na região próxima ao solo, e percebe-se que a concentração de material suspenso é menor no plano mais longínquo (Plano 2) quando comparado ao plano mais próximo da entrada (Plano 1), enquanto as concentrações depositadas no chão do domínio são maiores. Além disso, o Plano 2 registra maior acúmulo de partículas na borda direita, corroborando o comportamento visualizado na **Figura 5-31**.

Figura 5-33: Contornos de concentração no Plano 1 e Plano 2 para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s

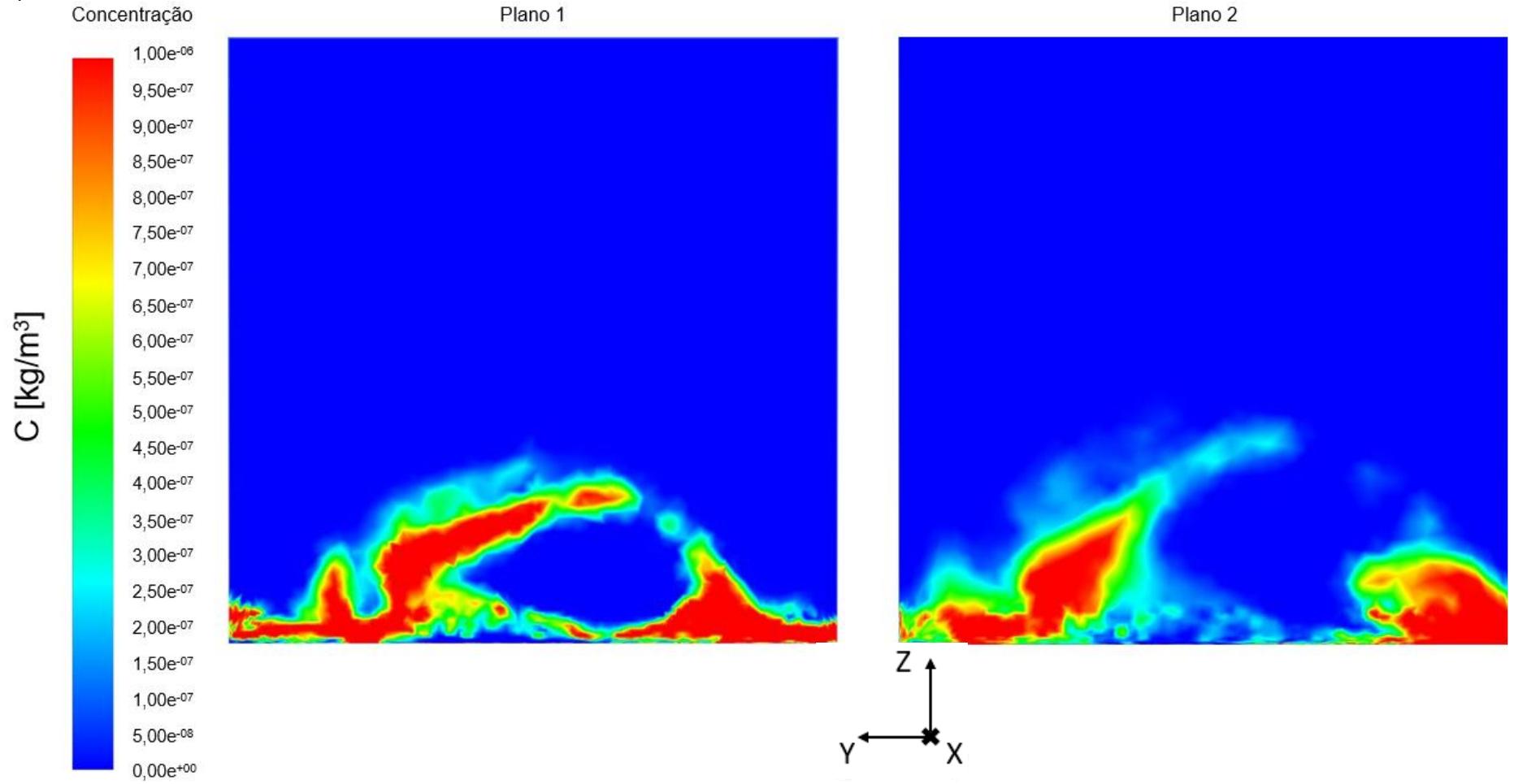
a)



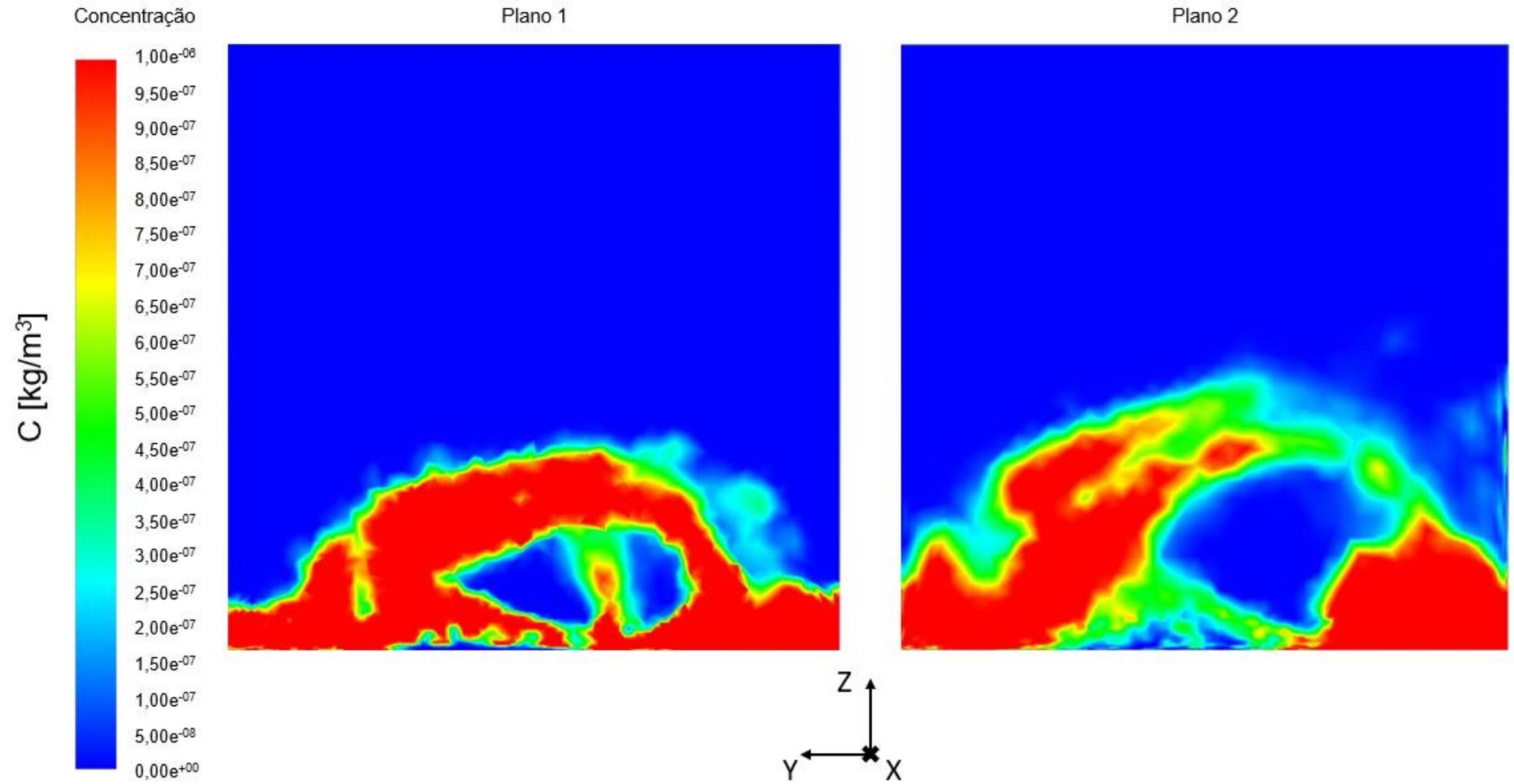
b)



