



**UNICA**

UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI CAGLIARI

**DOTTORATO DI RICERCA IN**

Scienze e Tecnologie della Terra e dell'Ambiente

Ciclo XXXVIII

**TITOLO TESI**

DEFINIZIONE DI UNA METODOLOGIA INTEGRATA  
PER LA STIMA DELLE EMISSIONI DI PM DA SUPERFICI  
DI MATERIALI GRANULARI ESPOSTE ALL'EROSIONE EOLICA

Settore scientifico-disciplinare di afferenza

CEAR-02/B

Presentata da	Dott. Ing. Alessio Lai
Supervisore	Prof. Ing. Valentina Dentoni
Co-supervisore/a	Prof. Ing. Battista Grosso

Esame finale anno accademico 2024/2025  
Tesi discussa nella sessione d'esame di febbraio 2026

## Indice:

1	Introduzione .....	1
2	Inquadramento Teorico .....	4
2.1	Particolato Aerodisperso (PM).....	4
2.1.1	Proprietà Fisiche .....	5
2.1.2	Proprietà Chimiche .....	6
2.1.3	Standard di Qualità dell’Aria.....	7
2.1.4	Emissioni di PM .....	11
2.1.4.1	Sorgenti di Emissione.....	11
2.1.4.2	Emissioni da Sorgenti Diffuse.....	12
2.2	Industrial Wind Erosion .....	15
2.2.1	Gli Stockpiles .....	15
2.2.1.1	Erosione Eolica delle Superfici Granulari.....	17
2.2.1.2	Velocità d’Attrito Limite.....	18
2.2.1.3	Meccanismi di Movimento.....	22
2.2.2	Parametri Influenti sul Fenomeno Erosivo.....	25
2.2.2.1	Parametri Influenti sull’Innesco della Saltazione.....	26
2.2.2.2	Parametri Influenti sul Flusso di Saltazione.....	28
2.2.2.3	Parametri Influenti sul Flusso Verticale di Polveri .....	30
2.2.3	Quantificazione delle Emissioni di Particolato .....	33
2.2.3.1	Metodologia U.S. EPA .....	34
2.2.3.2	Metodologie Alternative.....	37
2.2.3.3	Metodologia Integrata.....	39
2.3	Apparecchiature Sperimentali per la Stima delle Emissioni di Polveri .....	41
2.3.1	Gallerie del Vento Ambientali.....	41

2.3.2	Pi-SWERL .....	43
3	Materiali e Metodi.....	45
3.1	Strumentazioni e Attrezzature .....	45
3.1.1	Anemometro a Tubo di Pitot .....	45
3.1.2	DustTrak .....	46
3.1.3	Galleria del Vento DICAAR .....	47
3.1.3.1	Messa a Punto della Galleria .....	50
3.1.4	PI-SWERL.....	52
3.1.5	Modello Fisico-Matematico per la Stima dell'Emissione di PM da Superfici Granulari .....	53
3.2	Campioni Granulari e Caratterizzazione Tal Quale .....	57
3.3	Metodologie.....	59
3.3.1	Analisi della Velocità del Vento e Intensità di Turbolenza nella Galleria del Vento DICAAR.....	59
3.3.2	Modellazione CFD della Galleria del Vento DICAAR.....	61
3.3.3	Determinazione della Velocità d'Attrito Limite.....	63
3.3.3.1	Procedura EPA Rivisitata .....	64
3.3.3.2	Galleria del Vento DICAAR .....	64
3.3.3.3	PI-SWERL.....	66
3.3.4	Calcolo delle Emissioni di PM.....	68
3.3.4.1	Galleria del Vento DICAAR .....	69
3.3.4.2	Codice Numerico .....	71
4	Risultati della Sperimentazione .....	73
4.1	Caratterizzazioni dei Campioni Tal Quale .....	73
4.2	Analisi della Velocità del Vento e Intensità di Turbolenza nella Galleria del Vento DICAAR .....	76
4.2.1	Campi di Velocità del Vento .....	76

4.2.2	Campi di Intensità di Turbolenza .....	80
4.2.3	Validazione del Profilo Verticale dello SLA.....	81
4.2.4	Determinazione della Velocità d'Attrito .....	85
4.3	Analisi della Velocità del Vento nel Modello CFD della Galleria del Vento DICAAR .....	89
4.3.1	Campi di Velocità del Vento .....	89
4.3.2	Profilo Verticale dello SLA.....	91
4.4	Determinazione della Velocità d'Attrito Limite dei Materiali .....	94
4.4.1	Procedura EPA Rivisitata .....	94
4.4.2	Galleria del Vento DICAAR .....	96
4.4.3	PI-SWERL.....	99
4.5	Emissione dei Materiali Tal Quale.....	100
4.5.1	Profili Verticali di Concentrazione.....	100
4.5.2	Emissioni .....	109
4.6	Emissione dei Materiali Asciutti .....	112
4.6.1	Galleria del Vento DICAAR .....	112
4.6.1.1	Profili Verticali di Concentrazione.....	112
4.6.1.2	Andamento delle Concentrazioni nel Tempo .....	115
4.6.1.3	Emissioni .....	124
4.6.2	Codice Numerico.....	127
5	Discussione .....	135
5.1	Risultati Sperimentali.....	135
5.1.1	Caratterizzazione dei Materiali Granulari .....	135
5.1.2	Velocità del Vento nella Galleria del Vento DICAAR.....	136
5.1.2.1	Campi di Velocità del Vento .....	136
5.1.2.2	Campi di Intensità di Turbolenza .....	137

5.1.2.3	Validazione dello SLA .....	137
5.1.2.4	Determinazione della Velocità d'Attrito .....	138
5.1.3	Velocità del Vento nel Modello CFD della Galleria del Vento DICAAR .....	138
5.1.4	Determinazione della Velocità d'Attrito Limite.....	141
5.1.4.1	Limitazioni della Procedura EPA Standard.....	141
5.1.4.2	Comparazione delle Velocità d'Attrito Limite Ricavate con le Differenti Metodologie Impiegate.....	141
5.1.4.3	Correlazione delle Velocità d'Attrito Limite con le Caratteristiche Fisiche dei Materiali Granulari .....	142
5.1.4.4	Comparazione delle Metodologie Impiegate.....	143
5.1.5	Emissione dei Materiali Tal Quale .....	146
5.1.5.1	Profili Verticali di Concentrazione.....	146
5.1.5.2	Emissioni nella Galleria del Vento DICAAR.....	147
5.1.6	Emissione dei Materiali Asciutti .....	148
5.1.6.1	Profili Verticali di Concentrazione nella Galleria del Vento DICAAR .	148
5.1.6.2	Andamento delle Concentrazioni nel Tempo .....	148
5.1.6.3	Emissioni nella Galleria del Vento DICAAR.....	149
5.1.6.4	Emissioni Simulate col Codice Numerico.....	150
5.1.6.5	Confronto delle Emissioni tra Galleria del Vento DICAAR e Codice Numerico .....	154
5.2	Definizione di una Metodologia Integrata per la Stima delle Emissioni di PM.....	160
5.3	Limitazioni della Sperimentazione.....	164
5.3.1	Limitazioni della Determinazione della Velocità d'Attrito Limite .....	164
5.3.2	Limitazioni del Codice Numerico .....	165
5.4	Sviluppi Futuri.....	166
6	Conclusioni .....	168
	Appendice.....	172

Bibliografia.....	179
-------------------	-----

## Indice delle Figure:

<b>Figura 2.1.</b> Confronto fra le dimensioni del PM e alcune grandezze di riferimento (U.S. EPA, 2016b). .....	6
<b>Figura 2.2.</b> Contributo dei principali settori antropici alle emissioni di PM primario in Europea nel 2020. ....	12
<b>Figura 2.3.</b> Discarica fanghi rossi a Monteponi (Italia). In foto, sono rappresentati i fini asportati dalle superfici dall'azione erosiva del vento (ISPRA, 2014). ....	16
<b>Figura 2.4.</b> Schematizzazione delle forze agenti su una particella di sabbia al momento del sollevamento (Shao & Lu, 2000). ....	19
<b>Figura 2.5.</b> Dipendenza della velocità di attrito limite dal diametro equivalente delle particelle (Kok et al., 2012). ....	21
<b>Figura 2.6.</b> Dipendenza della velocità di attrito limite dal diametro equivalente delle particelle (Shao & Klose, 2016). ....	22
<b>Figura 2.7.</b> Rappresentazione grafica dei meccanismi di movimento per particelle di diverse dimensioni sotto l'azione del vento (Nickling & McKenna Neuman, 2009). ....	23
<b>Figura 2.8.</b> Processi di emissione di polveri per: a) trasporto aerodinamico; b) disintegrazione di un aggregato di particelle colpito da una particella saltatrice; c) per disintegrazione di un aggregato saltatore (rivisitata da Shao (2008)). ....	24
<b>Figura 2.9.</b> Rappresentazione schematica dell'insieme dei parametri che influenzano il meccanismo di emissione di PM in atmosfera da un letto granulare esposto all'erosione eolica (rivisitata da dentoni et al. (2022)). ....	33
<b>Figura 2.10.</b> Rappresentazione schematica della metodologia integrata. ....	40
<b>Figura 2.11.</b> Rappresentazione schematica di una galleria del vento a strato limite sviluppato (Pinna, 2021). ....	42
<b>Figura 2.12.</b> Rappresentazione schematica del PI-SWERL (Lai et al., 2025). ....	44
<b>Figura 3.1.</b> Anemometro a tubo di Pitot. ....	45
<b>Figura 3.2.</b> Analizzatore di polvere DustTrak DRX 8533. ....	46
<b>Figura 3.3.</b> (a) Vista della galleria del vento DICAAR dalla sezione convergente (ingresso del flusso); (b) vista della galleria del vento DICAAR dalla sezione divergente (uscita del flusso) (Pinna et al., 2024). ....	48

<b>Figura 3.4.</b> Rappresentazione schematica della galleria del vento DICAAR (Pinna et al., 2024).....	48
<b>Figura 3.5.</b> Rappresentazione schematica degli spires installati all'ingresso della sezione di sviluppo del flusso (Pinna et al., 2024). .....	51
<b>Figura 3.6.</b> Esempi di ramp test, step test e hybrid test. ....	53
<b>Figura 3.7.</b> Rappresentazione schematica del modello di emissione sviluppato: impatto dei saltatori sulla superficie; rottura dell'aggregato saltatore e posto sulla superficie, con conseguente liberazione delle particelle elementari; sviluppo del flusso verticale di polveri (rivisitata da Dentoni et al. (2022)). .....	55
<b>Figura 3.8.</b> Rappresentazione schematica del ciclo di calcolo (Dentoni et al., 2022). ..	57
<b>Figura 3.9.</b> Rappresentazione schematica dei punti di misura nella galleria del vento DICAAR (Pinna et al., 2024). .....	60
<b>Figura 3.10.</b> Geometria della mesh non strutturata impiegata nel modello CFD (Pinna et al., 2024). .....	63
<b>Figura 3.11.</b> Esempi dei campioni collocati all'interno di vassoi di alluminio e testati nella galleria del vento: a) gesso GP; b) solfati BD; c) galena MS; d) blenda PR (Lai et al., 2025).....	65
<b>Figura 3.12.</b> Esempi dei campioni collocati all'interno dei vassoi circolari e testati con il PI-SWERL: a) ossidi WL; b) blenda RD; c) solfati BD; d) galena PN (Lai et al., 2025).....	68
<b>Figura 3.13.</b> Schematizzazione del modello del volume di controllo utilizzato per il calcolo delle emissioni.....	70
<b>Figura 4.1.</b> Distribuzione granulometrica delle particelle elementare condotta mediante l'impiego del granulometro laser Mastersizer 3000E (Lai et al., 2025).....	74
<b>Figura 4.2.</b> Distribuzione granulometrica degli aggregati condotta mediante l'impiego di un vibrovaglio (Lai et al., 2025).....	75
<b>Figura 4.3.</b> Campi di velocità del vento in galleria individuati tramite i dati sperimentali (1500 e 2700 RPM) (Pinna et al., 2024).....	80
<b>Figura 4.4.</b> Campi di intensità di turbolenza in galleria individuati tramite i dati sperimentali (1500 e 2700 RPM) (Pinna et al., 2024).....	81

