



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo experimental da erosão eólica de pilhas de material granular com formato oblongo

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Jóni da Silva Gaspar

Orientador

Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira

Júri

Presidente	Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira Professor auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira Professor auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes Professor auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira Professor auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro de 2017

Conhecimento é igual a um sobre ego, ou seja, quanto maior o conhecimento
menor o ego e quanto maior o ego, menor o conhecimento

Albert Einstein

Aos meus pais, irmã e Avó

Agradecimentos

Nesta fase terminal do meu percurso académico, apresento aqui o trabalho realizado no âmbito da disciplina de dissertação de mestrado. A sua escrita, bem como todo o trabalho por detrás dela, passando por todo o percurso académico dos últimos cinco anos, foi possível graças a uma série de pessoas às quais quero deixar um agradecimento.

Em primeiro lugar destaco os meus pais e irmã, por todo o apoio incondicional dado ao longo destes anos, pelo esforço feito para que conseguisse chegar onde cheguei. São vocês o pilar do meu sucesso, a força motriz que me faz ser quem sou e tenho muita sorte em vos ter. Pelo vosso esforço e dedicação, um muito obrigado.

Em segundo lugar, quero deixar um agradecimento à minha avó que se encontra à data da escrita deste documento, acamada. Sendo a única dos meus quatro avós que me resta, e estando a dividir o meu tempo entre a escrita deste documento e tomar conta de si, quero que saiba que gosto muito de si e que sou quem sou também graças a si. Nesta altura é você quem me dá mais alento e força para completar o meu sucesso académico.

Em terceiro lugar, destaco todos os amigos que fiz ao longo destes cinco anos. Ao Renato, à Joana, ao Pedro, ao Luís, e a tantos outros, sejam eles do departamento ou não, um muito obrigado por todos os momentos vividos e por me ajudarem a ser quem sou.

Em quarto lugar destaco o corpo docente do DEM, responsáveis pela minha formação académica e pessoal. Um muito obrigado pela qualidade do vosso trabalho na minha formação. Quero agradecer também ao meu orientador, prof. Almerindo pelo apoio e orientação no trabalho a realizar ao longo deste semestre à prof. Raquel Faria, pelo auxílio prestado nos ensaios experimentais e pela construção do dispositivo de obtenção do formato em estudo. Sei que terei sempre aqui uma porta aberta, caso haja algum problema, ou caso queira apenas ouvir uma opinião sábia.

Finalmente quero deixar um agradecimento à cidade em geral, visto que passei aqui dos melhores anos da minha vida, conheci e convivi bastante e fui protagonista de histórias que ficam para sempre na memória. Sei que será um sítio onde certamente regressarei no futuro.

Resumo

Há muitas empresas que têm necessidades de armazenamento em estaleiros abertos de materiais granulares em pilhas. Tal facto leva a que esses materiais estejam sujeitos à erosão provocada pelo vento, o que implica que eles possam contaminar o ar, criando-se problemas económicos, ambientais e de saúde para as populações.

O formato da pilha em estudo nesta dissertação é o oblongo. As dimensões do modelo são 74 mm de altura, 635 mm de comprimento e 226 mm de largura. Fizeram-se ensaios de erosão em túnel de vento, uma vez que existem poucos estudos experimentais da erosão de pilhas com este formato. Assim, mostram-se os resultados experimentais da erosão provocada pelo vento, que vai deformar a pilha, bem como da taxa de erosão da pilha. Estes resultados são apresentados para vários instantes de tempo de erosão. São usadas duas velocidades de escoamento incidente nestes ensaios: 9.08 e 9.90 m/s. A medição da erosão provocada na pilha é feita usando duas grelhas de medição distintas: uma mais refinada e outra mais grosseira. Verificou-se que não havia diferença, a nível qualitativo na taxa de erosão nem na medição da deformação da pilha, entre a grelha de medição grosseira e a refinada.

São usadas duas direções de escoamento incidente: perpendicular à pilha e formando um ângulo de 60° com a pilha. Observa-se que a erosão da pilha é simétrica, para o caso do escoamento incidente ser perpendicular à pilha e que a taxa de erosão da pilha é maior para a velocidade mais elevada. Para além disso, a rotação da pilha tende a reduzir a sua deformação, sendo este efeito mais notório para a velocidade de escoamento incidente de 9.08 m/s.

Palavras-chave: Taxa de erosão, erosão do vento, deformação da pilha, pilha de armazenamento oblonga

Abstract

There are many industries who has needs of storage in open yards of granular materials in stockpiles. This fact leads to these materials will be potentially subject to erosion provoked by the wind, what will lead those materials to contaminate the air, creating economic, environment and health problems for the populations.

The pile shape in study of this dissertation is the oblong. The dimensions of the model are 74 mm of height, 635 mm of length and 226 mm of width. Erosion tests in wind tunnel have been done, because there are few experimental studies of erosion of piles with this shape. Thus, wind erosion experimental results are shown, illustrating deformation of the pile, as well as the erosion rate. These results are shown for several instants of erosion. Two wind flow speeds are used in these experiments: 9.08 and 9.90 m/s. The erosion rate of the pile is computed for two distinct grids of measurement: one refined and the other coarser. It was found that there was no qualitative difference in erosion rate of the pile nor in his deformation, between the coarser grid measurement and the refined.

Two wind flow directions are used: perpendicular to the pile and doing an angle of 60° with it. It was found that there was no qualitative difference in erosion rate of the pile nor in his deformation, between the coarser grid measurement and the more refined. It is observed that the erosion of the pile is symmetrical, for the case of wind flow perpendicular to the pile and the erosion rate of the pile is greater for the higher wind speed. Furthermore, the wind direction tend to reduce his deformation, being this effect more notorious for the wind flow speed of 9.08 m/s.

Keywords: Erosion rate, wind erosion, pile deformation, oblong stockpile

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Metodologia US EPA	3
2.2. Validação numérica da metodologia US EPA	5
2.3. Efeito da configuração da pilha nas emissões de poeiras	7
2.4. Influência do formato do topo da pilha.....	10
2.4.1. Influência da direção do escoamento.....	12
2.5. Visualização experimental do escoamento de ar na superfície e investigação numérica do escoamento em torno da pilha de formato oblongo.....	13
2.5.1. Análise de resultados	14
2.6. Contribuição das áreas envolventes à pilha na emissão de partículas	16
2.6.1. Análise quantitativa das emissões de poeiras	16
2.7. Influência de uma segunda pilha nas emissões globais de estaleiros industriais..	17
2.8. Simulação em túnel de vento dos efeitos de partículas não erodíveis na erosão eólica de uma pilha de armazenamento oblonga	18
3. Procedimento experimental	21
3.1. Estudo da folga para a melhor formação da crista.....	21
3.2. Sistema de atravessamento	23
3.3. Ensaio no túnel de vento	28
3.3.1. Grelhas de medição usadas nos ensaios e colocação do laser no ponto inicial.	33
4. Resultados.....	37
4.1. Análise à repetibilidade da construção da pilha e variações de medição do sistema de atravessamento.....	37
4.2. Medição da erosão da pilha completa.....	39
4.3. Taxa de erosão	42
4.4. Pilha orientada 60° com o escoamento incidente.....	47
4.5. Variação do volume com o tempo, ao longo do processo de erosão para as duas direções em estudo.....	50
5. Conclusões.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXO A	57
ANEXO B	63

ANEXO C	65
ANEXO D	67
ANEXO E	83
ANEXO F	95
ANEXO G	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Contornos da velocidade normalizada u_s/u_r .(Fonte: USEPA, miscellaneous sources).....	5
Figura 2.2. Dimensões das pilhas estudadas e formato das mesmas (forma cônica e de topo horizontal.) (Fonte: Badr e Harion, 2005)	6
Figura 2.3. Vista de cima dos contornos u_s/u_r na superfície da pilha. Figura (a) corresponde ao teste 5, (b) ao 4, (c) ao 3, (d) ao 2 e (e) ao 1, para uma velocidade do escoamento de 5 m/s (escoamento vindo de cima). (Fonte: Badr e Harion, 2007). 8	
Figura 2.4. Curvas de u_s/u_r medidas a uma localização de $z/H=0.9$ e a 25 cm em torno da superfície da pilha. (Fonte: Badr e Harion, 2007).....	9
Figura 2.5. Descrição das direções do escoamento. (Fonte: Turpin e Harion, 2009).....	10
Figura 2.6. Vista de cima dos contornos normalizados da velocidade, para os testes 1, 4 e 7 e velocidade normalizada no plano de simetria (S na figura (a)), para esses mesmos testes. (Fonte: Turpin e Harion, 2009)	10
Figura 2.7. Campos de velocidade e pressão para o caso do topo afiado (a e c) e para o caso de superfície horizontal. (b e d).(Fonte: Turpin e Harion, 2009)	11
Figura 2.8. Evolução do potencial de erosão da pilha em função da altura de corte, para diferentes velocidades u_{10}^+ . (Fonte: Turpin e Harion, 2009)	11
Figura 2.9. Potencial de erosão para os dois casos em estudo (topo horizontal e topo afiado), em função do ângulo de incidência para as diferentes velocidades do escoamento. (Fonte: Turpin e Harion, 2009)	12
Figura 2.10. Velocidade normalizada no plano médio da superfície, e na superfície da pilha, para $\theta=60^\circ$. (Fonte: Turpin e Harion, 2009).....	13
Figura 2.11. Dimensões da pilha de stock (à esquerda), e ângulos de incidência do vento (à direita). (Fonte: Furieri et al. 2012b).....	13
Figura 2.12. Análise do escoamento na base da pilha orientada perpendicularmente ao escoamento incidente. À esquerda, distribuição da tensão de corte, obtida com CFD. À direita, visualização da superfície do escoamento, obtida experimentalmente. (Fonte: Furieri et al. 2012b).....	14
Figura 2.13. Análise ao escoamento na base da pilha orientada 60° face ao escoamento incidente. À esquerda, distribuição da tensão de corte, obtida com CFD. À direita, visualização da superfície do escoamento, obtida experimentalmente. (Fonte: Furieri et al. 2012b).....	15
Figura 2.14. Análise ao escoamento na base da pilha orientada 30° face ao escoamento incidente. À esquerda, distribuição da tensão de corte, obtida com CFD. À direita, visualização da superfície do escoamento, obtida experimentalmente. (Fonte: Furieri et al. 2012b).....	15

Figura 2.15. Distribuição da granulometria de areia para as duas taxas de cobertura estudadas. (Fonte: Furieri et al. 2013).....	18
Figura 2.16. Vista de cima do modelo erodido (a) e (b) resultados numéricos da distribuição de tensão de atrito na superfície da pilha. (Fonte: Furieri et al. 2013).....	19
Figura 3.1. Apresentação do formato da pilha em estudo e dimensões da mesma.	21
Figura 3.2. Pormenor do ângulo com a horizontal do dispositivo usado no estudo da folga ideal a deixar entre planos inclinados(a) e (b) dispositivo usado para a construção da pilha de areia pretendida, construído pela prof. Raquel Faria, no ISEC.	22
Figura 3.3. Interface gráfica do software usado no controlo por computador do sistema de atravessamento.	24
Figura 3.4. Pormenor da montagem do sistema de atravessamento e respetivo referencial usado nas medições.	24
Figura 3.5. Resultado da repetibilidade da grelha de medição.....	25
Figura 3.6. Verificação da repetibilidade da medição na direção X.	27
Figura 3.7. Pormenor da ligação rígida (a) e da substituição por uma flexível (b).....	27
Figura 3.8. Resultados da verificação da perpendicularidade entre os dois eixos (a) e correção do problema (b).	27
Figura 3.9. Perfil de velocidade no túnel aerodinâmico e perfil de intensidade de turbulência, medidos a partir do centro do bocal do túnel. (Fonte: Ferreira e Oliveira, 2009)	28
Figura 3.10. Pormenor das dimensões do modelo em estudo e distância da pilha ao bocal do túnel.....	29
Figura 3.11. Pormenor das marcações feitas no chão da secção de ensaios (a) e nas sapatas do dispositivo colocado no sítio (b).	30
Figura 3.12. Pormenor da colocação correta do pé do dispositivo(a) e incorreta(b).	30
Figura 3.13. Pilha inicial para os 2 casos em estudo:(a) escoamento incidente perpendicular à pilha e (b) crista formando um ângulo de 60° com o escoamento incidente.....	31
Figura 3.14. Pormenor do dispositivo cheio, após ser alisado com a régua (a) e limpeza da areia aderente às paredes do dispositivo (b).....	31
Figura 3.15. Quadro de controlo do motor elétrico do ventilador do túnel aerodinâmico ...	33
Figura 3.16. Pormenor dos pontos de início das medições.	33
Figura 3.17. Pormenor da colocação do laser na origem, para o escoamento perpendicular à pilha. (a) colocação incorreta e (b) colocação correta.....	34
Figura 3.18. Grelha de medição da pilha completa.	35
Figura 3.19. Grelha de medição refinada usada na medição de metade da pilha.....	36
Figura 3.20. Grelha de medição da pilha orientada 60° com o escoamento incidente.....	36
Figura 4.1. Esquema explicativo do cálculo da taxa de erosão.	43

Figura 4.2.Comparação da variação do volume com o tempo: efeito da rotação da pilha face ao escoamento, para a velocidade $U_0=9.08\text{m/s}$ (V275 rpm) e para a velocidade $U_0=9.90\text{m/s}$ (V300 rpm)	50
Figura 4.3.Variação do volume calculado com o tempo de erosão, para a medição de meia pilha e velocidade de escoamento incidente $U_0= 9.08 \text{ m/s}$	51
Figura 4.4.Variação do volume calculado com o tempo de erosão, para a medição de meia pilha e velocidade de escoamento incidente $U_0= 9.90 \text{ m/s}$	52
Figura A.1.Contornos de u_s/u_r (a)No plano horizontal a 25cm acima do chão em toda a superfície, para a configuração perpendicular, (b)na superfície considerada para o cálculo de emissão de poeiras e (c) linhas de corrente coloridas pela vorticidade em X. (Fonte: Furieri et al. 2014).....	58
Figura A.2.Contornos de u_s/u_r (a)No plano horizontal a 25cm acima do chão em toda a superfície, para a configuração de 60° , (b)na superfície considerada para o cálculo de emissão de poeiras e (c) linhas de corrente coloridas pela vorticidade em X. (Fonte: Furieri et al. 2014)	59
Figura A.3.Contornos de u_s/u_r . (a)no plano horizontal a 25cm acima do chão em toda a superfície, para a configuração de 30° , (b)na superfície considerada para o cálculo de emissão de poeiras e (c) linhas de corrente coloridas pela vorticidade em X. (Fonte: Furieri et al. 2014)	59
Figura C.1.Grelha de medição grosseira de metade da pilha.	65
Figura G.1. Vista explodida do dispositivo de construção da pilha em estudo.	101
Figura G.2. Dimensões do molde.	102
Figura G.3. Dimensões do pé de apoio ao chão.	103
Figura G.4. Dimensões da porca.	104
Figura G.5. Dimensões da sapata.	105
Figura G.6. Dimensões da tampa.	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Multiplicador em função do tamanho de partículas (k).(Fonte: USEPA, miscellaneous sources).....	4
Tabela 2.2. Determinação da velocidade limiar de erosão (u_t^*). (Fonte: USEPA, miscellaneous sources).....	4
Tabela 2.3. Fatores de emissão para as diferentes velocidades e configurações testadas, em gramas por ano (Fonte: Badr e Harion, 2007).....	9
Tabela 3.1. Estudo da folga ideal a deixar entre planos inclinados, para se obter a melhor formação possível para a crista da pilha.....	23
Tabela 4.1. Análise aos desvios máximo e mínimo encontrados, em relação à média de cotas de cada pilha, bem como a média desses desvios e o desvio padrão.	38
Tabela 4.2. Análise a alguns instantes de tempo da medição da erosão da pilha completa, para as duas velocidades.....	40
Tabela 4.3. Comparação entre as medições com a malha refinada e grosseira, para a velocidade $U_0=9.08$ m/s, para alguns instantes de erosão.	41
Tabela 4.4. Taxa de erosão da medição da pilha completa, para as duas velocidades, para alguns instantes de erosão.	45
Tabela 4.5. Taxa de erosão das medições 1 e 2 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0=9.90$ m/s, para alguns instantes de tempo.....	46
Tabela 4.6. Resultados da medição da pilha completa, orientada 60° com o escoamento incidente, para alguns instantes de erosão.....	48
Tabela 4.7. Resultados do cálculo da taxa de erosão da pilha orientada 60° com o escoamento incidente, para alguns instantes de tempo.	49
Tabela A.1. Distribuição de subáreas para os regimes u_s/u_r em estudo. (Fonte: USEPA, miscellaneous sources).....	57
Tabela A.2. Detalhes geométricos das pilhas testadas. (Fonte: Badr e Harion, 2007).....	57
Tabela A.3. Características geométricas das pilhas testadas (Fonte: Turpin e Harion, 2009).....	58
Tabela A.4. Áreas erodíveis e não erodíveis na pilha ($u_t^*=0.35$ m/s) e em torno da pilha ($u_t^*=0.55$ m/s) para $u_{10}^+=10.38$ m/s (Fonte: Furieri et al. 2014).....	60
Tabela A.5. Emissões de poeiras da superfície da pilha e do terreno envolvente. (Fonte: Furieri et al. 2014).....	60
Tabela A.6. Quantificação das emissões de poeiras. (Fonte: Furieri et al. 2012a).....	61
Tabela A.7. Soma e diferença relativa entre os casos testados. (Fonte: Furieri et al. 2012a).....	61

Tabela B.1. Estudo detalhado do funcionamento do sistema de atravessamento no modo manual.....	63
Tabela D.1. Medição da erosão da pilha completa	67
Tabela D.2. Medição 1 e 2 da erosão de meia pilha, $U_0=9.08$ m/s (275 rpm)	70
Tabela D.3. Medição 3 e 4 da erosão de meia pilha, $U_0=9.08$ m/s (275 rpm)	73
Tabela D.4. Medição 1 e 2 da erosão de meia pilha, $U_0=9.90$ m/s (300 rpm)	76
Tabela D.5. Medição 3 e 4 da erosão de meia pilha, $U_0=9.90$ m/s (300 rpm)	79
Tabela E.1. Taxa de erosão da medição da pilha completa.....	83
Tabela E.2. Taxa de erosão das medições 1 e 2 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0 =9.08$ m/s.....	85
Tabela E.3. Taxa de erosão das medições 3 e 4 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0=9.08$ m/s.....	88
Tabela E.4. Taxa de erosão das medições 1 e 2 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0=9.90$ m/s.....	91
Tabela E.5. Taxa de erosão das medições 3 e 4 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0=9.90$ m/s.....	93
Tabela F.1. Medição da pilha completa, orientada 60° com o escoamento incidente.....	95
Tabela F.2. Taxa de erosão da pilha orientada 60° com o escoamento incidente.	97

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

h – Altura da pilha de armazenamento [m]

u – Velocidade do vento [m/s]

u_s – Velocidade perto da superfície da pilha [m/s]

u_r – Velocidade à altura de 10 m [m/s]

u^+ – Milha mais rápida do vento [m/s]

u_{10}^+ – Milha mais rápida do vento, à cota de 10 m [m/s]

u^* – Velocidade de atrito [m/s]

u_t^* – Velocidade limiar de erosão [m/s]

z – Altura acima da superfície de teste [m]

z_0 – Altura de rugosidade [m]

U_{ref} – Velocidade de referência [m/s]

U_0 – Velocidade não perturbada [m/s]

τ – Tensão tangencial na superfície [N/m²]

k – Multiplicador do tamanho das partículas

N – Número de perturbações por ano

P_i – Potencial de erosão [g/m²]

S_i – Área de superfície da pilha [m²]

α_r – Ângulo de repouso do material granular

α – Expoente da lei de potência do perfil de velocidade à saída do túnel de vento

θ – Direção do escoamento incidente

δ – Espessura da camada limite [m]

ϕ – Taxa de erosão [kg/m²s]

ρ – Densidade da areia [kg/m³]

A_i – Área de cada célula [m²]

V_i – Volume de cada célula [m³]

Siglas

CFD – Mecânica dos Fluidos Computacional

US EPA – United States Environmental Protection Agency

FE – Fator de emissão

LAI – Laboratório de Aerodinâmica Industrial

PIV – Particle image velocimetry

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia, várias indústrias, desde a indústria cerâmica até à de produção energética, têm necessidades de armazenamento de materiais em pilhas, tais como carvão, terra, areia ou resíduos industriais. Este armazenamento, muitas vezes dá-se em estaleiros abertos, ficando estes materiais sujeitos à erosão do vento. Tal facto leva a que estes materiais possam contaminar o ar e/ou os solos, devido à emissão de poeiras provocada pelo vento, levando a que hajam consequências económicas e ambientais, pondo-se em risco a saúde de populações que respirem o ar contaminado por estes materiais. Isto pode levar também à contaminação de lençóis freáticos com consequências na agricultura.

Estes materiais são armazenados em pilhas com diversos formatos, desde cónicos a semicirculares, bem como oblongos de topo horizontal ou afiado. É este o formato que está menos estudado a nível experimental, daí o interesse pertinente deste trabalho, de modo a contribuir para colmatar esta lacuna. Assim, pretende-se dar uma contribuição aos trabalhos já desenvolvidos por outros autores, maioritariamente do tipo computacional, de modo a permitir criar dados de natureza experimental que sirvam de comparação ou meio de validação do trabalho computacional já desenvolvido.

O trabalho experimental desta dissertação foi desenvolvido no LAI, no túnel de vento aí presente. O modelo a ser erodido foi construído por um dispositivo criado para esse propósito, de modo a assegurar uma boa repetibilidade na construção das pilhas. Os ensaios de erosão realizaram-se para duas velocidades de escoamento incidente $U_0 = 9.08$ e $U_0 = 9.90$ m/s, sendo que o túnel de vento foi parado para um tempo cumulativo de $t = 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10$ e 15 minutos de erosão para a velocidade mais baixa ($U_0 = 9.08$ m/s) e $t = 1, 2, 3, 4, 5, 7$ e 10 minutos para a velocidade mais elevada ($U_0 = 9.90$ m/s). Foram testadas duas direções para o escoamento incidente: perpendicular à pilha, ou seja, na perpendicular ao comprimento da pilha, e fazendo um ângulo de 60° com o comprimento da pilha. Para além disso usaram-se duas grelhas de medição: uma mais grosseira e outra mais refinada.

Os objetivos deste trabalho prendem-se com a medição da deformação da pilha provocada pelo vento para as duas velocidades de escoamento incidente e com esses dados,

calcular a taxa de erosão da pilha. Analisa-se também se o refinamento da malha de medição influencia ou não no cálculo da taxa de erosão.

Esta dissertação, a nível estrutural, divide-se em cinco capítulos. No capítulo dois apresenta-se uma revisão bibliográfica que permite enquadrar o trabalho, explicar as características do escoamento em torno do modelo oblongo em estudo, para várias direções do escoamento incidente, assim como na base do modelo, e apresentar alguns resultados teóricos da taxa de erosão. No capítulo três é feita uma descrição da metodologia experimental seguida, bem como alguns constrangimentos surgidos na preparação dos ensaios. No capítulo quatro apresentam-se alguns resultados das medições da erosão da pilha, bem como alguns resultados ilustrativos da taxa de erosão. Apresentam-se aí ainda as curvas do decaimento do volume da pilha com o tempo. Finalmente, no capítulo cinco, são apresentadas as conclusões deste trabalho, e são feitas algumas sugestões para trabalho futuro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Metodologia US EPA

Trata-se de um método analítico usado para estimar as emissões a partir de fontes abertas. Materiais granulares em pilhas de *stock*, normalmente são caracterizados por terem superfícies não homogêneas de misturas de materiais erodíveis e não erodíveis. Qualquer material que fique encrostado à superfície por ter um diâmetro médio superior vai diminuir o potencial de erosão. A velocidade média do vento pode não ser suficiente para manter a erosão, mas as rajadas podem rapidamente esvaziar uma porção de área erodida.

Há algumas variáveis meteorológicas importantes a reter. Uma delas é a “milha mais rápida do vento” (u^+). É esta variável que melhor representa a magnitude das rajadas. Estas variáveis facilmente são encontradas em tabelas locais das condições climáticas.

O perfil de velocidade usado nesta metodologia, tem a distribuição logarítmica apresentada em (2.1):

$$u(z) = \frac{u^*}{0.4} \ln \frac{z}{z_0}, (z > z_0). \quad (2.1)$$

Nesta expressão, o valor 0.4 representa a constante adimensional de *Von Karman*. Entende-se por altura de rugosidade (z_0) a cota à qual a velocidade do vento é nula.

As emissões de poeiras também dependem da frequência de perturbações. Entende-se por perturbações as ações que resultam na exposição de material novo à superfície, ou seja, operações de adição ou remoção de material à superfície. Assim, quando isto acontece, o potencial de erosão é restaurado.

Nesta metodologia, o fator de emissão (FE) pode ser expresso em (g/m^2) e é dado pela expressão (2.2)

$$FE = k \sum_{i=1}^N P_i S_i \quad (2.2)$$

O potencial de erosão (P_i) é determinado para a milha mais rápida observada entre perturbações. Este valor pode ser calculado a partir de (2.3). S_i é a área de superfície da

pilha e N é o número de perturbações na pilha. O multiplicador do tamanho das partículas (k) obtém-se a partir da Tabela 2.1 e varia com o tamanho destas.

Tabela 2.1. Multiplicador em função do tamanho de partículas (k). (Fonte: USEPA, *miscellaneous sources*)

$>30\mu\text{m}$	$<15\mu\text{m}$	$<10\mu\text{m}$	$<2.5\mu\text{m}$
1.0	0.6	0.5	0.075

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \quad (2.3)$$

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

Esta metodologia dá um procedimento experimental para determinar a velocidade limiar de erosão (u_t^*), que consiste em peneirar a areia. Dependendo da abertura da peneira, consegue-se determinar o diâmetro da areia e essa velocidade, conforme se apresenta na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Determinação da velocidade limiar de erosão (u_t^*). (Fonte: USEPA, *miscellaneous sources*)

Abertura (mm)	Média	Velocidade limiar de erosão (u_t^*), (m/s)
2	3	1
1	1.5	0.76
0.5	0.75	0.58
0.25	0.375	0.43

Para converter a milha mais rápida do vento medida num anemómetro de referência à cota de 10 m (u_{10}^+), na velocidade de atrito (u^*) equivalente deve-se aplicar a seguinte expressão:

$$u^* = 0.053u_{10}^+ \quad (2.4)$$

A expressão (2.4) restringe-se a pilhas de topo horizontal ou zonas com pouca penetração na camada limite do vento. Se a pilha tiver penetração significativa na camada limite do vento, (ou seja, se o rácio entre a base e a altura for superior a 0.2), é preciso dividir a pilha em subáreas com diferente exposição ao vento. Assim, esta metodologia é frequentemente usada para dois formatos representativos de pilhas de *stock*: cónico e oval

com topo horizontal, (Figura 2.1) e ângulo de repouso α_r de 37° (Figura 2.2). São apresentados os rácios entre a velocidade junto da superfície da pilha (u_s) e a velocidade de aproximação do vento (u_r). Os resultados, presentes na Figura 2.1, foram obtidos a partir de estudos em túnel de vento, que tem uma secção de testes com 2.1 m de altura, 3.7 m de largura e 18.3 m de comprimento. A camada limite aí presente tem uma profundidade de 1 m, rugosidade de 0.12 mm e velocidade de atrito (u^*) de $0.048U_0$ em que U_0  a velocidade de escoamento não perturbado. A velocidade junto à superfície foi medida na perpendicular  superfície das pilhas, com anemmetros de fio quente posicionados a 2-3 mm acima da superfície do modelo. A fração de área correspondente a cada valor do rácio u_s/u_r para cada um dos casos em estudo é apresentado no anexo A, Tabela A.1.

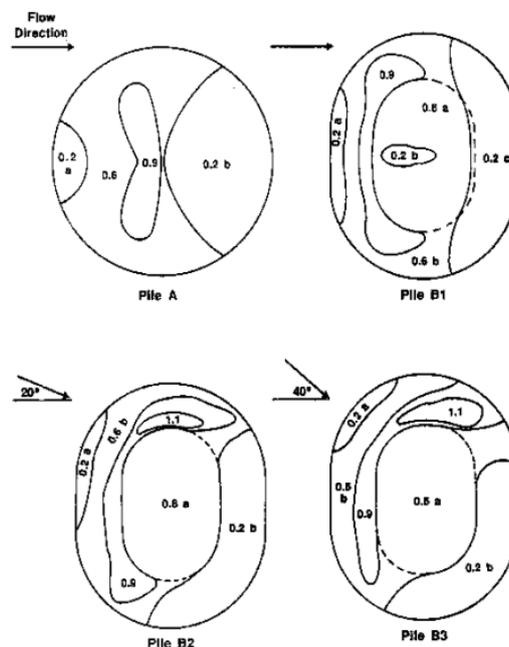


Figura 2.1. Contornos da velocidade normalizada u_s/u_r .(Fonte: USEPA, *miscellaneous sources*)

2.2. Validação numérica da metodologia US EPA

De forma a validar computacionalmente os resultados da metodologia experimental US EPA, Badr e Harion (2005) fizeram simulações numéricas tridimensionais, baseadas nas soluções das equações de Navier Stokes, aplicando o modelo de turbulência $k - w$. É este o método computacional que melhor se adapta ao estudo experimental, segundo aqueles autores. É aplicado o código comercial FLUENT.

As pilhas estudadas têm as dimensões presentes na Figura 2.2. Estas dimensões correspondem a um modelo  escala 1/100 relativamente a pilhas reais usadas no

armazenamento de carvão. A altura (11 cm) e o ângulo de repouso α_r (37°) são iguais para ambas, só mudando o formato.

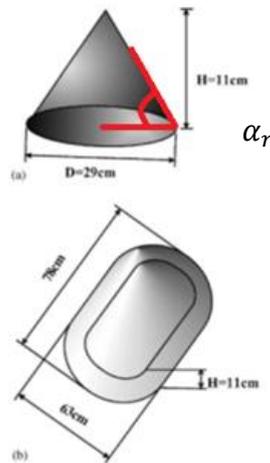


Figura 2.2. Dimensões das pilhas estudadas e formato das mesmas (forma cônica e de topo horizontal.)
(Fonte: Badr e Harion, 2005)

Conseguiram-se bons coeficientes de correlação, especialmente para o caso da pilha de topo plano ($r=0.95$). Para o caso da pilha cônica, a correlação foi menor ($r=0.9$). Isto acontece porque há uma zona de discrepância no topo do cone, onde a superfície e o raio são pequenos. Se se desprezar essa zona do topo, consegue-se um melhoramento no coeficiente de correlação para a pilha cônica. Para os casos da rotação da pilha de topo horizontal de 20° e 40° face à normal do escoamento incidente, também se obtiveram bons coeficientes de correlação ($r=0.94$ e 0.90 respetivamente).

A diferença global deve-se provavelmente ao facto de os valores numéricos da velocidade serem calculados à altura de 2.5mm acima da superfície da pilha e no caso experimental essa distância é difícil de medir, estando os anemómetros colocados a 2-3mm acima da superfície, conforme já referido.

É importante destacar a existência de áreas de elevada velocidade no topo das duas pilhas em estudo, já que é aí que a libertação de partículas é mais provável de ocorrer. Essas zonas localizam-se junto ao topo das faces inclinadas voltadas ao escoamento incidente. Isto é expectável, porque aí o escoamento é forçado a acelerar para cima e deslocar-se em redor das laterais da pilha. O escoamento separa-se, formando-se uma zona de recirculação de baixa velocidade. As simulações numéricas permitem ainda identificar zonas de baixa velocidade na base dos obstáculos. Esta redução leva a uma baixa capacidade de transporte de partículas na base da pilha.

A pilha de topo horizontal é mais protegida dos efeitos do vento do que a cônica. Isto pode ser explicado devido a uma abrupta queda de pressão na zona do topo, devido à forma afiada dessa zona. À medida que o ângulo de incidência aumenta, o escoamento aproxima-se do lado de sotavento, e os valores da velocidade aumentam.

2.3. Efeito da configuração da pilha nas emissões de poeiras

De forma a perceber de que forma a configuração da pilha afeta as emissões de partículas, Badr e Harion (2007) fizeram simulações numéricas, usando novamente o código FLUENT, mantendo fixo o volume da pilha de material granular, o ângulo de repouso desta, o formato (oblongo de crista afiada) e variando a altura, o comprimento e a velocidade do escoamento. Os resultados foram novamente validados com os presentes na metodologia US EPA. Os autores pretendem “encontrar o melhor compromisso entre a localização e a configuração das pilhas, de acordo com as características dominantes do vento no local, para se conseguir reduzir a emissão de poeiras. As pilhas de stock previamente investigadas não cobrem a variedade enorme de formas e dimensões que podem ser encontradas na indústria”.

Na Tabela A.2, presente no anexo A, é feita uma síntese das dimensões das pilhas daquele estudo.

Os resultados são consistentes com os já explicados. A presença da pilha faz com que haja desaceleração do escoamento na zona de trás da pilha, bem como junto da base da pilha. Por outro lado, há aceleração junto à crista e nas zonas laterais, seguida de uma zona de separação e súbita diminuição de velocidade. Variar a velocidade média do escoamento tem pouca influência na distribuição da velocidade normalizada (u_s/u_r). Apesar da pressão absoluta e velocidade variarem, as características qualitativas do escoamento mantêm-se bastante similares.

O campo de velocidade normalizada (u_s/u_r). é mostrado na Figura 2.3. Apresenta-se assim as várias configurações geométricas estudadas. Verifica-se uma aceleração progressiva do escoamento no lado voltado ao vento, para todas as configurações testadas e valores mais elevados na zona da crista foram encontrados para a geometria com maior altura.

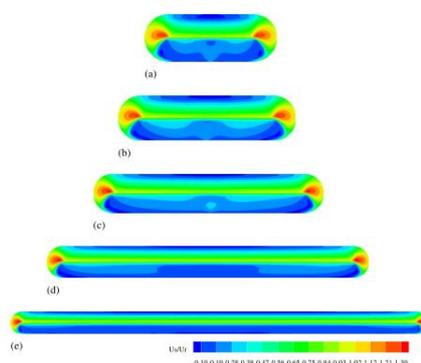


Figura 2.3. Vista de cima dos contornos u_s/u_r na superfície da pilha. Figura (a) corresponde ao teste 5, (b) ao 4, (c) ao 3, (d) ao 2 e (e) ao 1, para uma velocidade do escoamento de 5 m/s (escoamento vindo de cima). (Fonte: Badr e Harion, 2007)

Na Figura 2.4 apresentam-se as curvas traçadas a uma localização de $z/H = 0.9$ e em torno da superfície da pilha. Pode-se observar que a aceleração no lado inclinado para o vento não é uniforme em toda a superfície. Isto ainda é mais notório para o caso de a pilha ter o comprimento reduzido. Aí, o impacto das laterais da pilha no campo do escoamento altera-o logo a partir do plano de simetria. Ainda mais, os máximos valores de u_s/u_r nas laterais da pilha são maiores que os registados na zona da crista e aumentam ligeiramente com o aumento do comprimento da pilha, conforme se vê na Figura 2.4. Nos testes 4 e 5 os vórtices podem não se ter aproximado o suficiente para influenciar o transporte de partículas porque esses vórtices estão relativamente próximos nestes testes. Com o aumento do comprimento da pilha e redução de altura, a distância que separa os centros dos vórtices aumenta. Vê-se ainda na Figura 2.4 que no lado descendente da pilha, os efeitos combinados do aumento de altura e da redução de comprimento, levam a um constrangimento dos vórtices contra rotativos. O seu comprimento característico é aumentado proporcionalmente à altura da pilha, enquanto que a área de superfície disponível para o seu desenvolvimento lateral é reduzida.