c)

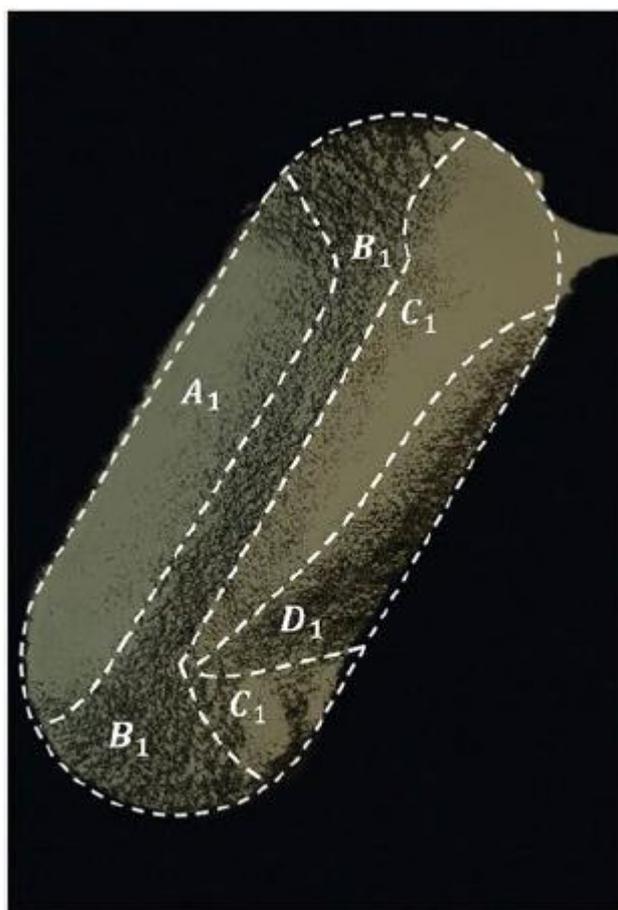


d)



As zonas de erosão eólica encontradas na simulação numérica das pilhas de estocagem orientadas a 60° em relação à direção do vento podem ser comparadas com as zonas encontradas no estudo experimental de Ferreira *et al.* (2019). Na **Figura 5-34**, os padrões de erosão foram identificados pela aglomeração das partículas não-erodíveis (pretas). A distribuição superficial das partículas pretas permitiu a identificação das zonas nas quais a tensão de cisalhamento foi grande o suficiente para erodir as partículas finas (partículas brancas).