<b>Figura 4.5.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1500 RPM.....	82
<b>Figura 4.6.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1650 RPM.....	83
<b>Figura 4.7.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1800 RPM.....	83
<b>Figura 4.8.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1950 RPM.....	83
<b>Figura 4.9.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2100 RPM.....	84
<b>Figura 4.10.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2250 RPM.....	84
<b>Figura 4.11.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2400 RPM.....	84
<b>Figura 4.12.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2550 RPM.....	85
<b>Figura 4.13.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM.....	85
<b>Figura 4.14.</b> Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1500 RPM.....	86
<b>Figura 4.15.</b> Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1650 RPM.....	87
<b>Figura 4.16.</b> Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1800 RPM.....	87
<b>Figura 4.17.</b> Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1950 RPM.....	87
<b>Figura 4.18.</b> Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2100 RPM.....	88
<b>Figura 4.19.</b> Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2250 RPM.....	88

<b>Figura 4.20.</b> Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2400 RPM.....	88
<b>Figura 4.21.</b> Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2550 RPM.....	89
<b>Figura 4.22.</b> Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM.....	89
<b>Figura 4.23.</b> Sviluppo del campo di velocità all'interno della galleria del vento DICAAR lungo le sezioni trasversali di controllo (2700 RPM) (Pinna et al., 2024).....	90
<b>Figura 4.24.</b> Sviluppo del campo di velocità all'interno della galleria del vento DICAAR lungo l'asse longitudinale (2700 RPM) (Pinna et al., 2024).....	91
<b>Figura 4.25.</b> Campi di velocità del vento in galleria individuati tramite le simulazioni CFD (Pinna et al., 2024).....	91
<b>Figura 4.26.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità sui dati ricavati dalle simulazioni CFD (1500 RPM) (Pinna et al., 2024).....	93
<b>Figura 4.27.</b> Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità sui dati ricavati dalle simulazioni CFD (2700 RPM) (Pinna et al., 2024).....	93
<b>Figura 4.28.</b> Distribuzione granulometrica degli aggregati determinata attraverso la procedura EPA rivisitata (Lai et al., 2025).....	95
<b>Figura 4.29.</b> Concentrazioni di PM <sub>10</sub> misurate sopravento (blu) e sottovento (rosso) rispetto al campione di solfati AD, alla velocità di attrito soglia $u^*_t = 0,34$ m/s. ....	97
<b>Figura 4.30.</b> Concentrazioni di PM <sub>10</sub> misurate sopravento (blu) e sottovento (rosso) rispetto al campione di galena PN, alla velocità di attrito soglia $u^*_t = 0,40$ m/s.....	98
<b>Figura 4.31.</b> Concentrazioni di PM <sub>10</sub> misurate sopravento (blu) e sottovento (rosso) rispetto al campione di solfati BD, alla velocità di attrito soglia $u^*_t = 0,44$ m/s.....	98
<b>Figura 4.32.</b> Concentrazioni di PM <sub>10</sub> misurate sopravento (blu) e sottovento (rosso) rispetto al campione di gesso GP, alla velocità di attrito soglia $u^*_t = 0,52$ m/s. ....	99
<b>Figura 4.33.</b> Esempi di identificazione dell' $u^*_t$ attraverso i test sperimentali con il PI-SWERL. La linea rossa tratteggiata indica l'inizio del processo di erosione e la corrispondente velocità di rotazione della piastra (RPM). Per determinare la velocità di attrito limite viene infine utilizzata l'equazione (3.6) (Lai et al., 2025). ....	100

<b>Figura 4.34.</b> Dipendenza delle emissioni di PM <sub>10</sub> dalla velocità d'attrito del vento per i campioni di materiale granulare allo stato tal quale. ....	111
<b>Figura 4.35.</b> Andamento delle concentrazioni di PM <sub>10</sub> nel tempo (galena PN). ....	116
<b>Figura 4.36.</b> Andamento delle concentrazioni di PM <sub>10</sub> nel tempo (blenda RD). ....	116
<b>Figura 4.37.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1650 RPM (galena PN). ....	118
<b>Figura 4.38.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1800 RPM (galena PN). ....	118
<b>Figura 4.39.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1950 RPM (galena PN). ....	119
<b>Figura 4.40.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2100 RPM (galena PN). ....	119
<b>Figura 4.41.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2250 RPM (galena PN). ....	120
<b>Figura 4.42.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2400 RPM (galena PN). ....	120
<b>Figura 4.43.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2550 RPM (galena PN). ....	121
<b>Figura 4.44.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1650 RPM (blenda RD). ....	121
<b>Figura 4.45.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1800 RPM (blenda RD). ....	122
<b>Figura 4.46.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1950 RPM (blenda RD). ....	122
<b>Figura 4.47.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2100 RPM (blenda RD). ....	123
<b>Figura 4.48.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2250 RPM (blenda RD). ....	123
<b>Figura 4.49.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2400 RPM (blenda RD). ....	124

<b>Figura 4.50.</b> Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2550 RPM (blenda RD).....	124
<b>Figura 4.51.</b> Emissioni di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d’attrito: dati misurati nella galleria del vento DICAAR e fitting della legge di potenza. ....	126
<b>Figura 4.52.</b> Emissioni di PM <sub>2,5</sub> al variare della velocità d’attrito: dati misurati nella galleria del vento DICAAR e fitting della legge di potenza. ....	127
<b>Figura 4.53.</b> Emissioni di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d’attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (galena PN e DR di Thornton et al.).....	130
<b>Figura 4.54.</b> Emissioni di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d’attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (galena PN e DR di Deng e Davé).....	131
<b>Figura 4.55.</b> Emissioni di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d’attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (blenda RD e DR di Thornton et al.).....	131
<b>Figura 4.56.</b> Emissioni di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d’attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (blenda RD e DR di Deng e Davé).....	132
<b>Figura 4.57.</b> Emissioni di PM <sub>2,5</sub> al variare della velocità d’attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (galena PN e DR di Thornton et al.).....	132
<b>Figura 4.58.</b> Emissioni di PM <sub>2,5</sub> al variare della velocità d’attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (galena PN e DR di Deng e Davé).....	133
<b>Figura 4.59.</b> Emissioni di PM <sub>2,5</sub> al variare della velocità d’attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (blenda RD e DR di Thornton et al.).....	133
<b>Figura 4.60.</b> Emissioni di PM <sub>2,5</sub> al variare della velocità d’attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (blenda RD e DR di Deng e Davé).....	134
<b>Figura 5.1.</b> Profili verticali di velocità del vento misurati lungo le linee di misura A, B, C, D ed E (regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM).....	136
<b>Figura 5.2.</b> Profili verticali di velocità del vento misurati lungo le linee di misura A, B, C, D ed E (regime di funzionamento del ventilatore di 1500 RPM).....	137
<b>Figura 5.3.</b> Confronto tra i campi di velocità del vento misurati e simulati tramite CFD (regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM) (Pinna et al., 2024).....	139

<b>Figura 5.4.</b> Fitting del profilo del vento della Legge di potenza ai dati sperimentali (punti rossi) e ai dati CFD (regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM) (Pinna et al., 2024). .....	140
<b>Figura 5.5.</b> Esempio di diminuzioni istantanee e sporadiche della concentrazione rilevata durante i test sperimentali con il PI-SWERL. Si noti che un numero di incrementi consecutivi superiore a 8 non avrebbe consentito l'identificazione corretta della velocità di attrito limite nonostante il fenomeno erosivo risulti già avviato (Lai et al., 2025). .....	145
<b>Figura 5.6.</b> Dipendenza delle emissioni di PM <sub>10</sub> dalla velocità d'attrito del vento per le due formulazioni del DR adottate (galena PN). .....	152
<b>Figura 5.7.</b> Dipendenza delle emissioni di PM <sub>10</sub> dalla velocità d'attrito del vento per le due formulazioni del DR adottate (blenda RD). .....	153
<b>Figura 5.8.</b> Dipendenza delle emissioni di PM <sub>2,5</sub> dalla velocità d'attrito del vento per le due formulazioni del DR adottate (galena PN). .....	153
<b>Figura 5.9.</b> Dipendenza delle emissioni di PM <sub>2,5</sub> dalla velocità d'attrito del vento per le due formulazioni del DR adottate (blenda RD). .....	154
<b>Figura 5.10.</b> Identificazione delle aree caratterizzate dalla presenza di un materiale granulare con proprietà fisico-chimiche omogenee.....	162
<b>Figura 5.11.</b> Identificazione delle la distribuzione spaziale della velocità del vento all'interno dell'impianto industriale. ....	163
<b>Figura 5.12.</b> Integrazione della distribuzione spaziale delle aree caratterizzate da materiali con caratteristiche fisico-chimiche omogenee e di quelle con medesime velocità del vento. ....	164

## Indice delle Tabelle:

<b>Tabella 2.1.</b> Valori limite per la concentrazione in aria di PM <sub>10</sub> e PM <sub>2,5</sub> definiti da Unione Europea, WHO e U.S. EPA. ....	9
<b>Tabella 2.2.</b> Valori del fattore moltiplicativo k in funzione del diametro aerodinamico. ....	35
<b>Tabella 2.3.</b> Relazione tra $u^*_t$ e moda dell'analisi granulometrica eseguita secondo la procedura proposta dall'U.S. EPA (2006).....	36
<b>Tabella 3.1.</b> Parametri di progetto e dimensioni degli spires della galleria del vento DICAAR.....	51
<b>Tabella 3.2.</b> Correlazione tra $\alpha$ e rugosità del materiale (Etyemezian et al., 2014).....	52
<b>Tabella 3.3.</b> Relazione tra $u^*_t$ e moda dell'analisi granulometrica eseguita secondo la procedura proposta dall'U.S. EPA (2006) nella versione rivisitata. ....	64
<b>Tabella 3.4.</b> Dati di input ricavati dalla bibliografia scientifica e adoperati per l'esecuzione del codice numerico.....	72
<b>Tabella 4.1.</b> Sintesi dei risultati della caratterizzazione fisica dei materiali granulari campionati. ....	75
<b>Tabella 4.2.</b> Profili di velocità del vento in galleria misurati lungo le linee di misura A, B, C, D ed E (regime di funzionamento del ventilatore di 1500 RPM). ....	77
<b>Tabella 4.3.</b> Profili di velocità del vento in galleria misurati lungo le linee di misura A, B, C, D ed E (regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM). ....	78
<b>Tabella 4.4.</b> Profili di velocità del vento in galleria misurati lungo la linea di misura A (regimi di funzionamento del ventilatore di 1650, 1800, 1950, 2100, 2250, 2400 e 2550 RPM). ....	79
<b>Tabella 4.5.</b> Risultati del fitting della Legge di potenza sui dati sperimentali.....	82
<b>Tabella 4.6.</b> Velocità di flusso libero $u_\delta$ , velocità d'attrito $u^*$ e coefficiente $z_0$ al variare del regime di funzionamento del ventilatore. ....	86
<b>Tabella 4.7.</b> Profili di velocità del vento in galleria simulati con il CFD lungo la linea di misura A. ....	92
<b>Tabella 4.8.</b> Risultati del fitting della Legge di potenza sui dati ricavati dalle simulazioni CFD. ....	92