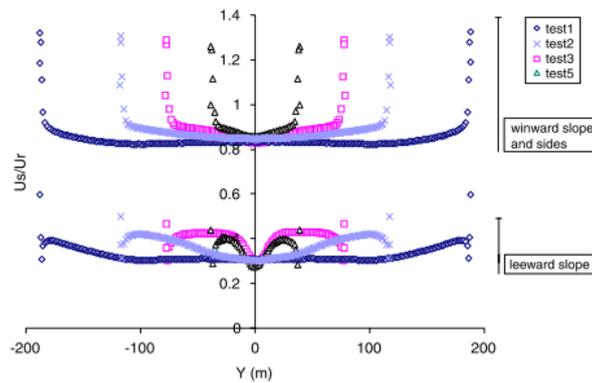


Figura 2.4. Curvas de u_s/u_r medidas a uma localização de $z/H=0.9$ e a 25 cm em torno da superfície da pilha. (Fonte: Badr e Harion, 2007)

Analisando os dados da Tabela 2.3, a configuração 3 é aquela que registra os valores de taxa de emissão mais baixos, para qualquer das velocidades estudadas. Isto pode-se justificar devido à formulação do fator de emissão, equação (2.2), que é controlado por dois parâmetros que são o potencial de erosão (P_i) e as áreas de superfície S_i . Assim, para uma velocidade de escoamento constante e altura da pilha variável, S_i vai ter o maior efeito na taxa de emissão, enquanto que mudar as características do escoamento para uma geometria fixa, o potencial de erosão tem mais importância. Daí que esta metodologia favoreça alturas intermédias em comparação com outras configurações.

É de notar ainda que alterar a direção do escoamento altera drasticamente as linhas de corrente e isso vai alterar o fator de emissão.

Tabela 2.3. Fatores de emissão para as diferentes velocidades e configurações testadas, em gramas por ano (Fonte: Badr e Harion, 2007)

Teste n°	Velocidade[m/s]		
	5	10	15
1	6455	77464	220856
2	5820	65830	187302
3	5607	59793	268470
4	5720	61032	169905
5	6176	61609	174194

2.4. Influência do formato do topo da pilha

Conforme já explicado acima no estudo de outros autores, a erosão eólica ocorre maioritariamente na zona do topo da pilha. Assim, Turpin e Harion (2009) “acham relevante desenvolver um estudo que avalie a influência da planificação da crista da pilha na emissão de poeiras. Já que é bem-sabido que atuar nas dimensões da pilha induz uma variação nas emissões de poeiras e que a crista da pilha de stock é a área que tem um maior potencial de erosão, parece relevante que uma pilha de topo horizontal pode levar a uma alteração significativa na emissão de partículas, comparativamente às de topo afiado.”

As configurações testadas são resumidas na Tabela A.3, presente em anexo. As dimensões da pilha de topo afiado tomadas como base deste estudo, são as determinadas por Badr e Harion (2007) que possuíam o mais baixo potencial de erosão (ver teste 3 das Tabela A.2 e Tabela 2.3). As direções do escoamento são representadas na Figura 2.5.

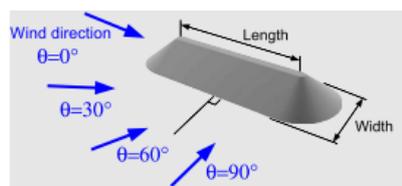


Figura 2.5. Descrição das direções do escoamento. (Fonte: Turpin e Harion, 2009)

Na Figura 2.6 é ilustrado o efeito da geometria da crista da pilha no campo de velocidades adimensional. À medida que a altura da superfície de corte do vértice da crista aumenta, (ou seja, a altura da pilha diminui e o seu topo passa de afiado a horizontal) a velocidade adimensional aumenta. Como consequência, a área erodível fica maior.

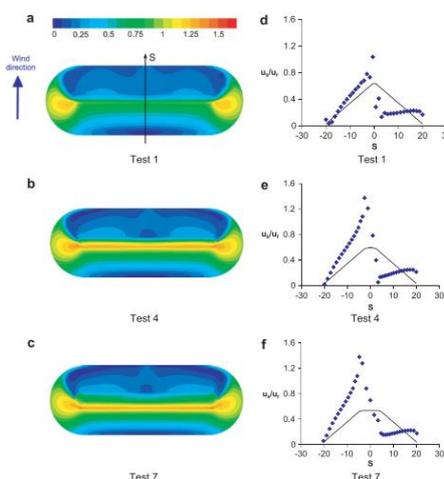


Figura 2.6. Vista de cima dos contornos normalizados da velocidade, para os testes 1, 4 e 7 e velocidade normalizada no plano de simetria (S na figura (a)), para esses mesmos testes. (Fonte: Turpin e Harion, 2009)

Para a configuração de topo horizontal (Figura 2.7 (b) e (d)) vê-se que há um forte gradiente de pressão e maiores campos de velocidade próximos do topo. Este facto justifica o porquê de existir uma maior aceleração do escoamento para o caso da superfície horizontal, junto ao topo da pilha, face ao caso da superfície afiada.

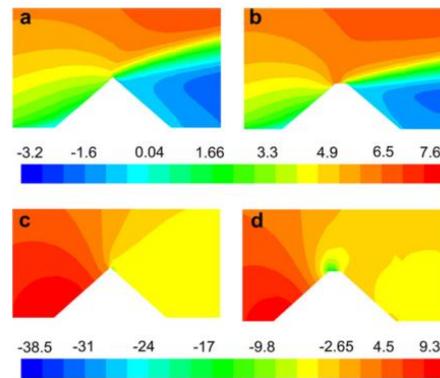


Figura 2.7.Campos de velocidade e pressão para o caso do topo afiado (a e c) e para o caso de superfície horizontal. (b e d).(Fonte: Turpin e Harion, 2009)

Na Figura 2.8 é representado o valor das emissões calculadas pela metodologia US EPA, em função da altura de corte da crista. Vê-se que, para qualquer velocidade do vento, o efeito da altura de corte da crista é semelhante, no andamento das curvas, apesar das escalas serem distintas. Para valores de altura de corte entre 0 e 1.5, as emissões aumentam, aumentando significativamente o potencial de erosão. Se essa altura for superior a 1.5, tende a haver uma estabilização das emissões. Isto acontece porque as pilhas têm menor altura, uma vez que a altura de corte da crista aumenta, e consequentemente menores áreas inclinadas sujeitas à erosão do vento. Parece assim, haver um balanço entre os efeitos da redução da área e do aumento da velocidade normalizada, no potencial de erosão da pilha.

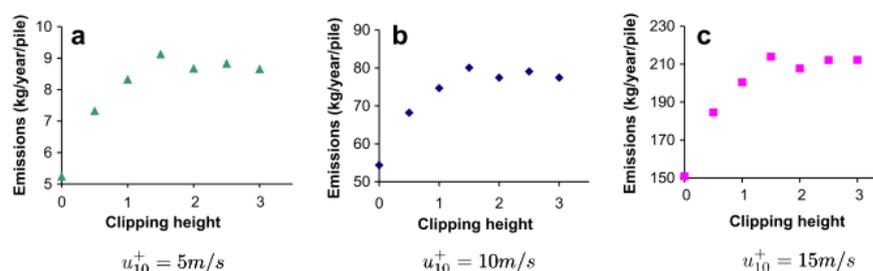


Figura 2.8.Evolução do potencial de erosão da pilha em função da altura de corte, para diferentes velocidades u_{10}^+ . (Fonte: Turpin e Harion, 2009)

2.4.1. Influência da direção do escoamento

São estudados por Turpin e Harion (2009) quatro direções do vento em relação à pilha, e é feita a comparação entre um dos casos do topo horizontal (teste 4) e a pilha de topo afiado. É escolhido apenas este caso porque é aqui que o potencial de erosão mais difere dos restantes casos de superfície horizontal. Assim, a Figura 2.9 permite fazer uma análise qualitativa das curvas. A evolução do comportamento das curvas do fator de emissão em função do ângulo de incidência é bastante similar para qualquer velocidade do escoamento, apesar das escalas serem distintas. Apenas os valores do potencial de erosão dependem dessa velocidade. Assim, para o caso de o ângulo de incidência ser 30°, o corte do vértice da pilha leva a uma redução do potencial de erosão. Isto apenas se verifica para este caso. Nos outros, as emissões são superiores para o caso da pilha de topo horizontal. Isto acontece porque, a separação do escoamento ocorre mais a jusante no caso da pilha de topo horizontal, comparativamente ao caso do topo afiado, levando a que a pilha, nesse caso, esteja mais sujeita à erosão do vento.

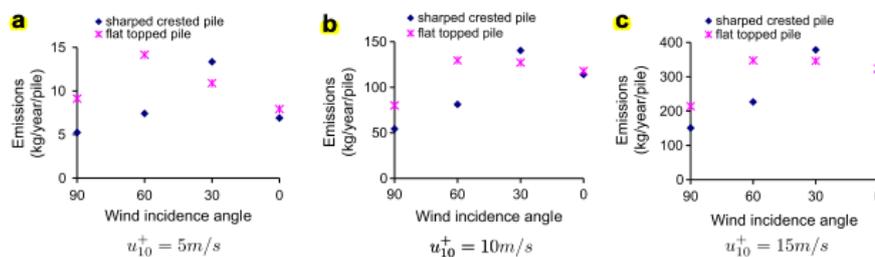


Figura 2.9. Potencial de erosão para os dois casos em estudo (topo horizontal e topo afiado), em função do ângulo de incidência para as diferentes velocidades do escoamento. (Fonte: Turpin e Harion, 2009)

Para o caso do ângulo de incidência de 60°, o formato aguçado da crista leva a uma separação antecipada do escoamento, comparativamente ao caso de topo horizontal. Esta separação leva à criação de um vórtice que se estende muito mais para jusante, (Figura 2.10, $l_1 > l_2$) levando a uma maior proteção do lado descendente da pilha (velocidade normalizada menor no caso à esquerda, na Figura 2.10, nessa zona). Consequentemente, esta pilha apresenta uma menor emissão de poeiras. Assim, para o caso do ângulo de incidência de 60°, o efeito do topo horizontal não só aumenta a erosão nessa zona, como também a aumenta na parte descendente da pilha.

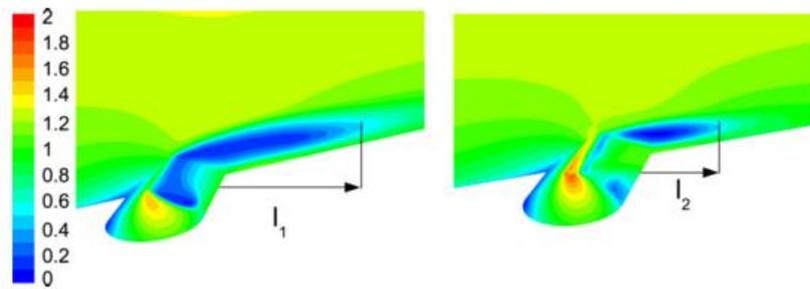


Figura 2.10. Velocidade normalizada no plano médio da superfície, e na superfície da pilha, para $\theta=60^\circ$.
(Fonte: Turpin e Harion, 2009)

2.5. Visualização experimental do escoamento de ar na superfície e investigação numérica do escoamento em torno da pilha de formato oblongo

Furieri et al. (2012b) não estudaram a quantificação do fluxo mássico na emissão de poeiras, mas fizeram a “análise da tipologia do escoamento e das características deste à superfície, para três direções de escoamento”. Os casos até aqui mostrados, apenas se focam na distribuição de velocidade nas proximidades da pilha. Consequentemente, não há uma tipologia detalhada do escoamento longe da pilha nem na sua vizinhança, nem uma distribuição da tensão tangencial na superfície, que está sem dúvida, presente nos mecanismos de erosão.

As dimensões do modelo da pilha estudada por Furieri et al. (2012b) são as presentes na Figura 2.11. São também aí representados os ângulos de incidência do vento. Estas dimensões são representativas de pilhas de armazenamento de carvão, que possuem um ângulo de repouso de 38° . Este modelo é construído em madeira à escala de 1:200 face à pilha real. A velocidade de escoamento incidente usada foi de 6.5 m/s.

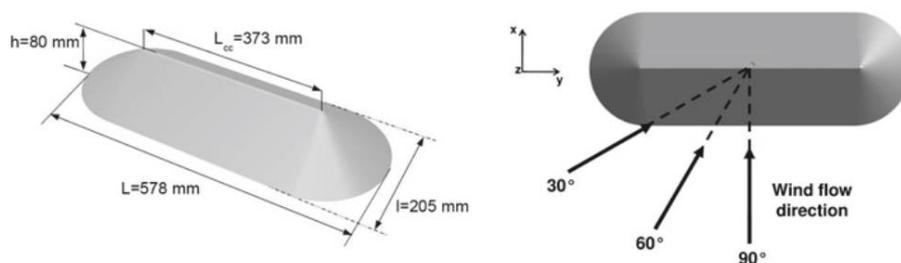


Figura 2.11. Dimensões da pilha de stock (à esquerda), e ângulos de incidência do vento (à direita). (Fonte: Furieri et al. 2012b)

Para validar as simulações numéricas das características do escoamento foram feitas medições com PIV. Esta técnica consiste em iluminar partículas traçadoras no campo de escoamento a ser investigado. Com isto, consegue-se ver as partículas traçadoras e é possível determinar o campo de velocidade do escoamento.

Para estudar o escoamento junto à superfície e a distribuição da tensão de corte, usou-se um revestimento de película de óleo, que cobre as superfícies expostas ao atrito do escoamento. Posicionou-se uma câmara acima do modelo à escala, calibrou-se a imagem e teve-se também o cuidado de eliminar a reflexão ótica para se maximizar a qualidade da fotografia.

2.5.1. Análise de resultados

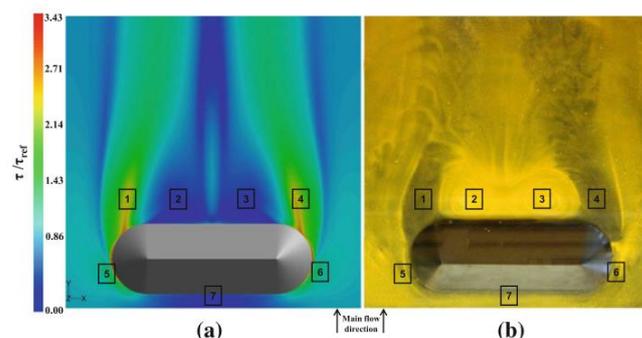


Figura 2.12. Análise do escoamento na base da pilha orientada perpendicularmente ao escoamento incidente. À esquerda, distribuição da tensão de corte, obtida com CFD. À direita, visualização da superfície do escoamento, obtida experimentalmente. (Fonte: Furieri et al. 2012b)

Na Figura 2.12 é feita uma análise global qualitativa, que revela quatro características do escoamento. Primeiro, uma zona caracterizada por baixos valores de tensão tangencial e por um par de vórtices contra rotativos, que representam as zonas 2 e 3. As zonas de maior tensão de atrito são a 1 e a 4, situadas a jusante da pilha, nas proximidades das extremidades desta. Elas ocorrem devido à aceleração do escoamento que ocorre inicialmente nas zonas 5 e 6, nas laterais da pilha. Finalmente, a zona 7, em que o fluido desacelera na área de estagnação, levando a baixos valores de tensão tangencial.

Para o caso do escoamento orientado 60° face ao escoamento incidente, podem-se identificar diferentes características do escoamento, que é fortemente perturbado pela presença do obstáculo. Assim, pode ser visto, na Figura 2.13, primeiramente que o escoamento acelera no lado esquerdo do obstáculo, correspondendo a altos valores de tensão

tangencial, na zona 6. Os valores mais elevados, encontram-se a jusante da pilha, na zona 3, iniciando-se na zona próxima da parede abrigada do vento e estendendo-se para jusante. Este caso apresenta uma zona de baixo valor de tensão tangencial, na zona 4. Vê-se assim a forte influência do ângulo de incidência no comportamento do escoamento, em torno da pilha e na sua vizinhança. No lado direito, o escoamento sofre uma aceleração similar à do lado esquerdo, na zona 5, mas de menor intensidade e extensão. Nas zonas restantes a montante, há uma evolução gradual da tensão tangencial, desde baixos valores, na zona 1, até valores superiores, na zona 2 e 3. Há ainda uma zona de acumulação da película de filme de óleo, na zona 4, entre duas regiões de elevada tensão tangencial.

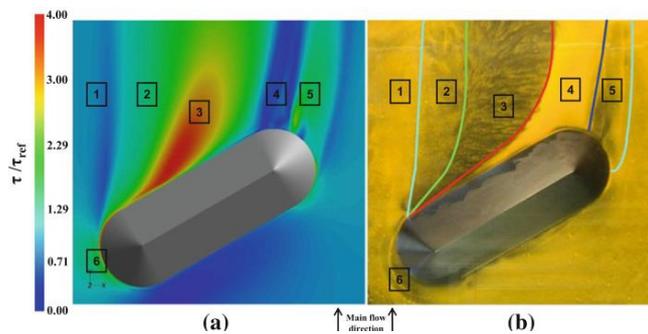


Figura 2.13. Análise ao escoamento na base da pilha orientada 60° face ao escoamento incidente. À esquerda, distribuição da tensão de corte, obtida com CFD. À direita, visualização da superfície do escoamento, obtida experimentalmente. (Fonte: Furieri et al. 2012b)

Na Figura 2.14 é representado o escoamento para o caso de 30° de ângulo de incidência. O escoamento é perturbado pela presença do obstáculo, que é mais afetado no lado esquerdo de montante, acelerando nessa região e criando uma zona de separação que provoca elevados valores de tensão tangencial a jusante da pilha.

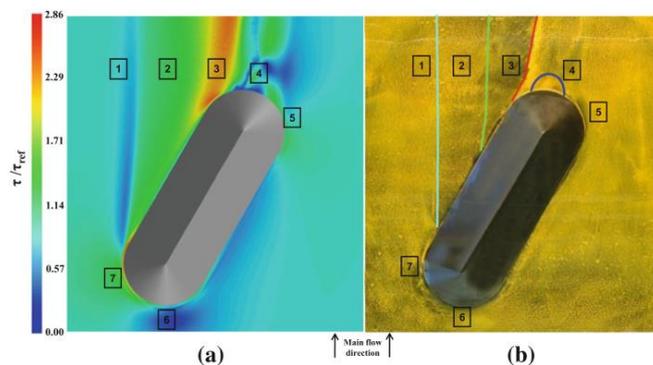


Figura 2.14. Análise ao escoamento na base da pilha orientada 30° face ao escoamento incidente. À esquerda, distribuição da tensão de corte, obtida com CFD. À direita, visualização da superfície do escoamento, obtida experimentalmente. (Fonte: Furieri et al. 2012b)

2.6. Contribuição das áreas envolventes à pilha na emissão de partículas

Furieri *et al* (2014) tiveram a “necessidade de quantificar a contribuição da reemissão de poeiras das áreas em redor das pilhas, na emissão total de um armazém aberto”. A metodologia US EPA volta a ser usada, mas desta vez para quantificar emissões no terreno circundante à pilha. As dimensões do modelo aplicado no estudo numérico são as presentes na Figura 2.11 (à esquerda).

Para calcular a reemissão de partículas soltas do chão à volta da pilha, há dois parâmetros que são distintos dos usados no cálculo de emissões da superfície da pilha.

Primeiro há que se definir uma área limitada em torno da pilha. Essa área foi “definida arbitrariamente pelos autores em cerca de dez vezes da área de superfície da pilha”.

O outro parâmetro a definir é a velocidade de início de erosão para as zonas em redor da pilha. Os outros parâmetros de entrada da metodologia US EPA mantêm-se inalterados e são usados igualmente quer seja na pilha quer seja na zona em redor desta.

Foram escolhidos três valores da milha mais rápida do vento representativos de diferentes situações de reemissões de poeiras: $u_{10-A}^+ = 5.0m/s$ em que não há emissões; $u_{10-B}^+ = 15m/s$ em que há emissões de toda a região (base e pilha) e $u_{10-C}^+ = 10.38m/s$ em que não há emissões na base da pilha, mas há na região perturbada pela pilha.

Nas Figura A.1(a), Figura A.2(a) e Figura A.3(a) apresentam-se os contornos de velocidade normalizada em redor da pilha para todo o domínio. Nas Figura A.1(b), Figura A.2(b) e Figura A.3(b) representam-se as zonas onde a velocidade de atrito é superior à velocidade de início de erosão. Nas Figura A.1(c), Figura A.2(c) e Figura A.3(c) representam-se as linhas de corrente do escoamento em torno da pilha de armazenamento.

2.6.1. Análise quantitativa das emissões de poeiras

Os resultados apresentados por Furieri *et al.* (2014) são obtidos pela aplicação da metodologia US EPA. Na Tabela A.4, mostra-se a percentagem de áreas erodíveis e não erodíveis, na pilha e na área em torno da pilha. A área erodível máxima na pilha foi encontrada para a configuração de 30°, o que é consistente com o observado na Figura 2.9 (topo afiado). Em todas as configurações, a área erodível em torno da pilha revelou-se menor do que na pilha. Para a área em torno da pilha, a erosão foi máxima para a configuração de 60°. Isto acontece devido ao vórtice principal formado ser mais intenso e maior.

Para todos os valores estudados, a emissão de poeiras na pilha é maior para a configuração de 30°, conforme se vê na Tabela A.5, no anexo A. Já no terreno envolvente é máxima para a configuração de 60°. Isto é consistente com os resultados da Tabela A.4, porque é nesses casos que há uma maior área erodível. Conclui-se da análise da Tabela A.5 que o terreno em torno da pilha não pode ser desprezado na emissão de poeiras. De facto, para $u_{10}^+ = 15m/s$ há uma contribuição de cerca de 67% da área envolvente na reemissão de poeiras. Já para o caso de $u_{10}^+ = 5m/s$ essa reemissão é desprezável.

2.7. Influência de uma segunda pilha nas emissões globais de estaleiros industriais

Conforme se conclui da Tabela A.5, a orientação que mais contribui para as emissões globais de estaleiros é o caso de a pilha estar orientada com um ângulo de 60° face ao escoamento incidente. Assim, Furiere *et al.* (2012a) “analisaram a influência de uma segunda pilha sucessiva nas emissões globais de poeiras em estaleiros, onde raramente existe uma única pilha isolada”. “A distância entre pilhas é também um parâmetro analisado” Essa distância é função do parâmetro $e = 0.894h$, em que h é a altura da pilha.

O objetivo é analisar as modificações no escoamento provocadas pelo espaçamento entre as pilhas e como é que isso afeta as emissões de poeiras. Nos estaleiros raramente se encontra uma única pilha isolada e elas estão orientadas paralelamente entre si. A metodologia US EPA volta a ser usada, mas desta vez para quantificar emissões no terreno circundante à pilha. As dimensões do modelo aplicado no estudo numérico são as presentes na Figura 2.11 (à esquerda).

É apresentada uma compilação de resultados das emissões de poeiras calculadas com a metodologia US EPA nas Tabela A.6 e Tabela A.7. Foram também escolhidos três valores da “milha mais rápida do vento”, à cota de 10 m (u_{10}^+). A Tabela A.6 apresenta a emissão de poeiras de cada pilha separadamente e a Tabela A.7 a soma e diferença relativa do dobro da poeira emitida por uma pilha isolada, em comparação com a soma de cada pilha, no caso das pilhas paralelas.

Da análise da Tabela A.6 conclui-se que a quantidade de partículas emitidas pela pilha isolada é menor do que a pilha de montante ou jusante, na configuração de duas pilhas paralelas, para qualquer velocidade. A diferença da emissão de poeiras entre a pilha de

montante e jusante é menor com o aumento do espaço entre elas e a pilha de jusante emite mais partículas para qualquer velocidade, no caso de a folga ser $1e$. Só para velocidades (u_{10}^+) elevadas é que a pilha de jusante emite mais partículas que a de montante, para o caso de a folga ser $2e$. Para além disso, para velocidades baixas, a pilha de jusante emite sempre mais poeiras.

Da Tabela A.7 conclui-se que, duas pilhas sucessivas emitem sempre mais poeiras do que duas pilhas isoladas. Esta diferença atinge um máximo de 45.2% para a velocidade (u_{10}^+) mais baixa. Estas diferenças aumentam com a diminuição da velocidade (u_{10}^+).

2.8. Simulação em túnel de vento dos efeitos de partículas não erodíveis na erosão eólica de uma pilha de armazenamento oblonga

Furieri et al. (2013) estudaram a erosão em túnel de vento de um modelo oblongo de areia com granulometria bimodal. O objetivo foi determinar a influência das partículas não erodíveis no fenómeno de erosão eólica. Assim, estes autores usaram uma distribuição bimodal de areia com dois diâmetros médios de partículas, $125\mu\text{m}$ e $850\mu\text{m}$. O diâmetro de $125\mu\text{m}$ corresponde a partículas erodíveis e o de $850\mu\text{m}$ a partículas não erodíveis. A taxa de cobertura de partículas não erodíveis é determinada usando uma sequência de peneiras em que as partículas foram peneiradas e pesadas de modo a se obterem duas percentagens mássicas de cada diâmetro usado. Aqui consideram-se duas taxas de cobertura: 10 e 20%. A distribuição da granulometria de areia para as duas taxas usadas vê-se na Figura 2.15.

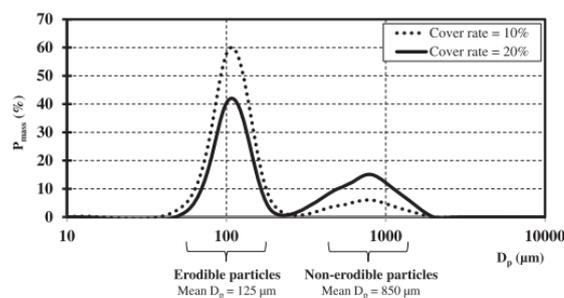


Figura 2.15. Distribuição da granulometria de areia para as duas taxas de cobertura estudadas. (Fonte: Furieri et al. 2013)

Neste estudo foram usadas 3 velocidades do escoamento não perturbado (6, 7 e 8 m/s) e tem o objetivo de “dar uma melhor compreensão nos mecanismos do escoamento local em torno das partículas não erodíveis bem como a quantificação da influência global da velocidade e da taxa de cobertura nas emissões”. Estes autores foram pioneiros em estudos experimentais em túnel de vento estudando pilhas oblongas, com materiais granulares.

Os autores pesaram o modelo da pilha enquanto a erosão ocorria e foram tiradas fotografias de elevada qualidade, usando um sistema instalado perpendicularmente à secção de testes.

As dimensões da pilha são 0.074m de altura, 0.226m de largura e 0.635m de comprimento e são semelhantes às desenvolvidas na metodologia experimental desta dissertação.

Na Figura 2.16, mostram-se 6 regiões típicas da erosão eólica. Duas zonas de elevados níveis de tensão de atrito na superfície e descolagem de partículas (2 e 4), duas zonas de agregação de partículas e baixa tensão de atrito (1^b e 5), uma zona onde não há modificações e baixos níveis de tensão de atrito (3), uma zona no chão em torno da pilha onde se vê a recirculação (6) e, finalmente uma zona onde há alta tensão de atrito e agregação observada (1^a). Na zona 5 observa-se ainda uma agregação de partículas não erodíveis devido a dois fenómenos: rolamento de partículas oriundas da crista da pilha e devido à recirculação na superfície protegida do vento.

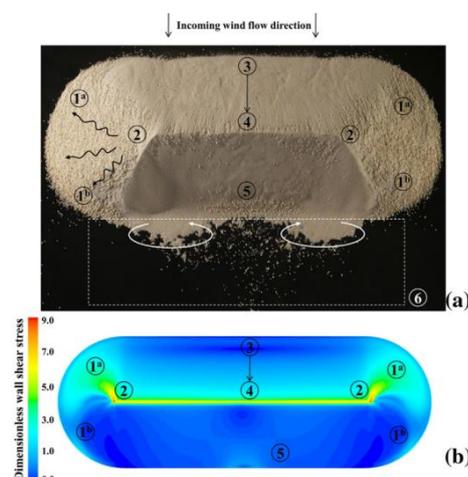


Figura 2.16. Vista de cima do modelo erodido (a) e (b) resultados numéricos da distribuição de tensão de atrito na superfície da pilha. (Fonte: Furieri et al. 2013)

O fluxo mássico emitido decai mais rapidamente para o caso de 20% de taxa de cobertura, devido à maior quantidade de partículas não erodíveis na pilha.

Furieri et al. (2013) descobriram uma mais acentuada diminuição no fluxo mássico emitido na pilha, para a velocidade de 8 m/s. observaram também que a velocidade do escoamento incidente tem menor influência no decaimento do que a taxa de cobertura.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Apresenta-se na Figura 3.1 a geometria da pilha em estudo e suas dimensões. Esta tem um comprimento de 635 mm, largura de 226 mm, altura de 74 mm e ângulo de repouso de 33°.

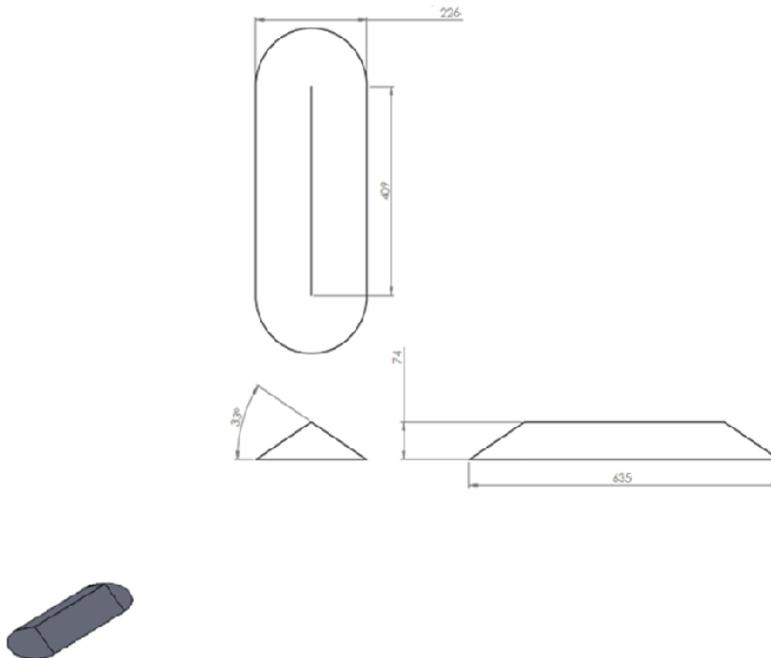


Figura 3.1. Apresentação do formato da pilha em estudo e dimensões da mesma.

3.1. Estudo da folga para a melhor formação da crista

De forma a ser possível fazer os ensaios de erosão no túnel aerodinâmico do LAI, houve todo um trabalho preparatório da metodologia experimental. O primeiro passo a fazer foi perceber para a areia usada nos ensaios, cujo diâmetro médio das partículas é de 0.5 mm (Ferreira e Fino, 2012; Ferreira e Oliveira, 2009), qual seria a folga ideal a deixar entre dois planos inclinados, de forma a permitir a melhor formação da crista da pilha. Com isto, construíram-se três dispositivos cuja folga, assinalada a vermelho na Tabela 3.1, entre esses planos inclinados, variou entre 1 e 3mm e observou-se a queda da areia e o formato da crista da pilha obtido.

Os dispositivos usados neste estudo fazem com a horizontal 33°, conforme se observa na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**(a). Este ângulo (α_r) corresponde ao'' ângulo de repouso definido como o declive da superfície livre da pilha

relativo ao chão (...), quando as forças coesivas entre as partículas de areia são desprezáveis” (Ferreira e Lambert, 2011). Assim, após se testar os dispositivos construídos, concluiu-se que a melhor folga a deixar seria de 2 mm, em que há uma maior perfeição na formação da crista. De facto, como se observa na Tabela 3.1, para o caso de 3mm, a crista não se forma e para o caso de 1mm, a areia tem dificuldade em escoar-se entre os planos inclinados, levando a que a crista formada não esteja perfeitamente direita.

A elaboração deste estudo revelou-se fundamental na construção do dispositivo usado para a obtenção da pilha de areia pretendida, conforme se apresenta na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**(b). Este estudo permitiu saber qual a melhor folga a deixar entre os planos inclinados deste dispositivo, para que fosse possível obter uma melhor perfeição na crista da pilha em estudo, pilha essa que se obtém do esvaziamento do dispositivo. Detalhes das dimensões deste dispositivo podem ser vistos no anexo G. A construção do dispositivo usado para a obtenção da pilha de areia pretendida foi feita pela prof. Raquel Faria, docente do ISEC. Foi no ISEC que este dispositivo foi maquinado e montado, sendo todos os materiais necessários à sua construção fornecidos pelo mesmo.



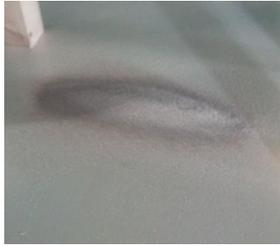
(a)



(b)

Figura 3.2. Pormenor do ângulo com a horizontal do dispositivo usado no estudo da folga ideal a deixar entre planos inclinados(a) e (b) dispositivo usado para a construção da pilha de areia pretendida, construído pela prof. Raquel Faria, no ISEC.

Tabela 3.1. Estudo da folga ideal a deixar entre planos inclinados, para se obter a melhor formação possível para a crista da pilha

Folga[mm]	Dispositivo	Pormenor da crista
3		
2		
1		

3.2. Sistema de atravessamento

Após o estudo da melhor folga para a correta formação da crista da pilha, procedeu-se à montagem do sistema de atravessamento sobre a zona de trabalho do túnel aerodinâmico instalado no LAI. Este sistema é controlado por computador, cuja interface gráfica está presente na Figura 3.3. Este software possui dois modos: um manual e outro automático. No modo automático, a leitura da grelha de medição é feita automaticamente, estando esta em formato CSV. A grelha de medição consiste em duas colunas de valores, separados com vírgulas. A primeira coluna é referente à coordenada X e a segunda à coordenada Y. Na Figura 3.4 estão definidas as direções X e Y. O eixo X corresponde à direção do escoamento não perturbado, o eixo Y na perpendicular a essa direção e o eixo Z na vertical. O sistema desloca-se a quantidade lida nesse ficheiro, o *laser* faz a leitura da

distância, registando esse valor noutra ficheiro para tratamento posterior e assim sucessivamente, até se completar o varrimento da grelha de medição. Já no modo manual, a grelha de medição é escrita manualmente numa tabela presente na interface. Trata-se, portanto, de um método mais demorado, daí apenas se usar este modo para posicionar o sistema de atravessamento no início de cada ciclo de medição. Pormenores das grelhas de medição usadas nos ensaios serão apresentados posteriormente, na secção 3.3.1.