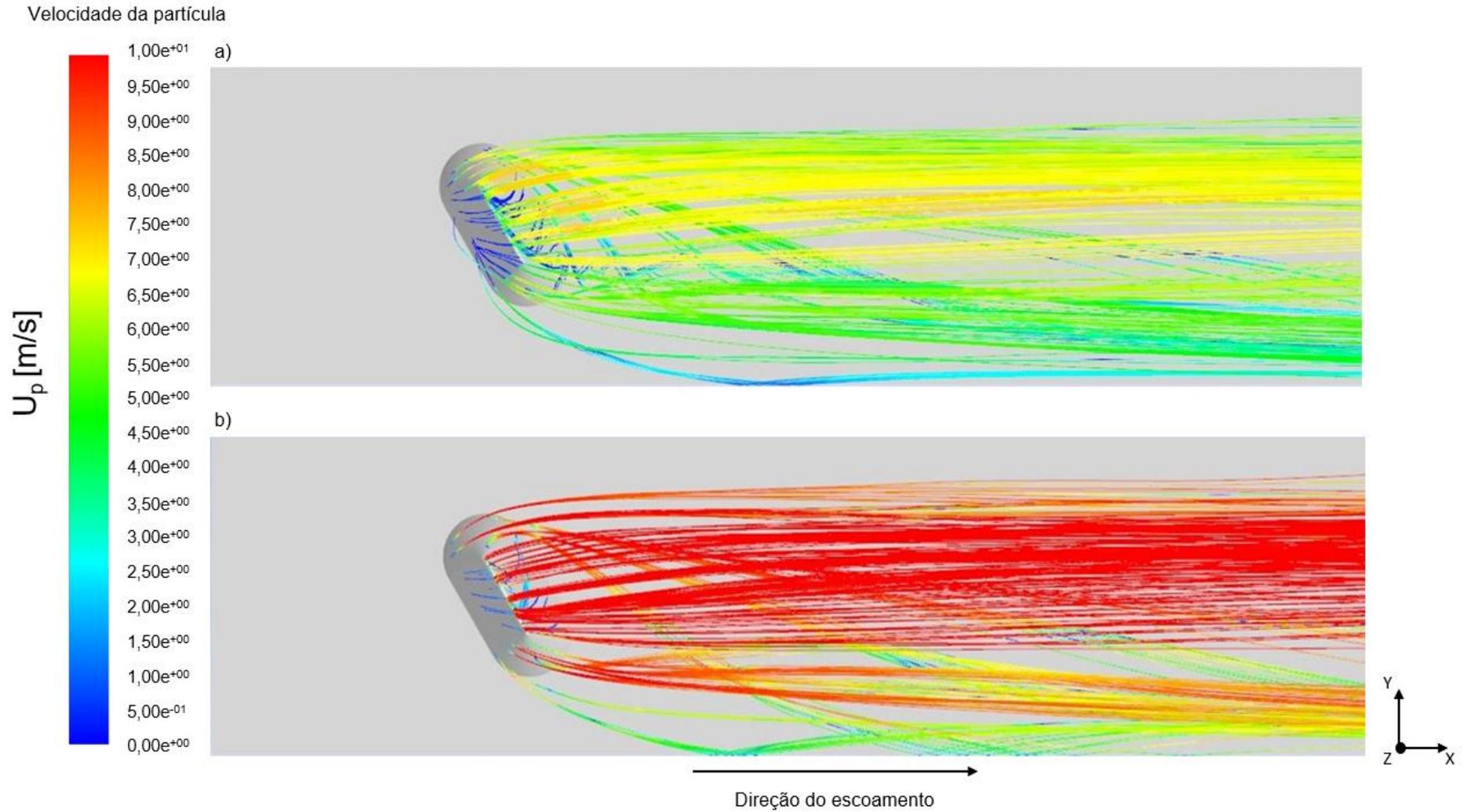
Figura 5-34: Resultado experimental da erosão eólica em uma pilha de estocagem orientada a 60° em relação à direção do vento no estudo de Ferreira *et al.* (2019).

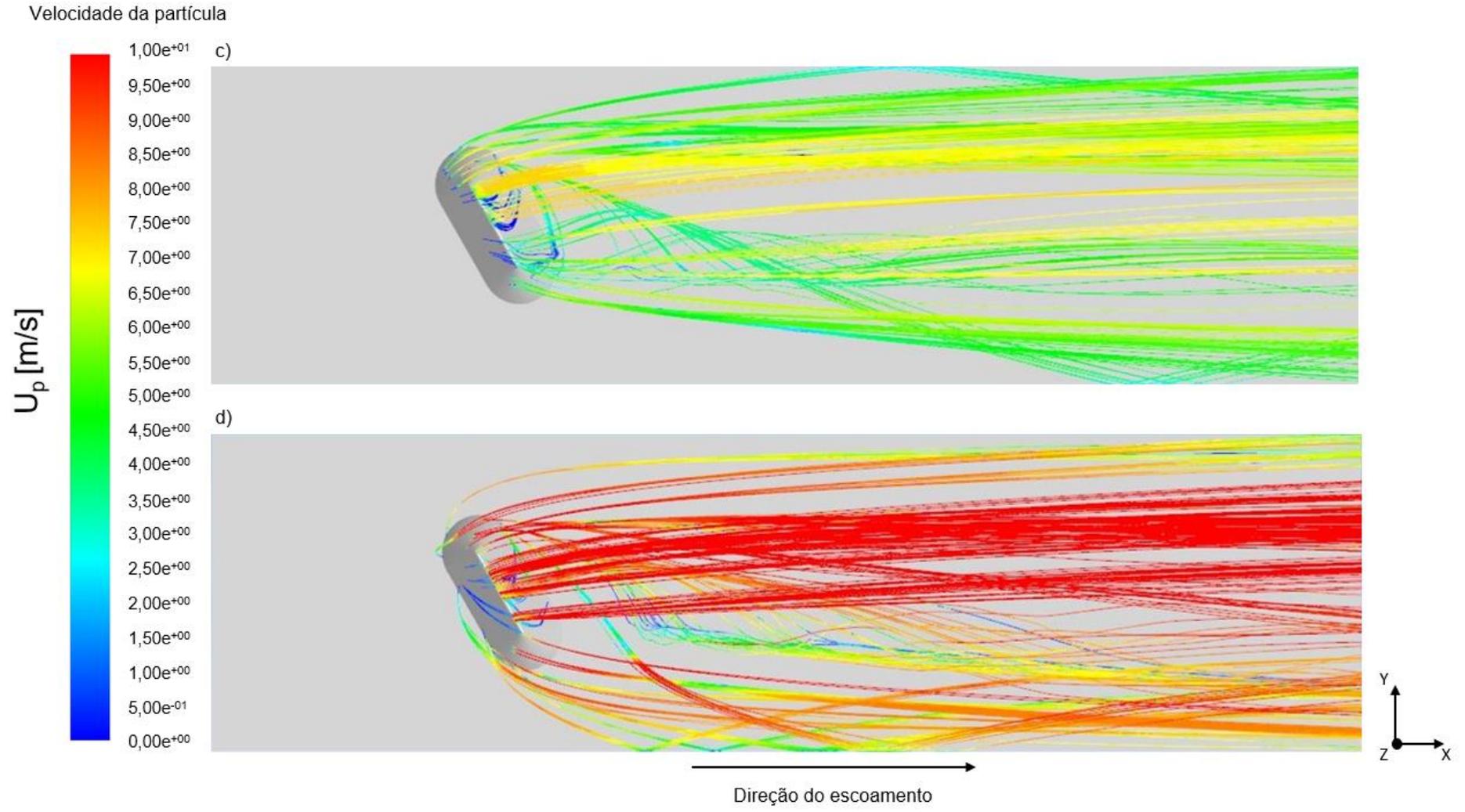


As trajetórias individuais das partículas emitidas pela pilha de estocagem são apresentadas na **Figura 5-35** para os casos analisados. As trajetórias são coloridas conforme a magnitude da velocidade, o que permite a visualização do comportamento das partículas quando estão situadas em regiões de menor ou maior velocidade do escoamento. Nota-se que as partículas apresentam menores valores de velocidade na zona de recirculação e na faixa longitudinal logo abaixo da pilha, região onde são

encontrados baixos valores de velocidade do escoamento e tensão de cisalhamento. Nessas mesmas regiões, há a tendência de acúmulo das partículas no chão do domínio, conforme visto na **Figura 5-31**. Nota-se também que o escoamento de maior velocidade foi capaz de conferir semelhante aumento de velocidade ao material.