<b>Tabella 4.9.</b> Moda della distribuzione granulometrica degli aggregati determinata tramite la procedura EPA rivisitata. ....	95
<b>Tabella 4.10.</b> Velocità d'attrito limite determinata tramite la procedura EPA rivisitata. ....	95
<b>Tabella 4.11.</b> Differenza percentuale media delle concentrazioni medie di PM <sub>10</sub> (sottovento - sopravento) determinate in funzione della velocità di attrito e velocità di soglia individuate attraverso i test nella galleria del vento DICAAR (EWT).....	96
<b>Tabella 4.12.</b> Velocità d'attrito limite determinata tramite il PI-SWERL e deviazione standard.....	100
<b>Tabella 4.13.</b> Profili di concentrazione di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (gesso GP).....	101
<b>Tabella 4.14.</b> Profili di concentrazione di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (ossidi WL).....	102
<b>Tabella 4.15.</b> Profili di concentrazione di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (solfati BD). ....	103
<b>Tabella 4.16.</b> Profili di concentrazione di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (solfati AD). ....	104
<b>Tabella 4.17.</b> Profili di concentrazione di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (galena MS). ....	105
<b>Tabella 4.18.</b> Profili di concentrazione di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (galena PN).....	106
<b>Tabella 4.19.</b> Profili di concentrazione di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (galena PR).....	107
<b>Tabella 4.20.</b> Profili di concentrazione di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (blenda PR).....	108
<b>Tabella 4.21.</b> Profili di concentrazione di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (blenda RD). ....	109
<b>Tabella 4.22.</b> Emissioni di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito per i diversi campioni granulari.....	110

<b>Tabella 4.23.</b> Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR in funzione della velocità d'attrito (materiali allo stato tal quale). .....	111
<b>Tabella 4.24.</b> Profili di concentrazione di $PM_{10}$ al variare della velocità d'attrito (galena PN asciutta). .....	112
<b>Tabella 4.25.</b> Profili di concentrazione di $PM_{10}$ al variare della velocità d'attrito (blenda RD asciutta). .....	113
<b>Tabella 4.26.</b> Profili di concentrazione di $PM_{2,5}$ al variare della velocità d'attrito (galena PN asciutta). .....	114
<b>Tabella 4.27.</b> Profili di concentrazione di $PM_{2,5}$ al variare della velocità d'attrito (blenda RD asciutta). .....	115
<b>Tabella 4.28.</b> Risultati del fitting della legge di potenza sulle concentrazioni in funzione del tempo. ....	117
<b>Tabella 4.29.</b> Emissioni di $PM_{10}$ al variare della velocità d'attrito per la galena PN e la blenda RD asciutte ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR. ....	125
<b>Tabella 4.30.</b> Emissioni di $PM_{2,5}$ al variare della velocità d'attrito per la galena PN e la blenda RD asciutte ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR. ....	125
<b>Tabella 4.31.</b> Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni di $PM_{10}$ ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR in funzione della velocità d'attrito (materiali asciutti). .....	126
<b>Tabella 4.32.</b> Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni di $PM_{2,5}$ ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR in funzione della velocità d'attrito (materiali asciutti). .....	126
<b>Tabella 4.33.</b> Emissioni di $PM_{10}$ al variare della velocità d'attrito per la galena PN ottenute attraverso il codice numerico. ....	128
<b>Tabella 4.34.</b> Emissioni di $PM_{2,5}$ al variare della velocità d'attrito per la galena PN ottenute attraverso il codice numerico. ....	128
<b>Tabella 4.35.</b> Emissioni di $PM_{10}$ ottenute attraverso il codice numerico al variare della velocità d'attrito per la blenda RD. ....	129

<b>Tabella 4.36.</b> Emissioni di PM <sub>2,5</sub> ottenute attraverso il codice numerico al variare della velocità d'attrito per la blenda RD. ....	129
<b>Tabella 4.37.</b> Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni di PM <sub>10</sub> attraverso il codice numerico in funzione della velocità d'attrito. ....	129
<b>Tabella 4.38.</b> Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni di PM <sub>2,5</sub> attraverso il codice numerico in funzione della velocità d'attrito. ....	130
<b>Tabella 5.1.</b> Valori di progetto e valori medi di $\alpha$ e $\delta$ determinati sperimentalmente e tramite le simulazioni CFD.....	140
<b>Tabella 5.2.</b> Velocità d'attrito limite determinata tramite la procedura EPA rivisitata, la galleria del vento DICAAR (EWT) e il PI-SWERL. ....	142
<b>Tabella 5.3.</b> Damage Ratio medio generato nelle simulazioni numeriche. ....	152
<b>Tabella 5.4.</b> Emissioni di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito per la galena PN ottenute attraverso i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR e il codice numerico. ....	155
<b>Tabella 5.5.</b> Emissioni di PM <sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito per la blenda RD ottenute attraverso i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR e il codice numerico. ....	155
<b>Tabella 5.6.</b> Emissioni di PM <sub>2,5</sub> al variare della velocità d'attrito per la galena PN ottenute attraverso i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR e il codice numerico. ....	156
<b>Tabella 5.7.</b> Emissioni di PM <sub>2,5</sub> al variare della velocità d'attrito per la blenda RD ottenute attraverso i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR e il codice numerico. ....	156
<b>Tabella 5.8.</b> Valori del modulo di Young e del coefficiente di Poisson della blenda e della galena, calcolati utilizzando le costanti elastiche fornite da Bass (2013), e valori utilizzati per la definizione delle formulazioni dei DR. ....	157
<b>Tabella 5.9.</b> Rapporto tra le emissioni di PM <sub>2,5</sub> e PM <sub>10</sub> ricavate attraverso le sperimentazioni in galleria del vento e il modello numerico (Galena PN). ....	159
<b>Tabella 5.10.</b> Rapporto tra le emissioni di PM <sub>2,5</sub> e PM <sub>10</sub> ricavate attraverso le sperimentazioni in galleria del vento e il modello numerico (Blenda RD). ....	160

# 1 Introduzione

Tra i meccanismi che influenzano la qualità dell'aria, l'azione del vento riveste un ruolo cruciale, sia nella mobilitazione di particolato solido (*emissione*), sia nel processo di trasporto e dispersione di PM (*Particulate Matter*) in atmosfera. Sebbene si tratti di un fenomeno naturale, l'emissione di PM è fortemente influenzata dalle attività antropiche, in particolare nei contesti industriali, dove grandi quantità di materiali granulari vengono stoccate o depositate su grandi superfici esterne (piazzali e aree di stoccaggio), esposte all'azione del vento. Nei siti industriali (minerari, mineralurgici e metallurgici) i materiali erodibili, stoccati in cumuli (*stockpiles*) o in bacini di decantazione (*tailings basins*), costituiscono potenziali sorgenti di particolato solido (*sorgenti diffuse di PM*), che possono avere impatti significativi sulla qualità dell'aria.

Il particolato solido rappresenta, infatti, uno degli inquinanti più pericolosi e diffusi in atmosfera, insieme a ossidi di azoto e di zolfo, monossido di carbonio, piombo, benzene e ozono troposferico (principali indicatori di qualità dell'aria). Per tale ragione, l'Unione Europea e gli Stati Uniti monitorano costantemente lo stato di qualità dell'aria, per verificare le concentrazioni di PM rispetto ai valori limite stabiliti per le diverse frazioni granulometriche di particolato (European Union, 2008, 2024; U.S. EPA, 2016a): PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>, in particolare.

La stima accurata delle emissioni di polveri da sorgenti diffuse (*fugitive dust sources* or *non-point sources*), in particolare nei produttivi industriali, nei siti produttivi dismessi soggetti ad attività di recupero ambientale e messa in sicurezza, e in generale nelle attività che prevedono lo scavo, il deposito e il trasporto di materiale granulare, rappresenta una sfida fondamentale per la valutazione dell'impatto atmosferico e per la definizione di efficaci strategie di mitigazione. Tuttavia, le variabili influenti, quali la granulometria del materiale soggetto all'erosione eolica, il suo contenuto di umidità, la coesione interparticellare e la composizione mineralogica interagiscono tra loro in modo complesso (Dentoni et al., 2022), rendendo spesso complicata una stima accurata dell'emissione, tipicamente basata sull'implementazione di formulazioni semi-empiriche o metodologie standardizzate.

Con lo scopo di agevolare la stima delle emissioni di particolato da superfici granulari esposte all'azione del vento, agenzie ambientali internazionali, come l'U.S. EPA (*United States Environmental Protection Agency*), hanno proposto metodiche standardizzate (U.S. EPA, 2006) che tengono in considerazione solamente la granulometria dei materiali coinvolti e la velocità

d'attrito del vento incidente. Tuttavia, l'applicazione di queste metodologie per contesti specifici può portare a stime imprecise, che non tengono conto delle specifiche variabili che influenzano il fenomeno erosivo, delle caratteristiche peculiari del sito e della variabilità delle sorgenti nel dominio spaziale e temporale.

La mancanza di metodologie e di modelli numerici consolidati ha finora limitato la possibilità di quantificare in modo accurato le emissioni potenziali e di supportare la pianificazione e la gestione ambientale delle attività produttive tramite strumenti affidabili e scientificamente validati. In questo scenario emerge la necessità di sviluppare nuove metodologie, capaci di descrivere in modo più accurato i processi erosivi ed emissivi di un determinato contesto operativo.

Per affrontare questa complessità, nell'ambito del progetto di Dottorato si è proposto un approccio integrato che combina la caratterizzazione fisico-chimica dei materiali oggetto di interesse (analisi di laboratorio), i risultati dei test di emissione (misure dirette) e le modellazioni numeriche. L'obiettivo del progetto è appunto sviluppare una metodologia integrata capace di descrivere le dinamiche di emissione in contesti ambientali specifici, migliorando l'accuratezza delle stime e, in generale, riducendo le incertezze sulla valutazione dei dati di input utilizzati per l'implementazione dei modelli previsionali di impatto ai recettori (modelli di trasporto e dispersione in atmosfera).

Al fine di indagare le relazioni tra le caratteristiche fisiche dei materiali e le potenzialità emissive di una vasta gamma di superfici granulari, è stato predisposto uno studio condotto attraverso l'impiego di diverse strumentazioni sperimentali, tra cui la galleria del vento ambientale EWT (*Environmental Wind Tunnel*), progettata e costruita nei laboratori del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura (DICAAR) dell'Università degli studi di Cagliari e la strumentazione portatile PI-SWERL (*Portable In-Situ Wind ERosion Lab*) messa a disposizione dal Dipartimento di Scienze Ambientali dell'Università di Basilea (Svizzera), e vari software di simulazione numerica (*ANSYS Fluent* e *MATLAB*).

L'attività di ricerca è stata sviluppata attraverso le sei fasi principali di seguito riportate:

- *Prima fase.* Campionamento e caratterizzazione fisico-chimica di una gamma di materiali granulari campionati nei siti industriali operanti nel territorio regionale.
- *Seconda fase.* Progettazione, costruzione e messa a punto della galleria del vento ambientale, opportunamente regolata in modo da riprodurre il profilo di Strato Limite Atmosferico (SLA) di interesse.

- *Terza fase.* Sviluppo e calibrazione del modello CFD (*Computational Fluid Dynamics*) della galleria del vento del DICAAR, per la simulazione tridimensionale del campo di vento. Il modello CFD permette di valutare in anticipo l'effetto di eventuali e future variazioni della configurazione della galleria EWT.
- *Quarta fase.* Determinazione sperimentale della *velocità d'attrito limite* (i.e. velocità di innesco del processo erosivo), mediante la metodologia proposta nel Documento AP-42 dell'EPA (U.S. EPA, 2020), adeguata per adattarsi alle caratteristiche peculiari dei campioni, e tramite test sperimentali condotti sia in galleria del vento sia con strumentazione PI-SWERL. Parte di questa attività è stata svolta durante il periodo di ricerca svolto all'estero (Dipartimento di Scienze Ambientali dell'Università di Basilea, Svizzera).
- *Quinta fase.* Misura diretta delle emissioni in galleria del vento. La stima delle emissioni ha riguardato tutti i materiali campionati allo stato *tal quale* (senza pretrattamento) e, solo per alcuni campioni selezionati, a valle del processo di essiccazione.
- *Sesta fase.* Perfezionamento di un codice numerico, già parzialmente sviluppato dal gruppo di ricerca di geoingegneria dell'Università di Cagliari (Dentoni et al., 2022), fondato su un modello di emissione fisico-matematico per la previsione delle emissioni basata sull'uso di *dati di input sito-specifici*, e stima delle emissioni dei materiali essiccati nella fase precedente attraverso l'esecuzione dello stesso.