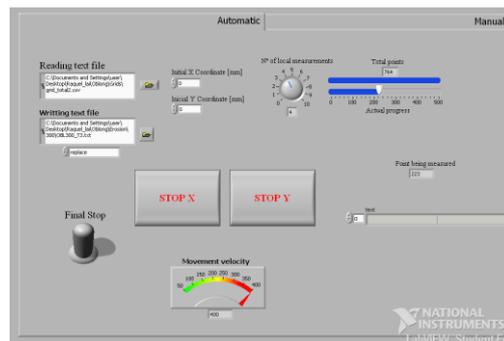


Figura 3.3. Interface gráfica do *software* usado no controlo por computador do sistema de atravessamento.

Na Figura 3.4 apresenta-se um pormenor da montagem do sistema de atravessamento bem como o *laser* quando posicionado sobre a secção de ensaios. Este *laser*, “(Dimetix, modelo DLS-B15) está posicionado 2.77m acima da base da secção de trabalho. O diâmetro do ponto medido pelo *laser* é de cerca de 3 mm. De acordo com as especificações, este tem uma precisão nas medições de ± 1.5 mm com uma confiança estatística de 95.4%.” (Ferreira e Fino, 2012; Ferreira e Lambert, 2011).

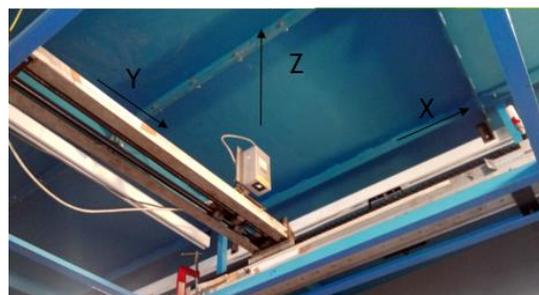


Figura 3.4. Pormenor da montagem do sistema de atravessamento e respetivo referencial usado nas medições.

Após montagem do sistema de atravessamento fizeram-se vários testes de repetibilidade da grelha de medição, detetando-se vários problemas no sistema de atravessamento. Assim, inicialmente criou-se um ficheiro de leitura com uma grelha de 40 mm por 40 mm e registaram-se numa cartolina os pontos onde o *laser* media. Este exercício foi repetido várias vezes. O resultado obtido encontra-se ilustrado na Figura 3.5.

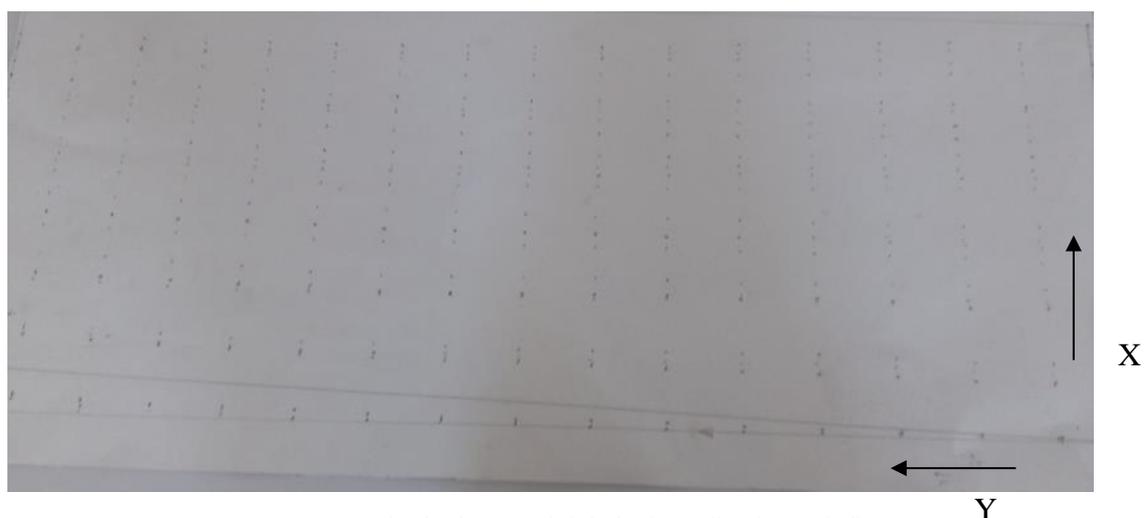


Figura 3.5. Resultado da repetibilidade da grelha de medição.

Conforme se observa, este foi um dos problemas detetados. Para esta grelha testada, há uma boa repetibilidade na direção Y, mas a direção X apresentava desvios significativos. De facto, verificou-se que a cada incremento $\Delta Y=40\text{mm}$, o eixo X movimentava-se simultaneamente. Ora, tal problema impossibilitava a medição da pilha, não sendo possível medir a zona da crista corretamente, devido ao desvio observado. Com isto, pensou-se que poderia ser algum problema mecânico no sistema que estava a impedir o seu correto funcionamento. Assim, procedeu-se à limpeza, dos parafusos sem fim responsáveis pelo movimento do *laser*, bem como à lubrificação dos mesmos. Após este trabalho, voltou-se a repetir o exercício descrito anteriormente, e verificou-se que, apesar da limpeza e lubrificação, o problema do movimento do eixo X com o incremento ΔY persistia. Então, pesquisou-se mais aprofundadamente qual seria a origem deste problema, e descobriu-se uma sub-rotina que estava a provocar esse desvio. Procedeu-se à eliminação dessa sub-rotina e conseguiu-se eliminar o movimento do eixo X com o incremento em Y.

Entretanto pensou-se usar o modo manual, para observar se o problema do movimento do eixo X com o incremento ΔY estava relacionado com o modo automático ou manual. Porém, verificou-se o mesmo problema. Assim, fez-se um estudo detalhado nesse modo de funcionamento, que se passa a explicar. Primeiro, incrementou-se apenas ΔX nos sentidos positivo e negativo, para se verificar se existia movimento em Y. Verificou-se que não se movimentava Y com o incremento ΔX . Em seguida, fez-se o contrário. Incrementou-se ΔY nos dois sentidos para ver se existia movimento em X e verificou-se que, dependendo da distância incrementada, o eixo X movimentava-se ou não. A Tabela B.1, presente no anexo B, apresenta o estudo feito ao sistema de atravessamento no modo manual, e que

quantidades de incremento X ou Y levam ao movimento do sistema de atravessamento na direção perpendicular.

Após a eliminação da sub-rotina acima referida e da realização do estudo que levou à construção da Tabela B.1, voltou-se a verificar a repetibilidade da grelha de medição, mas desta vez apenas na direção X, uma vez que na direção Y os desvios eram praticamente inexistentes, conforme observado na Figura 3.5. Fez-se este exercício de modo a verificar se o sistema de atravessamento já estava totalmente funcional para a realização dos ensaios. Porém, detetou-se que o sistema de atravessamento, pontualmente não avançava a quantidade desejada nessa direção, conforme se vê na Figura 3.6. Verificou-se que, quando essa quantidade não era a certa, o motor emitia um ruído invulgar. Com isto, procedeu-se à desmontagem da ligação do motor ao parafuso sem fim e verificou-se que existia um problema de toleranciamento geométrico nessa ligação. Assim, era a ligação rígida (Figura 3.7 (a)) a responsável pelo incorreto movimento na direção X do sistema de atravessamento, causando o tal barulho. Com isto, de modo a permitir liberdade de movimento no motor devido ao problema detetado, substituiu-se a ligação rígida por uma flexível, conforme se mostra na Figura 3.7.(b).

Após esta substituição, verificou-se que havia ainda outro problema no sistema de atravessamento, que era a falta de perpendicularidade entre os dois eixos. Na Figura 3.8(a) ilustra-se o problema após se unirem os pontos assinalados numa cartolina, fazendo um varrimento segundo X e outro segundo Y. Na Figura 3.8 (b) vê-se o pormenor da correção da falta de perpendicularidade, através da colocação de chapas metálicas na união entre os eixos.

Verificou-se posteriormente, para o caso da rotação da pilha 60° face ao escoamento incidente, que o ficheiro de leitura das coordenadas dos pontos a medir só podia ter uma casa decimal. Se tivesse mais, o sistema de atravessamento não funcionava.

Após todo este trabalho de melhoramentos no sistema de atravessamento, pôde-se avançar para os ensaios de erosão no túnel de vento.

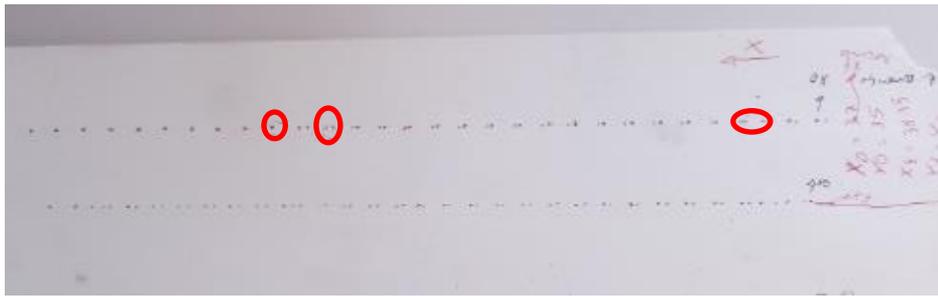


Figura 3.6. Verificação da repetibilidade da medição na direção X.

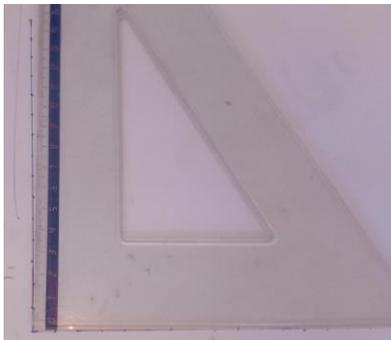


(a)



(b)

Figura 3.7. Pormenor da ligação rígida (a) e da substituição por uma flexível (b).



(a)



(b)

Figura 3.8. Resultados da verificação da perpendicularidade entre os dois eixos (a) e correção do problema (b).

3.3. Ensaios no túnel de vento

O túnel de vento existente no Laboratório de Aerodinâmica Industrial tem uma secção transversal de 2mx2m, a secção de testes é aberta e tem 5m de comprimento. O pouco comprimento da secção de trabalho impossibilita a colocação de elementos de aumento da espessura da camada limite (Ferreira e Fino, 2012) O perfil de velocidade à saída do bocal do túnel pode ser aproximadamente ajustado com a seguinte lei:

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha. \quad (3.1)$$

A espessura da camada limite (δ) é de 0.4 m e o expoente α é de 0.11. Na Figura 3.9 vê-se o perfil de velocidade medido e a intensidade de turbulência, com a secção de ensaios vazia. “A intensidade de turbulência mantém-se praticamente inalterada com a altura, em cerca de 15%” (Ferreira e Oliveira, 2009).

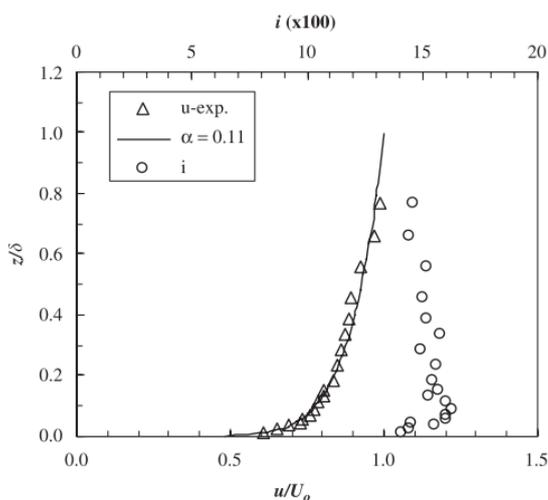


Figura 3.9. Perfil de velocidade no túnel aerodinâmico e perfil de intensidade de turbulência, medidos a partir do centro do bocal do túnel. (Fonte: Ferreira e Oliveira, 2009)

No âmbito desta dissertação, fizeram-se ensaios de erosão à pilha oblonga, cujas dimensões estão presentes na Figura 3.1. Esta pilha obteve-se do esvaziamento do dispositivo representado na Figura 3.2(b). Para isso, colocou-se o dispositivo perpendicularmente à saída do bocal do túnel aerodinâmico de modo a que a crista da pilha estivesse localizada a 2.5 m da saída do bocal do túnel. Na Figura 3.10 é mostrado o pormenor da distância da crista da pilha ao bocal do túnel bem como as outras dimensões da pilha em estudo.

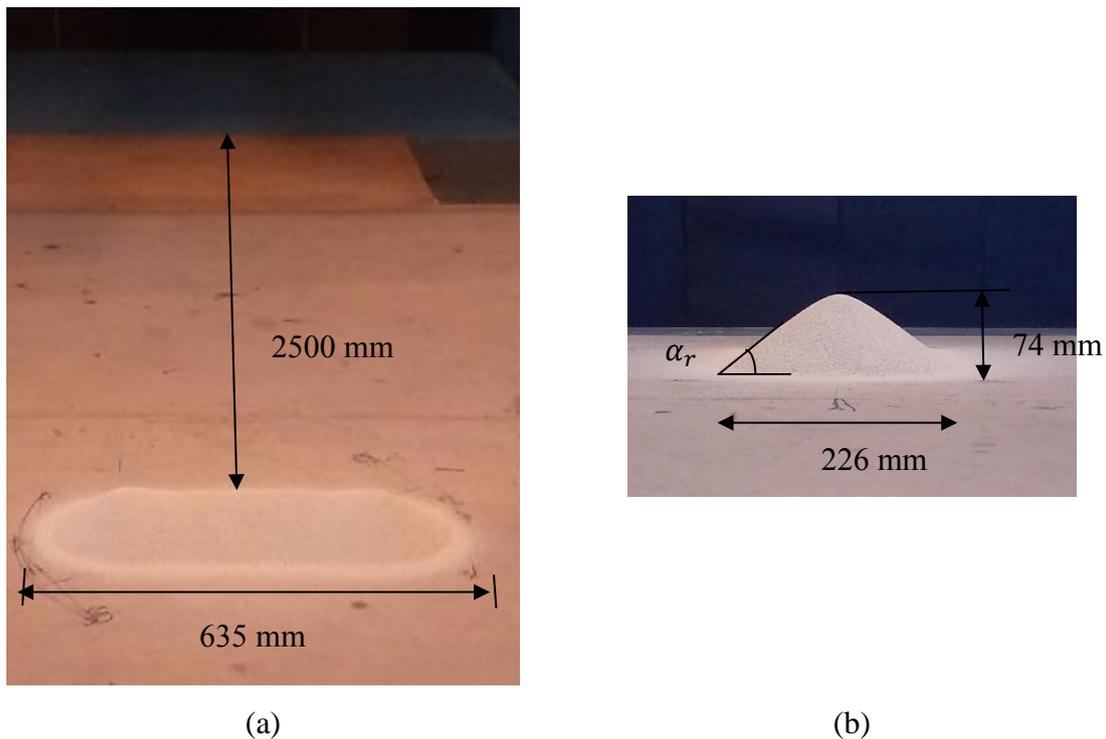


Figura 3.10. Pormenor das dimensões do modelo em estudo e distância da pilha ao bocal do túnel

De modo a garantir a colocação correta do dispositivo de criação dos perfis, desenhou-se no chão o sítio dos pés e numerou-se. Numeraram-se também as sapatas, fazendo corresponder a numeração destas com a assinalada no chão. Isto foi feito para garantir a construção do modelo em estudo sempre no mesmo sítio, e sem haver equívocos quanto ao sentido de colocação do dispositivo. Na Figura 3.11 apresenta-se o pormenor das marcações feitas para a colocação do dispositivo para os dois casos em estudo: escoamento perpendicular à pilha, e a 60° com o escoamento incidente (a). Vê-se também o pormenor das numerações nas sapatas do dispositivo colocado no sítio (b). Na Figura 3.12 vê-se o pormenor da colocação correta do pé do dispositivo (a) sobre as marcações e incorreta (b), para o caso da pilha perpendicular ao escoamento incidente. Para o caso de a pilha fazer 60° com o escoamento incidente a metodologia é semelhante.

Para o caso da pilha a fazer 60° , teve de se traçar um arco de circunferência a partir do centro, até à tangente dos pés do modelo, conforme se observa na Figura 3.11(a), de modo a garantir a correta rotação do dispositivo. Depois disso, a partir do centro, traçou-se uma linha a 30° com a linha da crista da pilha, assinalou-se a nova posição para os pés do dispositivo e confirmou-se se as distâncias do centro aos pés estavam certas. Após este trabalho, pôde-se avançar com a construção da pilha. Na Figura 3.13 mostra-se a pilha

inicial, antes de qualquer erosão, para os dois casos em estudo, onde se ilustra o ângulo formado entre a direção do escoamento incidente e a crista da pilha.

O formato desejado é obtido através do enchimento do dispositivo com areia. Esta areia é previamente peneirada para se retirar qualquer impureza. Após o enchimento, procede-se ao alisamento da areia com uma régua e remoção do excesso. (Figura 3.14(a)). Depois disso, remove-se a tampa inferior e espera-se que a areia escoe até o dispositivo ficar vazio. Por fim, procede-se à limpeza com uma trincha da areia que adere às paredes do dispositivo, retirando-se de seguida o dispositivo (Figura 3.14(b)).

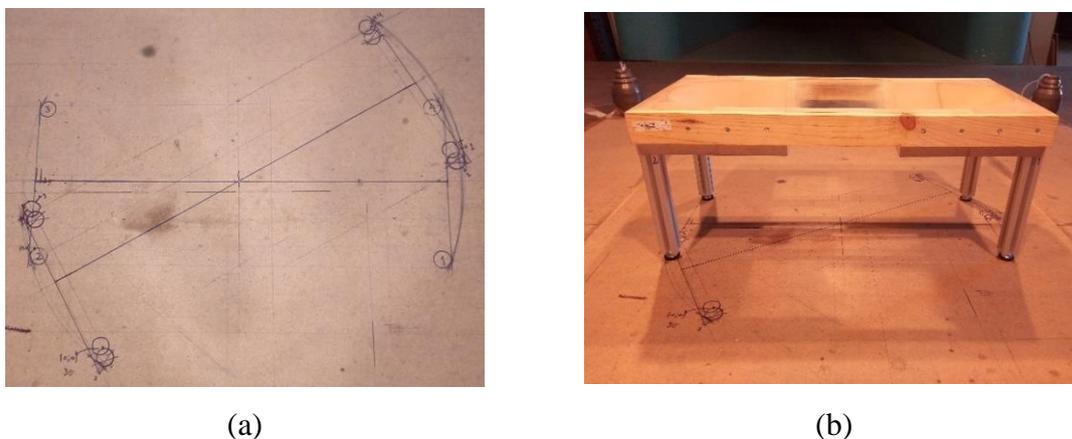


Figura 3.11. Pormenor das marcações feitas no chão da secção de ensaios (a) e nas sapatas do dispositivo colocado no sítio (b).



Figura 3.12 Pormenor da colocação correta do pé do dispositivo(a) e incorreta(b).

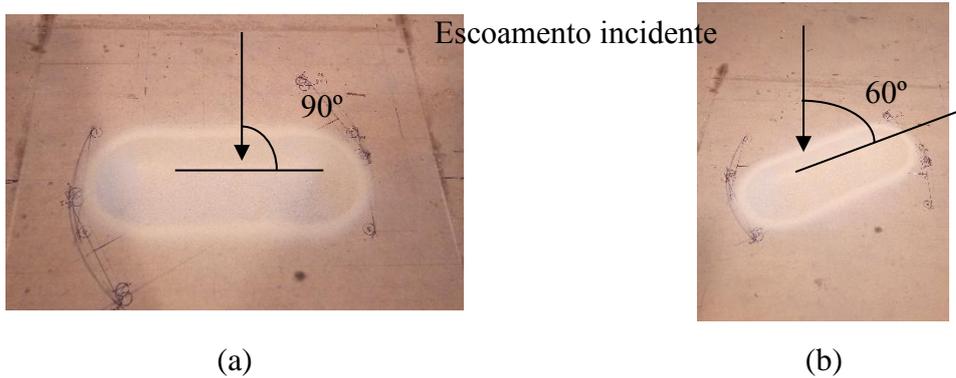


Figura 3.13. Pilha inicial para os 2 casos em estudo:(a) escoamento incidente perpendicular à pilha e (b) crista formando um ângulo de 60° com o escoamento incidente

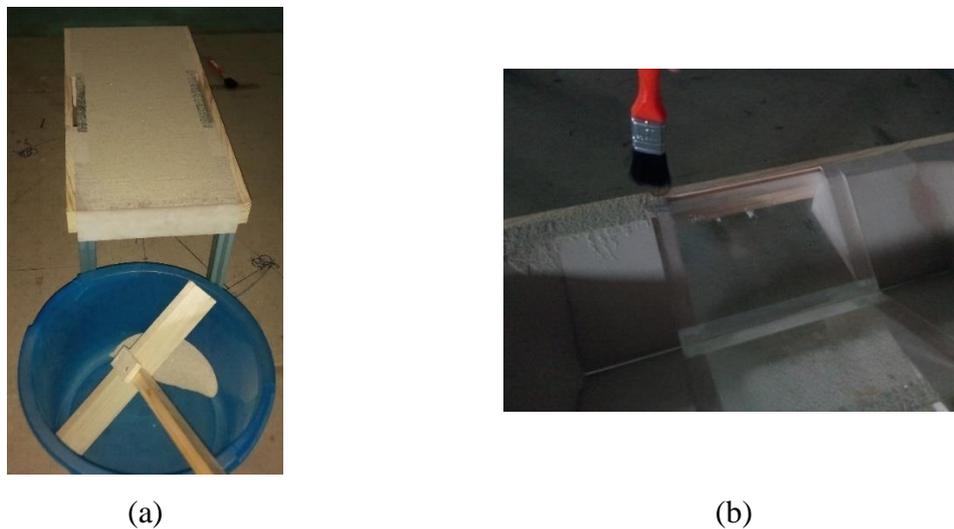


Figura 3.14 Pormenor do dispositivo cheio, após ser alisado com a régua (a) e limpeza da areia aderente às paredes do dispositivo (b).

Após este trabalho de preparação da construção da pilha e devida colocação no mesmo sítio desta, fizeram-se vários testes à repetibilidade da construção da pilha. Estes testes tiveram o intuito de verificar a repetibilidade na forma medida pelo *laser*. Posteriormente é feita uma análise a essas medições, no capítulo referente aos resultados.

Após as medições de repetibilidade terminadas, avançaram-se com os ensaios de erosão. Para a realização de tais ensaios, eram precisas duas pessoas: uma para proteger a pilha com uma tábua de 0.6mx1.2m até se atingir a velocidade do escoamento pretendida, visto que essa velocidade não estava logo disponível no arranque do túnel. Essa pessoa tem que ter o máximo de cuidado ao andar na zona de ensaios do túnel, porque a mínima vibração pode danificar o formato da pilha, devido à instabilidade apresentada por esta, uma vez que os grãos de areia estão numa posição em que as forças coesivas entre si são muito baixas. A

outra pessoa é necessária para ligar o interruptor geral de segurança e acionar o motor elétrico do ventilador, até se atingir a velocidade desejada. Na Figura 3.15 vê-se o quadro de controlo do túnel aerodinâmico em que: (1) é o interruptor geral de segurança, (2) é o botão de arranque, (3) é o botão de paragem, (4) é o potenciômetro de injeção de corrente, (5) é um ecrã digital indicativo da velocidade de rotação do túnel e (6) é o contador de horas de funcionamento do túnel.

Duas velocidades de rotação foram usadas ao longo dos ensaios: 275 e 300 rotações por minuto. A curva de correlação do túnel de vento aerodinâmico é dada por (3.2):

$$Vel. Escoamento[m/s] = 0.033 \times Vel. Rotação[rpm] \quad (3.2)$$

Assim, para a velocidade de 300 rpm, corresponde a uma velocidade do escoamento não perturbado de $U_0 = 9.90 \text{ m/s}$ e para a velocidade de 275 rpm, corresponde uma velocidade de escoamento não perturbado de $U_0 = 9.08 \text{ m/s}$. Considerando a altura da pilha (74 mm) em estudo como o comprimento característico, e para $U_0 = 9.08 \text{ m/s}$, o número de Reynolds mínimo usado nestes ensaios é de $Re = \frac{V.L}{\nu} = \frac{9.08 \times 74 \times 10^{-3}}{1.516 \times 10^{-5}} = 4.4 \times 10^4$. Neste cálculo considerou-se a viscosidade cinemática do ar a uma temperatura de 20°C. Este valor de número de Reynolds é próximo de $Re = 5 \times 10^4$, que “de acordo com vários autores é considerado grande o suficiente para se verificar a independência do regime de escoamento em relação ao número de Reynolds. Este é um requisito fundamental para satisfazer possivelmente o mais importante critério de semelhança”. (Ferreira e Lambert, 2011)

Com isto, quando em (5) se atinge a velocidade pretendida, a pessoa que está a controlar o túnel indica isso à pessoa que está a proteger a pilha, para que ela remova a tábua. No preciso momento em que isso acontece, a pessoa que controla o túnel deve iniciar o cronómetro, até a pilha erodir durante um minuto. Ao fim desse tempo, desliga-se o túnel e aciona-se o sistema de atravessamento para medir, com o cuidado de colocar o *laser* sempre no mesmo ponto inicial. Após terminada a medição, repete-se o procedimento, de modo a que os tempos de cumulativos de erosão da pilha sejam $t = 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10$ e 15 minutos de erosão para a velocidade mais baixa de escoamento não perturbado, ou seja, $U_0 = 9.08 \text{ m/s}$, e de $t = 1, 2, 3, 4, 5, 7$ e 10 minutos para a velocidade de escoamento não

perturbado, ou seja, $U_0 = 9.90 \text{ m/s}$. Estes tempos de erosão são usados para as duas orientações estudadas.

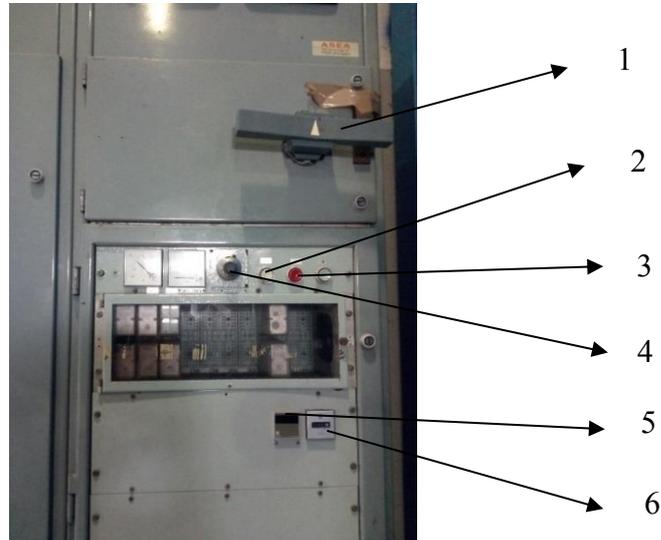


Figura 3.15. Quadro de controlo do motor elétrico do ventilador do túnel aerodinâmico

3.3.1. Grelhas de medição usadas nos ensaios e colocação do *laser* no ponto inicial

Ao fim de cada ensaio de erosão, para os tempos indicados previamente, colocava-se o sistema de atravessamento a medir, com o cuidado de garantir a colocação do *laser* sempre no mesmo ponto no início de cada medição. Posto isto, na Figura 3.16 mostra-se os pontos de início das medições, sendo que (1) é o ponto inicial usado para o caso do escoamento perpendicular à pilha e (2) é o ponto inicial no caso de a crista fazer 60° com o escoamento incidente. Na Figura 3.17 vê-se o pormenor da colocação do *laser* na origem da medição. Em (a) a colocação não está correta, tendo de se reposicionar o *laser* até ficar convenientemente colocado (b).

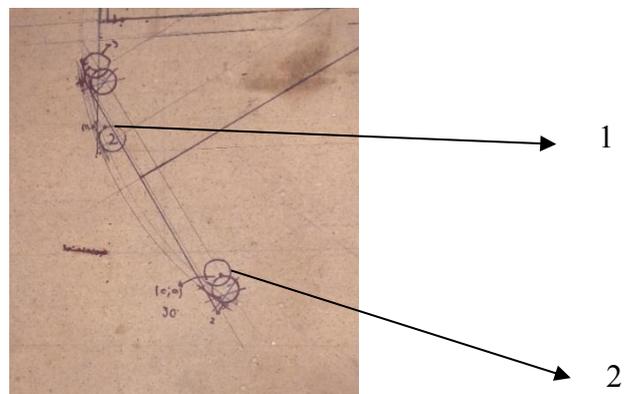
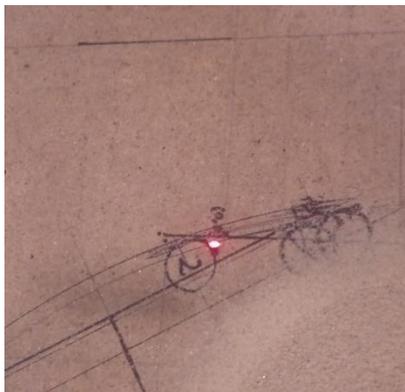


Figura 3.16. Pormenor dos pontos de início das medições.



(a)



(b)

Figura 3.17 Pormenor da colocação do *laser* na origem, para o escoamento perpendicular à pilha. (a) colocação incorreta e (b) colocação correta

Após este trabalho de colocação do *laser* na origem, avançou-se para as medições de erosão para os instantes de tempo referidos. Primeiramente, mediu-se para as duas velocidades em análise a pilha completa, tendo sido utilizada a grelha de medição presente na Figura 3.18. Aí vê-se também o contorno ideal da pilha, no instante $t=0$, para $z=0$. À medida que o processo de erosão ia ocorrendo, houve a necessidade de prolongar a grelha mais para jusante, isto é, na direção X de 40mm, para a velocidade mais elevada, após 2 minutos de erosão e ainda mais 40 mm após 4 minutos de erosão, de modo a garantir a medição completa da pilha deformada após deposição. Para a velocidade mais reduzida, neste primeiro teste, foi sempre usada a grelha de medição mostrada na Figura 3.18.

Seguidamente a esta medição inicial verificou-se que a erosão da pilha era praticamente simétrica. Com isto, para agilizar o processo de medição, passou-se a usar uma grelha de medição que medisse apenas metade da pilha. Essa grelha de medição, num dos ensaios realizados (medição 1) é mais refinada e nos restantes é mais grosseira (medição 2, 3 e 4), com espaçamento semelhante ao da Figura 3.18. Na Figura 3.19, mostra-se a grelha de medição mais refinada, usada no instante antes do processo de erosão. Vê-se também o contorno inicial da pilha. De modo a garantir novamente a medição completa da deposição da pilha, teve de se prolongar a grelha de medição para jusante. Assim, para a velocidade $U_0 = 9.08 \text{ m/s}$, após $t=1$ minuto de erosão, teve de se prolongar até $X=306\text{mm}$. Para $t=2$ minutos e $t=3$ minutos, teve de se prolongar mais 20mm, ou seja, até $X=326\text{mm}$. O mesmo prolongamento foi feito para $t=4$ e $t=5$ minutos, até $X=346 \text{ mm}$. Nos três instantes

finais ($t=7$ minutos, $t=10$ minutos e $t=15$ minutos) prolongou-se mais 40mm. Para $U_0 = 9.90$ m/s os prolongamentos usados na grelha de medição foram semelhantes.

Na Figura C.1, mostra-se o pormenor da grelha de medição mais grosseira usada nas medições 2, 3 e 4, no instante inicial. Esta grelha é semelhante à da Figura 3.18. Desta vez, prolongou-se a grelha 20mm no sentido negativo de X, de modo a ver se era possível melhorar a resolução das medições nessa zona. Porém, verificou-se que apenas se estava a medir área onde não existia areia, ou a camada aí formada era demasiado fina para o *laser* a conseguir medir. Novamente teve de se prolongar para jusante a grelha de medição para as duas velocidades em estudo. Esse prolongamento foi em tudo semelhante ao explicado no parágrafo anterior.

Finalmente na Figura 3.20 mostra-se a grelha de medição usada no instante inicial durante o processo de erosão da pilha orientada 60° com o escoamento incidente. Vê-se também o contorno inicial da pilha, assinalado a preto. Para o instante de erosão $t=1$ minuto e $t=2$ minutos, a grelha faz mais dois varrimentos paralelos à última linha, distanciados desta 20 mm cada um. Para os outros instantes, são feitos mais seis varrimentos paralelos à última linha, à mesma distância referida.

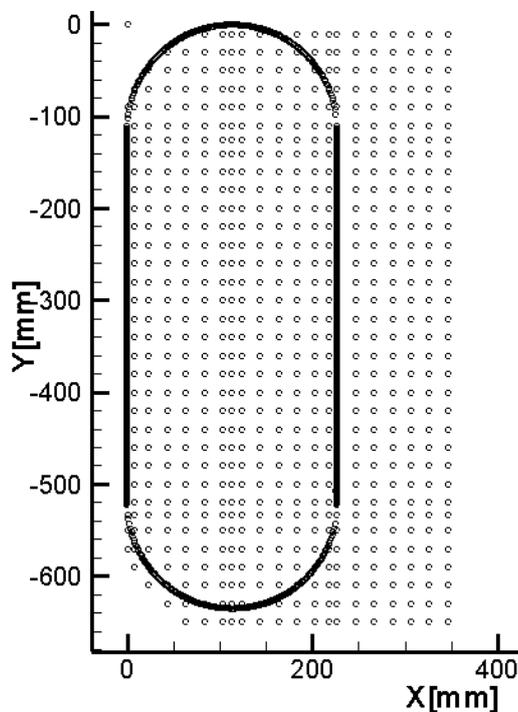


Figura 3.18. Grelha de medição da pilha completa.

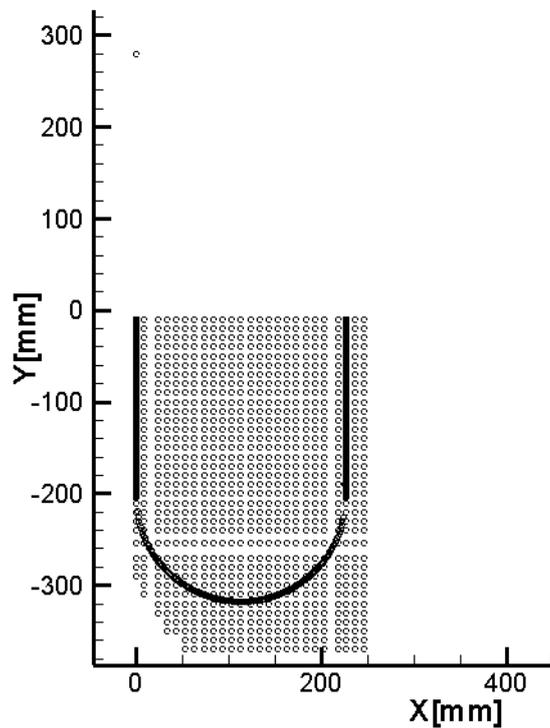


Figura 3.19. Grelha de medição refinada usada na medição de metade da pilha.

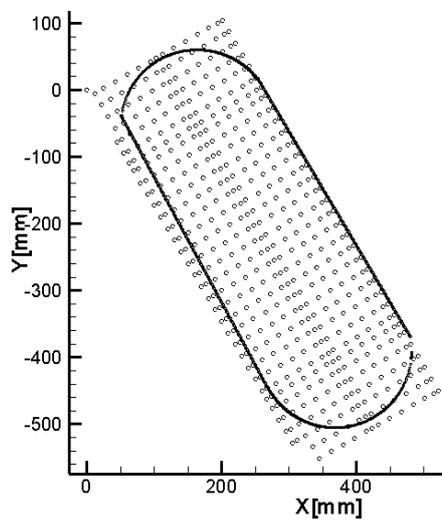


Figura 3.20. Grelha de medição da pilha orientada 60º com o escoamento incidente.

4. RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se a análise e discussão de resultados das medições realizadas, obtidos através das medições com o laser montado no sistema de atravessamento. Recorreu-se ao *software Tecplot* para se fazer o tratamento dos dados lidos nas medições. É também feita uma explicação da metodologia de cálculo da taxa de erosão, para as medições realizadas, visto ser esse um dos objetivos desta dissertação.

Nas imagens ilustradas neste capítulo, o escoamento incidente dá-se da esquerda para a direita.

4.1. Análise à repetibilidade da construção da pilha e variações de medição do sistema de atravessamento

De modo a verificar a repetibilidade na construção da pilha, fizeram-se várias medições à pilha inicial, sem erosão. Estas medições consistiram em medir cinco vezes uma pilha construída. Após isso, destruiu-se a pilha, voltou-se a encher o dispositivo de construção, com a areia devidamente peneirada, construindo-se a pilha de novo. Esta análise foi feita para cinco pilhas construídas, perfazendo um total de 25 medições. No fim de cada medição houve o cuidado de colocar devidamente o *laser* no ponto inicial, garantindo que a medição se iniciasse sempre no mesmo ponto. A grelha de medição, neste caso inicial é idêntica à presente na Figura 3.18, com a particularidade de o varrimento em X só se prolongar até $X=226\text{mm}$.

Finalizados estes testes iniciais, passou-se à análise das medições obtidas. Os ficheiros gerados foram exportados para uma folha de cálculo em que se calculou a média das cotas lidas pelo sistema de atravessamento, para as cinco medições efetuadas a cada uma das cinco pilhas construídas. Após isso, determinou-se o desvio relativo, ou seja, os desvios entre a média e os pontos medidos, bem como se calculou a média desses desvios e o desvio padrão associado ao desvio relativo. Na Tabela 4.1 apresentam-se os desvios máximos e mínimos em relação à média de cotas de cada pilha, bem como a média desses desvios e o desvio padrão

Tabela 4.1. Análise aos desvios máximo e mínimo encontrados, em relação à média de cotas de cada pilha, bem como a média desses desvios e o desvio padrão.

Pilha nº 1	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Máximo[mm]	1.310	2.420	1.650	2.000	0.785
Mínimo[mm]	-5.574	-3.380	-1.080	-0.640	-0.640
Média dos desvios[mm]	-0.142	-0.292	0.335	0.053	0.046
Desvio padrão[mm]	0.886	1.526	0.527	0.274	0.256
Pilha nº 2	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Máximo[mm]	1.615	0.625	1.330	3.345	1.785
Mínimo[mm]	-1.525	-2.270	-1.430	-2.715	-0.820
Média dos desvios[mm]	-0.009	-0.418	-0.059	0.224	0.262
Desvio padrão[mm]	0.783	0.509	0.604	1.656	0.619
Pilha nº 3	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Máximo[mm]	5.940	1.395	0.875	1.305	0.850
Mínimo[mm]	-2.215	-1.355	-1.625	-2.435	-1.770
Média dos desvios[mm]	1.132	-0.032	-0.372	-0.268	-0.461
Desvio padrão[mm]	2.229	0.587	0.536	0.961	0.601
Pilha nº 4	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Máximo[mm]	2.870	1.005	0.955	2.995	2.750
Mínimo[mm]	-1.450	-3.055	-5.055	-0.680	-2.400
Média dos desvios[mm]	-0.078	-0.090	-0.020	-0.069	0.257
Desvio padrão[mm]	0.709	0.479	0.473	0.265	1.441
Pilha nº 5	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Máximo[mm]	0.670	0.575	1.900	3.710	0.780
Mínimo[mm]	-1.265	-1.045	-2.765	-1.355	-1.095
Média dos desvios[mm]	-0.179	-0.130	-0.466	0.891	-0.116
Desvio padrão[mm]	0.359	0.304	1.187	1.109	0.287

Da análise da Tabela 4.1 verifica-se que há várias medições que se desviam bastante da média da pilha medida (máximo de 5.94mm na medição 1 da pilha nº 3 e mínimo -5.574 mm na medição 1 da pilha nº1). Estes desvios são bastante superiores à precisão do *laser* de ± 1.5 mm (Ferreira e Lambert 2011). Para além disso, constata-se ainda que todas as medições da pilha nº 4 se encontram bastante afastadas desse intervalo. Não obstante estas observações, há ainda outras que estão bastante boas, cumprindo o intervalo de precisão referido, como por exemplo a medição 1, 2 e 5 (máximos de 0.67, 0.575, 0.780 mm e mínimos de -1.265,-1.045, -1.095 mm respetivamente) da pilha nº 5, bem como a medição 2 da pilha nº3 e a medição 5 da pilha nº1(máximos de 1.395, 0.785mm e mínimos de -1.355 e -0.64mm respetivamente). Verifica-se ainda haver outros casos em que a precisão pouco ultrapassa os limites de referência como a medição 5 da pilha nº 3, a medição 5 da pilha nº 2, ou a medição 1 da pilha nº2.

Podem ser encontradas várias justificações para a ocorrência destes desvios na medição das cotas da pilha. Uma delas pode ser a não colocação correta do sistema de atravessamento na origem. Podem ainda ser devidos aos problemas já referidos de falta de repetibilidade da grelha de medição, que apesar de todos os melhoramentos feitos, a sua eliminação pode não ter sido totalmente assegurada. Pode-se referir ainda como causa destes desvios o facto da não colocação correta nas marcas assinaladas do dispositivo usado na construção da pilha pretendida. Este facto pode ser o responsável da pilha nº 4 apresentar desvios significativos em todas as medições.

4.2. Medição da erosão da pilha completa

O *laser* montado no sistema de atravessamento, faz a medição do pé direito no ponto em que está a medir. Assim, para uma correta análise das coordenadas da pilha, teve de se fazer o módulo da diferença entre todos os pontos medidos relativamente ao inicial, de modo a se obter as dimensões da pilha corretamente.

Na Tabela D.1, em anexo encontra-se a medição das cotas da pilha completa, com a grelha de medição mais grosseira, para as duas velocidades de escoamento incidente em estudo, $U_0 = 9.90$ m/s[300 rpm] e $U_0 = 9.08$ m/s [275 rpm] e para os instantes de tempo de erosão referidos. Verifica-se ser uma boa aproximação o facto de se considerar a erosão da pilha simétrica. Na Tabela 4.2, estão ilustrados alguns resultados, retirados da

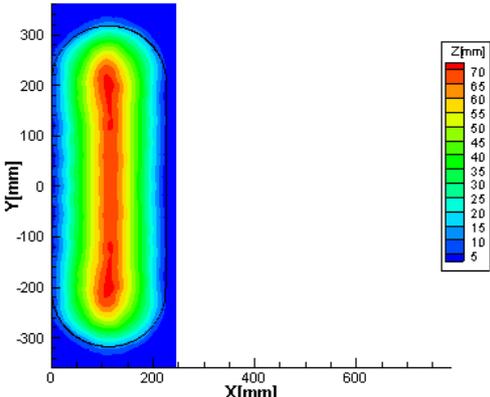
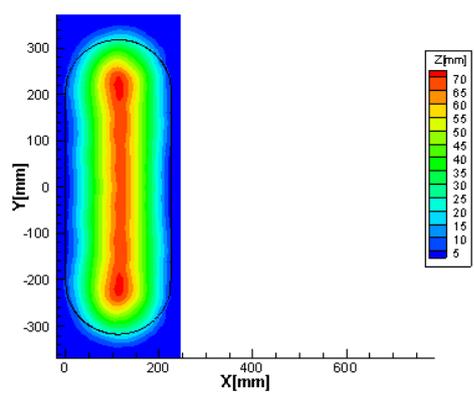
Tabela D.1, obtidos com o *software Tecplot*. Estes dizem respeito à medição da erosão da pilha completa. O escoamento incidente é da esquerda para a direita. O contorno a preto indica o contorno da pilha no instante $t=0$ minutos. Observa-se que para $U_0 = 9.90 \text{ m/s}$ a erosão da pilha já não é simétrica, após $t=4$ minutos de erosão. Essa simetria também deixa de existir para $U_0 = 9.08 \text{ m/s}$, sendo mais evidente no instante $t=10$ minutos. Observa-se ainda uma maior erosão da pilha para a velocidade mais elevada, já que a zona da crista para o instante $t=4$ minutos tem uma cota máxima de 32mm face aos 65mm medidos para a velocidade mais baixa, nesse instante. Após 10 minutos de erosão essa diferença é ainda mais notória para a velocidade mais elevada, não só pela diferença no máximo como pela muito mais reduzida área da pilha.

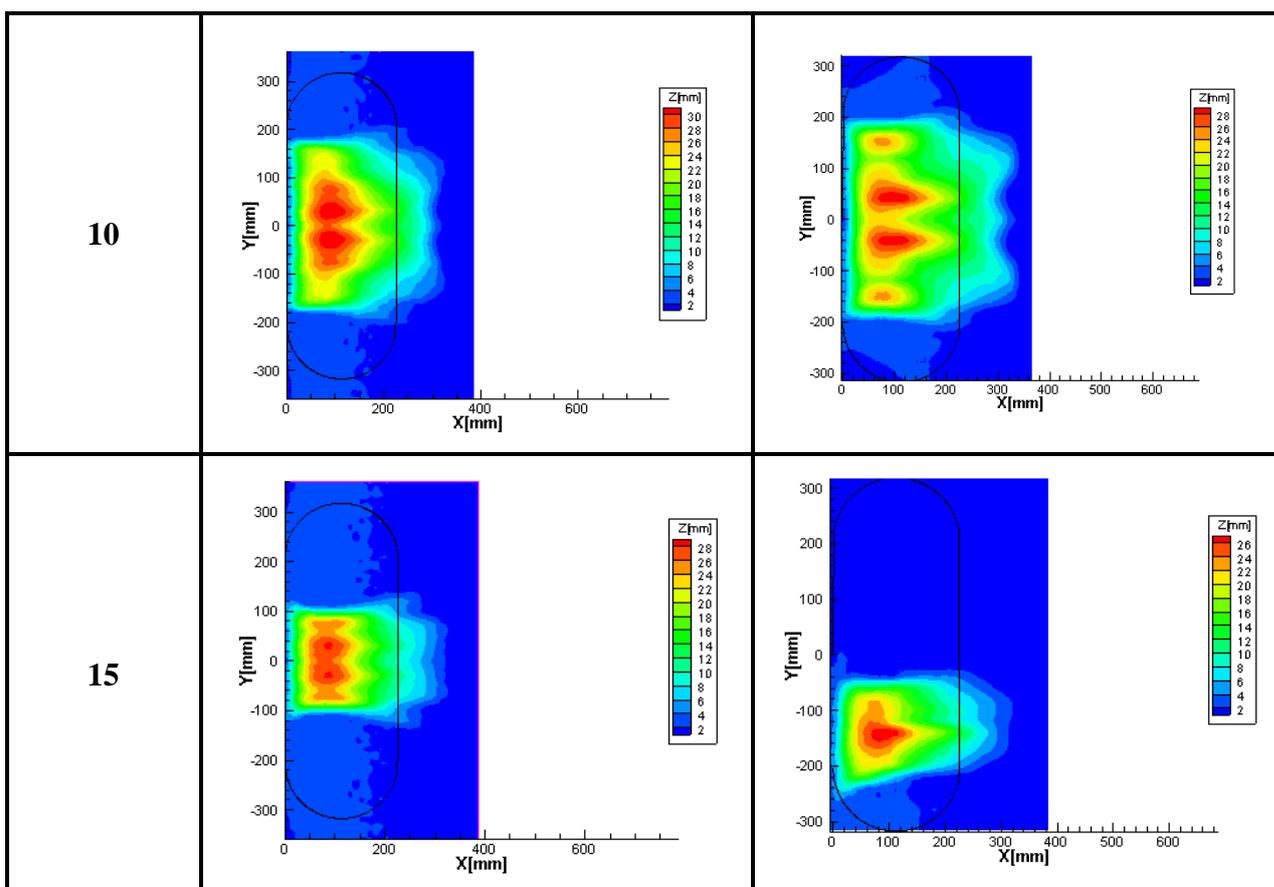
Tabela 4.2. Análise a alguns instantes de tempo da medição da erosão da pilha completa, para as duas velocidades.

Tempo de erosão [min]	$U_0 = 9.08 \text{ m/s}$ [275rpm]	$U_0 = 9.90 \text{ m/s}$ [300rpm]
4		
10		

Na Tabela 4.3 mostram-se alguns resultados das medições 1 e 2 da pilha erodida, para a velocidade de escoamento não perturbado $U_0 = 9.08 \text{ m/s}$, retirados do Tabela D.2, em anexo. Observa-se aí uma boa consistência nos resultados das medições, uma vez que as formas das pilhas obtidas são bastante semelhantes entre si. A medição 1 diz respeito à malha de medição mais refinada e a medição 2 à malha de medição mais grosseira. Observa-se existir pouca diferença a nível qualitativo entre os resultados destas medições. No instante $t=10$ minutos observa-se existir uma ligeira diferença quer na cota máxima lida (28 mm na medição 2 e 30 mm na medição 1) quer na área correspondente a esse máximo. Diferenças semelhantes são notadas nas medições 3 e 4, presentes na Tabela D.3. Estas diferenças justificam-se pelo facto de a erosão ser um processo estocástico, assim como a turbulência. Observa-se também uma aproximação, no instante $t=0$ minutos do formato da pilha ao contorno inicial a preto. Isto deve-se ao facto de a medição não começar precisamente a meio da pilha, e não a um aumento da quantidade de areia inicial. No instante $t=15$ minutos, observa-se ainda que a medição 1 da pilha erodida ficou bem ao centro, mas o mesmo não aconteceu na medição 2.

Tabela 4.3. Comparação entre as medições com a malha refinada e grosseira, para a velocidade $U_0=9.08 \text{ m/s}$, para alguns instantes de erosão.

Tempo de erosão[min]	Medição 1: malha refinada	Medição 2: malha grosseira
0		



4.3. Taxa de erosão

Um dos objetivos desta dissertação é fazer o cálculo da taxa de erosão. De facto, esta é uma variável que se encontra pouco explorada na literatura. Assim, na Figura 4.1 esquematiza-se como se vai calcular esta variável ao longo do domínio da medição. Nesta figura, à esquerda, estão apresentados os pontos medidos pelo sistema de atravessamento, a preto, ao longo de todo o domínio medido. A vermelho, são mostrados os pontos onde se calculou a taxa de erosão. À direita, está representada uma célula, cuja área, A_i , varia ao longo do domínio medido, uma vez que o espaçamento entre pontos da grelha de medição não é regular. Os pontos onde se calculou a taxa de erosão, a vermelho, são os representativos do centro da área assinalada A_i . As cotas destes pontos, correspondem à média das cotas medidas pelo sistema de atravessamento, nos vértices da célula assinalada. Multiplicando essa cota média pela área, A_i , obtém-se um volume médio, V_i . Este cálculo estendeu-se a todo o domínio medido pelo sistema de atravessamento.

As unidades da taxa de erosão $[\phi]$ são $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$. Assim, para cada instante t de erosão já referido, calcularam-se os volumes $V_i(t)$. Após este cálculo, calculou-se a diferença de volume entre o instante t e o instante anterior, $t-1$, ou seja, fez-se $V_i(t)-V_i(t-1)$. Multiplicando esta variação pela densidade de areia, ρ , obtém-se a massa de areia em cada célula. “A densidade da areia seca é de aproximadamente 1500 kg/m^3 , enquanto que cada grão de areia tem uma densidade igual à do quartzo que é de 2650 kg/m^3 ” (Ferreira e Fino, 2012). Nesta dissertação, considere o valor de 1500 kg/m^3 , uma vez que é a areia seca (mistura de areia com ar) que está a ser sujeita ao processo de erosão. Somando este valor, ao longo do domínio medido obtém-se uma estimativa da massa presente em cada instante. Dividindo esse valor de massa de cada célula pelo tempo de erosão (fazendo a diferença entre dois instantes de erosão seguidos) e pela área A_i obtém-se a taxa de erosão. Assim, pode-se escrever a seguinte expressão, em que se verificam as dimensões da taxa de erosão:

$$\phi = \frac{(V_i(t) - V_i(t - 1)) \times \rho}{(t_i - t_{i-1}) \times A_i} = \frac{[\text{m}^3] \times \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]}{[\text{s}] \times [\text{m}^2]} = \frac{[\text{kg}]}{[\text{s} \times \text{m}^2]} \quad (4.1)$$

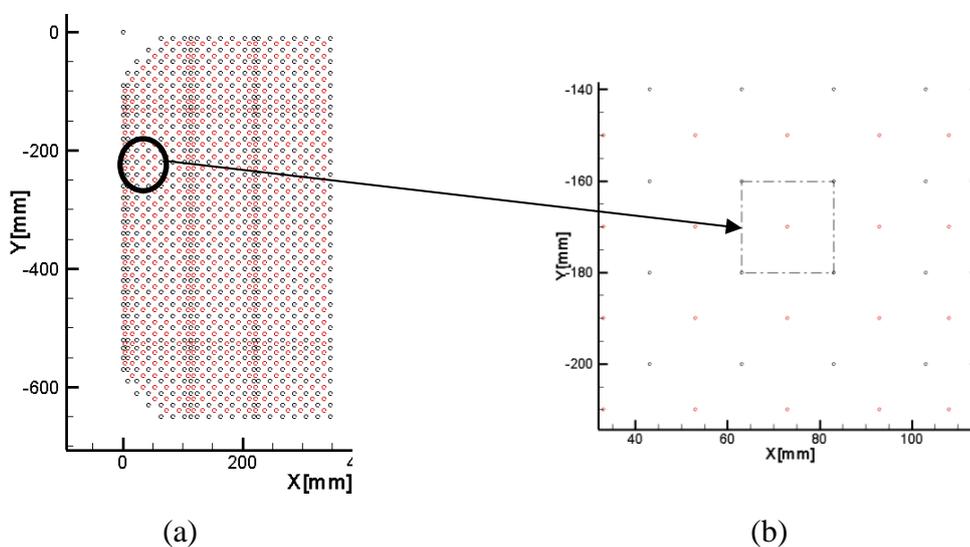


Figura 4.1. Esquema explicativo do cálculo da taxa de erosão.

Conforme se observa na Tabela 4.4, retirada da Tabela E.1, onde é feito o cálculo da taxa de erosão da medição de erosão da pilha completa, para alguns instantes de tempo de erosão, observa-se novamente uma boa simetria no processo de erosão, assim como observado na Tabela 4.2. Esta variável dá uma melhor noção ao observador do movimento da areia ao longo do processo de erosão. Devido às características do escoamento em torno

da pilha e da granulometria da areia, revela-se que qualitativamente, há zonas em que há remoção de areia e zonas em que esta é depositada. Observa-se da análise desta tabela que a erosão da pilha para as duas velocidades em estudo dá-se de forma totalmente diferente. Assim, para a velocidade de escoamento incidente $U_0 = 9.08 \text{ m/s}$, observam-se duas zonas circulares de remoção de areia para $\Delta t = 1$ minuto e a jusante destas zonas observa-se deposição. Essas zonas de remoção vão avançando ao longo da crista, bem como as de deposição, à medida que a forma da pilha se torna mais aerodinâmica, como se observa para $\Delta t = 3$ minutos. No instante $\Delta t = 5$ minutos já ocorreu a erosão da totalidade da crista da pilha. No instante $\Delta t = 10$ minutos já se observam duas zonas de remoção de areia distintas, e a zona de deposição é muito baixa. Para a velocidade de escoamento incidente $U_0 = 9.90 \text{ m/s}$, o processo de erosão é ligeiramente diferente. Após $\Delta t = 1$ minuto de erosão, observa-se uma maior erosão inicial da pilha na zona da crista. Observa-se que a área onde ocorre erosão ($\phi < 0$) é substancialmente superior para os instantes $\Delta t = 1$ minuto e $\Delta t = 3$ minutos, para a velocidade de escoamento incidente de 9.90 m/s . No instante $\Delta t = 3$ minutos começa-se a observar uma segunda zona de remoção de areia. A deposição ($\phi > 0$) tem um comportamento semelhante. Na velocidade mais elevada, observa-se ainda que para $\Delta t = 10$ minutos de erosão já só há zonas de remoção de areia, devido a uma mais rápida adaptação aerodinâmica da forma da pilha ao escoamento.

As zonas onde se observa remoção de areia ($\phi = -0.8 \text{ kg/m}^2\text{s}$) no instante $\Delta t = 1$ minuto correspondem às zonas de maior velocidade normalizada u_s/u_r em torno da pilha, onde o ar é forçado a acelerar, devido ao formato semi-cónico das extremidades da pilha, conforme se observa na Figura 2.3, assim como às zonas de maior distribuição da tensão de atrito, como se observa na Figura 2.16. Já as zonas de acumulação de areia, para $\Delta t = 1$ minuto, correspondem às zonas de menor tensão de atrito na superfície da pilha, como observado em Figura 2.16 bem como nas zonas de τ/τ_{ref} reduzidas, na Figura 2.12.

Na Tabela 4.5, retirada da Tabela E.4 mostra-se alguns resultados da taxa de erosão da medição 1 e 2, a metade da pilha erodida, para alguns instantes de tempo, para a velocidade de escoamento incidente $U_0 = 9.90 \text{ m/s}$. Novamente se verifica pouca diferença qualitativa entre a malha grosseira e a malha refinada, no instante $\Delta t = 5$ minutos. No instante $\Delta t = 10$ minutos de erosão, há zonas de deposição na medição 1, o que é dúbio. Isto acontece porque a areia que ficou por erodir nesse instante de erosão ficou mais abaixo, enquanto que na medição 2 ficou mais ao centro. Observam-se poucas diferenças também nas Tabela E.2

e Tabela E.3, relativas às 4 medições da erosão de meia pilha para a velocidade de escoamento incidente $U_0 = 9.08 \text{ m/s}$ e Tabela E.5, relativas às medições da erosão de meia pilha para a velocidade de escoamento incidente $U_0 = 9.90 \text{ m/s}$.

Tabela 4.4. Taxa de erosão da medição da pilha completa, para as duas velocidades, para alguns instantes de erosão.

$\Delta t[\text{min}]$	$U_0 = 9.08 \text{ m/s}$ [275rpm]	$U_0 = 9.90 \text{ m/s}$ [300rpm]
1		
3		
5		

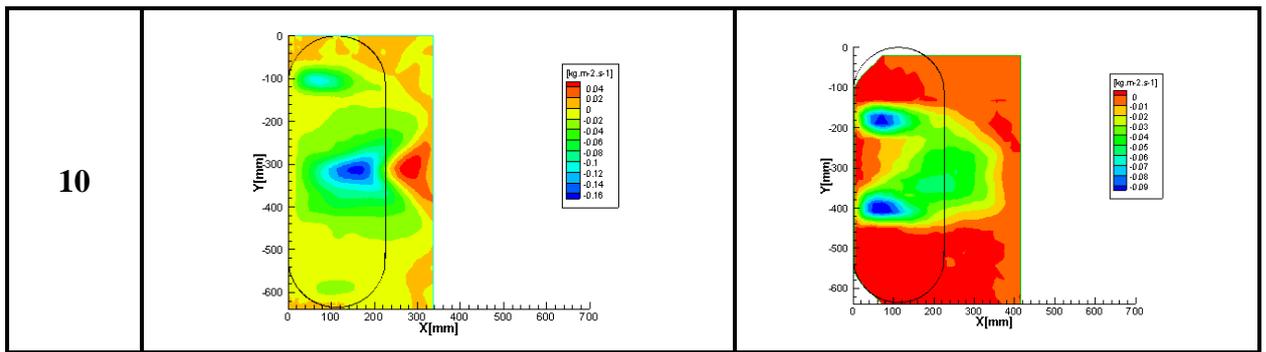


Tabela 4.5. Taxa de erosão das medições 1 e 2 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0=9.90$ m/s, para alguns instantes de tempo

Δt [min]	Medição 1: malha refinada	Medição 2: malha grosseira
5		
10		

4.4. Pilha orientada 60° com o escoamento incidente

Passa-se finalmente à análise das medições de erosão da pilha completa, orientada 60° com o escoamento incidente. Na Tabela 4.6, retirada da Tabela F.1, ilustram-se algumas medições da pilha erodida, orientada 60° com o escoamento incidente. Os contornos a preto são novamente referentes ao contorno inicial da pilha. Observa-se que o formato inicial da pilha medida, antes da erosão e para os ensaios a $U_0=9.90$ m/s, possui a zona da crista ligeiramente menor do que para a outra velocidade de escoamento incidente (máximo de 65 mm nesse caso face a 70mm no outro). Tal diferença justifica-se devido a alguma vibração na zona de trabalho do túnel, que levou a que a crista se deformasse. Enquanto que nos casos anteriores se observava uma erosão simétrica, que ia erodindo as laterais da pilha, avançando até ao centro da pilha à medida que a crista ia sendo erodida, aqui observa-se um comportamento distinto. Assim, para a velocidade de escoamento incidente $U_0=9.08$ m/s observa-se que há remoção de areia ao longo da crista, sendo que a pilha vai ser mais erodida na parte de cima. Para $t=3$ minutos ainda há um máximo de 60 mm de altura, sendo que a erosão remove mais areia na parte de cima. Este máximo ainda é de 42 mm de altura para $t=7$ minutos. Para $U_0=9.90$ m/s, observa-se uma maior erosão inicial na parte de cima da pilha, após $t=3$ minutos de erosão. Neste instante, a esta velocidade, a crista da pilha já se encontra totalmente deformada. De facto, devido à maior velocidade, a erosão é mais intensa, observando-se assim uma maior deformação da pilha ao longo de X. Observa-se também uma maior remoção de areia, sendo que, logo após $t=3$ minutos de erosão o máximo da pilha já é menor para $U_0=9.90$ m/s do que após $t=7$ minutos de erosão para a velocidade de escoamento incidente $U_0=9.08$ m/s.

Finalmente, na Tabela 4.7, retirada da Tabela F.2 apresentam-se alguns resultados da taxa de erosão da pilha orientada a 60° com o escoamento incidente. Observa-se uma maior erosão da pilha na parte de cima do que na parte de baixo, para $\Delta t=1$ minuto e é tanto maior, quanto maior a velocidade do escoamento incidente. Assim, para a velocidade $U_0=9.08$ m/s, observa-se novamente zonas de deposição de areia ($\phi>0$), a jusante das zonas de remoção. Observa-se também alguma remoção de areia na parte de baixo, para $\Delta t=1$ minuto e para $\Delta t=3$ minutos. Em $\Delta t=5$ minutos observa-se que a zona de maior remoção de areia se deslocou ligeiramente do centro, voltando à posição central em $\Delta t=10$ minutos. Para a velocidade de escoamento incidente $U_0=9.90$ m/s, observa-se uma maior remoção inicial na zona da crista da pilha, para $\Delta t=1$ minuto que vai sendo cada vez mais aumentada, na

zona da crista, como se observa para $\Delta t=3$ minutos. Observa-se também que no instante $\Delta t=10$ minutos de erosão que existem duas zonas de remoção de areia, e uma ligeira deposição a jusante. Essa deposição também se observa a jusante das zonas de remoção, para os outros instantes Δt ilustrados. Observa-se ainda zonas onde há deposição de areia a jusante das zonas de remoção.

Tabela 4.6. Resultados da medição da pilha completa, orientada 60° com o escoamento incidente, para alguns instantes de erosão.

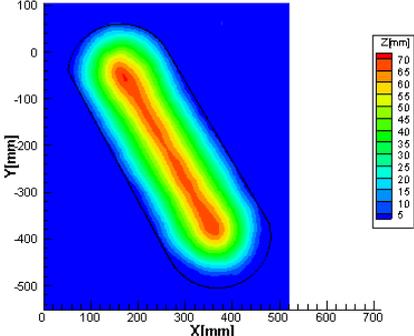
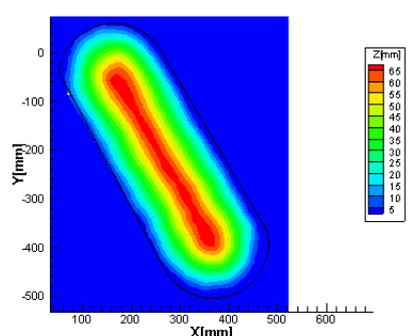
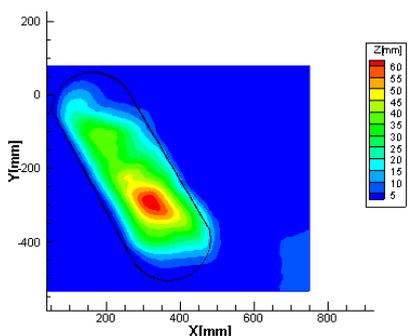
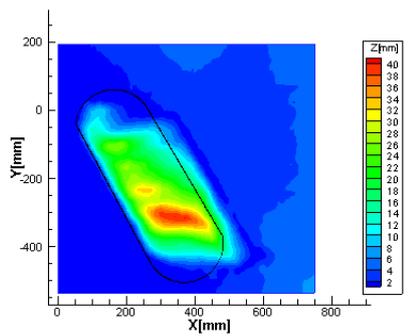
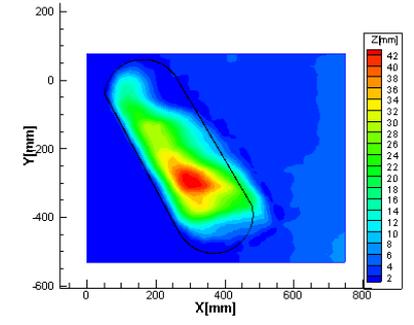
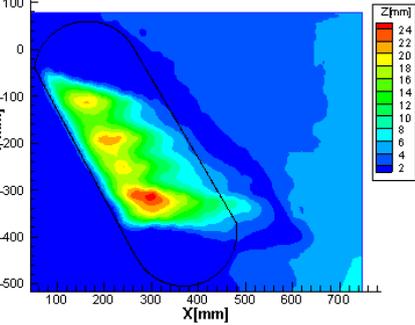
Tempo de erosão[<i>min</i>]	$U_0 = 9.08 \text{ m/s}$ [275rpm]	$U_0 = 9.90 \text{ m/s}$ [300rpm]
0		
3		
7		

Tabela 4.7. Resultados do cálculo da taxa de erosão da pilha orientada 60° com o escoamento incidente, para alguns instantes de tempo.

Δt [min]	$U_0 = 9.08 \text{ m/s}$ [275rpm]	$U_0 = 9.90 \text{ m/s}$ [300rpm]
1		
3		
5		
10		

4.5. Variação do volume com o tempo, ao longo do processo de erosão para as duas direções em estudo

Conforme dito na secção 4.3, o cálculo da taxa de erosão tinha por trás toda uma análise ao domínio medido que permite obter uma estimativa da massa removida, bem como uma ideia do decaimento do volume da pilha ao longo do tempo. Assim, na Figura 4.2, apresenta-se a variação do volume calculado com o tempo de erosão, para a medição da pilha completa, para as duas velocidades de escoamento incidente e para as duas direções em estudo. Como expectável, há um maior decaimento do volume da pilha para a velocidade mais elevada de escoamento incidente. O volume inicial de areia é de $4.40 \times 10^{-3} m^3$, obtido através do *software Solidworks*. Esse valor é coerente com o apresentado neste caso. Os valores de volume da pilha calculados foram obtidos através de um dos passos necessários para o cálculo da taxa de erosão, conforme explicado em 4.3. Assim, calculou-se a cota média correspondente à média 4 pontos medidos pelo sistema de atravessamento nos vértices da célula assinalada na Figura 4.1 e multiplicou-se essa cota média pela área A_i da célula. Com isto, obteve-se o volume médio V_i dessa célula. Este cálculo estendeu-se a todo o domínio medido pelo sistema de atravessamento e, o volume da pilha obteve-se somando todos os volumes V_i calculados.

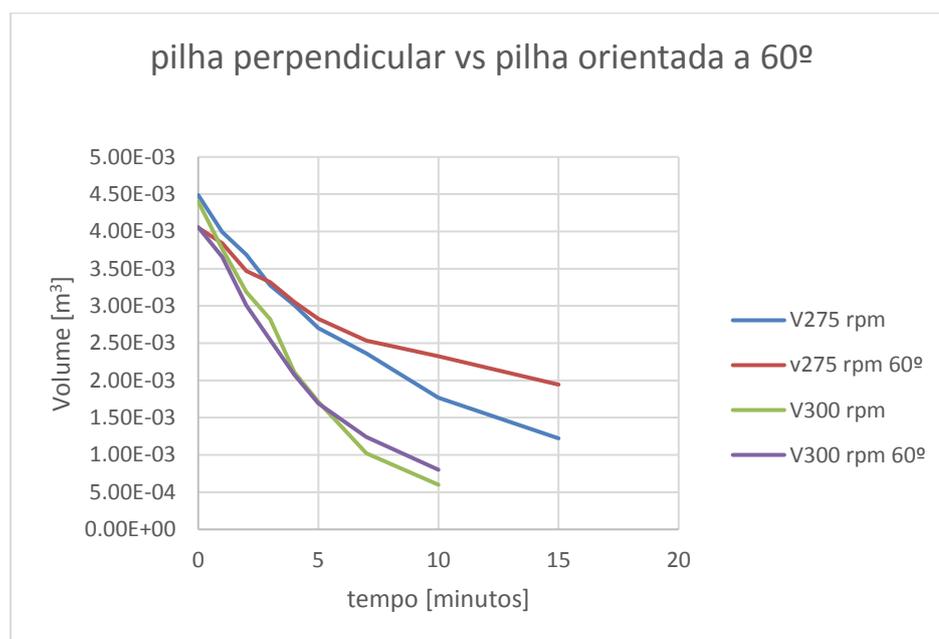


Figura 4.2. Comparação da variação do volume com o tempo: efeito da rotação da pilha face ao escoamento, para a velocidade $U_0=9.08m/s$ (V275 rpm) e para a velocidade $U_0=9.90m/s$ (V300 rpm)

Na Figura 4.2 é feita ainda uma análise ao efeito da rotação da pilha no decaimento do volume de areia com o tempo de erosão. De facto, para a velocidade de escoamento incidente $U_0=9.08$ m/s., é notória a diferença na variação do volume provocado pela rotação da pilha face ao escoamento incidente. Assim, após cerca de 3 minutos o volume da pilha rodada diminui menos do que o da pilha perpendicular ao escoamento, logo há uma menor emissão de partículas neste caso. Após 15 minutos de erosão observa-se uma diferença de cerca de $0.75 \times 10^{-3} m^3$ no volume entre o caso da pilha perpendicular e o caso da pilha rodada, daí a rotação da pilha 60° diminuir substancialmente a emissão de partículas. Observa-se um comportamento semelhante, mas não tão acentuado no caso da velocidade de escoamento incidente ser de 9.90 m/s. Isto vai contra o apresentado na Figura 2.9, assim como na Tabela A.5, em que aí se observa que há um aumento das emissões de partículas com a rotação da pilha. Ora neste caso, o volume tende a ser maior no caso da pilha rodada após erosão, logo ficando mais massa de areia na pilha, daí que se pode concluir que menos partículas foram emitidas. Isto justifica a importância de estudos em túnel de vento para validar o observado em estudos computacionais. Porém a realização de apenas uma medição para cada velocidade para a rotação da pilha orientada 60° face ao escoamento incidente não é suficiente para comprovar a consistência dos resultados, devendo posteriormente, ser feitos mais ensaios para este caso, em túnel de vento para corroborar a consistência destas observações.