Figura 5-35: Velocidade das partículas para os casos a) 2 – Areia, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; b) 4 - Areia, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s; c) 6 - Carvão, velocidade de escoamento livre 6,08 m/s; d) 8 - Carvão, velocidade de escoamento livre 10,00 m/s



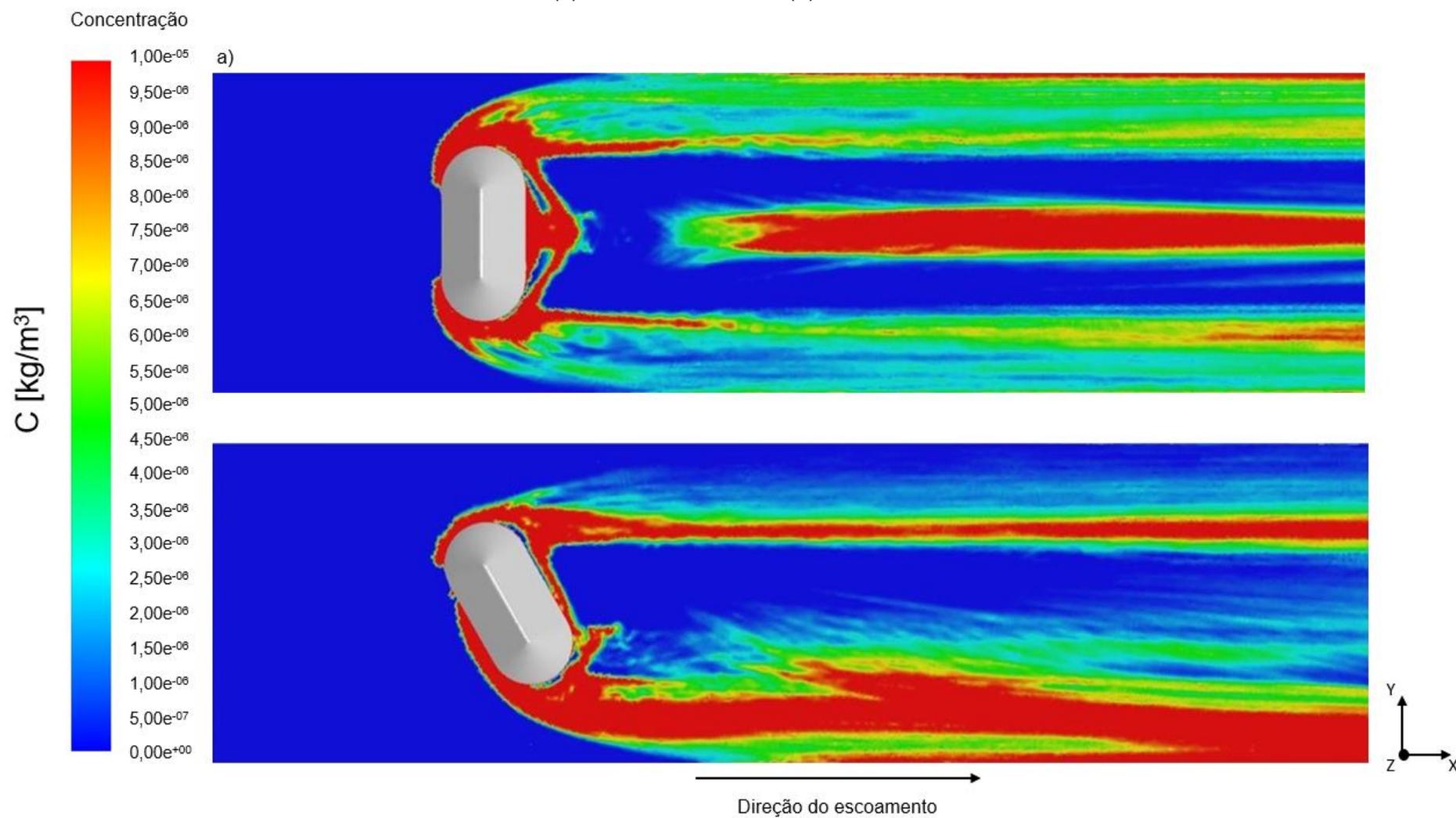


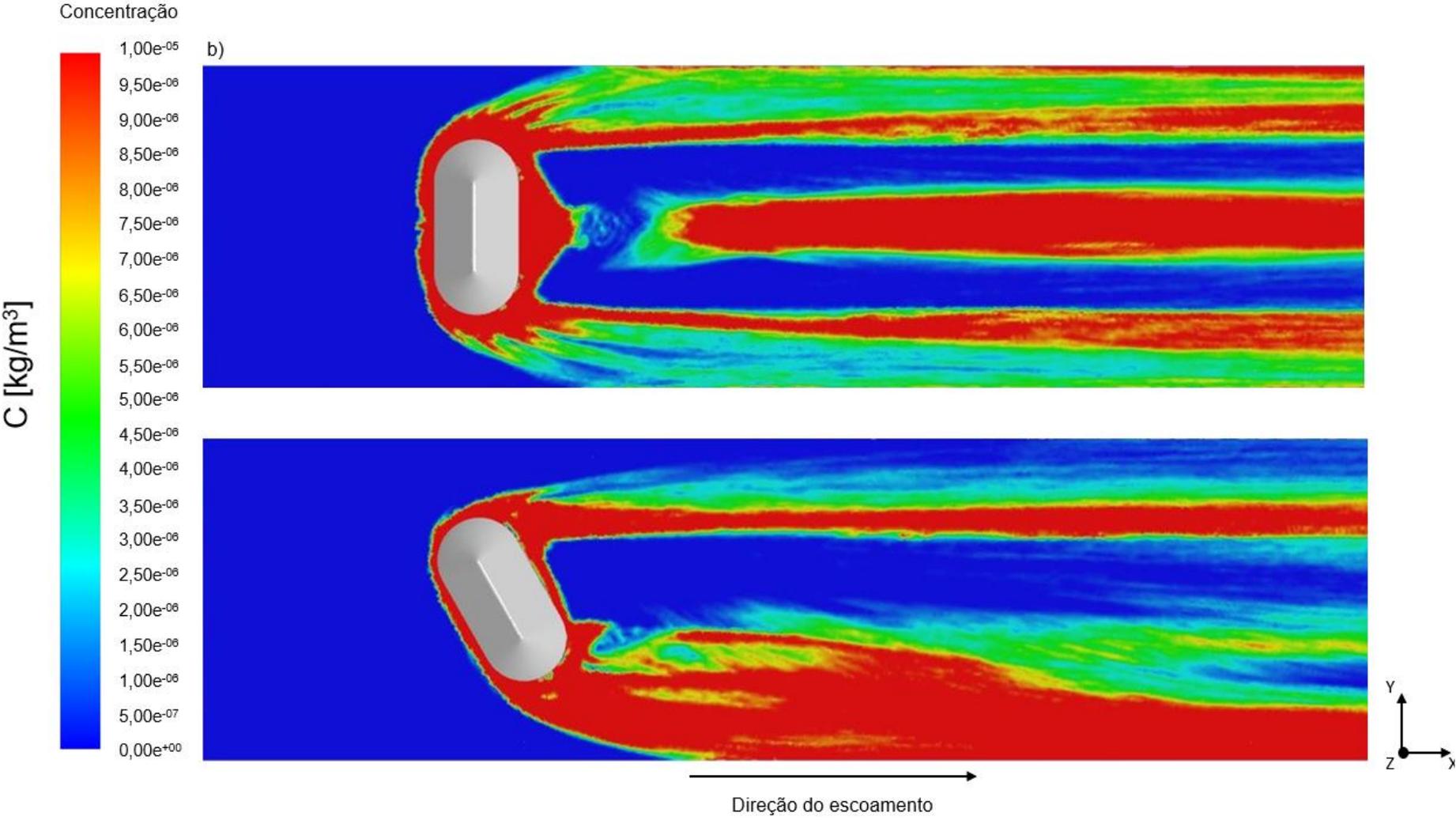