Il lavoro svolto ha permesso di definire e affinare una metodologia integrata che consente di stimare le emissioni di particolato da superfici granulari, combinando sperimentazioni di laboratorio e modellazioni numeriche. Tale approccio rappresenta un contributo verso lo sviluppo di strumenti predittivi più affidabili e adattabili a differenti contesti operativi e ambientali, offrendo un supporto concreto alla gestione sostenibile delle aree minerarie e metallurgiche.

## 2 Inquadramento Teorico

Il presente capitolo si sofferma sulle basi teoriche del progetto di Dottorato.

Nel paragrafo 2.1 viene introdotto il tema del particolato atmosferico (PM), fornendo una panoramica sulle sue caratteristiche, sulla sua rilevanza ambientale, nonché sugli standard normativi vigenti e sulle principali sorgenti di emissione.

Il paragrafo 2.2 approfondisce il fenomeno dell'erosione eolica in contesti industriali, con particolare attenzione ai meccanismi fisici, ai parametri che ne influenzano l'intensità e ai metodi di quantificazione delle emissioni di particolato.

Infine, il paragrafo 2.3 descrive le apparecchiature sperimentali comunemente impiegate per stimare e caratterizzare le emissioni di polveri generate dai processi di erosione eolica.

### 2.1 Particolato Aerodisperso (PM)

Il particolato aerodisperso (*Particulate Matter o PM*) è una miscela complessa ed eterogenea di particelle solide e liquide disperse nell'atmosfera. Esso costituisce uno dei principali e più monitorati contaminanti che contribuiscono all'inquinamento atmosferico ed è associato a rischi significativi per la salute umana. Oltre agli effetti sulla salute, la presenza di elevate concentrazioni di particolato in atmosfera può generare impatti rilevanti su numerose componenti ambientali, tra cui flora e fauna, suolo e acque superficiali, aria e clima.

Dockery et al. (1993) hanno stimato che la mortalità nelle città con elevati livelli di inquinamento atmosferico supera del 20% quella osservata nelle città meno inquinate. Infatti, l'esposizione prolungata a concentrazioni significative di PM, in relazione alla composizione mineralogica del particolato e alle sue caratteristiche granulometriche (i.e.: capacità di deposizione dell'apparato respiratorio), può causare o aggravare patologie cardiovascolari e polmonari, favorire attacchi cardiaci e aritmie, colpire il sistema nervoso centrale e il sistema riproduttivo e incrementare la probabilità di insorgenza di patologie neoplastiche.

Il processo di formazione del particolato è particolarmente complesso e non univoco. In base alla modalità di formazione, il PM viene generalmente suddiviso in due categorie:

- le particelle primarie, emesse direttamente in atmosfera, caratterizzate da dimensioni mediamente maggiori rispetto alla classe successiva e quindi soggette a processi di deposizione più rapidi, che ne riducono il tempo di permanenza in aria.

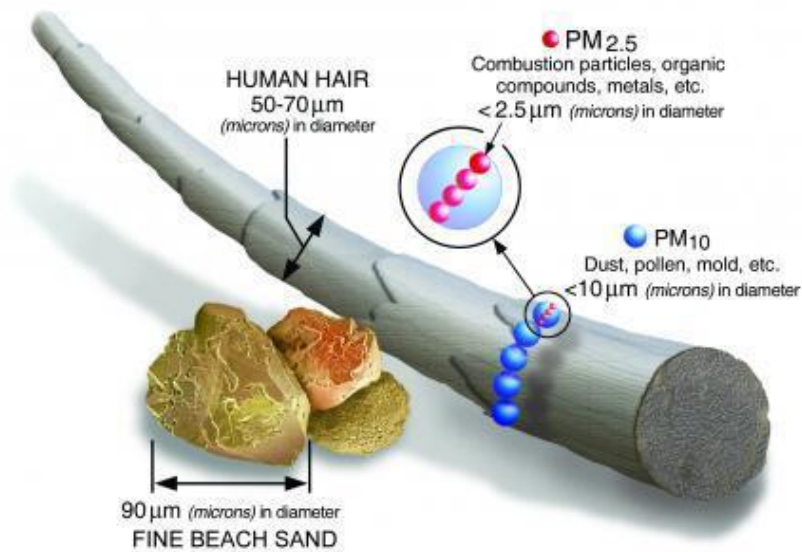
- le particelle secondarie, prodotte da reazioni chimiche e fisiche che coinvolgono gas precursori del PM come ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), anidride solforosa (SO<sub>2</sub>), ammoniaca (NH<sub>3</sub>) e composti organici volatili (COV).

### 2.1.1 Proprietà Fisiche

A causa della varietà dei processi di formazione, il particolato non presenta una distribuzione uniforme né dal punto di vista dimensionale né chimico. Tali caratteristiche variano nel tempo e nello spazio in funzione delle sorgenti di emissione e delle condizioni atmosferiche e meteorologiche.

L'insieme delle particelle solide sospese in aria è costituito da grani di dimensione (Figura 2.1), forma e massa volumica diverse, con differenti capacità di deposizione all'interno dell'apparato respiratorio. Affinché si possa valutare l'impatto del particolato sulla salute è dunque necessario definire una grandezza che permetta il confronto tra particelle differenti. Tale grandezza è il diametro aerodinamico, con il quale si intende il diametro di una sfera equivalente con massa volumica unitaria, avente la stessa velocità terminale di sedimentazione della particella oggetto di studio.

Il diametro aerodinamico è un parametro fondamentale per la descrizione e la comprensione dei processi di inalazione e deposizione del PM nel sistema respiratorio umano. Le particelle di PM trasportate in aria (*airborne particles*) sono classificate sulla base del loro diametro aerodinamico in frazione grossolana (i.e., PM<sub>10</sub>) e frazione fine (i.e., PM<sub>2,5</sub>) (Gozzi et al., 2017). La frazione grossolana include perlopiù particelle primarie, prodotte dalla rottura meccanica di particelle con dimensioni maggiori, e alcune particelle secondarie. Al contrario, una grossa porzione della frazione fine è costituita da particelle secondarie, formatesi mediante processi di coagulazione e condensazione (Gozzi et al., 2017; U.S. EPA, 2018).



**Figura 2.1.** Confronto fra le dimensioni del PM e alcune grandezze di riferimento (U.S. EPA, 2016b).

### 2.1.2 Proprietà Chimiche

I diversi processi di formazione del particolato non consentono di determinare una composizione chimica univoca del contaminante. Le particelle atmosferiche possono essere costituite da una ampia varietà di elementi, tra cui sali inorganici (solfato di ammonio, nitrato di ammonio, cloruro di sodio), carbonio organico, carbonio elementare, particelle di origine biologica (spore, fungine, pollini, cellule batteriche, virus, nonché frammenti e prodotti di organismi), metalli pesanti e materiali cristallini provenienti da rocce e suoli.

Le particelle fini sono caratterizzate da una elevata concentrazione di solfati, ammonio, ioni idrogeno, carbonio elementare e composti organici (Piras, 2011). Il solfato è presente nella frazione fine come solfato di ammonio, formatosi per ossidazione di  $\text{SO}_2$  in atmosfera, e sotto forma di  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  di origine marina. L'ammonio è invece il risultato di processi di neutralizzazione di acidi nitrici e solforici da parte dell'ammoniaca presente nell'atmosfera. Infine, il carbonio elementare e il carbonio organico sono prodotti a seguito di processi di combustione incompleta di biomassa e combustibili fossili (Gozzi et al., 2017).

Le particelle di materiale cristallino (calcio, alluminio, silicio, manganese e ferro), i pollini e i prodotti vegetali e animali si trovano principalmente nella frazione grossolana. La composizione della polvere minerale varia notevolmente in funzione della geologia, delle condizioni meteorologiche e dei processi superficiali nell'area sorgente. Anche le particelle biologiche sono caratterizzate da dimensioni e morfologia eterogenee.

Al variare dei processi di formazione, alcuni composti chimici possono essere presenti sia nella frazione fine sia in quella grossolana. Ad esempio, il nitrato è presente nella frazione fine sotto forma di nitrato d'ammonio, prodotto a seguito della reazione dell'acido nitrico in forma gassosa con l'ammoniaca; nella frazione grossolana, il nitrato è invece prodotto principalmente dalla reazione dell'acido nitrico con particelle solide preesistenti. Il potassio presente nella frazione fine si genera a seguito di incendi, mentre quello presente nella frazione grossolana deriva dall'erosione eolica dei suoli (Piras, 2011).

### 2.1.3 Standard di Qualità dell'Aria

La comunità scientifica assume generalmente che gli eventuali effetti sulla salute umana siano proporzionali alla massa delle particelle con determinato diametro aerodinamico depositate sia nel complesso del tratto respiratorio sia nelle singole regioni in cui esso può essere suddiviso. La necessità di distinguere le diverse regioni dell'apparato respiratorio deriva dal fatto che il flusso d'aria diminuisce progressivamente lungo le vie respiratorie, fino a raggiungere valori prossimi allo zero oltre le vie aeree ciliate. Questo processo implica che si depositino progressivamente particelle di dimensioni sempre più ridotte in funzione della distanza percorsa lungo l'apparato respiratorio.

Al fine di individuare il rischio per la salute umana in ambienti di lavoro sono state definite delle convenzioni ISO/CEN/ACGIH che si riferiscono a delle specifiche frazioni di interesse dell'apparato respiratorio tra cui:

- la frazione inalabile (*FI*), corrispondente alla frazione in massa di tutte le particelle inalate;
- la frazione toracica (*FT*), corrispondente alla frazione in massa delle particelle inalate che penetra oltre la laringe;
- la frazione respirabile (*FR*), corrispondente alla frazione in massa delle particelle inalate che penetra nelle vie respiratorie non ciliate.
- la frazione respirabile ad alto rischio (*FRar*), che è un sottoinsieme della frazione respirabile, introdotto per la protezione dei soggetti più suscettibili.

Per valutare l'impatto del particolato sulla qualità dell'aria ambiente, sono state invece identificate due frazioni:

- **PM<sub>10</sub>**, definito come frazione di materiale particolato sospeso in aria ambiente che passa attraverso un sistema di separazione in grado di selezionare, con un'efficienza di campionamento pari al 50%, il materiale particolato di diametro aerodinamico di 10 µm;
- **PM<sub>2,5</sub>**, definito come frazione di materiale particolato sospeso in aria ambiente che passa attraverso un sistema di separazione in grado di selezionare, con un'efficienza di campionamento pari al 50%, il materiale particolato di diametro aerodinamico di 2,5 µm.

Le frazioni di PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub> risultano analoghe, ma non esattamente coincidenti, rispettivamente alla frazione toracica e alla frazione respirabile ad alto rischio definite dalle convenzioni ISO/CEN/ACGIH. Per tale ragione, tali frazioni di particolato sono soggette a normative specifiche da parte degli enti preposti alla tutela della qualità dell'aria.

Al fine di garantire un livello di qualità dell'aria che possa essere definito come "accettabile", l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha stabilito dei valori guida per la qualità dell'aria (*Air Quality Guidelines - AQGs*) (WHO, 2021) per la concentrazione di PM nel breve (24 ore) e nel lungo periodo (anno civile). Il rispetto di tali valori è associato a una riduzione significativa del rischio previsto per la salute umana.