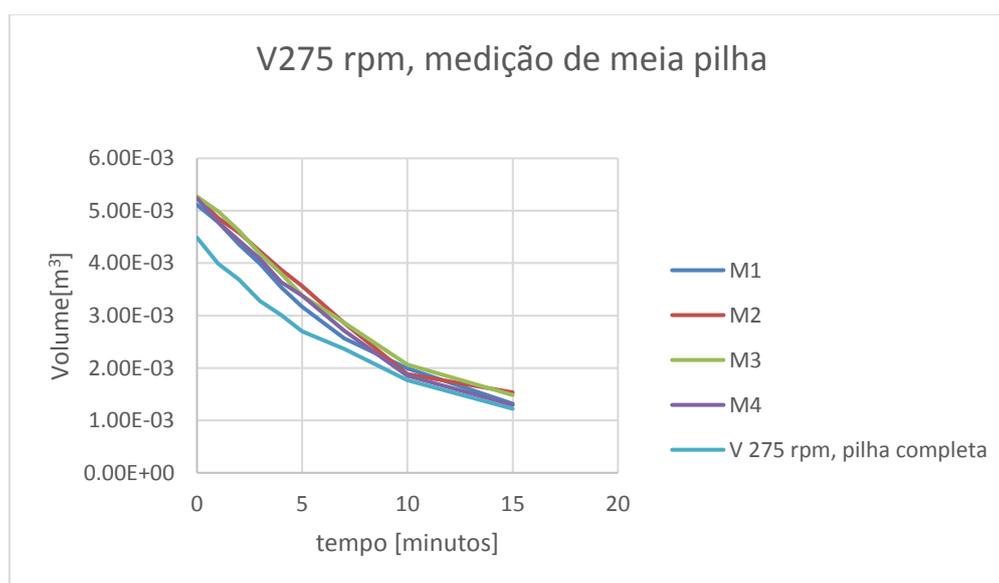


Figura 4.3.Variação do volume calculado com o tempo de erosão, para a medição de meia pilha e velocidade de escoamento incidente $U_0= 9.08$ m/s

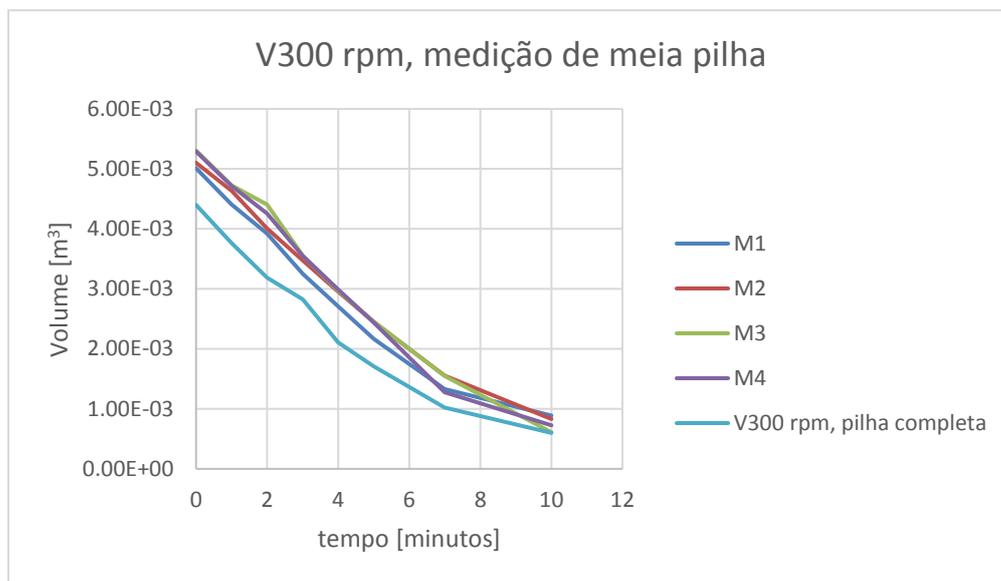


Figura 4.4.Variação do volume calculado com o tempo de erosão, para a medição de meia pilha e velocidade de escoamento incidente $U_0= 9.90$ m/s

Nas Figura 4.3 e Figura 4.4, estão presentes as curvas da variação do volume com o tempo para as quatro medições da erosão de meia pilha realizadas. Novamente se vê que existe uma boa repetibilidade nos ensaios realizados devido à boa proximidade das curvas bem como ao decaimento destas. Observa-se que o volume inicial, que foi obtido no cálculo da taxa de erosão, é ligeiramente superior aos $4.4 \times 10^{-3} m^3$ referidos acima, o que parece estranho, já que o dispositivo de construção da pilha é sempre o mesmo, levando sempre a mesma quantidade de areia. Tal aumento explica-se pelo facto de a medição de meia pilha não acontecer exatamente no plano de simetria da pilha, mas sim ligeiramente mais atrás, daí esta diferença no volume. O decaimento do volume verifica-se ser bastante semelhante ao apresentado para os casos da medição da pilha completa, apenas com a ligeira diferença no valor do volume inicial.

5. CONCLUSÕES

Nesta dissertação fez-se um estudo experimental da erosão eólica de pilhas de material granular com formato oblongo. Para tal, foram realizados diversos ensaios de erosão a uma pilha oblonga. Essa pilha era obtida do esvaziamento de um dispositivo criado para o efeito, da autoria da prof. Raquel Faria. Nos ensaios realizados no túnel de vento do LAI, foram usadas duas velocidades de escoamento incidente distintas: 9.08 e 9.90 m/s. Foram realizadas medições com um *laser* montado num sistema de atravessamento, à erosão provocada pelo vento com duas grelhas de medição distintas: uma mais refinada e uma mais grosseira. Estes dados foram usados para se calcular a taxa de erosão das pilhas erodidas, bem como o decaimento do volume da pilha com o tempo de erosão. Além disso, foram usadas duas direções do escoamento em relação à pilha: Escoamento incidente na perpendicular ao comprimento da pilha e orientado 60° com esse lado.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação permite tirar algumas conclusões importantes. Assim, concluiu-se primeiramente haver um bom paralelismo entre as zonas de maior distribuição de velocidade normalizada u_s/u_r e as zonas onde a taxa de erosão é maior.

Concluiu-se haver boa repetibilidade na construção da pilha com o dispositivo criado para o efeito. Porém, um dos constrangimentos notados foi a falta de repetibilidade na grelha de medição do sistema de atravessamento, o que levou a existirem desvios significativos nas medições de repetibilidade da pilha, antes da erosão no túnel de vento. Apesar disso, os resultados da medição de erosão e da taxa de erosão parecem não estar muito afetados por estes desvios, uma vez que se observa uma boa repetibilidade nas medições efetuadas. Para além disso conclui-se ser uma boa aproximação existir simetria no processo de erosão da pilha perpendicular ao escoamento, apesar das pequenas faltas de simetria em alguns instantes. Qualitativamente, existem alguns desvios entre as diversas medições, o que é normal que aconteça devido a todos os erros humanos que condicionam os ensaios, bem como ao carácter estocástico associado aos processos de erosão no túnel de vento.

Concluiu-se ainda que o facto de se fazer um refinamento da grelha de medição não levou a um melhoramento significativo na resolução das medições, uma vez que, quer a taxa de erosão, quer as medições de erosão se mantiveram bastante semelhantes entre si.

Assim, a grelha de medição mais grosseira revelou ser boa o suficiente para a consistência dos resultados, não existindo grandes diferenças qualitativas entre as medições com a grelha mais refinada, comparativamente às realizadas com a grelha mais grosseira.

Concluiu-se também que existem duas zonas principais no processo de erosão da pilha oblonga: uma onde há remoção de areia e outra onde há deposição. Tais zonas coincidem bem com as distribuições de tensão de atrito na superfície da pilha. Assim, onde essa tensão é maior é onde ocorre remoção das partículas de areia da pilha, nomeadamente na crista e nas laterais. Onde há deposição é nas zonas onde essa tensão é menor, nomeadamente na superfície de jusante, mas também um bocado mais a jusante dessa superfície.

Concluiu-se também que o processo de erosão para a velocidade mais elevada $U_0=9.90$ m/s é responsável por uma maior remoção de areia da pilha do que a velocidade mais baixa sendo que o volume da pilha decai mais rapidamente para este caso. Para além disso concluiu-se também que a rotação da pilha 60° face ao escoamento incidente leva a que a pilha sofra menos erosão comparativamente ao caso em que esta está perpendicular ao escoamento, visto ser maior o volume final da pilha erodida, havendo menos erosão de areia neste caso. Tal facto contraria a literatura, que considera que as emissões de poeiras aumentam com a rotação da pilha face ao escoamento. Esta característica é mais notória para a velocidade de escoamento incidente mais reduzida.

De modo a comprovar a consistência das medições de erosão para a pilha rodada 60° , sugiro no futuro, que se façam mais medições para este caso, de modo a corroborar a conclusão anterior. Para além disso, seria interessante estudar outras orientações da pilha face ao escoamento, de modo a aumentar os resultados experimentais nesse sentido. Seria pertinente ainda estudar, no futuro a colocação de uma pilha a jusante da primeira, de modo a se perceber de que forma, a nível experimental esta segunda pilha vai afetar a taxa de erosão da primeira, fazendo variar a distância entre elas já que nos estaleiros industriais raramente se encontra uma pilha isolada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badr, T. & Harion, J.L., Numerical modelling of flow over stockpiles: implications on dust emissions, *Atmospheric Environment*, **39**, pp. 5576-5584, 2005.
- Badr, T. & Harion, J.L., Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions. *Atmospheric Environment*, **41(2)**, pp. 360-368, 2007.
- Ferreira, A.D., Oliveira, R.A., Wind erosion of sand placed inside a rectangular box, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **97**, pp. 1-10, 2009.
- Ferreira, A.D., Lambert, R.J., Numerical and wind tunnel modeling on the windbreak effectiveness to control the aeolian erosion of conical stockpiles, *Environ Fluid Mech*, **11**, pp. 61-76, 2011.
- Ferreira, A.D., Fino, M.R.M., A wind tunnel study of wind erosion and profile reshaping of transverse sand piles in tandem, *Geomorphology*, **139-140**, pp.230-241, 2012.
- Furieri, B., Russeil, S., Harion, J.L., Santos, J., Milliez, M., Comparative analysis of dust emissions: isolated stockpile vs two nearby stockpiles, *Air Pollution*, **XX**, pp.285-294, 2012a.
- 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, *Environ Fluid Mech*, **12**, pp. 533-553 2012b.
- 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*, **79**, pp.672-680, 2013.
- Furieri, B., Santos, J.M., Russeil, S., Harion, J.L., Aeolian erosion of storage piles yards: contribution of the surrounding areas, *Environ Fluid Mech*, **14**, pp. 51-67 2014.
- Turpin, C., Harion, J.L., Numerical modeling of flow structures over various flat-topped stockpiles height: implications on dust emissions, *Atmospheric Environment*, **43**, pp. 5579-5587, 2009.
- USEPA, *Miscellaneous sources, industrial wind erosion*, AP-42, 2006.
- Çengel Y.A., Transferência de calor e massa: uma abordagem prática-tabelas e gráficos de propriedades, terceira edição, *Mc Graw Hill*, pp. 860

ANEXO A

Tabela A.1. Distribuição de subáreas para os regimes u_s/u_r em estudo. (Fonte: USEPA, *miscellaneous sources*)

Subárea da pilha	Percentagem da subárea da pilha			
	Pilha A	Pilha B1	Pilha B2	Pilha B3
0.2a	5	5	3	3
0.2b	35	2	28	25
0.2c		29		
0.6a	48	26	29	28
0.6b		24	22	26
0.9	12	14	15	14
1.1			3	4

Tabela A.2. Detalhes geométricos das pilhas testadas. (Fonte: Badr e Harion, 2007)

Teste	Volume[m ³]	Área de superfície[m ²]	Ângulo de repouso [°]	Altura [m]	Comprimento [m]	Largura [m]
1	31474	10117	38	8	373	20.5
2	31474	8205	38	10	232.5	25.6
3	31474	6951	38	12	153	31
4	31474	6122	38	14	106	36
5	31474	5548	38	16	74.5	41

Tabela A.3. Características geométricas das pilhas testadas (Fonte: Turpin e Harion, 2009)

Teste n°	θ [°]	Altura[m]	Largura[m]	Superfície[m]
1,8,10,12	90,60,30,0	16	20.500	3202
2	90	15.5	20.508	3251.7
3	90	15	20.530	3305.4
4,9,11,13	90,60,30,0	14.5	20.570	3363.6
5	90	14	20.628	3426.7
6	90	13.5	20.707	3495.4
7	90	13	20.808	3570.4

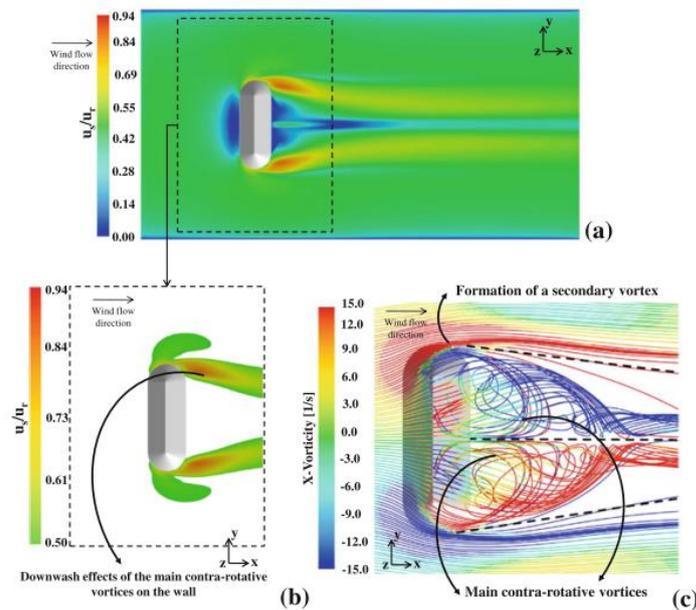


Figura A.1. Contornos de u_s/u_r (a) No plano horizontal a 25cm acima do chão em toda a superfície, para a configuração perpendicular, (b) na superfície considerada para o cálculo de emissão de poeiras e (c) linhas de corrente coloridas pela vorticidade em X. (Fonte: Furieri et al. 2014)

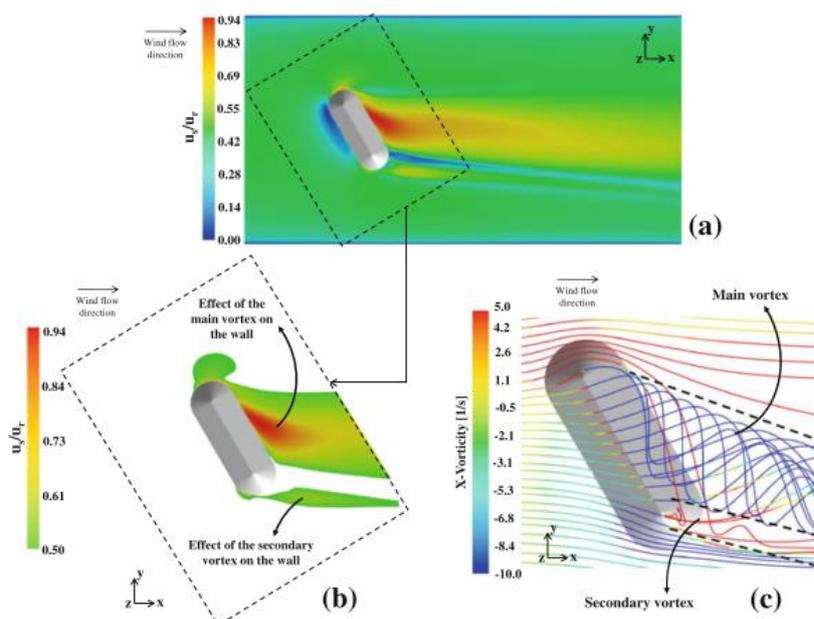


Figura A.2. Contornos de u_s/u_r (a) No plano horizontal a 25cm acima do chão em toda a superfície, para a configuração de 60° , (b) na superfície considerada para o cálculo de emissão de poeiras e (c) linhas de corrente coloridas pela vorticidade em X. (Fonte: Furieri et al. 2014)

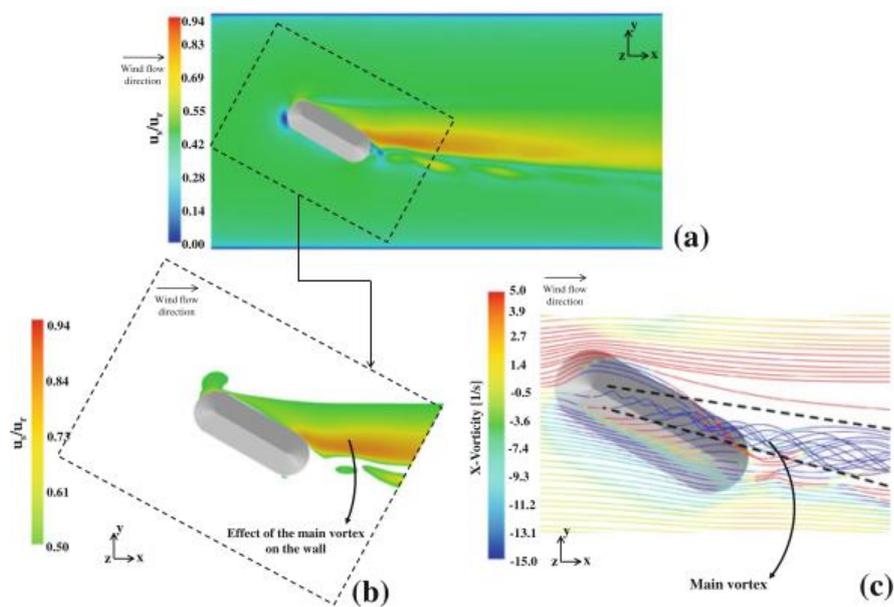


Figura A.3. Contornos de u_s/u_r . (a) no plano horizontal a 25cm acima do chão em toda a superfície, para a configuração de 30° , (b) na superfície considerada para o cálculo de emissão de poeiras e (c) linhas de corrente coloridas pela vorticidade em X. (Fonte: Furieri et al. 2014)

Tabela A.4. Áreas erodíveis e não erodíveis na pilha ($u_t^*=0.35$ m/s) e em torno da pilha ($u_t^*=0.55$ m/s) para $u_{10}^+=10.38$ m/s (Fonte: Furieri et al. 2014)

u_s/u_r	u (m/s)	%			u_s/u_r	u (m/s)	%		
		On the stockpile					Around the stockpile		
		90°	60°	30°			90°	60°	30°
0.05	0.05	9.5	6.0	2.7	0.05	0.05	3.2	0.4	0.1
0.15	0.16	28.2	11.7	5.6	0.15	0.16	5.7	2.9	0.4
0.25	0.26	20.2	9.9	7.3	0.25	0.26	7.5	3.7	1.5
	Non-erodible	57.9	27.6	15.6	0.35	0.36	13.8	14.7	17.8
0.35	0.36	6.7	9.8	9.7	0.45	0.47	52.9	51.8	60.5
0.45	0.47	7.1	11.1	15.9		Non-erodible	83.1	73.5	80.3
0.55	0.57	7.4	13.0	20.3	0.55	0.57	8.6	10.5	10.1
0.65	0.67	6.7	13.9	15.3	0.65	0.66	6.5	11.2	5.8
0.75	0.78	5.9	12.2	10.9	0.75	0.77	1.8	3.4	3.8
0.85	0.88	5.4	7.5	5.4	0.85	0.88	0.0	1.4	0.0
0.95	0.99	2.9	2.3	3.5	0.95	0.99	0.0	0.0	0.0
1.05	1.09	0.0	1.4	2.4	1.05	1.10	0.0	0.0	0.0
1.15	1.19	0.0	0.9	0.6	1.15	1.21	0.0	0.0	0.0
1.25	1.30	0.0	0.3	0.3	1.25	1.32	0.0	0.0	0.0
1.35	1.40	0.0	0.0	0.1	1.35	1.43	0.0	0.0	0.0
1.45	1.50	0.0	0.0	0.0	1.45	1.54	0.0	0.0	0.0
1.55	1.61	0.0	0.0	0.0	1.55	1.65	0.0	0.0	0.0
1.65	1.71	0.0	0.0	0.0	1.65	1.76	0.0	0.0	0.0
	Erodible	42.1	72.4	84.4		Erodible	16.9	26.5	19.7

Tabela A.5. Emissões de poeiras da superfície da pilha e do terreno envolvente. (Fonte: Furieri et al. 2014)

		Emissions (kg/perturbation)			Contribution (%)		
		5	u_{10}^+ (m/s)		5	u_{10}^+ (m/s)	
			10.38	15		10.38	15
On the pile	90°	0.8	16.5	44.4	100	67.7	34.2
	60°	1.5	30.0	79.7	100	57.1	32.8
	30°	1.6	32.6	87.5	100	71.8	41.1
Surrounding the pile	90°	0.0	7.9	85.2	0.0	32.3	65.8
	60°	0.0	22.6	163.5	0.0	42.9	67.2
	30°	0.0	12.8	125.6	0.0	28.2	58.9
Global emissions	90°	0.8	24.4	129.6			
	60°	1.5	52.6	243.2			
	30°	1.6	45.4	214.1			

Tabela A.6. Quantificação das emissões de poeiras. (Fonte: Furieri et al. 2012a)

u_{10}^+	Emissão de poeiras [kg/ano]				
	isolada	Duas (2e) montante	Duas (2e) jusante	Duas (1e) montante	Duas (1e) jusante
5	2.1	3.1	2.6	2.6	3.5
10	31.3	34.8	34.5	33.0	42.4
15	91.2	97.9	98.7	94.7	118.5

Tabela A.7. Soma e diferença relativa entre os casos testados. (Fonte: Furieri et al. 2012a)

u_{10}^+	Duplamente isolada	Duas (2e) montante e jusante		Duas (1e) montante e jusante	
	Emissão de poeiras [kg/ano]	Emissão de poeiras [kg/ano]	Diferença [%]	Emissão de poeiras [kg/ano]	Diferença [%]
5	4.2	5.7	35.7	6.1	45.2
10	62.6	69.3	10.7	75.4	20.4
15	182.4	196.6	7.8	213.2	16.9

ANEXO B

Tabela B.1. Estudo detalhado do funcionamento do sistema de atravessamento no modo manual.

Quantidade incrementada		Mexe/não mexe	
ΔX	ΔY	Direção X	Direção Y
150	--	--	Não
150	--	--	Não
200	--	--	Não
-100	--	--	Não
-150	--	--	Não
-250	--	--	Não
250	--	--	Não
300	--	--	Não
200	--		Não
--	-29	Não	--
--	-30	Sim, (X negativo)	--
--	-40	Sim, (X negativo)	--
--	-50	Sim, (X negativo)	--
--	-100	Sim, (X negativo)	--
--	-200	Sim, (X negativo)	--
--	-300	Sim, (X negativo)	--
-	-400	Sim, (X negativo)	--
--	-600	Sim, (X negativo)	--
--	29	Não	--
--	30	Não	--
--	32	Não	--
--	33	Sim, (X positivo)	--
--	34	Sim, (X positivo)	--
--	35	Sim, (X positivo)	--
--	40	Sim, (X positivo)	--
--	50	Sim, (X positivo)	--
--	100	Sim, (X positivo)	--
--	200	Sim, (X positivo)	--
--	300	Sim, (X positivo)	--

ANEXO C

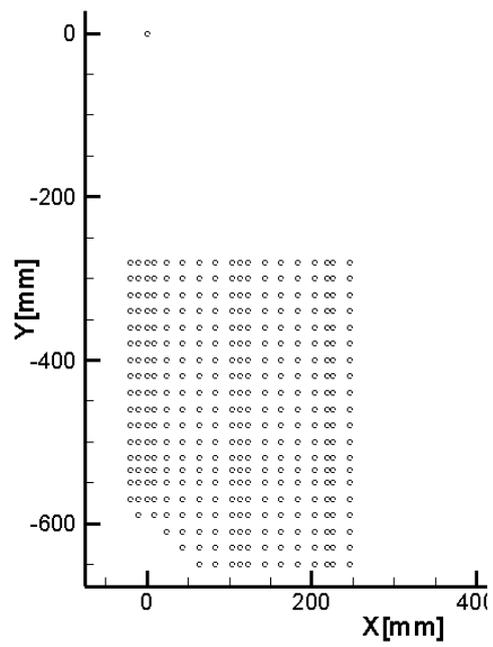
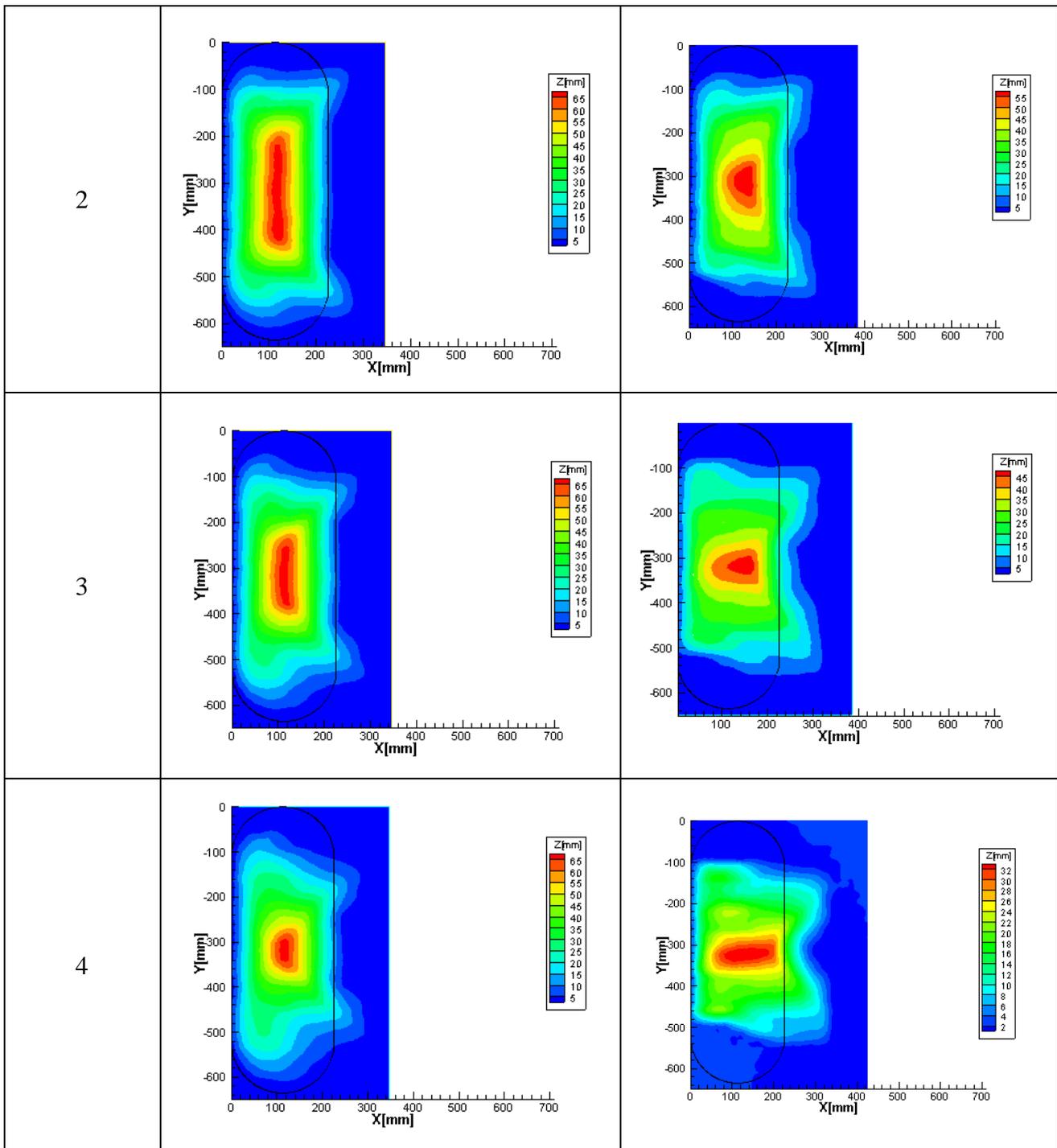


Figura C.1. Grelha de medição grosseira de metade da pilha.

ANEXO D

Tabela D.1. Medição da erosão da pilha completa

Tempo de erosão[<i>min</i>]	$U_0 = 9.08 \text{ m/s}$ [275rpm]	$U_0 = 9.90 \text{ m/s}$ [300rpm]
0		
1		



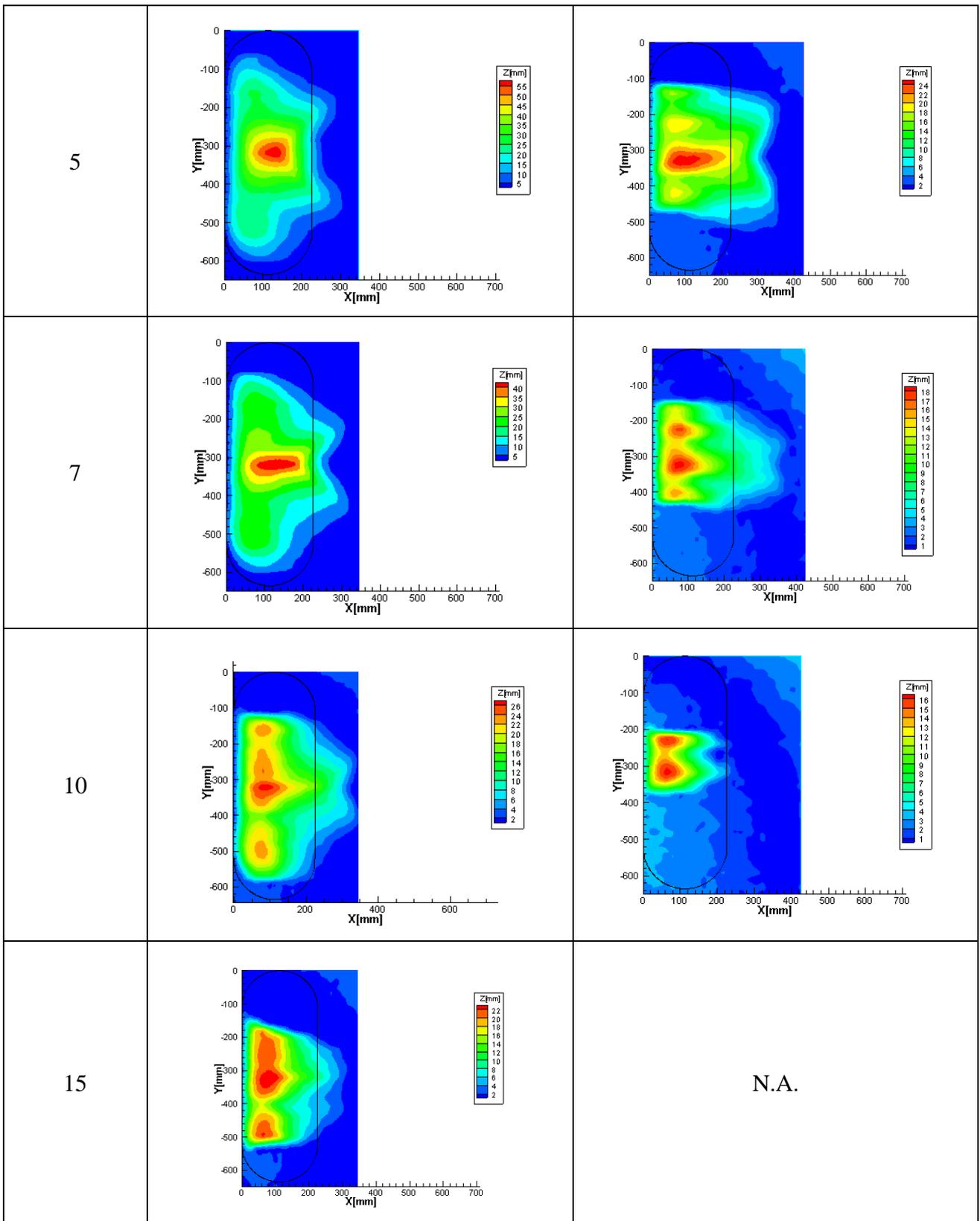
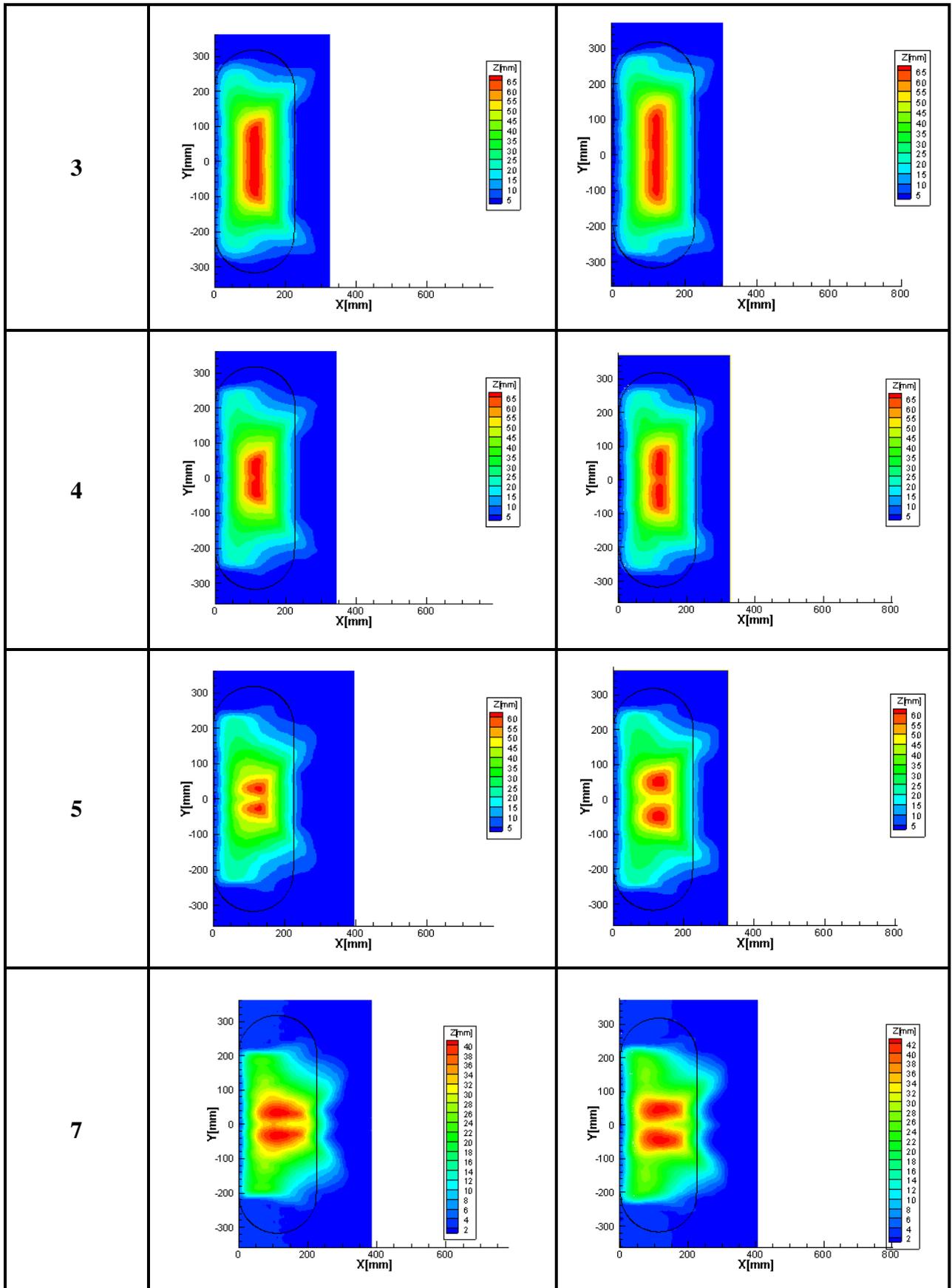