5.2.3. Comparação entre os casos

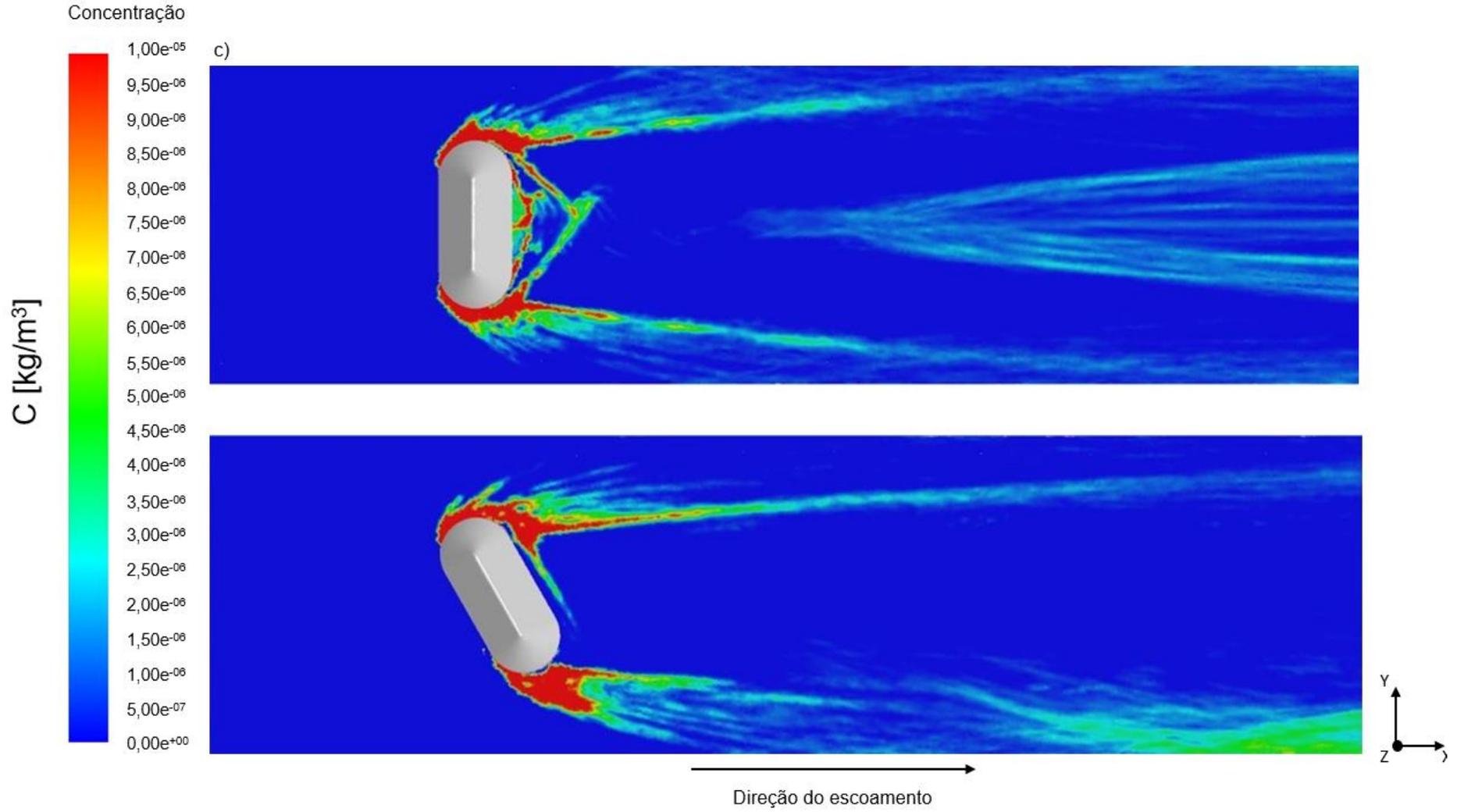
De maneira a avaliar a dinâmica do transporte para os diferentes casos de orientação do vento, a **Figura 5-36** traz a comparação entre os contornos de concentração no chão do domínio para pilhas de mesmo material e velocidade do vento e apenas com alteração do ângulo de incidência do vento.