I valori limite proposti dall'OMS per l'esposizione a lungo termine sono pari a 5 µg/m<sup>3</sup> per il PM<sub>2,5</sub> e a 15 µg/m<sup>3</sup> per il PM<sub>10</sub>. Tali valori sono fondati sulle evidenze scientifiche emerse da uno studio finanziato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (J. Chen & Hoek, 2020). Per quanto concerne l'esposizione di breve durata, sono stati proposti valori limite giornalieri pari a 15 µg/m<sup>3</sup> per il PM<sub>2,5</sub> e pari a 45 µg/m<sup>3</sup> per il PM<sub>10</sub>, sulla base delle evidenze scientifiche emerse da un altro studio finanziato dall'OMS (Orellano et al., 2020). Questi limiti, aggiornati al 2021, sono molto più restrittivi rispetto alle linee guida precedenti (relative al 2005), a testimonianza della crescente evidenza dei rischi per la salute anche a concentrazioni molto basse di particolato.

In aggiunta ai valori guida stabiliti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità per il PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>, si devono considerare i limiti fissati dall'Unione Europea e dagli Stati Uniti, che sono oggetto di revisione periodica al fine di promuovere una riduzione graduale delle concentrazioni limite. I valori limite stabiliti dalla Direttiva Europea, i NAAQS (*National Air Ambient Quality Standards*) dell'U.S. EPA e i valori guida dell'OMS sono riportati in Tabella 2.1.

**Tabella 2.1.** Valori limite per la concentrazione in aria di  $PM_{10}$  e  $PM_{2,5}$  definiti da Unione Europea, WHO e U.S. EPA.

Indicatore	Periodo	Valori limite	Commenti
<b>PM<sub>10</sub></b>	Lungo termine (media annua)	WHO AQG: 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		EU (2025): 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		EU (2030): 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		U.S. EPA NAAQS: -	
	Breve termine (24 h)	WHO AQG: 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		EU (2025): 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Da non superare più di 35 giorni all'anno
		EU (2030): 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Da non superare più di 18 giorni all'anno
		U.S. EPA NAAQS: 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Da non superare più di una volta all'anno in media nell'arco di 3 anni
<b>PM<sub>2,5</sub></b>	Lungo termine (media annua)	WHO AQG: 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		EU (2025): 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		EU (2030): 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		U.S. EPA NAAQS: 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Primario; media annua su 3 anni
	Breve termine (24 h)	U.S. EPA NAAQS: 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Secondario; media annua su 3 anni
		WHO AQG: 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		EU (2025): -	
		EU (2030): 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Da non superare più di 18 giorni all'anno
		U.S. EPA NAAQS: 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	98° percentile (3 giorni all'anno)

All'interno dell'Unione Europea, la Direttiva 2008/50/EC (European Union, 2008) stabilisce il valore limite per la concentrazione giornaliera e annuale di  $PM_{10}$  rispettivamente in 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (da non superare per più di 35 volte in un anno) e in 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La concentrazione

limite annuale per il PM<sub>2,5</sub> è stabilita a 25 µg/m<sup>3</sup>; tuttavia, non è stata definita una soglia limite giornaliera.

Recentemente, è stata emanata la Direttiva 2024/2881 del 23 ottobre 2024 (European Union, 2024) che entrerà in vigore dal 12 dicembre 2026. La direttiva spinge gli stati membri al raggiungimento dei limiti proposti nella direttiva precedente, proponendo allo stesso tempo nuovi limiti normativi da raggiungere entro il 1° gennaio 2030. Tali limiti sono pari a 25 µg/m<sup>3</sup> e 45 µg/m<sup>3</sup>, rispettivamente per il PM<sub>2,5</sub> e il PM<sub>10</sub>, per quanto riguarda la concentrazione giornaliera (da non superare per più di 18 volte in un anno) e pari a 10 µg/m<sup>3</sup> e 20 µg/m<sup>3</sup> rispettivamente per il PM<sub>2,5</sub> e il PM<sub>10</sub> per quanto riguarda la concentrazione annuale. Inoltre, la direttiva prevede una revisione periodica per allineare gli standard alle evidenze scientifiche più aggiornate e avvicinarli progressivamente alle linee guida dell'OMS, con l'obiettivo di raggiungere tali valori normativi nel 2050 (*Zero Pollution Action Plan*).

Nel report *Europe's air quality status* del 2024 (European Environment Agency, 2024) l'Unione Europea evidenzia che meno dell'1% della popolazione europea è esposta a concentrazioni di PM<sub>2,5</sub> sopra la soglia gli attuali limiti normativi europei. Tuttavia, la percentuale aumenta fino al 96% se si considera la soglia suggerita dall'OMS. Invece, per quanto riguarda il PM<sub>10</sub>, la popolazione europea esposta a concentrazioni sopra la soglia gli attuali limiti normativi europei è pari al 9%, mentre l'83% è esposta a concentrazioni superiori a quelle indicate dall'OMS.

Negli Stati Uniti, gli standard di qualità dell'aria per il PM (NAAQS) sono stati introdotti per la prima volta nel 1971, con riferimento alle polveri totali (*Total Suspended Particles* - TSP). A decorrere dal 1997, l'U.S. EPA (*Environmental Protection Agency*) ha definito limiti specifici per le concentrazioni di PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>. Il limite per l'esposizione al PM<sub>2,5</sub>, è stato stabilito rispettivamente a 35 e 9 µg/m<sup>3</sup> nel breve e lungo termine (quest'ultimo aggiornato nel 2024, precedentemente pari a 12 µg/m<sup>3</sup>). Il limite giornaliero per il PM<sub>10</sub> è fissato a 150 µg/m<sup>3</sup>; tuttavia, il valore limite annuale è stato abrogato a causa dell'insufficienza di studi scientifici che possano stabilire con certezza una relazione causa-effetto tra l'esposizione prolungata al PM<sub>10</sub> e gli effetti sulla salute (U.S. EPA, 2016a).

## 2.1.4 Emissioni di PM

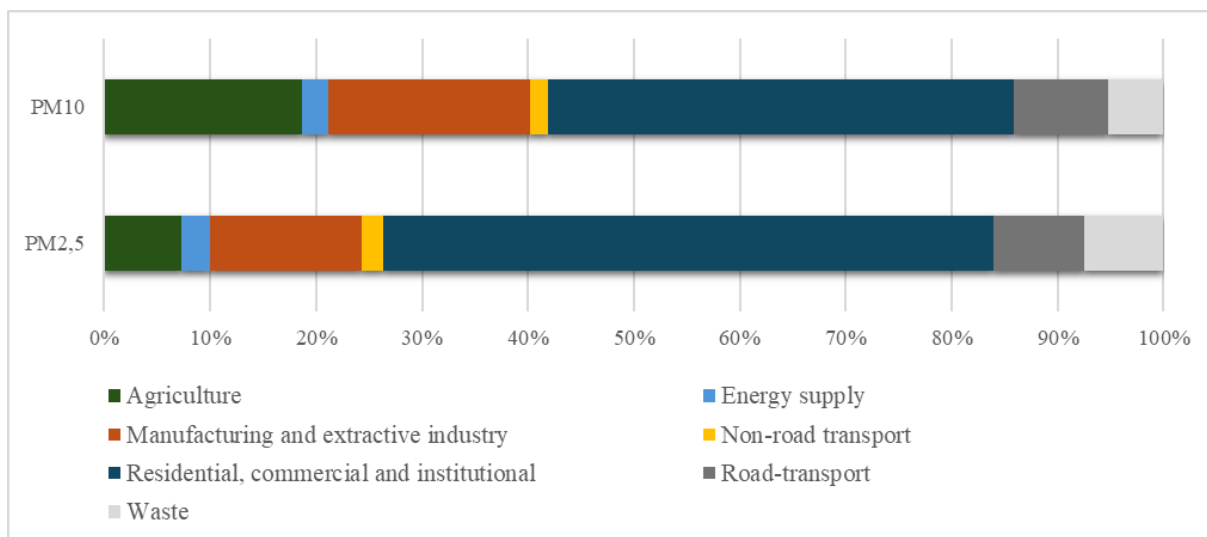
### 2.1.4.1 Sorgenti di Emissione

Il particolato può avere origine sia da fattori naturali, comprendenti polvere, microrganismi, pollini, erosione di rocce, eruzioni vulcaniche e tempeste di vento, sia da fattori antropici, quali il fumo di tabacco, i residui dell'usura del manto stradale e delle gomme delle vetture e le emissioni dei motori a combustione interna, del riscaldamento domestico, di lavorazioni meccaniche, dei cantieri, di inceneritori, di centrali elettriche e di lavorazioni agricole. Generalmente il contributo delle sorgenti naturali è preponderante, stimato complessivamente intorno al 90%, contro un 10% di origine antropica. Tuttavia, il rapporto fra contributo naturale e antropico è molto differente a seconda dei luoghi. Nelle aree urbane l'apporto preponderante deriva principalmente dalle sorgenti antropiche a causa del traffico stradale, del riscaldamento domestico e di eventuali impianti industriali presenti, mentre nelle aree rurali domina la componente naturale.

Le principali fonti di particolato di origine naturale sono rappresentate dalle grandi aree desertiche: Sahara, Kalahari, Gobi, penisola arabica, deserto australiano, Death Valley e il deserto della Patagonia (Engelbrecht & Derbyshire, 2010). Nelle aree urbane, le principali fonti di PM sono l'utilizzo di combustibili in ambito domestico per il riscaldamento e la cucina, oltre al traffico veicolare. In particolare, la maggior parte delle emissioni di PM dovute a quest'ultimo provengono dagli scarichi dei motori diesel (Gozzi et al., 2017).

Nel report sulle emissioni registrate nell'Unione Europea nel 2020 (European Environment Agency, 2022), le sorgenti di emissione di PM primario sono state divise in 7 gruppi principali, che corrispondono ai settori che contribuiscono in maggior misura alle emissioni di contaminanti atmosferici in Europa: agricoltura, produzione e distribuzione di energia, industria manifatturiera ed estrattiva, trasporto (stradale e non), settore residenziale, commerciale e istituzionale e rifiuti (i.e., discariche, incenerimento dei rifiuti con recupero di calore e combustione dei rifiuti all'aperto).

Nel report (Figura 2.2) si evidenzia che la fonte principale di particolato, sia PM<sub>10</sub> che PM<sub>2,5</sub>, è stata il consumo energetico nel settore residenziale, commerciale e istituzionale, responsabile rispettivamente del 44% e del 58% delle emissioni. Anche l'industria manifatturiera ed estrattiva (rispettivamente 19% e 14%) e il settore dei trasporti su strada sono fonti significative di entrambi gli inquinanti (circa il 9% per entrambi i contaminanti), mentre l'agricoltura risulta una fonte rilevante principalmente di PM<sub>10</sub> (19%).



**Figura 2.2.** Contributo dei principali settori antropici alle emissioni di PM primario in Europea nel 2020.

Lo stesso report evidenzia che, dal 2005 al 2020, le emissioni di particolato PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub> sono diminuite rispettivamente del 30% e del 32%. Nonostante ciò, l'83% e il 96% della popolazione europea è ancora esposta rispettivamente a concentrazioni di PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub> sopra i limiti raccomandati dall'OMS. Tuttavia, quest'ultimo dato è influenzato dalla presenza di particolato di origine naturale. Le emissioni di questo particolato risultano impossibili da ridurre. Per questo motivo, le regioni meridionali dell'Unione Europea sono anche quelle più esposte, in quanto geograficamente più prossime al deserto del Sahara (European Environment Agency, 2024).

Una ulteriore classificazione delle fonti di particolato può essere effettuata distinguendo tra sorgenti convogliate e sorgenti diffuse. Mentre le emissioni provenienti da sorgenti convogliate possono essere stimate con precisione, la quantificazione delle emissioni da sorgenti diffuse risulta complessa e richiede la conoscenza approfondita di tutti i fenomeni coinvolti, delle caratteristiche dei materiali e delle condizioni ambientali.