Tabela D.2. Medição 1 e 2 da erosão de meia pilha, $U_0=9.08$ m/s (275 rpm)

Tempo de erosão[min]	Medição 1	Medição 2
0		
1		
2		



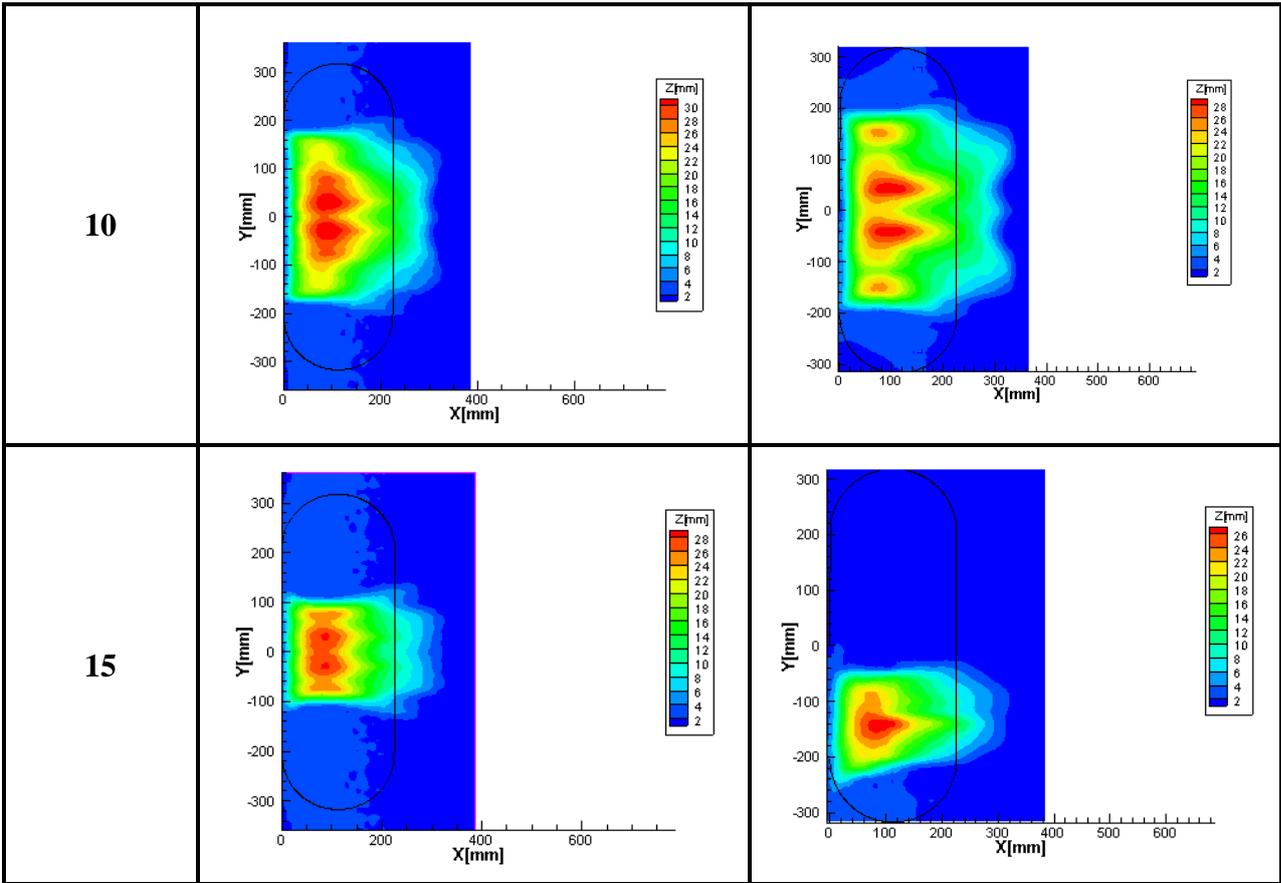
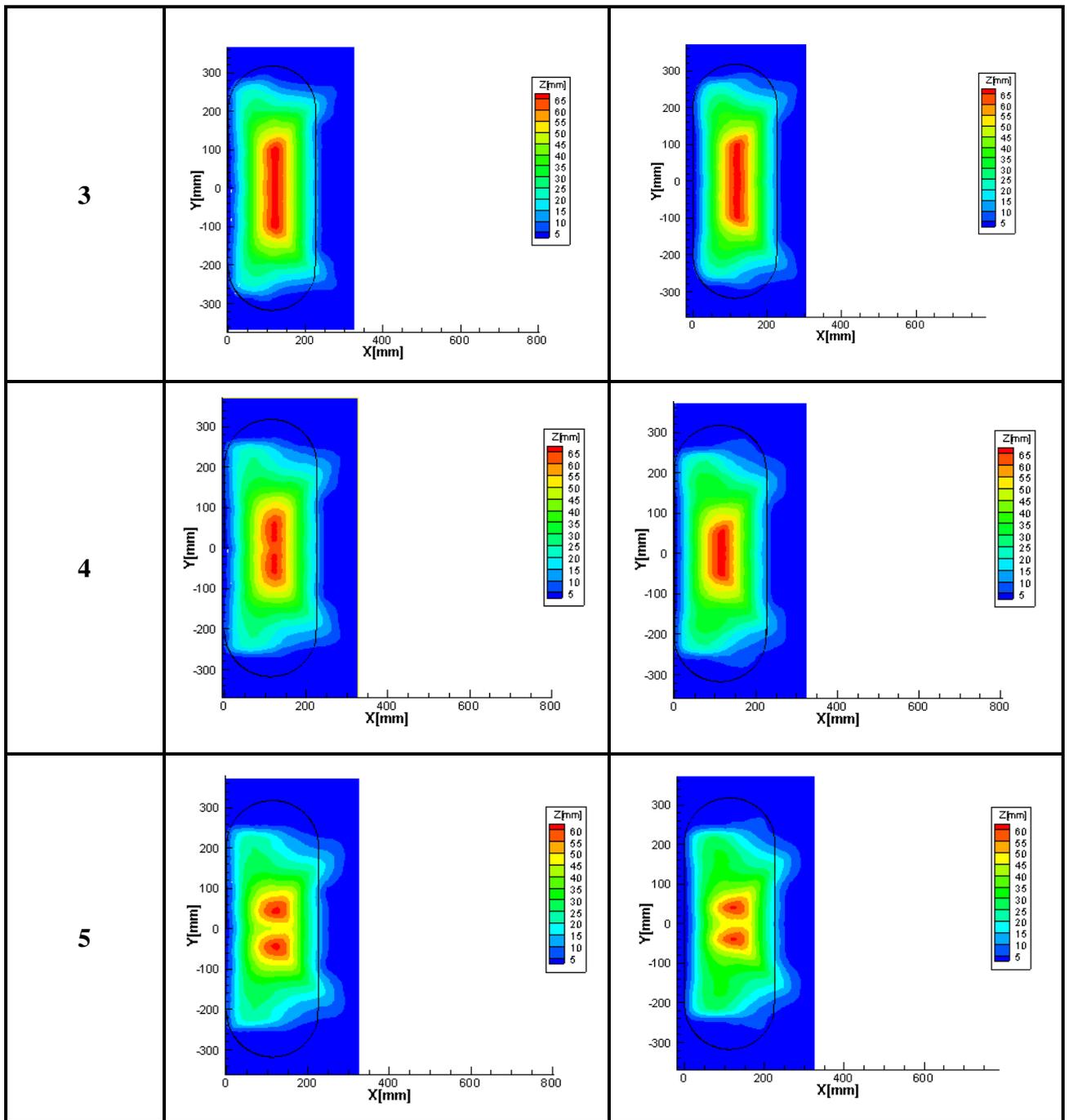


Tabela D.3. Medição 3 e 4 da erosão de meia pilha, $U_0=9.08$ m/s (275 rpm)

Tempo de erosão[min]	Medição 3	Medição 4
0		
1		
2		



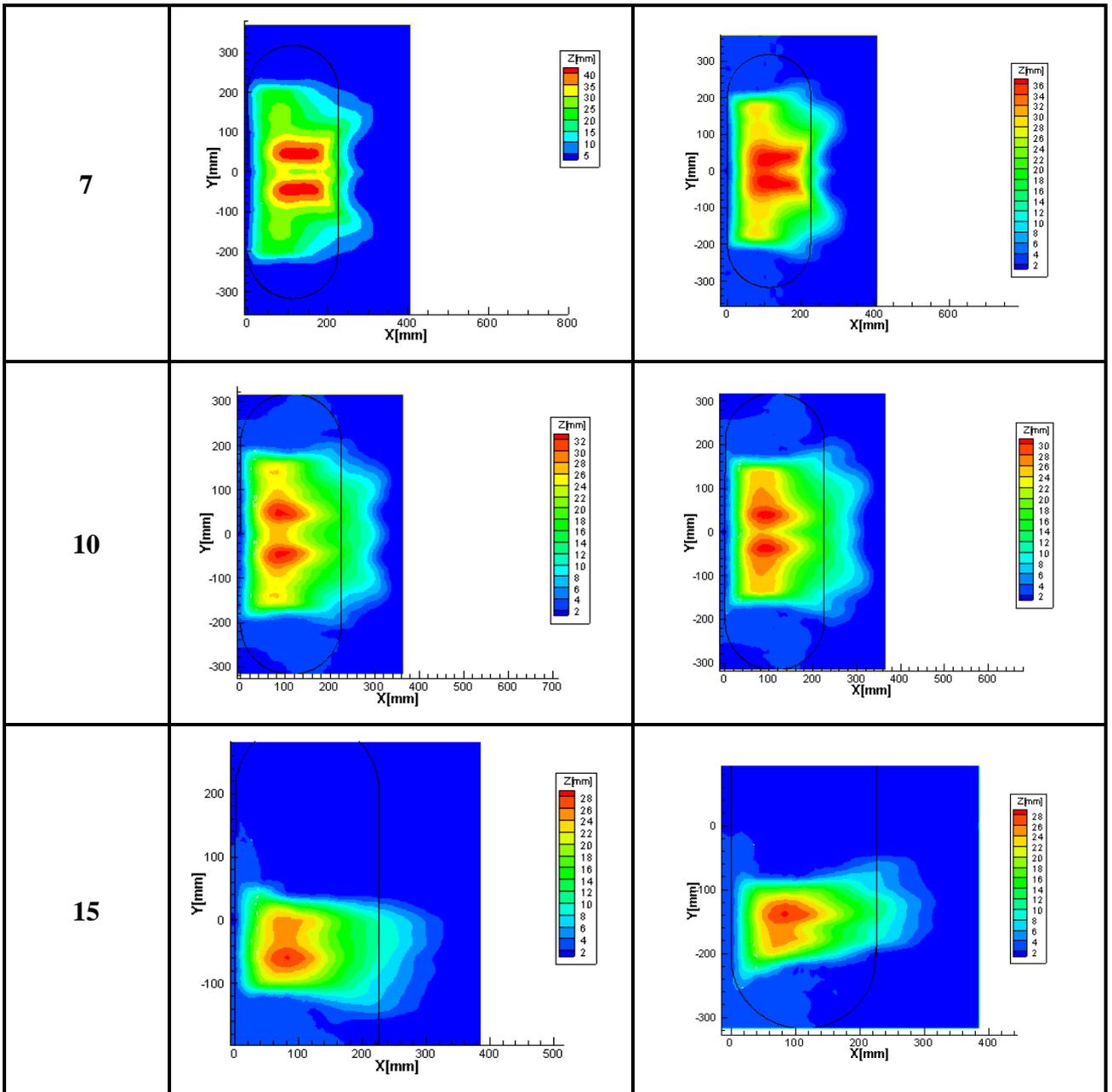
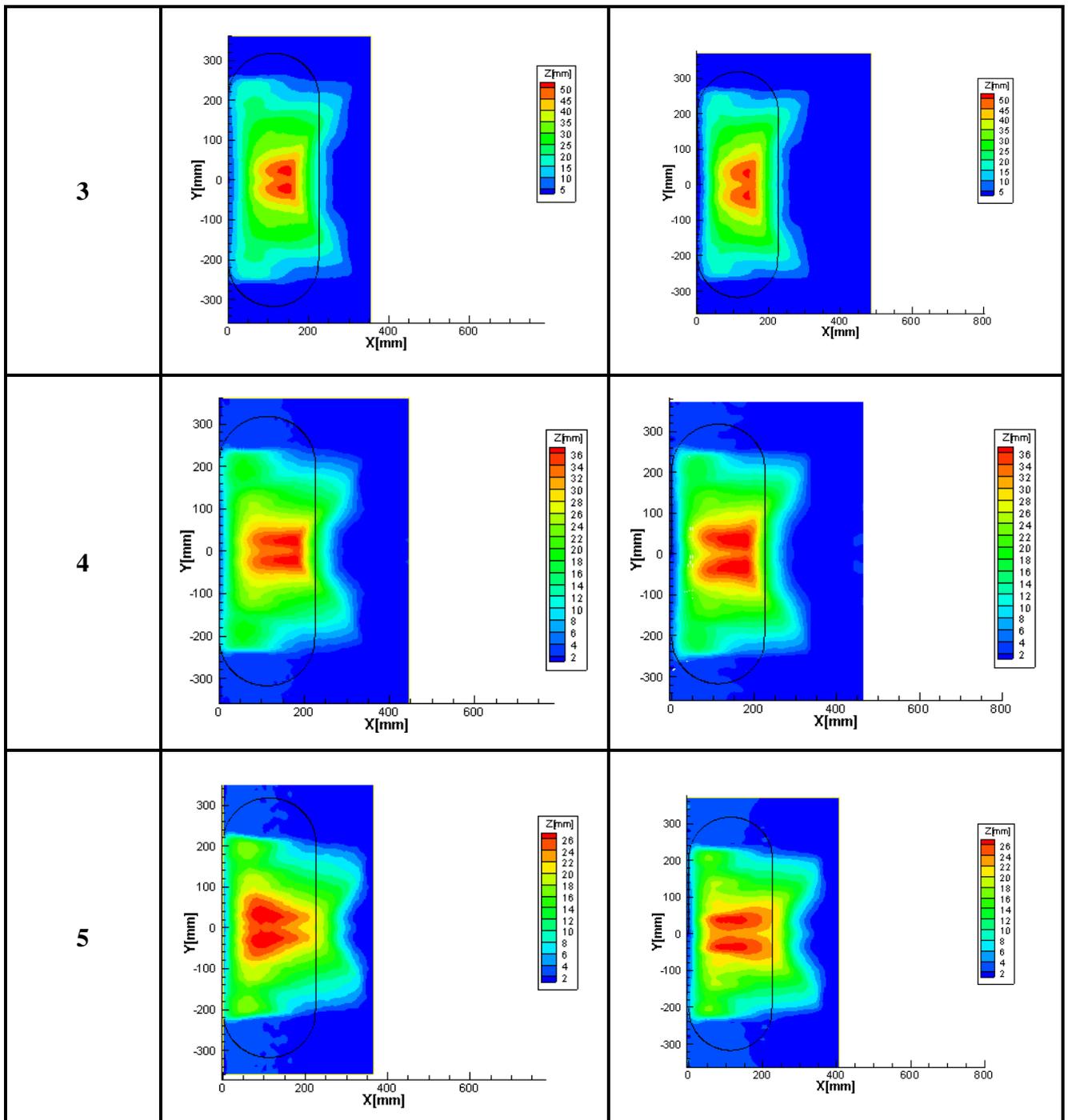


Tabela D.4. Medição 1 e 2 da erosão de meia pilha, $U_0=9.90$ m/s (300 rpm)

Tempo de erosão [min]	Medição 1	Medição 2
0		
1		
2		



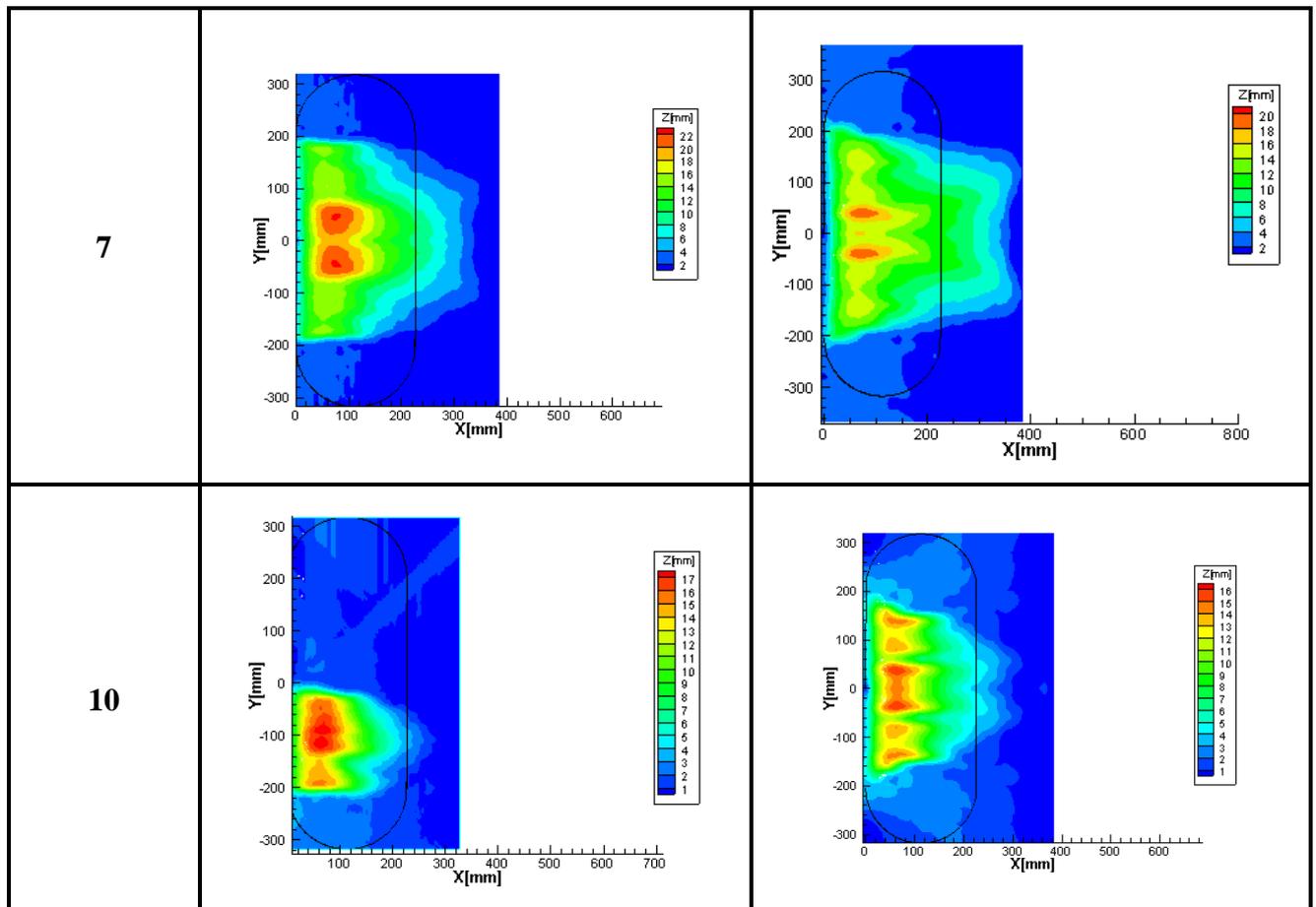
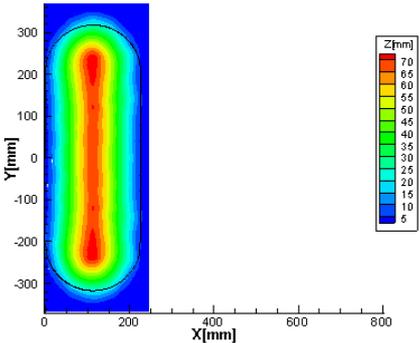
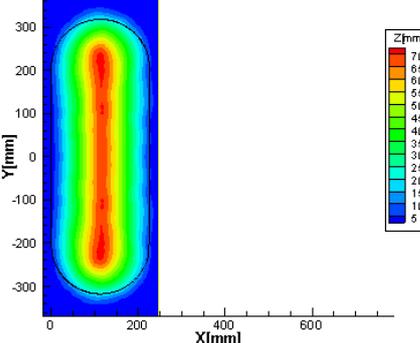
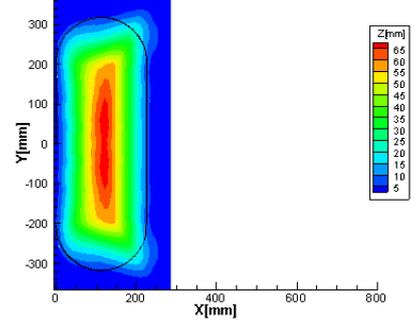
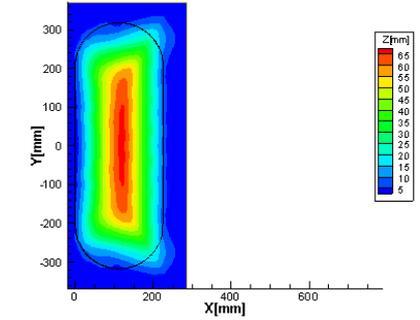
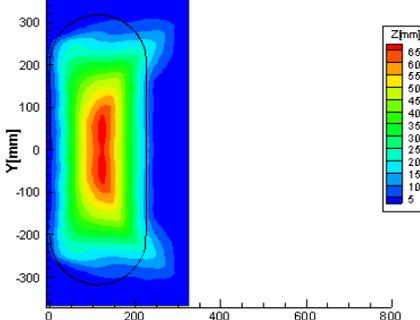
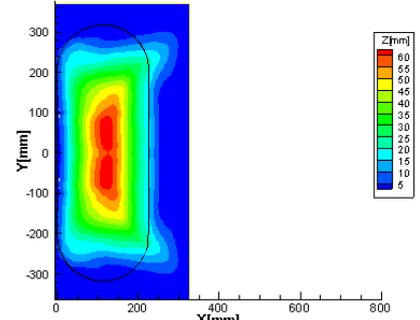
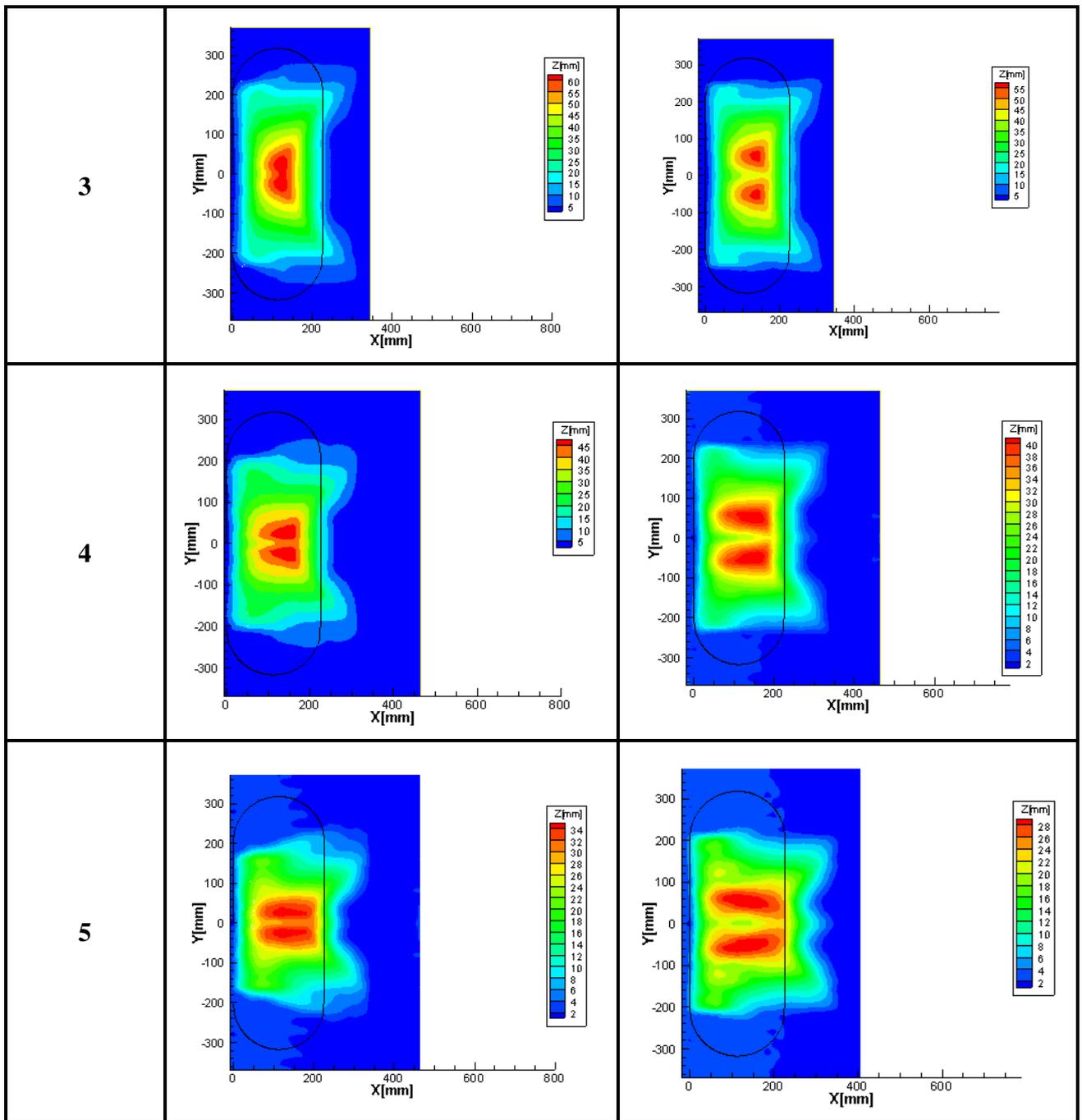
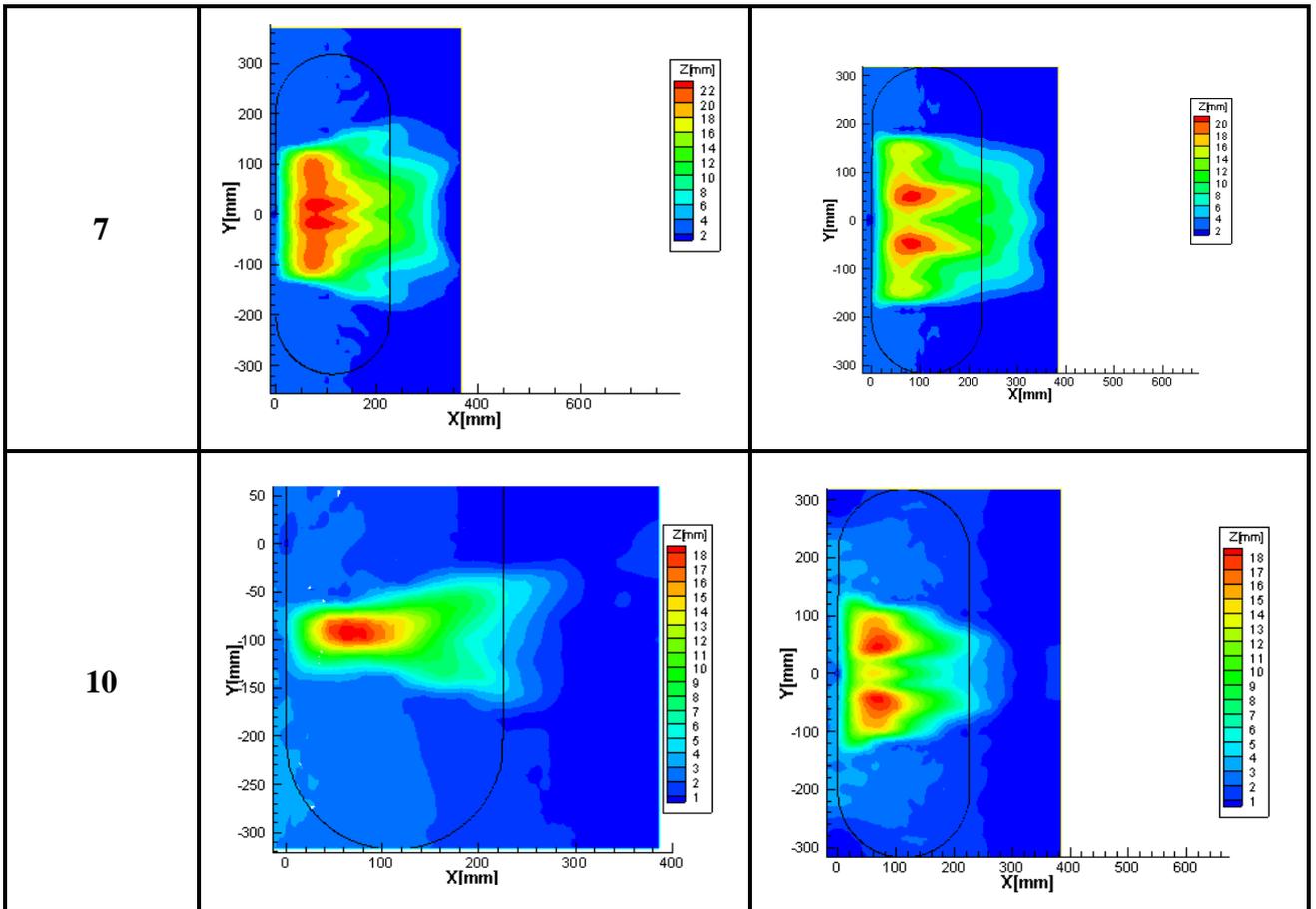


Tabela D.5. Medição 3 e 4 da erosão de meia pilha, $U_0=9.90$ m/s (300 rpm)

Tempo de erosão[min]	Medição 3	Medição 4
0		
1		
2		

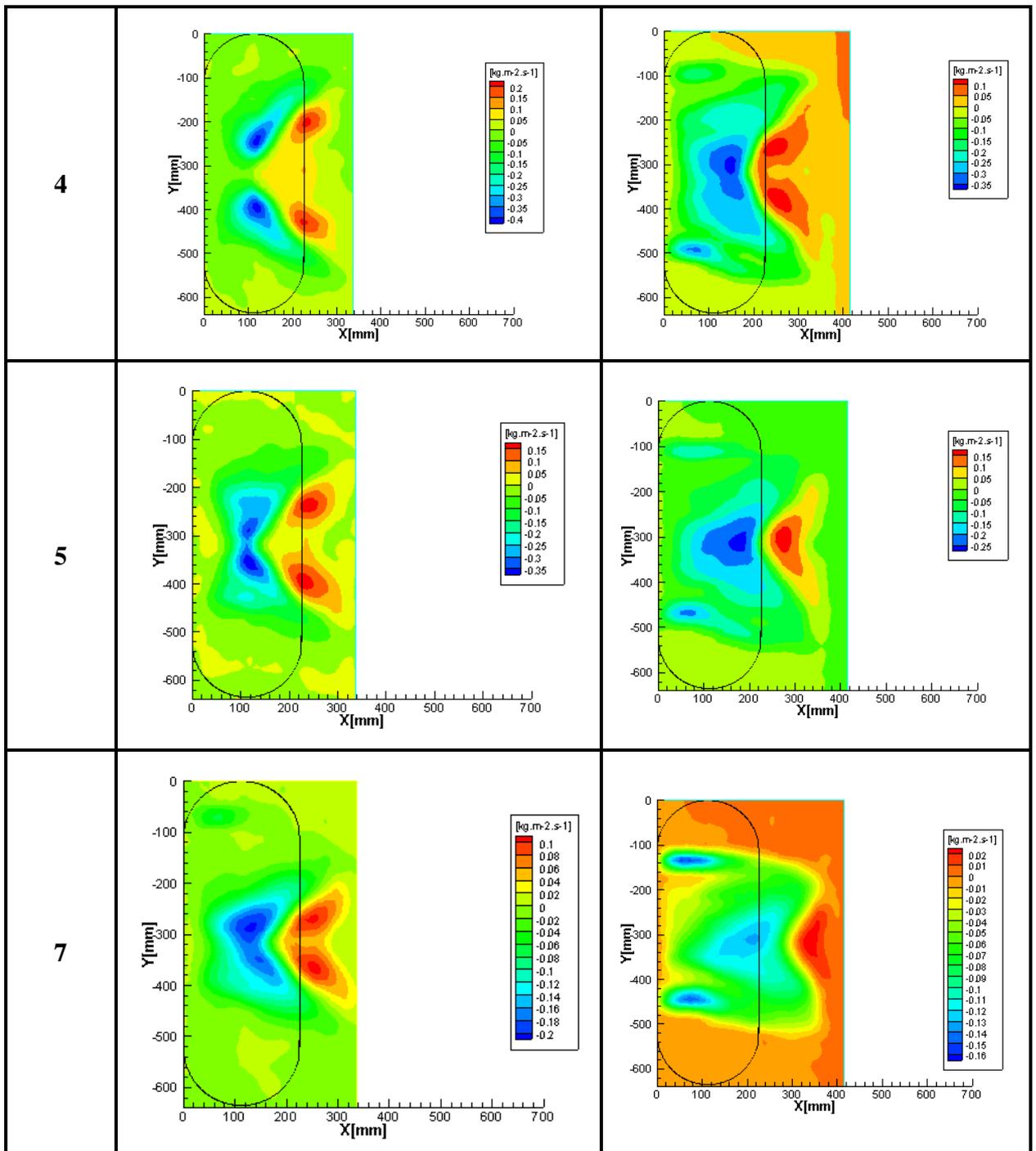




ANEXO E

Tabela E.1. Taxa de erosão da medição da pilha completa.