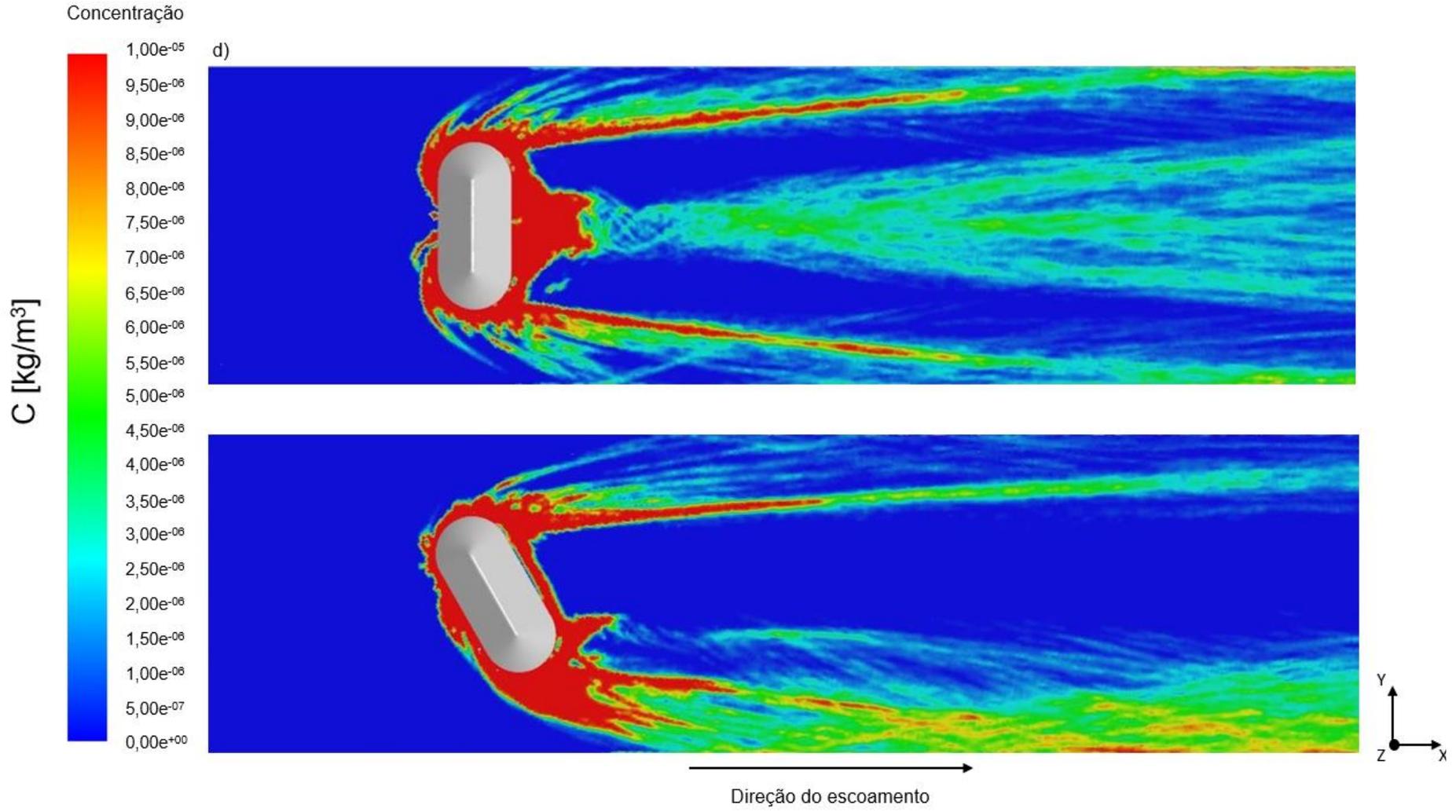
Nota-se como a modificação da angulação da pilha influencia nas regiões de maior acúmulo de partículas, onde os casos onde a pilha está orientada a 90° em relação a direção do vento apresenta uma concentração mais expressiva na seção central longitudinal do domínio, região essa que corresponde à zona de menores valores de tensão de cisalhamento (ver **Figura 5-6**), e os casos onde a pilha está orientada a 60° em relação a direção do vento apresentam maior concentração na faixa longitudinal abaixo da pilha, onde também se encontram os menores valores de tensão de cisalhamento (ver **Figura 5-16**).

Figura 5-36: Comparação entre os contornos de concentração no chão do domínio para os casos (a) Caso 1 e Caso 2; (b) Caso 3 e Caso 4; (c) Caso 5 e Caso 6; (d) Caso 7 e Caso 8.