#### 2.1.4.2 Emissioni da Sorgenti Diffuse

Le sorgenti diffuse (*fugitive dust sources*) possono essere di origine sia naturale sia antropica. Queste ultime possono essere ulteriormente suddivise in base alla loro genesi: quelle generate da attività industriali, associate al trasporto, allo stoccaggio e al trasferimento di materiali (materie prime, intermedie, secondarie e rifiuti) e quelle non industriali, generate dal passaggio di mezzi in parcheggi, su strade non pavimentate, su strade asfaltate, nell'ambito di attività di costruzione e lavori agricoli (WRAP, 2006).

Un'ulteriore classificazione può essere effettuata in base al meccanismo di formazione, distinguendo tra emissioni di polvere diffusa causate da azioni meccaniche, quali la polverizzazione e l'abrasione di materiali per mezzo dell'applicazione di forze meccaniche esercitate da ruote, lame e strumenti affini, ed emissioni di polvere diffusa causate dal vento, come l'erosione di superfici esposte al vento per effetto di correnti d'aria turbolente (U.S. EPA, 1995a).

Di particolare interesse sono le regioni caratterizzate da climi aridi e secchi, nelle quali le superfici soggette a disturbo possono andare incontro a un rilascio prolungato di polveri, a seguito dell'erosione eolica, che può protrarsi per diversi mesi, sino a quando non si stabilisce un periodo di maggiore umidità. I principali componenti del particolato emesso da queste sorgenti diffuse sono particelle di terreno e altri materiali cristallini o particelle asportate da materiali granulari o polverulenti stoccati o depositati in aree aperte (WRAP, 2006).

Al fine di garantire il mantenimento o il raggiungimento di uno stato di qualità dell'aria entro limiti di accettabilità (riconosciuti da standard internazionali e nazionali), occorre individuare efficaci politiche di contenimento delle emissioni, fondate sulla conoscenza approfondita delle dinamiche di formazione delle potenziali sorgenti di particolato e dei meccanismi di emissione in atmosfera.

Le misure adottate per il controllo delle emissioni da sorgenti diffuse includono tecniche quali la bagnatura superficiale, la stabilizzazione chimica, la riduzione della velocità di attrito del vento attraverso l'installazione di barriere frangivento e la copertura delle sorgenti. L'obiettivo della bagnatura è quello di facilitare l'agglomerazione delle particelle con altre particelle o gocce d'acqua, aumentando la loro coesione e rendendole di conseguenza non asportabili dal vento. Questo approccio di controllo delle emissioni è il più diffuso e, in linea generale, il meno oneroso, sebbene produca un effetto di durata limitata. In contrapposizione, l'impiego di agenti chimici assicura un abbattimento delle emissioni più perdurante, sebbene possa risultare dispendioso e potenzialmente avere impatti negativi sull'ambiente o sui materiali stoccati. Le barriere frangivento sono progettate allo scopo di ridurre la velocità del vento in prossimità delle superfici erodibili e trova pertanto comune applicazione nel caso di materiali stoccati in cumulo. La metodologia di controllo più efficace per la valutazione della concentrazione di particolato in ambiente è rappresentata dalla copertura completa delle fonti emissive, ma spesso risulta impraticabile da un punto di vista tecnico ed economico, anche in relazione alle dimensioni delle sorgenti.

Per valutare l'impatto delle sorgenti diffuse sulla qualità dell'aria, è necessario determinare i tassi di emissione, ovvero il rapporto tra la massa di sostanza inquinante emessa e l'unità di tempo. La loro determinazione è generalmente effettuata avvalendosi dei Fattori di Emissione ( $EF$ ) proposti dal documento AP42 dell'U.S. EPA, specificatamente nel Capitolo 13 del documento AP42 (*Miscellaneous sources*) (U.S. EPA, 2020). Questo capitolo contiene i Fattori di Emissione e le informazioni pertinenti alle categorie di sorgenti che differiscono significativamente dalle altre sorgenti stazionarie trattate nello stesso documento (sorgenti puntuali).

In linea generale, i fattori di emissione rappresentano lo strumento più adeguato, se non l'unico disponibile, per la stima delle emissioni, nonostante i loro limiti intrinseci. I dati provenienti dagli studi di emissione condotti in sito sono infatti in grado di fornire una rappresentazione accurata delle emissioni della sorgente testata. Tuttavia, è opportuno notare che tali dati non sono sempre disponibili e, quando reperibili, potrebbero non riflettere le specificità del fenomeno osservato (U.S. EPA, 1995b).

L'espressione generale utilizzata per valutare le emissioni da sorgenti diffuse è la seguente:

$$E = A \cdot EF \cdot \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (2.1)$$

in cui  $E$  è l'emissione di PM,  $A$  è il tasso di attività espressa in una unità di misura dell'attività rapportata a un intervallo di tempo di un giorno o di un anno,  $EF$  è il fattore di emissione, ovvero il rapporto tra la massa di sostanza inquinante emessa e l'unità di prodotto o servizio (massa o volume di materiale movimentato, distanza percorsa del mezzo semovente, ecc.), e  $ER$  è l'efficienza di rimozione delle emissioni, espressa in percentuale.

Per quanto riguarda più specificatamente l'erosione eolica (*industrial wind erosion*), nella maggior parte dei casi le emissioni dipendono dalla frequenza del disturbo della superficie erodibile, inteso come un'azione che determina l'esposizione di materiale fresco in superficie. Ogni volta che una superficie viene disturbata, il suo potenziale erodibile viene ripristinato in quanto avvengono sulla superficie preesistente azioni di rimescolamento del materiale superficiale o di aggiunta di particelle erodibili o di rimozione di elementi non erodibili. In assenza di queste azioni di disturbo, il materiale erodibile viene esportato in tempi ridotti e la sua disponibilità non viene ripristinata. Ciò comporta che la determinazione del fattore di

emissione deve essere eseguita separatamente per ciascuna area di superficie erodibile soggetta a differenti frequenze di disturbo.

Quelle appena descritte sono definite come superfici a potenziale erodibile limitato. Esiste infatti un'altra categoria di superfici, definite come superfici a potenziale erodibile illimitato. Queste ultime sono superfici caratterizzate da granulometrie fini e uniformi, dove la disponibilità di materiale erodibile è praticamente infinita rispetto alla capacità del vento di trasportarlo. Ciò implica che il vento rappresenta l'unico fattore limitante, piuttosto che la quantità di sedimenti disponibili.

## **2.2 Industrial Wind Erosion**

### **2.2.1 Gli Stockpiles**

Nelle industrie minerarie e metallurgiche vengono di norma utilizzati i piazzali esterni per creare aree di stoccaggio temporaneo (*stockpiles*) tra le fasi di estrazione, lavorazione e distribuzione (Figura 2.3).

Il ciclo produttivo si articola in estrazione del minerale grezzo, applicazione di tecniche di trattamento rimario, che permettono una migliore separazione del minerale di interesse da quello di minore valore economico (*ganga*), e successivo trattamento mineralurgico o idro-metallurgico, che consente l'arricchimento dei metalli di interesse.

La prima fase di trattamento, solitamente operata dalle stesse industrie minerarie che si occupano dell'estrazione, comprende le operazioni di frantumazione e macinazione del minerale, seguite da processi di concentrazione che sfruttano le diverse proprietà fisiche o chimiche dei minerali per separare più efficacemente quelli di interesse dalla *ganga*.

La seconda fase, generalmente svolta dalle industrie metallurgiche, utilizza tecniche sempre più elaborate e specifiche per estrarre i metalli dalla matrice mineralogica in cui si trovano.

Durante queste due fasi, si generano due categorie principali di materiali: un materiale di interesse (un concentrato di minerale dopo la prima fase o un concentrato di metallo dopo la seconda fase) e i residui di processo (sterili minerari e sterili mineralurgici, detti *tailings*). Questi ultimi sono costituiti dagli elementi separati durante la lavorazione e possono contenere

ancora tracce dei materiali utili e, in alcuni casi, dei reagenti chimici impiegati nei processi di concentrazione.

L'efficace gestione dei cumuli di materiali generati durante questi processi non è solo cruciale per l'efficienza operativa e la conservazione della qualità del materiale, ma anche per la minimizzazione degli impatti ambientali. I rischi ambientali ad essi associati sono dovuti all'elevata mobilità dei contaminanti nelle diverse matrici ambientali (aria, acqua e suolo), favorita dai processi di macinazione che riducono i materiali a granulometrie molto fini.

Tra gli impatti ambientali più significativi associati agli *stockpiles* e ai *tailings*, quelli derivanti dall'emissione di polveri sottili e composti tossici in atmosfera sono particolarmente rilevanti. In condizioni di clima arido e ventoso, le superfici erodibili di cumulo o bacini sterili possono subire un processo di erosione generato dall'azione del vento, con conseguente emissione di particolato e altri contaminanti nell'atmosfera. Tale fenomeno può portare al superamento dei limiti stabiliti dalle norme in materia ambientale, con potenziali gravi conseguenze negative per la salute umana e la biodiversità nelle aree adiacenti (Jia et al., 2014; Kon et al., 2007; McKenna Neuman et al., 2009).



**Figura 2.3.** Discarica fanghi rossi a Monteponi (Italia). In foto, sono rappresentati i fini asportati dalle superfici dall'azione erosiva del vento (ISPRA, 2014).

In questo contesto, la rilevanza delle emissioni diffuse associate alle infrastrutture di stoccaggio dei materiali minerali è stata ulteriormente evidenziata anche dalle più recenti politiche europee in materia di sostenibilità e approvvigionamento delle risorse. In particolare, il *Critical Raw Materials Act* della Commissione Europea (2023) sottolinea la necessità di garantire un approvvigionamento sicuro e resiliente delle materie prime critiche, promuovendo al contempo una gestione ambientalmente responsabile delle attività estrattive e dei rifiuti

minerari, con specifico riferimento alla riduzione degli impatti ambientali associati a discariche minerarie, *tailings* e aree di stoccaggio temporaneo. In tale quadro, la disponibilità di strumenti in grado di stimare in modo affidabile le emissioni di particolato da superfici granulari esposte all'azione del vento assume un ruolo centrale per supportare le attività di pianificazione, monitoraggio e mitigazione degli impatti ambientali nei siti industriali.

La quantificazione dell'emissione generata dall'azione del vento su cumuli e superfici esposte, specialmente nelle aree prive di vegetazione come quelle presenti nelle zone industriali, rappresenta una delle sfide più complesse nel campo della mitigazione degli impatti ambientali. L'entità dell'erosione eolica è determinata da vari fattori, tra cui l'estensione e l'orientamento delle superfici, la dimensione dei grani e l'umidità dei materiali depositati, nonché le condizioni anemologiche del territorio in esame. La conoscenza delle caratteristiche fisiche del vento e delle dinamiche che portano alla diffusione in atmosfera delle particelle collocate sulla superficie risulta dunque fondamentale per comprendere il fenomeno erosivo.

Nella produzione scientifica e tecnica, i fattori di emissione proposti hanno l'obiettivo di interpretare e rendere più accessibile la complessità delle principali leggi che governano il fenomeno emissivo, fornendo valori di riferimento utili per stimare la quantità di particolato emesso in atmosfera. Tuttavia, il meccanismo di erosione e l'emissione di particolato e la loro mutazione nello spazio e nel tempo sono influenzati da numerose variabili. Per questo motivo, spesso è necessario sviluppare modelli di emissione sito-specifici, in grado di tenere conto delle diverse caratteristiche e delle condizioni locali.

### **2.2.1.1 Erosione Eolica delle Superfici Granulari**

A causa dell'interazione tra il vento e la superficie terrestre, che esercita una forza di resistenza sull'aria in movimento, la velocità dell'aria diminuisce progressivamente man mano che ci si avvicina al suolo. Con l'aumentare dell'altezza rispetto al suolo, tale effetto diminuisce progressivamente fino a raggiungere una quota, denominata altezza dello strato limite dell'atmosfera, al di là della quale la velocità del vento rimane costante. L'atmosfera al di sopra di questo strato viene denominata atmosfera libera. Lo spessore dello strato limite varia da poche centinaia di metri a qualche chilometro, in funzione di diversi fattori, quali l'intensità del vento, la rugosità del suolo e l'angolo di latitudine.