$\Delta t[\text{min}]$	$U_0 = 9.08 \text{ m/s [275rpm]}$	$U_0 = 9.90 \text{ m/s [300rpm]}$
1		
2		
3		



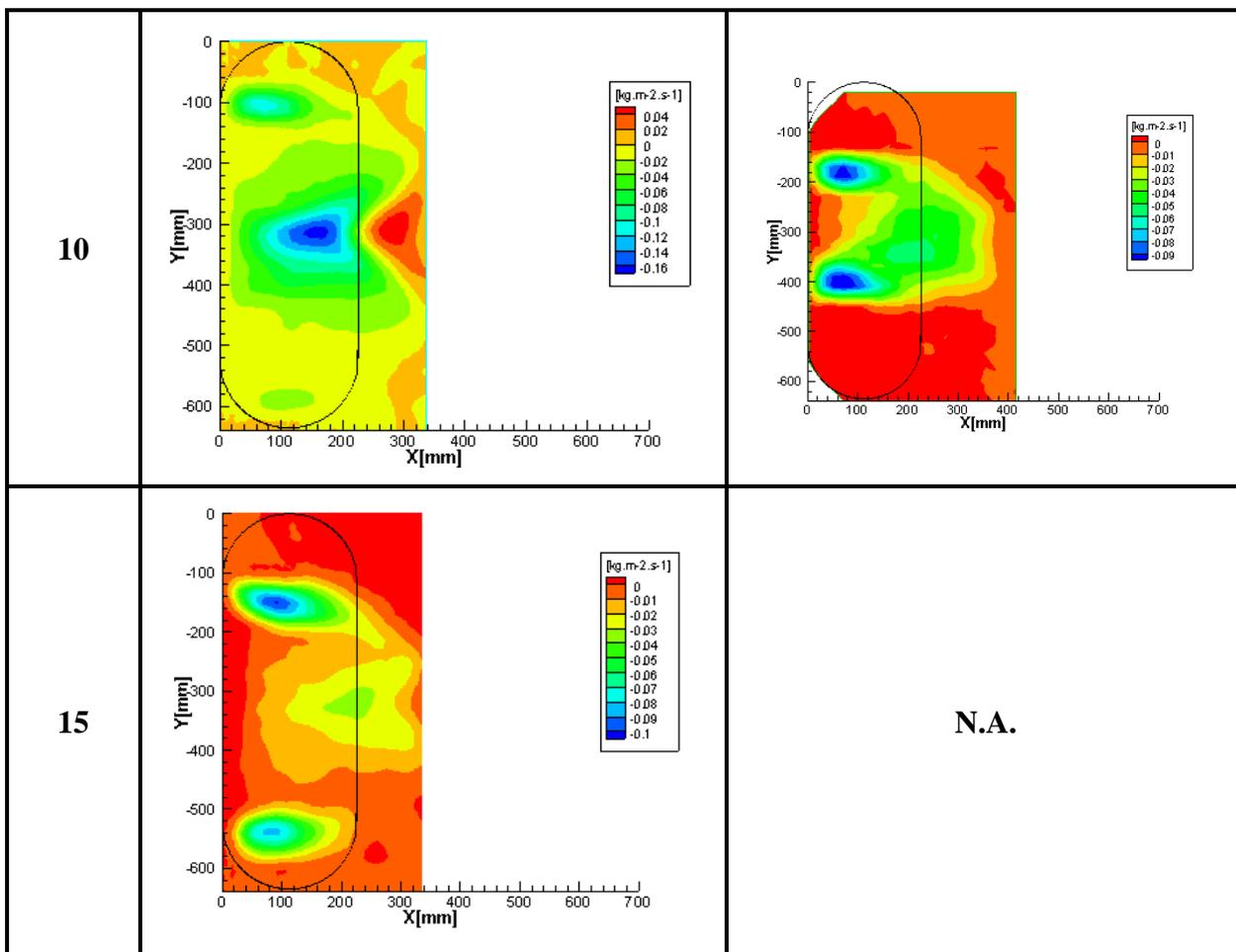
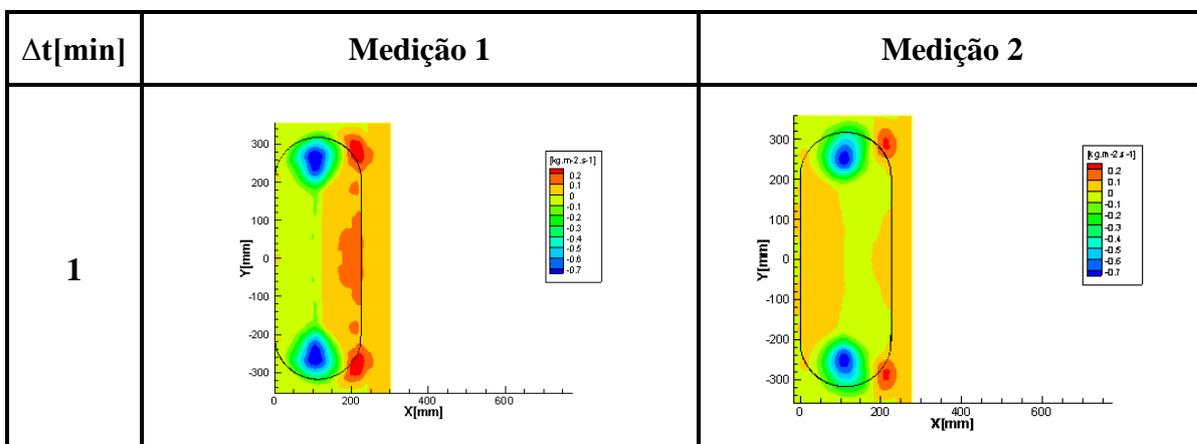
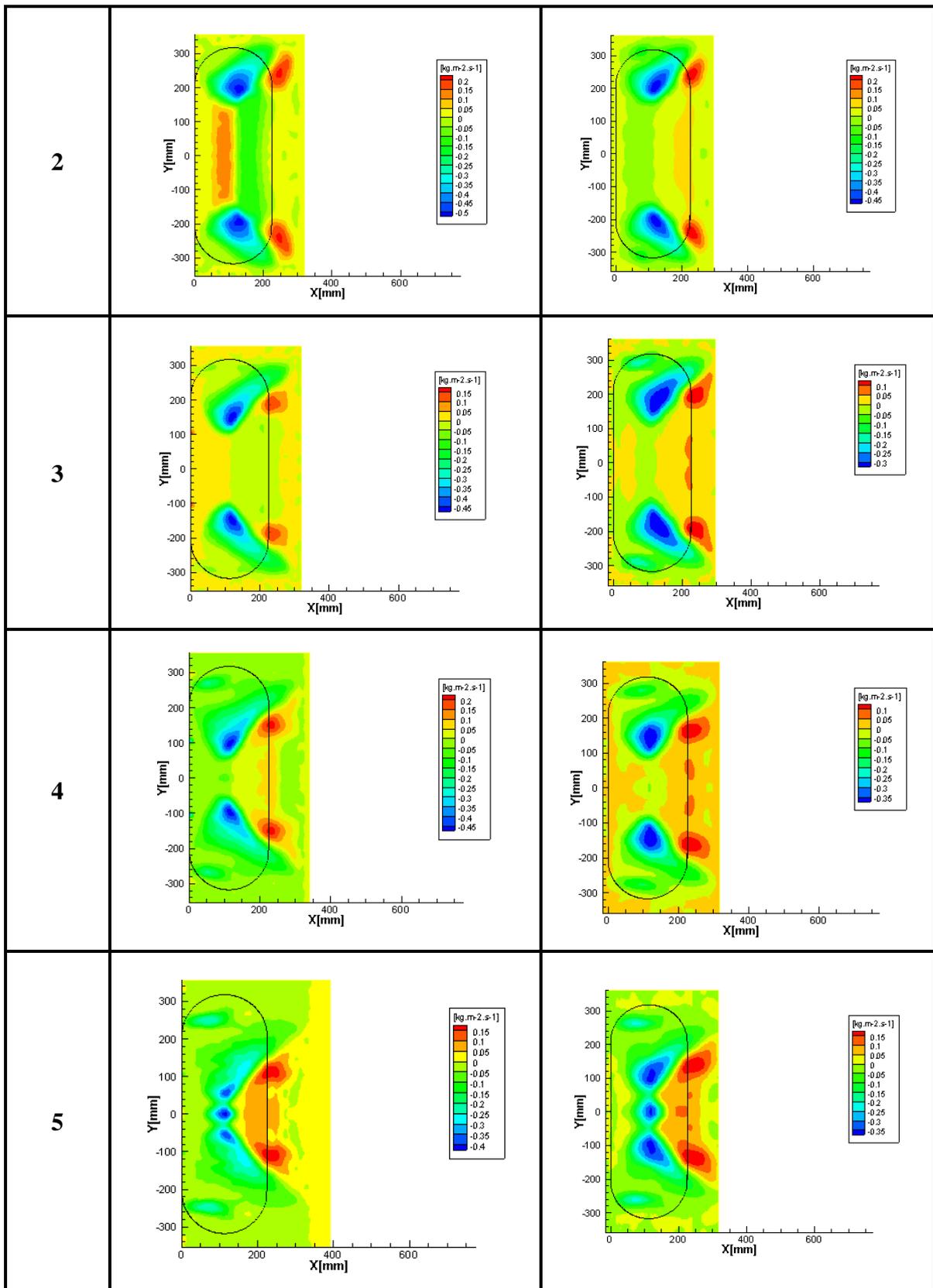


Tabela E.2. Taxa de erosão das medições 1 e 2 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0=9.08$ m/s.





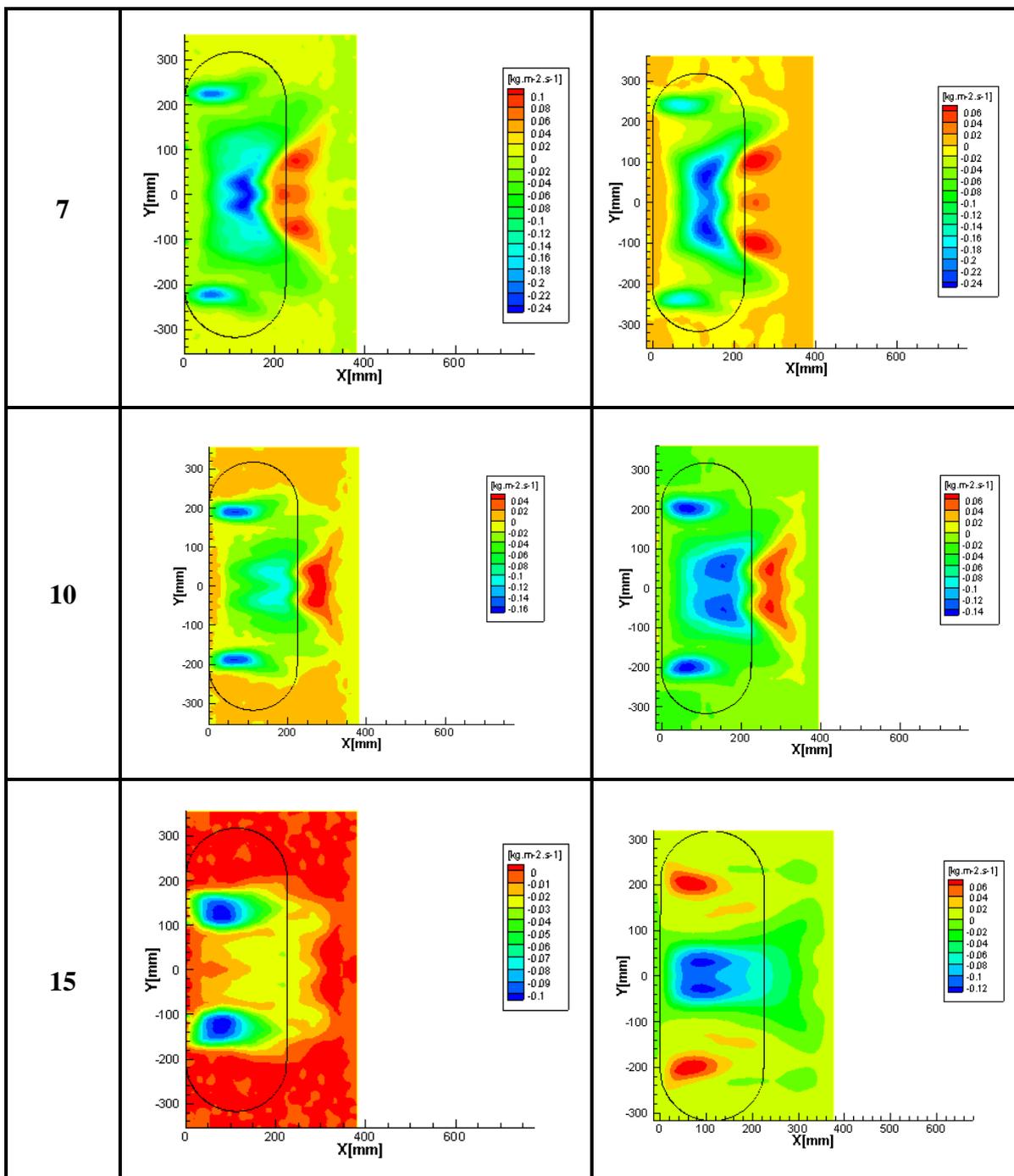
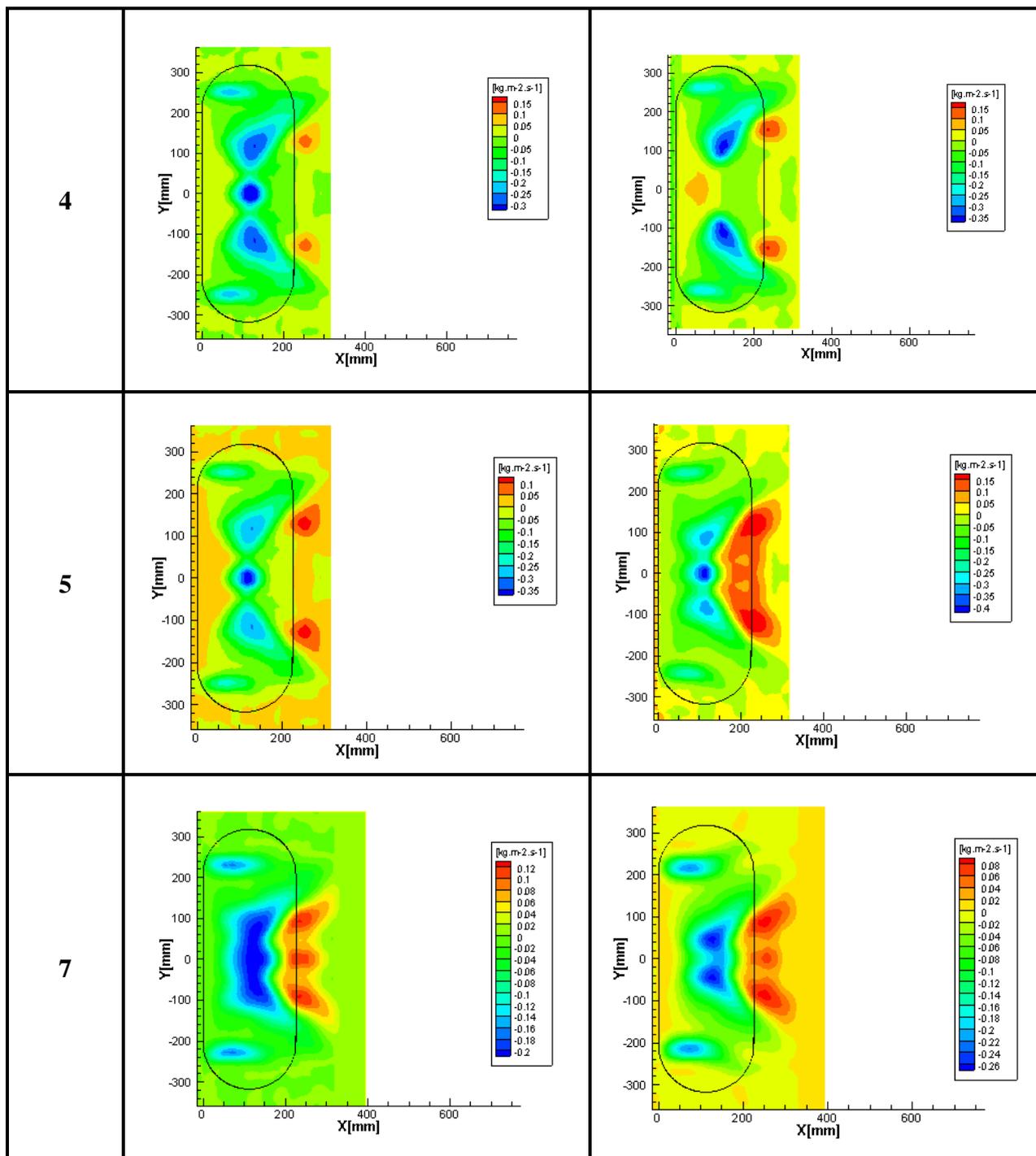


Tabela E.3. Taxa de erosão das medições 3 e 4 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0=9.08$ m/s.

Δt [min]	Medição 3	Medição 4
1		
2		
3		



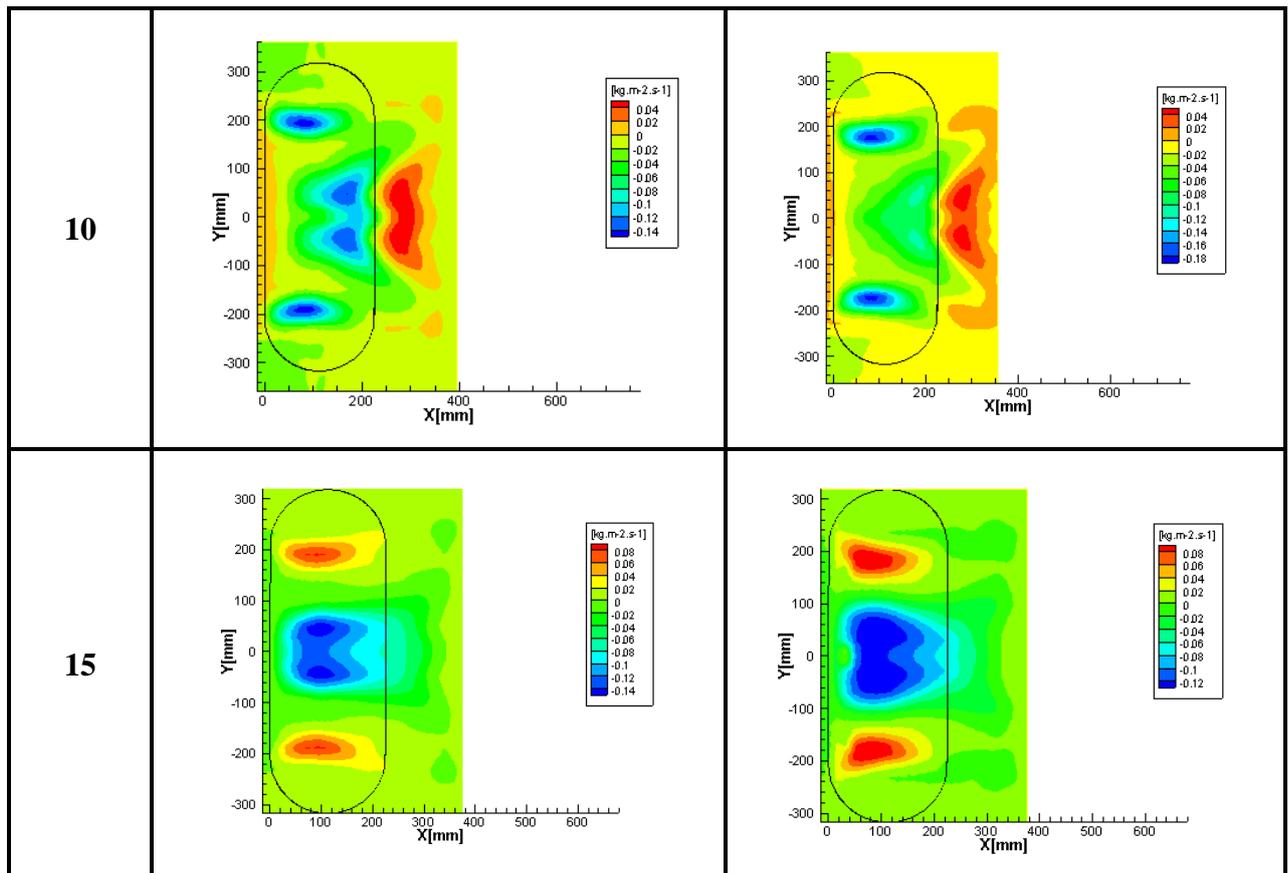


Tabela E.4. Taxa de erosão das medições 1 e 2 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0=9.90$ m/s.

Δt [min]	Medição 1	Medição 2
1		
2		
3		
4		

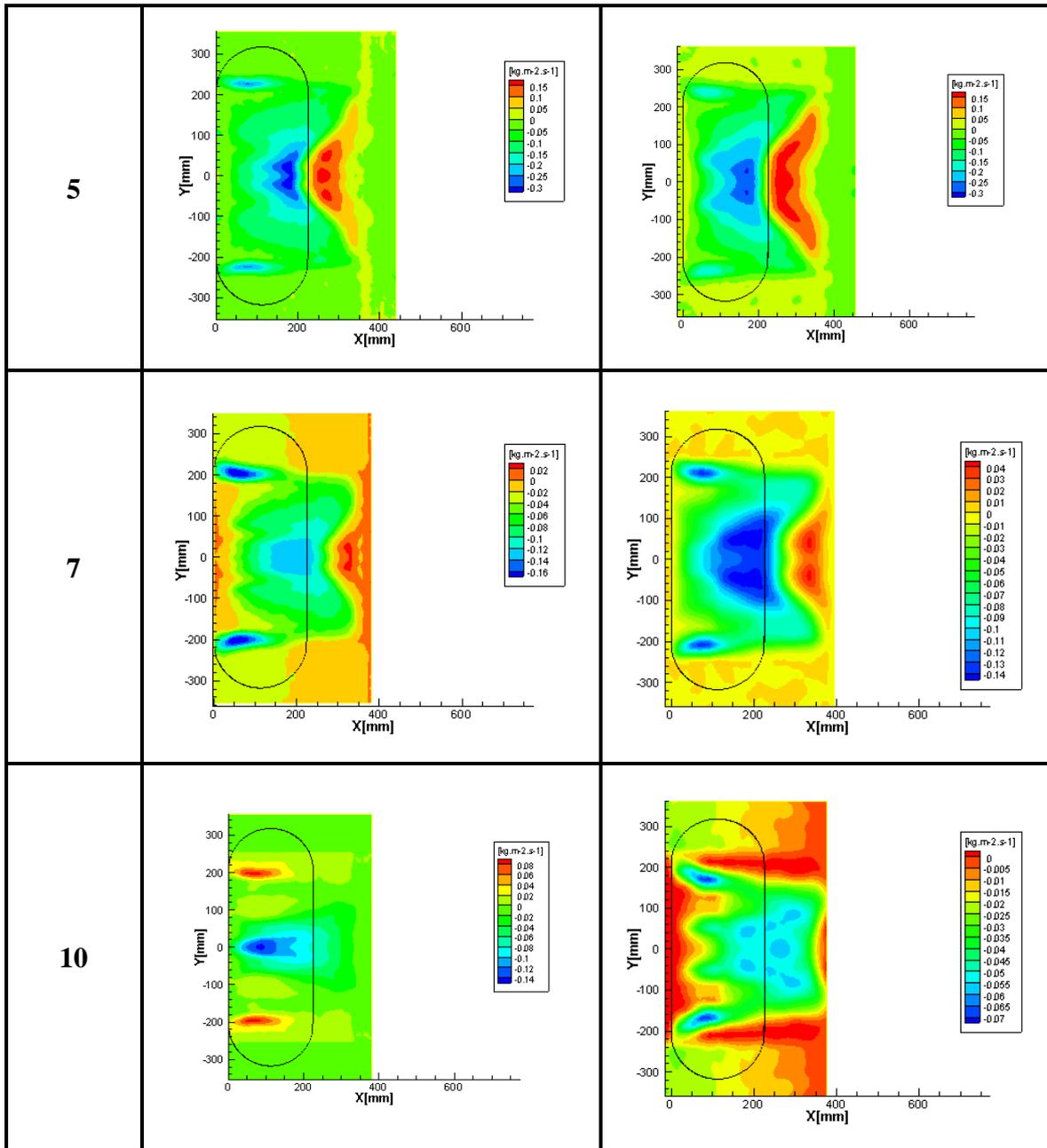
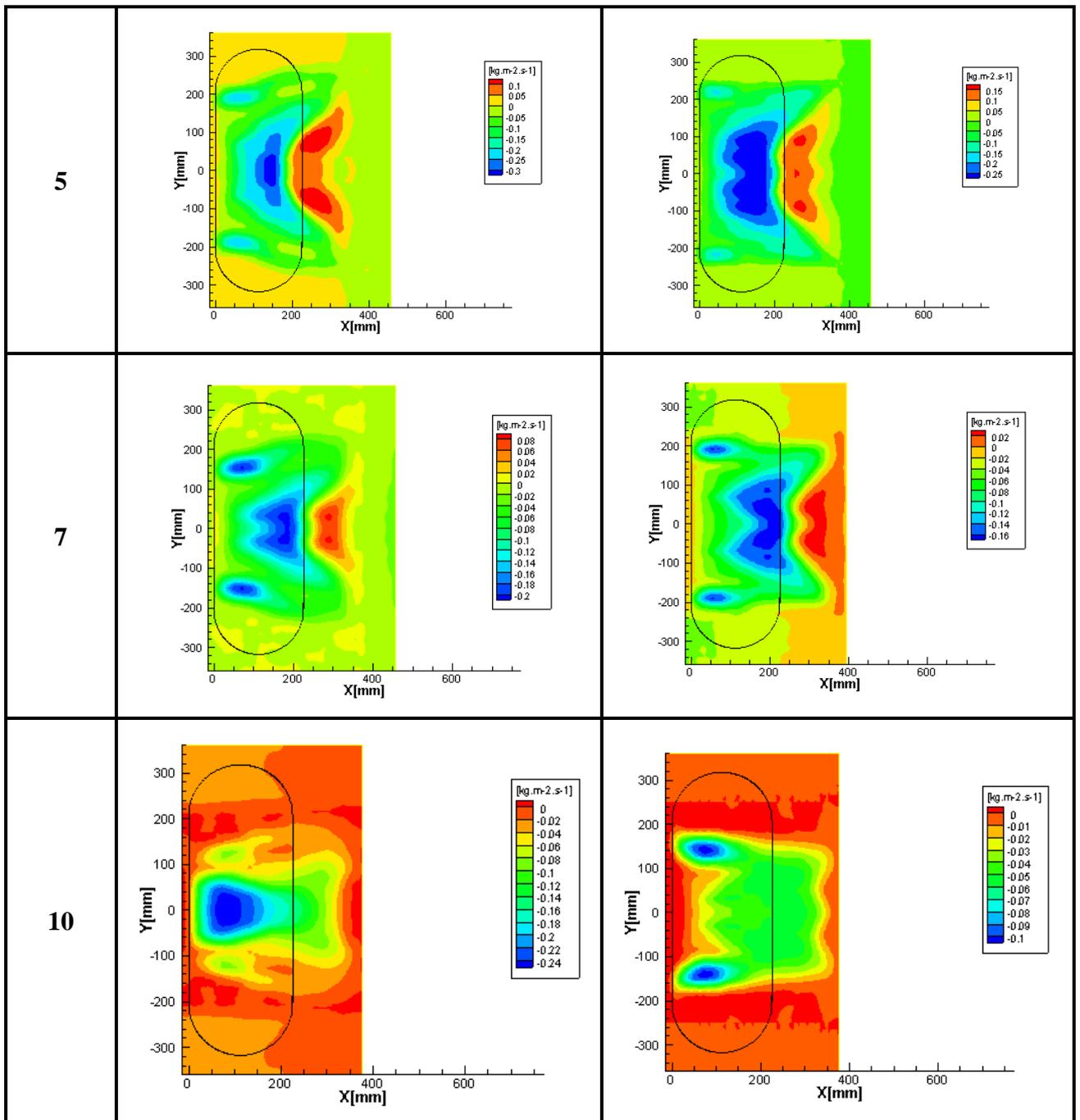


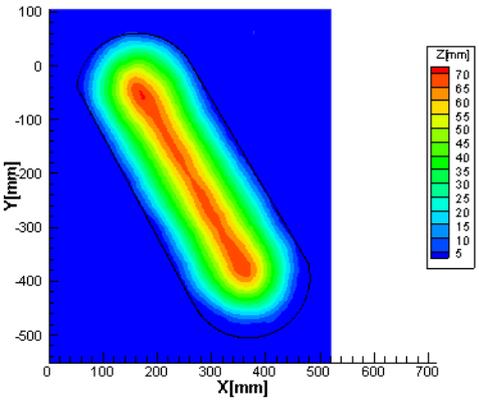
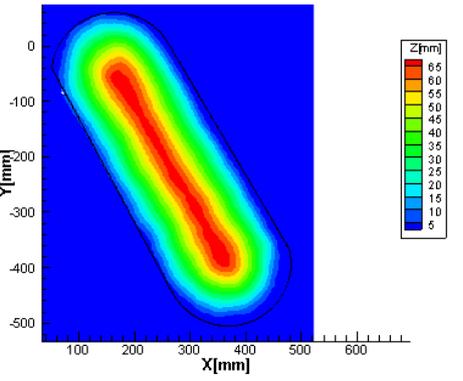
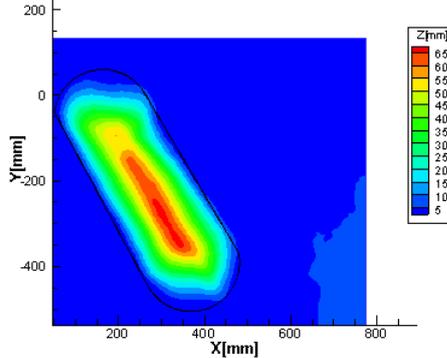
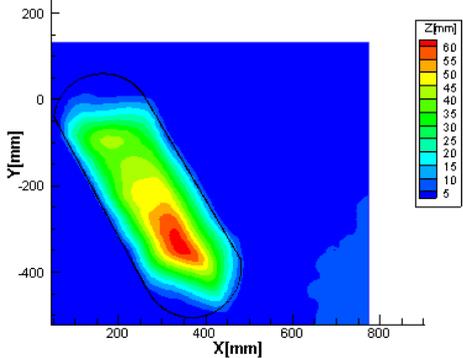
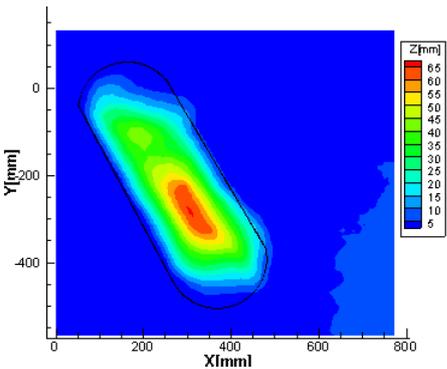
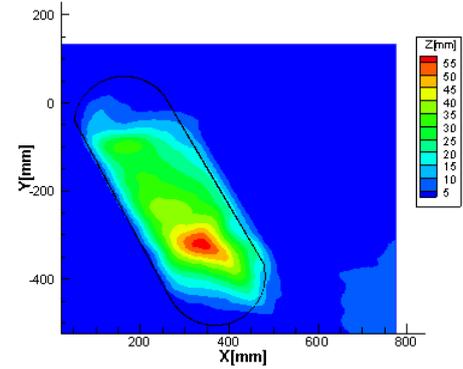
Tabela E.5. Taxa de erosão das medições 3 e 4 referentes à medição da erosão em meia pilha, para $U_0=9.90$ m/s.

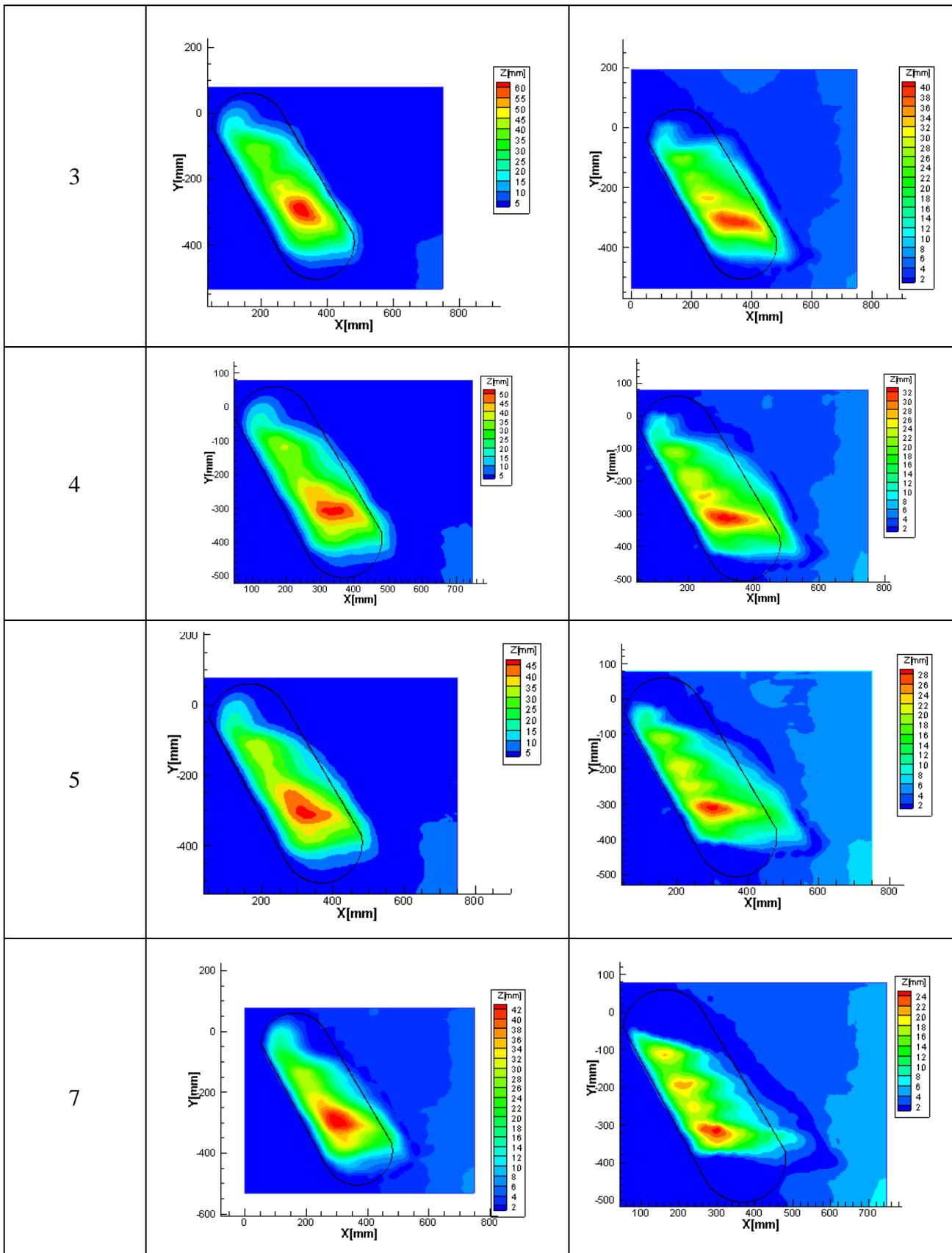
Δt [min]	Medição 3	Medição 4
1		
2		
3		
4		



ANEXO F

Tabela F.1. Medição da pilha completa, orientada 60° com o escoamento incidente.