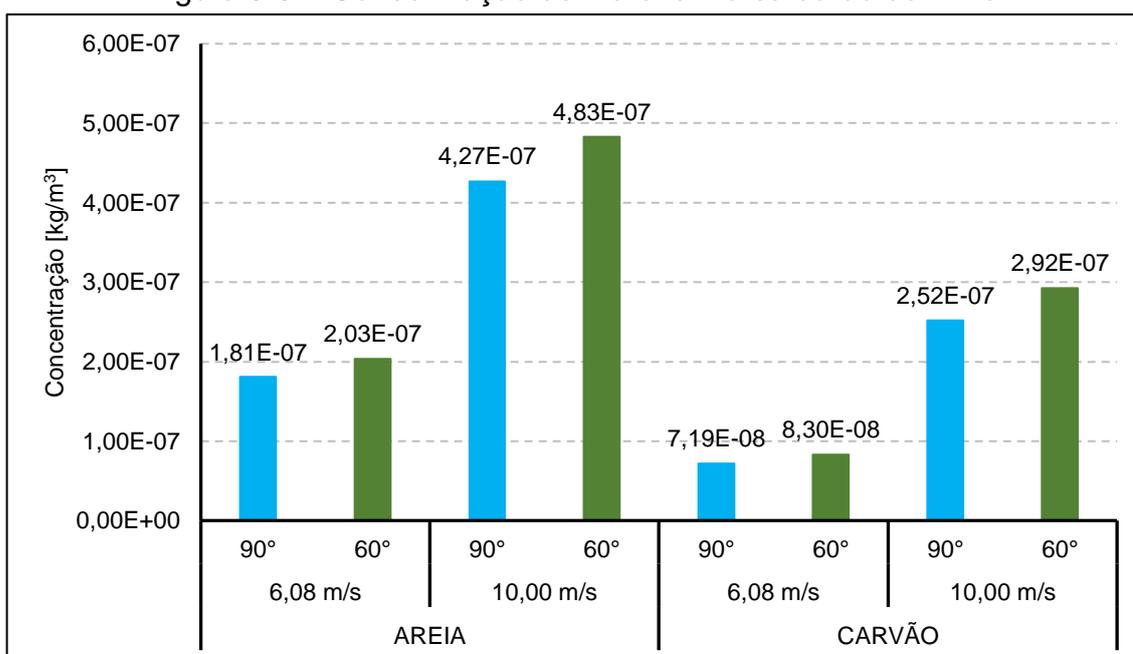






A **Figura 5-37** apresenta a concentração de material particulado calculada na saída do domínio de estudo para cada caso avaliado, e é possível perceber que as pilhas orientadas a 60° em relação à direção do vento resultam em uma maior concentração na saída quando comparadas às orientadas a 90°, e o aumento da velocidade do vento também resultou em um aumento da concentração. Tal situação pode ser explicada ao se analisar a **Figura 5-23**, onde são encontradas comparações similares em relação à massa emitida pelas pilhas de estocagem de cada caso.

Figura 5-37: Concentração de material na saída do domínio.



6. CONCLUSÃO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da velocidade e ângulo de incidência do escoamento nos mecanismos hidrodinâmicos ao redor de uma pilha de estocagem, além de observar como as diferentes velocidades, ângulos de incidência e materiais influenciam na emissão e dispersão de material granulado para a atmosfera. Para isso, foram realizadas simulações numéricas utilizando modelo de turbulência κ - ω SST para simular o escoamento atmosférico, modelo de emissão USEPA para quantificar a emissão de material, e modelo de fase discreta para avaliar a dispersão das partículas no domínio. Os valores de energia cinética turbulenta (κ) e taxa de dissipação específica (ω) foram obtidos a partir de simulações numéricas preliminares em um domínio precursor no qual uma condição periódica foi aplicada como condição de contorno nas seções de entrada e saída, de maneira a produzir um escoamento completamente desenvolvido, e esse escoamento foi utilizado como condição de entrada para a simulação analisada. Os resultados obtidos foram comparados com resultados de literatura, sendo eles resultados numéricos e/ou experimentais.

O presente estudo foi capaz de obter uma boa predição dos mecanismos do escoamento ao redor da pilha de estocagem, principalmente ao observar as regiões de diminuição de velocidade na região anterior à pilha devido à sua presença, a aceleração do escoamento e um aumento do gradiente de velocidade na face de barlavento da pilha, e a zona de recirculação na região de sotavento devido à separação do escoamento no topo da pilha. Observou-se também que a pilha de estocagem orientada à 60° em relação à direção do vento registrou maiores valores de velocidade incidente quando comparada à mesma pilha disposta perpendicularmente à direção do vento.

A quantificação da emissão de material a partir da pilha de estocagem devido à erosão eólica demonstrou que a pilha constituída por areia teve uma maior emissão de material, e isso se deve à menor velocidade de fricção limite da areia, quando comparado ao carvão, dado que uma menor velocidade de fricção limite permite que o material seja ressuspenso por um vento de menor intensidade. O aumento da velocidade do escoamento livre teve como consequência o aumento da emissão de material, dado que a velocidade de fricção do vento é diretamente proporcional à sua

velocidade de escoamento. Por fim, a pilha de estocagem orientada a 60° em relação à direção do vento apresentou maior emissão, quando comparada à pilha orientada à 90° .

A análise da dispersão das partículas ao longo do domínio mostrou que, para a pilha orientada perpendicularmente à direção do vento, há maior acúmulo de material na faixa longitudinal central após a pilha, região correspondente à uma zona de baixas tensões de cisalhamento. Para a pilha orientada a 60° , as zonas de menor tensão de cisalhamento estão localizadas nas faixas longitudinais logo acima e abaixo da pilha, e nessas regiões foi possível observar um alto acúmulo de material.

Frente ao apresentado, é sugerido para trabalhos futuros desenvolver uma investigação com um maior número de pilhas, observando direções e velocidades predominantes nos locais onde elas se encontram, de maneira a entender como a configuração das pilhas pode interferir na emissão de particulado; a realização de experimento em túnel de vento a fim de validar quantitativamente o modelo empregado neste estudo e a alteração nas configurações da pilha para verificação da eficiência de supressores químicos para minimização das emissões de partículas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Theory Guide. 2013a.

ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide. 2013b.

BADR, T.; HARION, J. L. Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 5576-5584, 2005.

BADR, T.; HARION, J. L. Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 360-368, 2007.

BARLOW, J.B.; RAE, W.H.; POPE, A. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. 3 ed. John Wiley & Sons, 1999.

BEN RAMOUL, L.; KORICHI, A.; POPA, C.; ZAIDI, H.; POLIDORI, G. Numerical study of flow characteristics and pollutant dispersion using three RANS turbulence closure model. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 19, p. 379-400, 2019.

BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS., T; CARMELIET, J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. **Atmospheric Environment**, v.41, p. 238-252, 2007.

CIERCO, F. X.; NAAIM, M.; NAAIM-BOUVET, F. Experimental study of particle concentration fluctuations in a turbulent steady flow. **Annals of Glaciology**, v. 49, p. 121-126, 2008.

CONG, X.C. *et al.* Impact of the installation scenario of porous fences on wind-blown particle emission in open coal yards. **Atmospheric Environment**, v. 45, p. 5247-5253, 2011.

CONG, X.C. *et al.* Effect of aggregate stockpile configuration and layout on dust emissions in an open yard. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, p. 5482-5491, 2012.

DIEGO, I. *et al.* Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, p. 3197-3207, 2009.

DUAN, Z.; WANG, Y.; JIAO, Q.; WANG, J.; LIU, Y. Local dispersion characteristics of dust in large open-air piles under the action of one-way wind. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 47182-47195, 2021.

DURÁN, O.; CLAUDIN, P.; ANDREOTTI, B. On aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws. **Aeolian Research**, v. 3, p. 243-270, 2011.