Il processo fisico che porta al sollevamento di una particella solida da una superficie emittente è governato, oltre che dalla velocità del vento incidente, da diverse variabili che caratterizzano la particella, tra cui le dimensioni e la massa volumica.

Il vento esercita sulla superficie terrestre uno sforzo tangenziale  $u^*$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] (*wind shear stress*) che dipende dal profilo logaritmico della velocità del vento (Von Karman, 1931), descritto dall'equazione (2.2):

$$u(z) = \left(\frac{u^*}{k}\right) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.2)$$

in cui  $u$  è la velocità del vento [ $\text{m s}^{-1}$ ] a una determinata altezza  $z$  sopra la superficie [m],  $z_0$  è la rugosità della superficie [m], definita come altezza sul terreno alla quale la velocità del vento si annulla, corrispondente all'intercetta del profilo logaritmico con l'asse delle altezze, e  $k$  è la costante adimensionale di von Karman pari a 0,4.

La velocità d'attrito  $u^*$  può essere definita in funzione dello sforzo di taglio ( $\tau$ ) che il vento esercita sulla superficie esposta e della massa volumica dell'aria ( $\rho$ ) in corrispondenza della parete (Stull, 1988), come descritto dall'espressione (2.3):

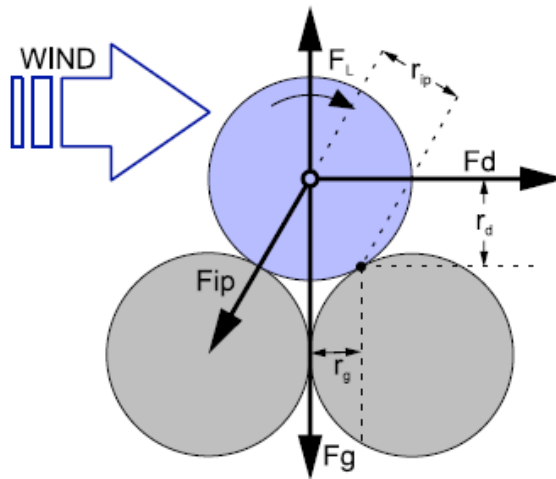
$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.3)$$

### 2.2.1.2 Velocità d'Attrito Limite

Affinché si inneschi il fenomeno erosivo, la forza esercitata dal vento deve essere tale da superare una determinata soglia, definita velocità di attrito limite o velocità di soglia  $u^*_t$  (*threshold friction velocity*), che dipende dalle caratteristiche delle particelle esposte al vento e rappresenta la capacità di una superficie erodibile di opporsi all'erosione eolica (Shao & Lu, 2000).

Una particella a riposo collocata sulla superficie esposta all'azione del vento è soggetta a tre forze (Figura 2.4):

- la forza gravitazionale  $F_g$ , che dipende dalla dimensione e dal peso specifico della particella;
- la forza generata dal trasferimento dell'energia del vento alla superficie erodibile, che è composta da una componente di trascinamento  $F_d$  e una di sollevamento  $F_L$ ;
- le forze interparticellari  $F_{ip}$ , composte dalle forze di van der Waals, dalle forze dell'acqua di adsorbimento e dalle forze elettrostatiche.



**Figura 2.4.** Schematizzazione delle forze agenti su una particella di sabbia al momento del sollevamento (Shao & Lu, 2000).

Il moto della particella viene innescato quando il momento delle forze esercitate dal vento su di essa rispetto al punto di appoggio  $P$  eguaglia il momento delle forze resistenti. Tale condizione è espressa dall'equazione (2.4):

$$r_d F_d = r_g (F_g - F_L) + r_{ip} F_{ip} \quad (2.4)$$

in cui  $r_d$ ,  $r_g$ , e  $r_{ip}$  sono i bracci dei momenti in Figura 2.4.

Una prima espressione della velocità d'attrito limite fu ottenuta nel 1941 semplificando il bilancio dei momenti considerando le sole forze  $F_d$  e  $F_g$  (Bagnold, 1941):

$$u_{*t} = A_{ft} \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g D_p} \quad (2.5)$$

in cui  $\rho_p$  e  $\rho_a$  sono rispettivamente la massa volumica della particella e dell'aria,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $D_p$  è il diametro della particella e  $A_{ft}$  è funzione delle forze interparticellari, delle forze di sospensione e del numero di Reynolds. Una serie di prove sperimentali condotte su campioni di sabbia sciolta ha condotto Bagnold all'identificazione di un valore dell' $A_{ft}$  pari a 0,10, attraverso l'esecuzione di un fitting dell'equazione (2.5) sui dati sperimentali.

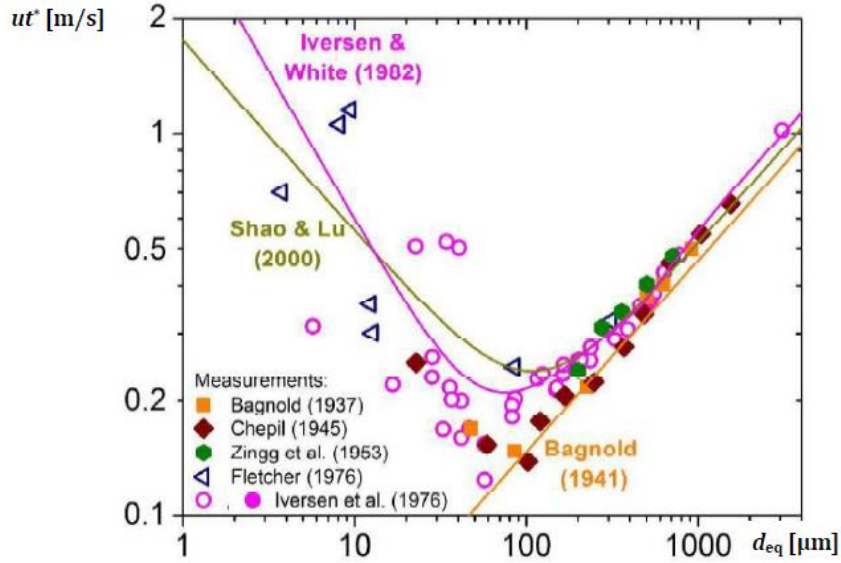
Successivamente, Iversen e White (1982) hanno sviluppato un'espressione per ricavare l' $u_{*t}$  che include le forze di interazione particellare  $F_{ip}$  e quelle di sollevamento  $F_L$ . Questo approccio ha consentito di ottenere una formula più completa e valida per intervalli di numero di Reynolds e di diametro delle particelle più estesi rispetto ai risultati precedenti. In questa

nuova formulazione il parametro  $A_{ft}$  veniva espresso mediante una serie di espressioni semi-empiriche valide per diversi intervalli del numero di Reynolds. In seguito Shao e Lu (2000), semplificando tali espressioni hanno proposto l'equazione (2.6):

$$u_{*t} = A_N \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g D_p + \frac{\gamma}{\rho_a D_p}} \quad (2.6)$$

in cui  $A_N$  è un coefficiente adimensionale uguale a circa 0,11 ed è funzione delle forze di sospensione e del numero di Reynolds, mentre  $\gamma$  è un parametro funzione delle forze interparticellari che per particelle di sabbia o polvere asciutta è compreso nell'intervallo  $1,65 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-4} \text{ N m}^{-1}$ .

Secondo queste relazioni, le prime particelle ad essere messe in movimento per effetto della forza di trascinamento del vento sono quelle aventi diametro equivalente dell'ordine di  $100 \mu\text{m}$  (Kok et al., 2012), in quanto le particelle più grandi sono difficilmente sollevabili a causa del loro peso, mentre quelle più piccole possiedono forze di adesione molto elevate. Ne consegue che la velocità di attrito limite assume un valore minimo intorno ai  $75\text{-}100 \mu\text{m}$  pari a circa  $0,2 \text{ m/s}$  per particelle con massa volumica pari a  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , come evidenziato nella Figura 2.5, in cui è riportata la relazione tra diametro equivalente e velocità d'attrito limite e che integra i risultati delle misure sperimentali (simboli) di vari autori (Bagnold, 1937; Chepil, 1945; Zingg, 1953; Fletcher, 1976b; Iversen et al., 1976) e le espressioni semi-empiriche (linee) citate precedentemente (Bagnold, 1941; Iversen & White, 1982; Shao & Lu, 2000).



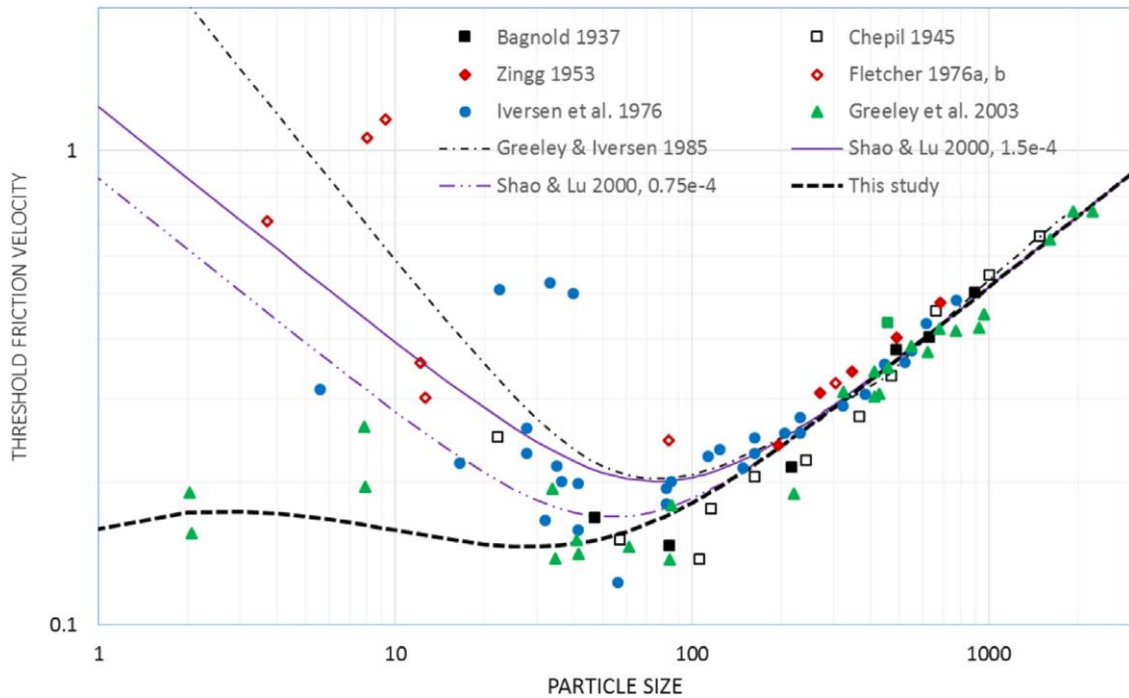
**Figura 2.5.** Dipendenza della velocità di attrito limite dal diametro equivalente delle particelle (Kok et al., 2012).

Recentemente, l'espressione (2.6) è stata riesaminata prendendo in considerazione la presenza di particelle caratterizzate da bassa coesione (Shao & Klose, 2016):

$$u_{*t} = A_N \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g D_p + \frac{\gamma}{\rho_a D_p} \exp \left[ -\sigma_0 \left( \frac{D_0}{D_p} \right)^b \right]} \quad (2.7)$$

in cui  $b$  è un coefficiente empirico,  $d_0$  è una dimensione scalare delle particelle e  $\sigma_0$  è la varianza della distribuzione log-normale delle forze di coesione a  $d_0$ . Gli autori evidenziano che impostando un valore  $d_0$  pari a 100  $\mu\text{m}$ , dimensione nella quale  $\sigma_0$  è circa uguale 1 (Zimon, 1982), il parametro  $b$  assume un valore uguale a circa 0,33.