Tempo de erosão [min]	$U_0 = 9.08 \text{ m/s [275rpm]}$	$U_0 = 9.90 \text{ m/s [300rpm]}$
0		
1		
2		



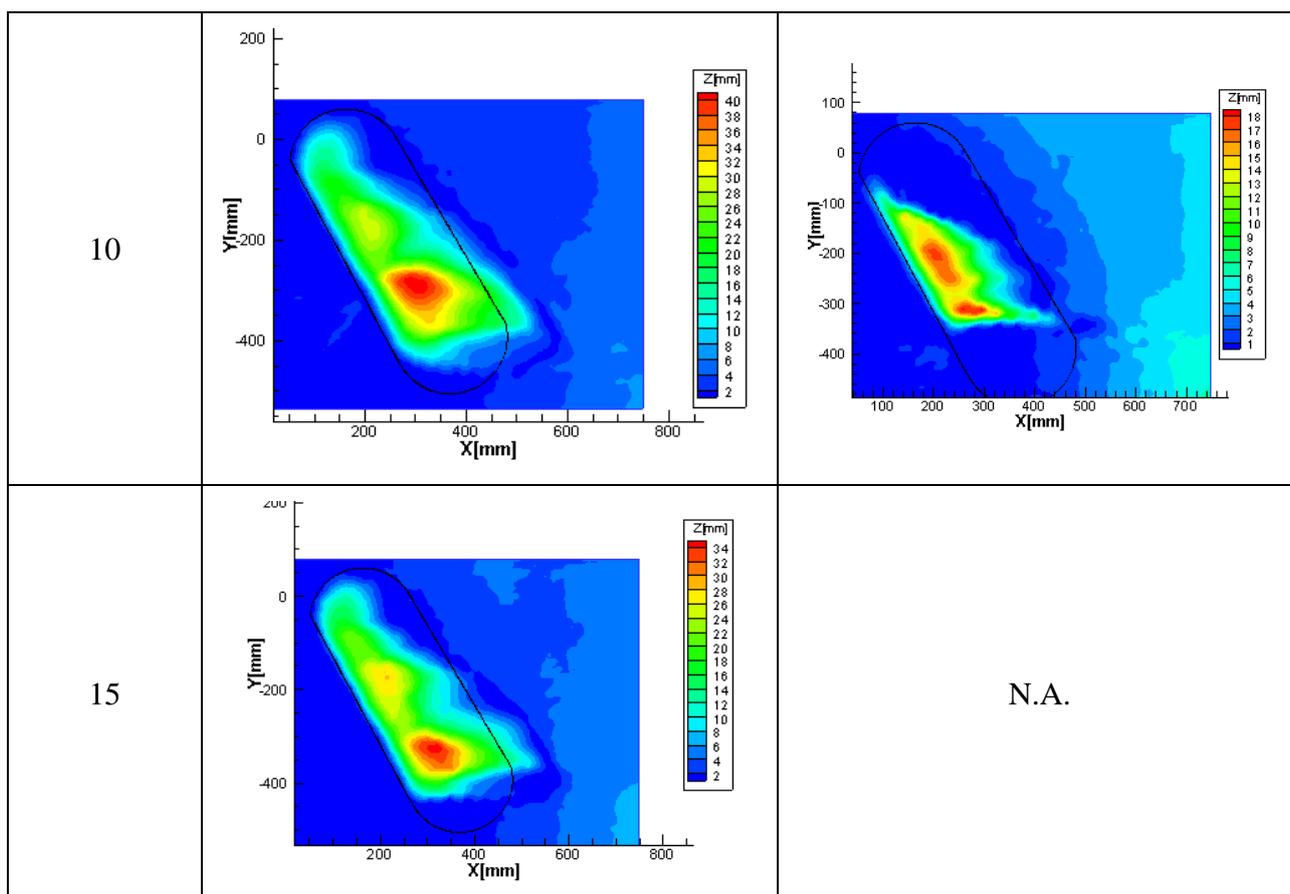
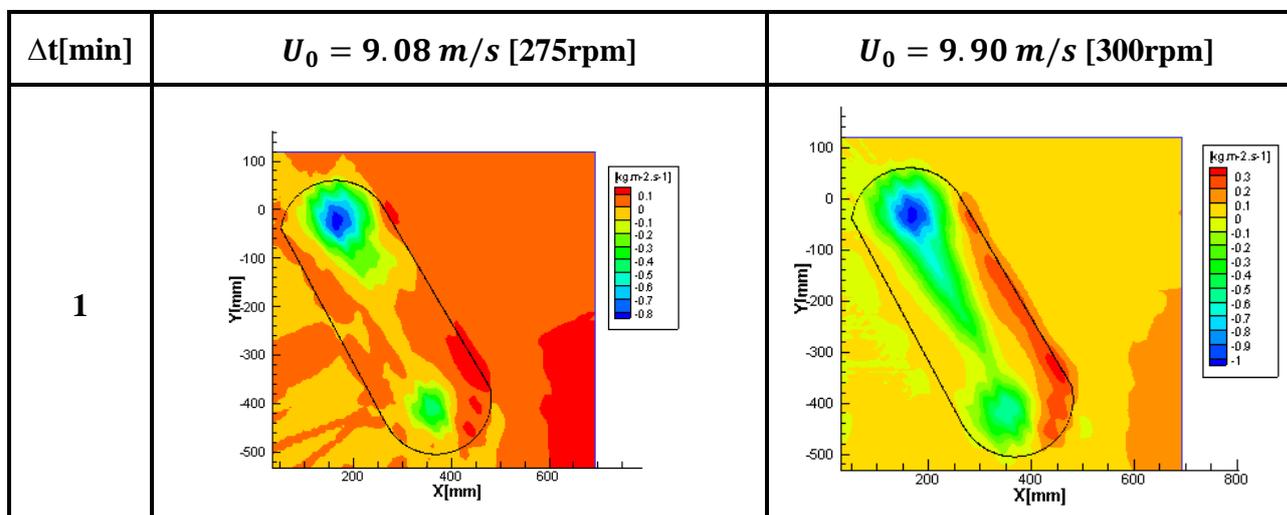
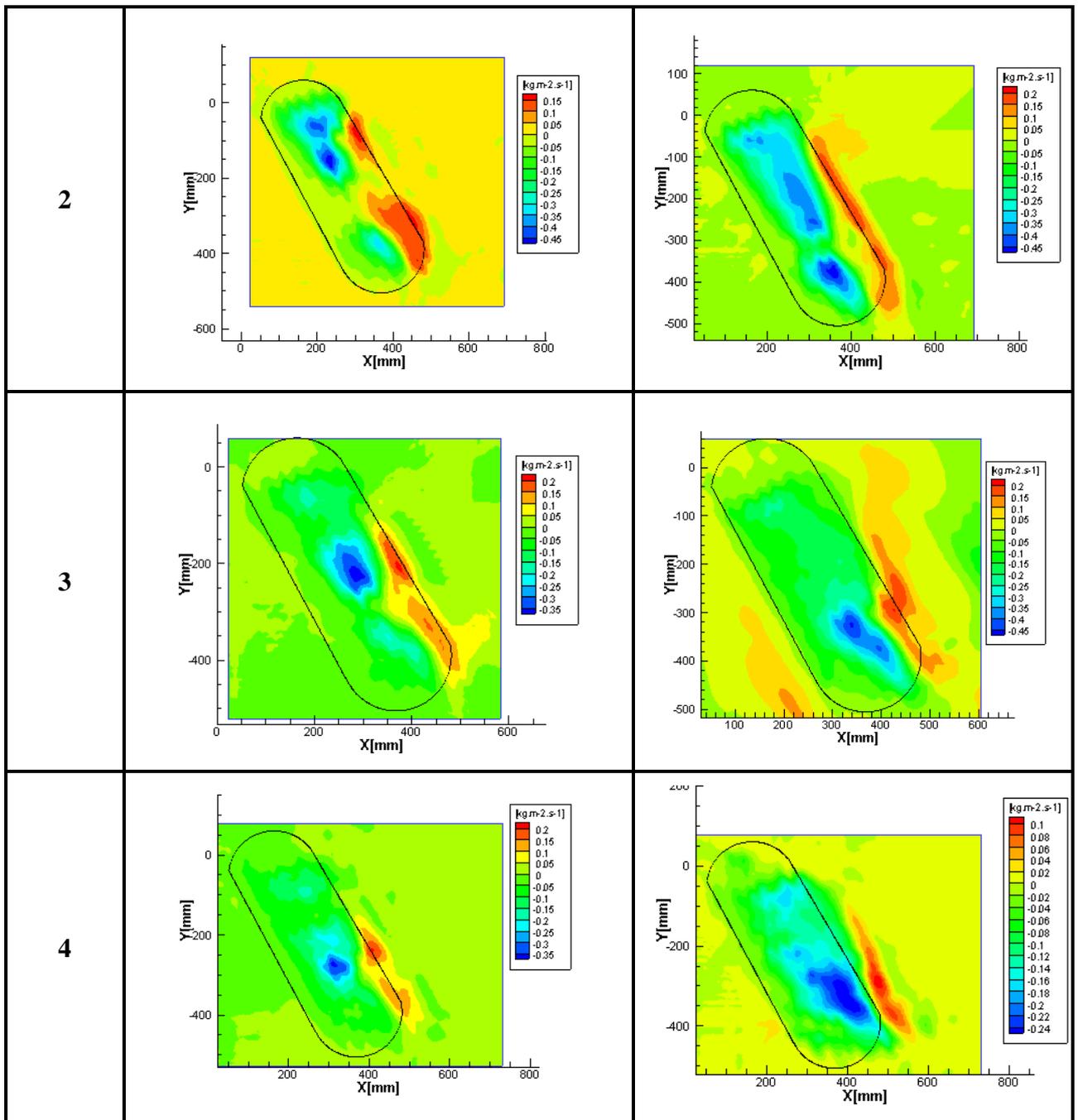
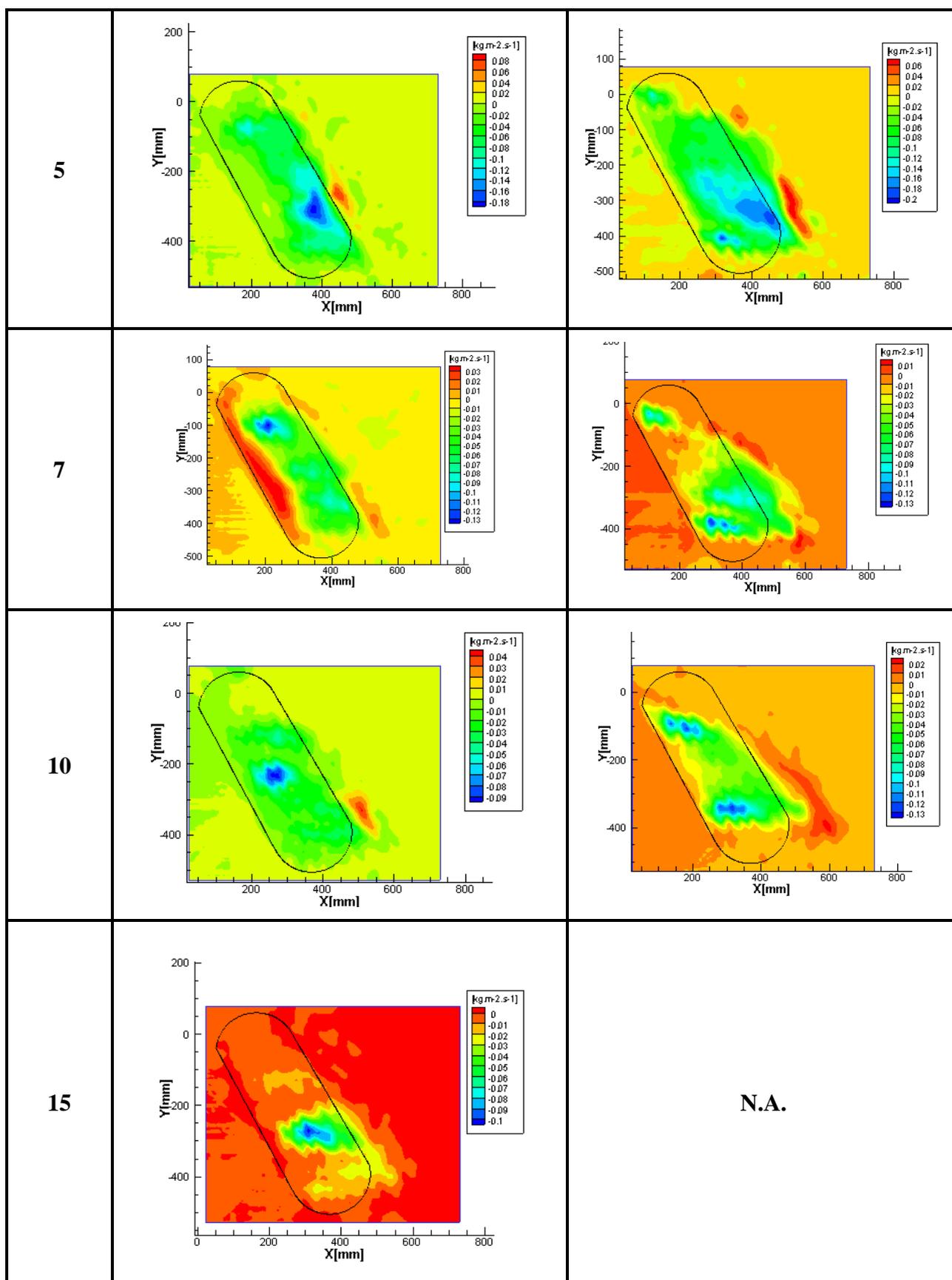


Tabela F.2. Taxa de erosão da pilha orientada 60° com o escoamento incidente.







ANEXO G

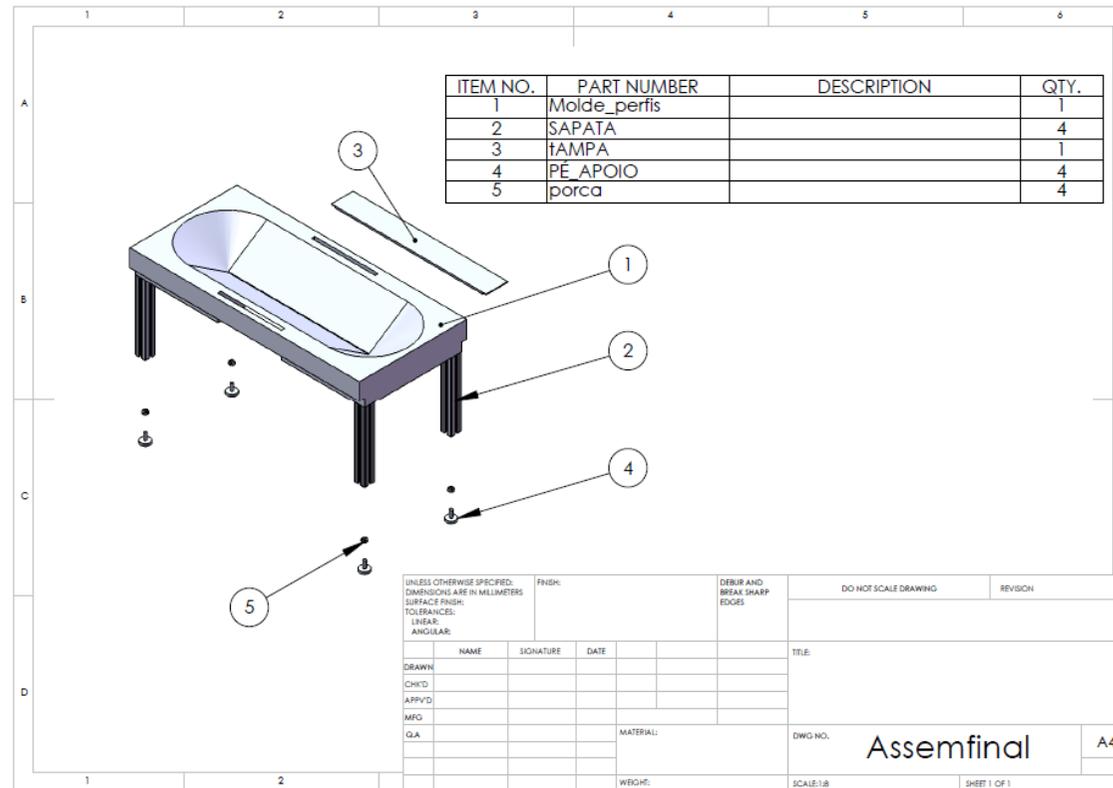


Figura G.1. Vista explodida do dispositivo de construção da pilha em estudo.

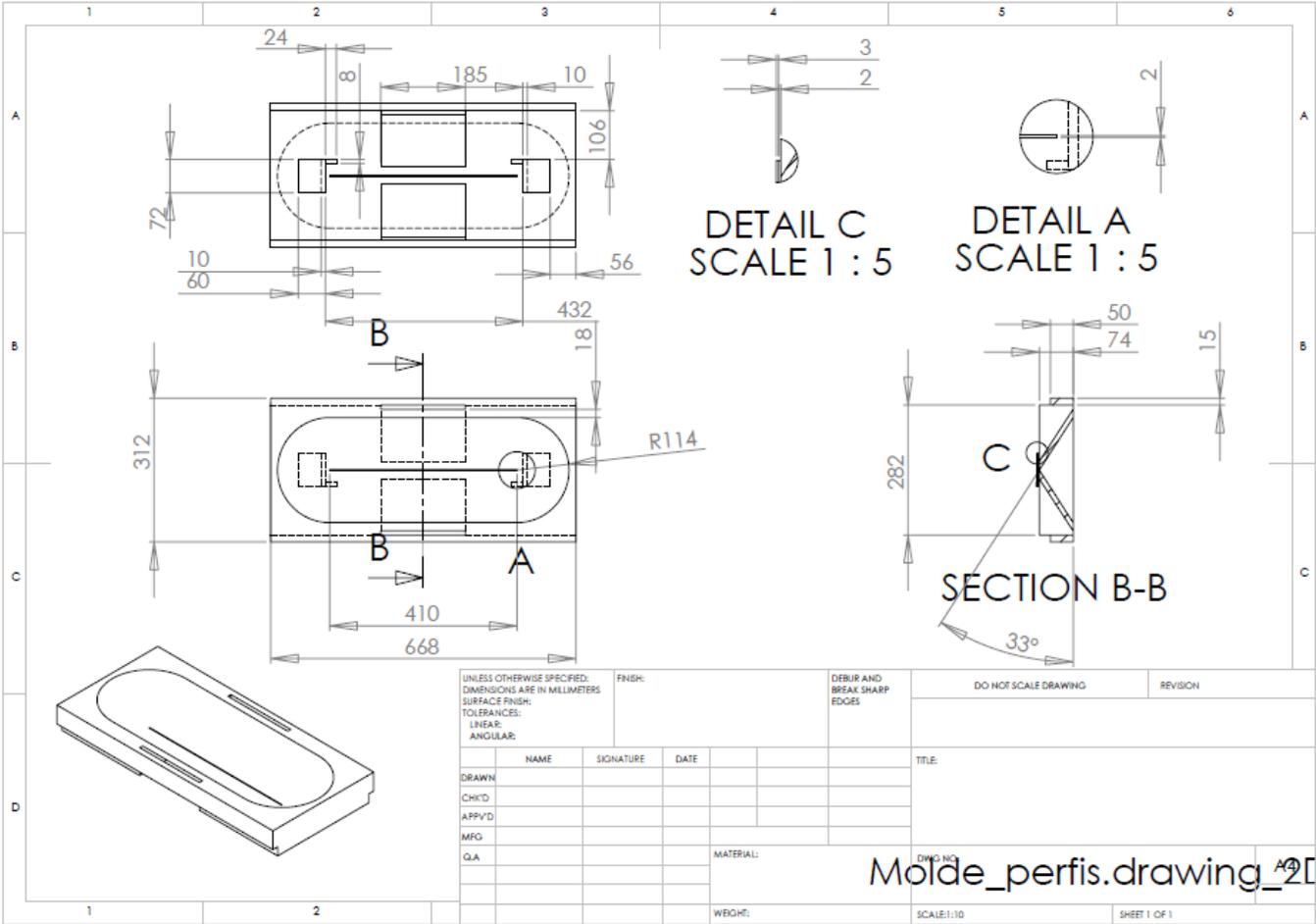


Figura G.2. Dimensões do molde.

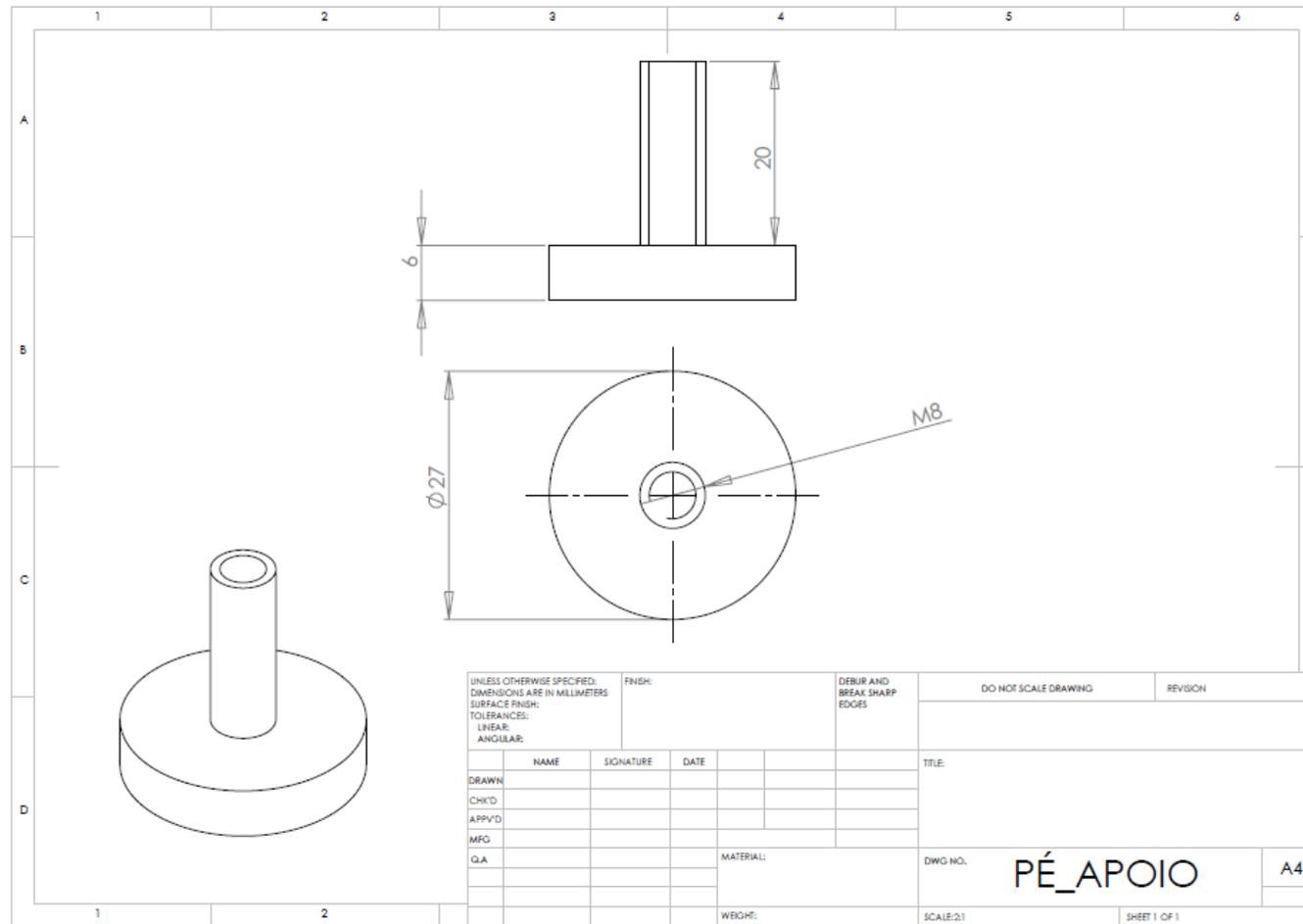


Figura G.3. Dimensões do pé de apoio ao chão.

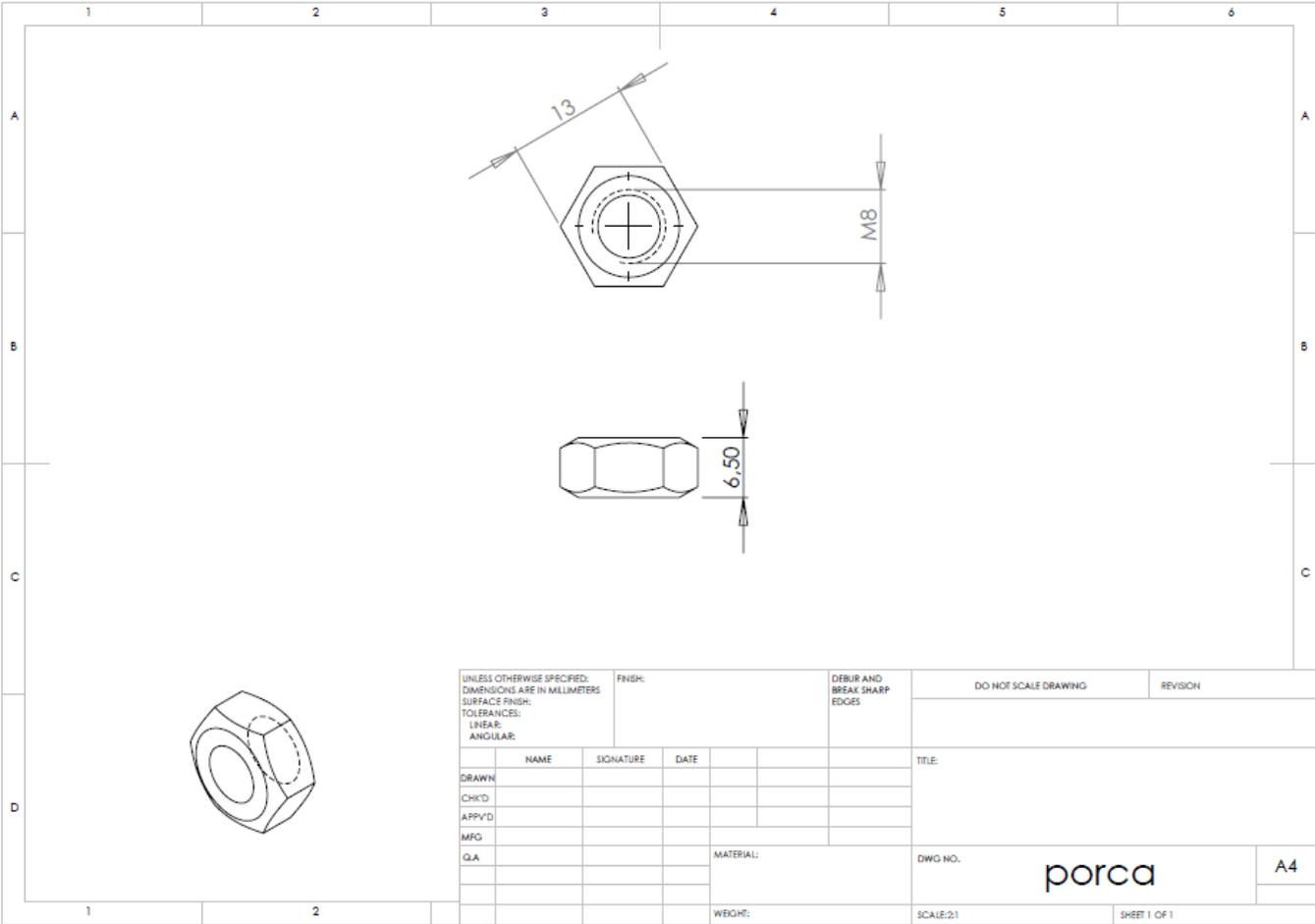


Figura G.4. Dimensões da porca.

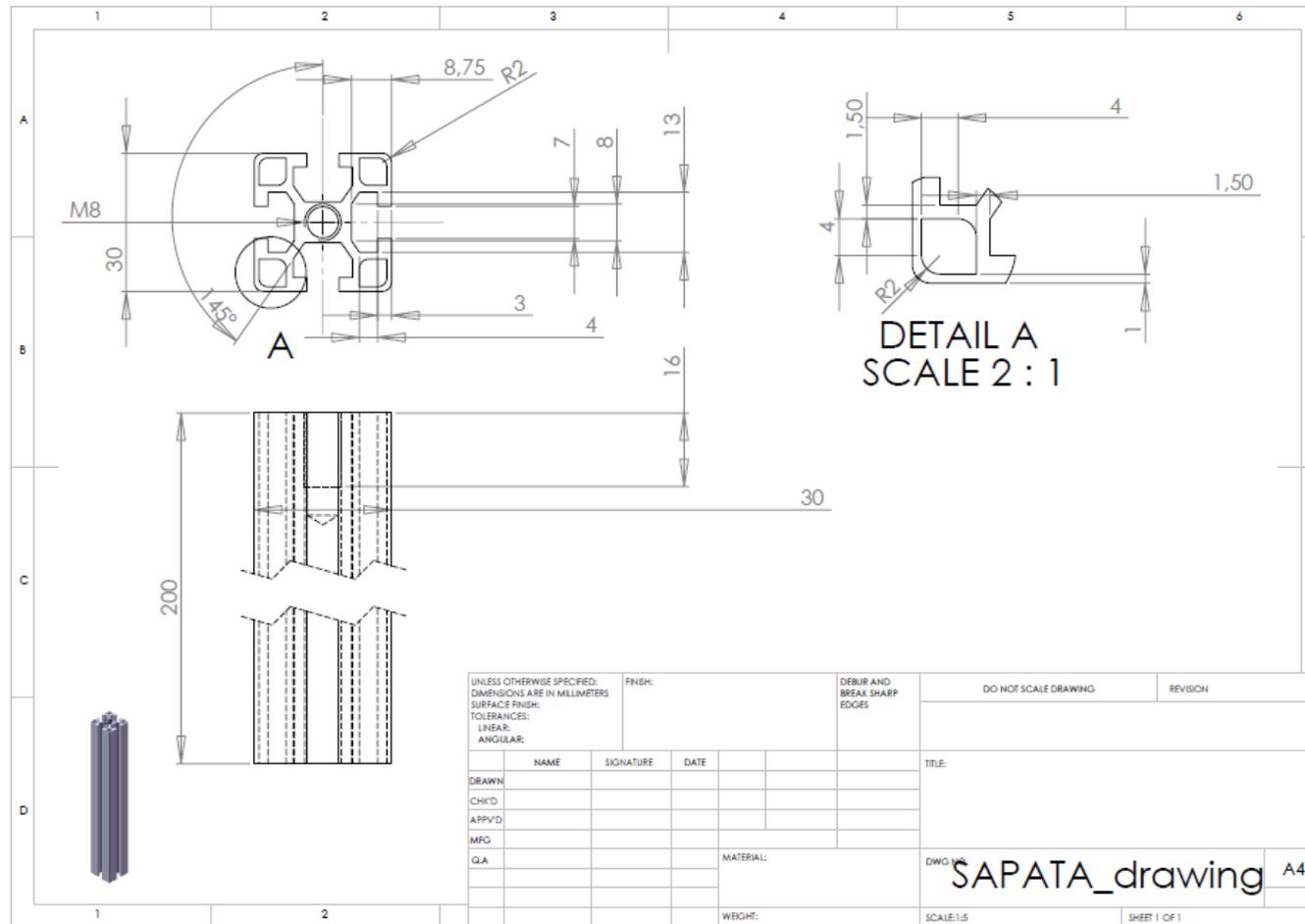


Figura G.5. Dimensões da sapata.

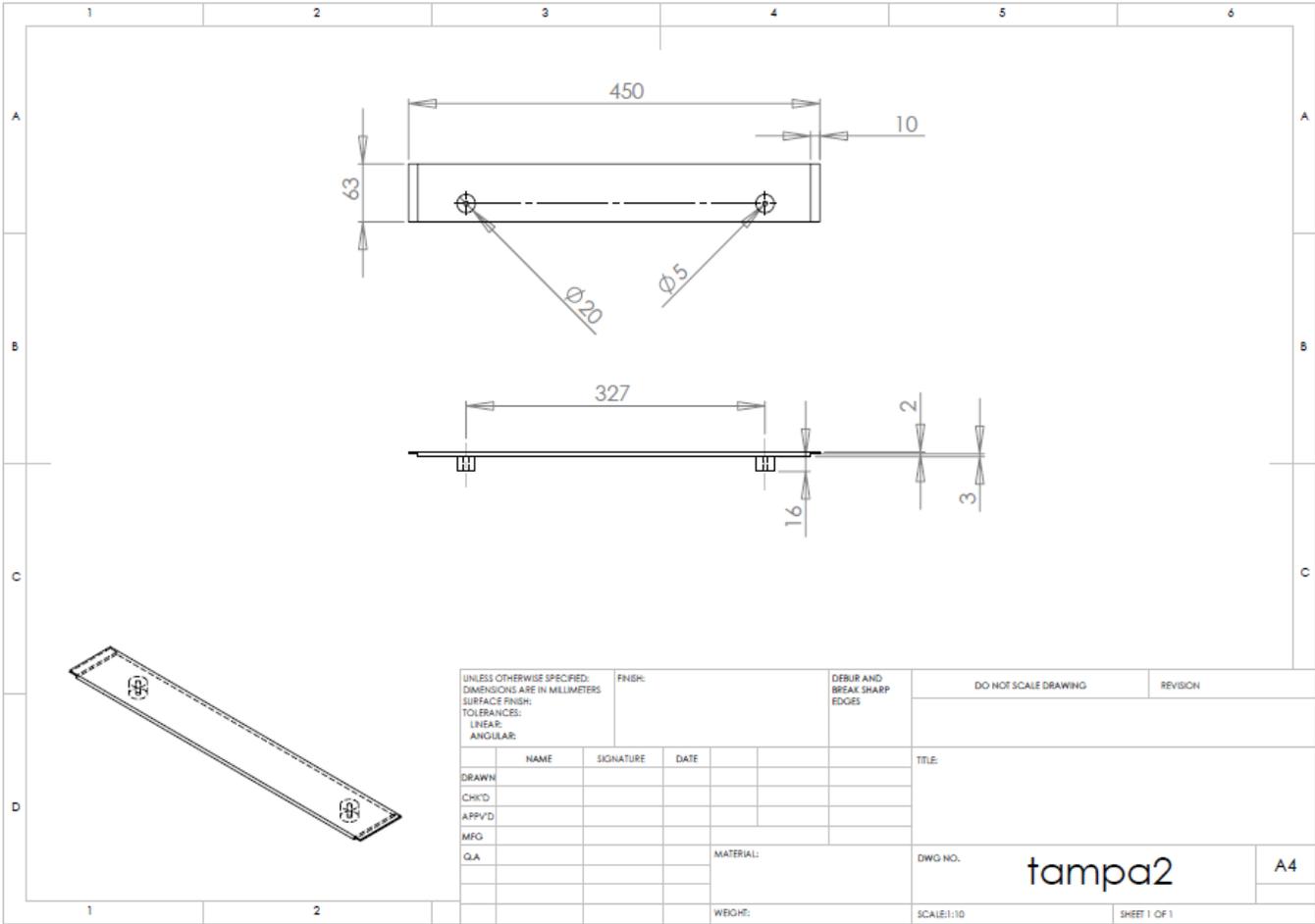


Figura G.6. Dimensões da tampa.