FERREIRA, M.C. *et al.* An experimental and numerical study of the aeolian erosion of isolated and successive piles. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 20, p.123-144, 2019.

FERREIRA, M. S. C.; FURIERI, B.; DE MORAIS, C. L.; STOCCO, J. F.; REIS JR, N.C.; HARION, J-L.; SANTOS, J. M. Experimental and numerical investigation of Building effects on wind erosion of a granular material stockpile. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 36013-36026, 2020.

FRANKE, J.; BAKLANOV, A. best practice guideline for the cfd simulation of flows in the urban environment: COST Action 732 Quality assurance and improvement of microscale meteorological models. 2007.

FURIERI, B.; RUSSEIL, S.; HARION, J.L.; TURPIN, C.; SANTOS, J.M. Experimental surface flow visualization and numerical investigation of flow structure around an oblong stockpile. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 12, p. 533-553, 2012.

FURIERI, B.; RUSSEIL, S.; SANTOS, J.M.; HARION, J.L. Effects of non-erodible particles on aeolian erosion: Wind-tunnel simulations of a sand oblong storage pile. **Atmospheric Environment**, v. 79, p. 672-680, 2013.

HE, W. ; HUANG, N.; XU, B.; WANG, W. Numerical simulation of wind-sand movement in the reversed flow region of a sand dune with a bridge built downstream. **The European Physical Journal**, v. 41, p. 41-53, 2018.

HONG, N. *et al.* Wind tunnel investigation on the dust emission characteristics of high moisture coal piles. **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, p. 02019, 2020.

JIANG, H. *et al.* Sand transportation and reverse patterns over leeward face of sand dune. **Geomorphology**, v. 238, p. 41-47, 2017.

KIM, S-E.; BOYSAN, F. Application of CFD to environmental flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 81, p. 145-158, 1999.

KOK, J.; RENNO, N. Enhancement of the emission of mineral dust aerosol by electric forces. **Geophysical research letters**, v.33, 2006.

MENTER, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. **AIAA Journal**, v. 32(8), p. 1598-1605, 1994.

MOUKALLED, F.; DARWISH, M.; MANGANI, L. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics**. Springer. 2016.

MURAKAMI, S. Comparison of various turbulence models Applied to a bluff body. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 46-47, p. 21-36, 1993.

NOVAK, L. *et al.* Numerical Modeling of Dust Lifting from a Complex-Geometry Industrial Stockpile. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 61, p. 621-631. 2015.

NTINAS, G. K.; SHEN, X.; WANG, Y.; ZHANG, G. Evaluation of CFD turbulence models for simulating external airflow around varied building roof with wind tunnel experiment. **Building Simulation**, v.11, p115-123, 2018.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. McGraw-Hill, 1980.

PETIT, H. A.; CAVALCANTI, p. p.; TAVARES, L. M. Modeling of emission of dust due to abrasion during stockpiling of iron ore pellets. In: IMPC 2020: International Mineral Processing Congress, Cidade do Cabo, 2015.

RANI, S. I.; AZIZ, B. A.; GIMBUN, J. Analysis of dust distribution in silo during axial filling using computational fluid dynamics: Assessment on dust explosion likelihood. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 96, p. 14-21, 2015.

SANTOS, J. M.; REIS JR, N. C.; GOULART, E. V.; MAVROIDIS, I. Numerical simulation of flow and dispersion around an isolated cubical building: The effect of the atmospheric stratification. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 5484-5492, 2009.

SCHULZ, d.; SCHWINDT, N.; SCHMIDT, E.; KRUGGEL-EMDEN, H. Modelling of dust emissions induced by flow over stockpiles and through packed beds. **Particuology**, 2020.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**. 2. ed. John Wiley & Sons, Inc. 2006.

SHAO, Y. **Physics and Modelling of Wind Erosion**. 2. ed. Springer, 2008.

SHAO, Y.; LU, H. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. **Journal of Geophysical Research**, v.105, p.22437-22443, 2000.

SONG, C.; PENG, L.; CAO, J.; UM, L.; BAI, H.; LIU, X. Numerical simulations of flow structure and dust emissions behind porous fences used to shelter open storage piles. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 14, p. 1584-1592, 2014.

STOVERN, M.; FELIX, O.; CSAVINA, J.; RNE, K. P.; RUSSEL, M. R. JONES, R. M.; KING, M.; BETTERTON, E. A.; SÁEZ, A. E. Simulation of windblown dust transport from a mine tailings impoundment using a computational fluid dynamics model. **Aeolian Research**, v. 14, p. 75-83, 2014.

TABOR, G.R.; BABA-AHMADI, M.H. Inlet conditions for large eddy simulation: A review. **Computers & Fluids**, v. 39, p. 553-567, 2010.

TORAÑO, J. A. *et al.* Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation. **Applied Mathematical Modelling**, v. 31, p. 2487-2502, 2007.

TORNO, S. *et al.* Dust emission reduction for open storage mineral piles by fences: CFD modelling. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 136, 2010.

TURPIN, C.; HARION, J-L. Numerical modeling of flow structures over various flat-topped stockpiles height: Implications on dust emissions. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 5579-5587, 2009.

TURPIN, C.; HARION, J-L. Effect of the topography of an industrial site on dust emission from open storage yards. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 10, p. 677-690, 2010.

USEPA (1995). **Introduction to Fugitive Dust Sources**. AP-42, 5^a Ed. Vol I. Chap. 13.2. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/13.2_fugitive_dust_sources.pdf. Acesso em: set. 2021.

USEPA (2006). **Industrial Wind Erosion**. AP-42, 5^a Ed. Vol I. Chap. 13.2.5. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/13.2.5_industrial_wind_erosion.pdf. Acesso em: set. 2021.

VASATURO, R.; KALKMAN, I.; BLOCKEN, B.; VAN WESEMAEL, P. J. V. Large eddy simulation of the neutral atmospheric boundary layer: performance evaluation of three inflow methods for terrains with diferente roughness. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, v. 173, p. 241-261, 2018.

ZHANG, W.; WANG, Y.; LEE, S. J. Two-phase measurements of wind and saltating sand in na atmospheric bounday layer. **Geomorphology**, v. 88, p. 109-119, 2007.

ZOBECK, T. M.; VAN PELT, R. S. Wind Erosion. In: HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J. **Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America**, 2011, p. 209-227.