La Figura 2.6 mostra i risultati di misure sperimentali (Bagnold, 1937; Chepil, 1945; Zingg, 1953; Fletcher, 1976a, 1976b; Iversen et al., 1976; Greeley et al., 2003) ed espressioni semi-empiriche (Greeley & Iversen, 1985; Shao & Lu, 2000; Shao & Klose, 2016) di vari autori. Si può osservare che con l'espressione rivisitata, dunque in presenza di bassa coesione, le particelle con un diametro equivalente inferiore a 100  $\mu\text{m}$  hanno velocità di attrito limite inferiori rispetto a quelle dedotte dagli studi precedenti. Secondo Shao (2008), ciò è attribuibile al fatto che la coesione tra le particelle è influenzata da numerosi fattori di natura casuale, rendendo perciò più appropriato considerare la velocità d'attrito limite come una variabile stocastica anziché come un valore costante.



**Figura 2.6.** Dipendenza della velocità di attrito limite dal diametro equivalente delle particelle (Shao & Klose, 2016).

Tutte le espressioni della velocità d’attrito limite riportate in questo capitolo sono state ottenute per condizioni ideali, ovvero particelle sferiche su superfici asciutte e spoglie. Tali espressioni si rivelano strumenti di fondamentale importanza negli studi concernenti l’erosione eolica, in quanto definiscono il valore minimo di  $u^*_t$  per un determinato tipo di suolo (Shao & Lu, 2000). Tuttavia, in condizioni reali, diversi fattori possono inibire l’erosione eolica, tra cui l’umidità del suolo, il contenuto di sale, le croste superficiali, la vegetazione e altri materiali non erodibili. Tali fattori inibenti vengono tenuti in considerazione mediante l’applicazione di espressioni correttive ai valori di  $u^*_t$  ottenuti per condizioni ideali, come quelle proposte da Fécan et al. (1999) per considerare l’umidità dei suoli e da Raupach et al. (1993) per considerare la presenza di materiali non erodibili (Kok et al., 2012).

Come si può osservare in tutti gli studi riportati, i valori più bassi di  $u^*_t$  sono associati a particelle aventi un diametro equivalente dell’ordine dei 100  $\mu\text{m}$ , che sono le prime a muoversi a causa delle forze esercitate dal vento.

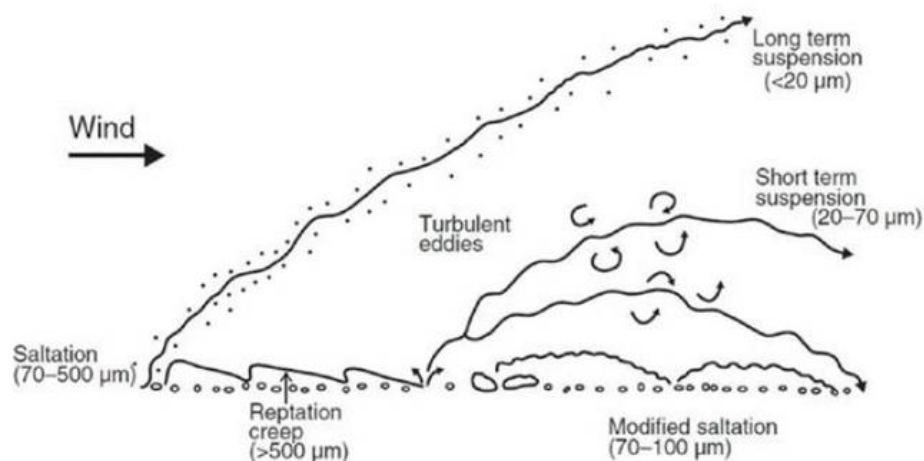
### 2.2.1.3 Meccanismi di Movimento

Le modalità di movimento delle particelle che si staccano dalla superficie erodibile (Figura 2.7) dipendono principalmente dal diametro aerodinamico. Quando la velocità del vento raggiunge le velocità di attrito limite più basse, vengono sollevate le particelle con diametro

equivalente tra i 70  $\mu\text{m}$  e i 500  $\mu\text{m}$ , esse raggiungono altezze di alcuni cm e, dopo una breve traiettoria, ricadono sulla superficie rimbalzando diverse volte poiché la forza di trascinamento non è sufficiente a superare il loro peso: queste traiettorie descrivono il meccanismo di trasporto denominato saltazione (*saltation*).

L'impatto con la superficie rompe i legami interparticellari rilasciando particelle di dimensioni inferiori che vengono trasportate verso l'alto dai vortici originati dalle fluttuazioni turbolente dell'aria, e rimangono sospese in aria a causa della loro leggerezza. Queste particelle possono essere trasportate dal vento a notevoli distanze dal punto di rilascio della particella, anche a migliaia di km di distanza: il movimento descritto da tali particelle è denominato sospensione (*suspension*), e può essere di breve termine/breve distanza ( $d_{eq} \approx 20 \mu\text{m} \div 70 \mu\text{m}$ ) o di lungo termine/lunga distanza ( $d_{eq} < 20 \mu\text{m}$ ).

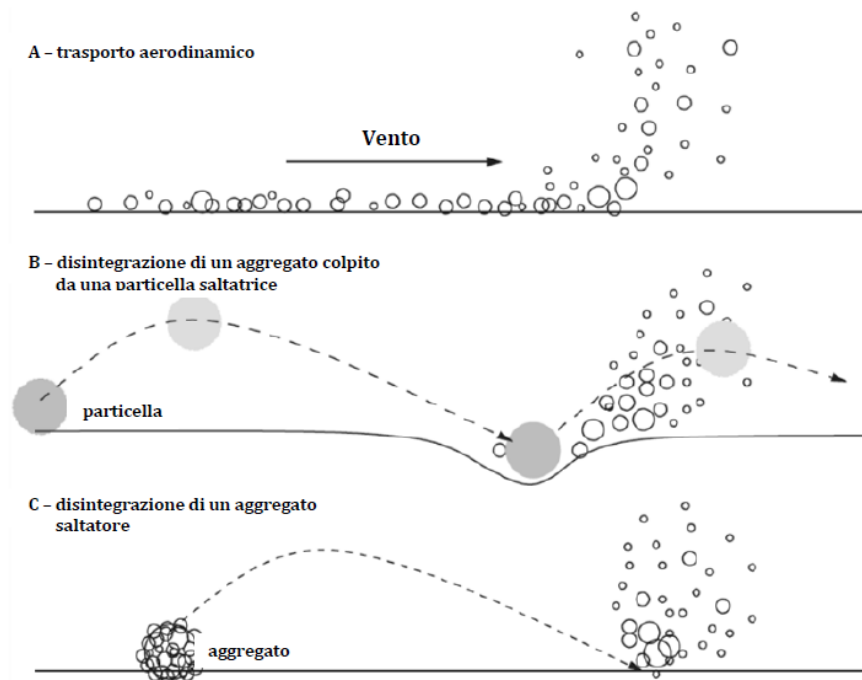
L'impatto delle particelle saltatrici può mobilitare anche i grani di dimensioni maggiori, con diametro superiore a 500  $\mu\text{m}$ , per effetto del trasferimento del momento sulle particelle che giacciono sulla superficie. Tuttavia, queste ultime non vengono trasportate in sospensione poiché l'accelerazione è limitata dall'inerzia, ma si muovono a contatto con la superficie generando il moto di rotolamento e strisciamento (*creeping*) o di reptazione (*reptation*). Nel primo caso le particelle rotolano o scivolano lungo la superficie, mentre nel secondo compiono un piccolo salto, in genere minore di 1 cm, per poi ricadere sulla superficie.



**Figura 2.7.** Rappresentazione grafica dei meccanismi di movimento per particelle di diverse dimensioni sotto l'azione del vento (Nickling & McKenna Neuman, 2009).

L'impatto delle particelle saltatrici può causare la disintegrazione di aggregati (*sandblasting*) (Alfaro et al., 1997; Dentoni et al., 2022; Pi et al., 2023; Shao, 2008) secondo

due modalità rappresentate in Figura 2.8: la disintegrazione degli aggregati saltatori o la disintegrazione di aggregati presenti sul suolo e colpiti dai saltatori (Kok et al., 2012; Shao, 2008; Wang et al., 2019). Queste due modalità possono manifestarsi contemporaneamente e causare dunque la disintegrazione sia degli aggregati saltatori sia di quelli presenti sul suolo.



**Figura 2.8.** Processi di emissione di polveri per: a) trasporto aerodinamico; b) disintegrazione di un aggregato di particelle colpito da una particella saltatrice; c) per disintegrazione di un aggregato saltatore (rivisitata da Shao (2008)).

L'innescò della saltazione si verifica quando viene superata la velocità di attrito limite. In tale condizione, le prime particelle che vengono sollevate dalla superficie vengono accelerate rapidamente dal vento in traiettorie balistiche. Dopo numerosi salti, queste particelle possono accumulare una quantità di moto sufficiente a distaccare dalla superficie altre particelle non coinvolte precedentemente nel moto. Tali particelle, appena espulse, vengono a loro volta accelerate dal vento e, quando impattano con la superficie, espellono a loro volta altre particelle, causando, nelle fasi iniziali della saltazione, un incremento esponenziale del flusso di saltatori in prossimità della superficie (flusso di saltazione orizzontale) (Anderson & Haff, 1991; Andreotti et al., 2010; Durán et al., 2011; McEwan & Willetts, 1993). Questo rapido aumento della concentrazione delle particelle provoca un incremento della resistenza dei saltatori sull'aria, determinando un conseguente rallentamento della velocità del vento. Questo processo comporta a sua volta una riduzione della velocità delle particelle saltatrici fino a raggiungere

uno stato di equilibrio dinamico, in cui la velocità delle particelle che interagiscono con la superficie del suolo risulta tale che, per ogni particella che impatta, ne viene rilasciata dalla superficie una sola (Ungar & Haff, 1987).

Si definisce saltazione in stato di equilibrio dinamico o stazionario (*Steady-state saltation*) la condizione in cui il flusso di saltazione orizzontale e la concentrazione delle particelle saltatrici sono approssimativamente costanti nel tempo e lungo lo sviluppo orizzontale del fenomeno. In tale condizione, ad ogni particella che colpisce la superficie, corrisponde una particella che se ne distacca, così che il flusso di polvere che finisce in sospensione risulta pressoché costante. Tuttavia, poiché la velocità del vento può subire notevoli fluttuazioni turbolente, ciò si verifica raramente su scale temporali superiori a pochi minuti o spesso anche pochi secondi, rendendo la saltazione altamente intermittente (Stout & Zobeck, 1997).

I modelli numerici e le misurazioni sul campo indicano che il flusso di saltazione orizzontale risponde alle variazioni della velocità del vento con una scala temporale caratteristica di un secondo (Anderson & Haff, 1988, 1991; Butterfield, 1991; Jackson & McCloskey, 1997; Ma & Zheng, 2011; McEwan & Willetts, 1991, 1993). Di conseguenza, sembra plausibile che la saltazione sia vicina allo stato stazionario nella maggior parte delle condizioni (Durán et al., 2011).

La distanza necessaria affinché la saltazione raggiunga lo stato stazionario è caratterizzata dalla lunghezza di saturazione (*saturation length*) (Sauermann et al., 2001). Il suo valore dipende da diversi elementi che caratterizzano la saltazione, come la lunghezza di un tipico salto della particella saltatrice, la lunghezza necessaria per accelerare una particella fino alla velocità del fluido e la lunghezza richiesta dalla resistenza dei saltatori per rallentare la velocità del vento (Andreotti et al., 2010). Come esaminato in maniera più approfondita in Durán et al. (2011), queste scale di lunghezza finite comportano che il fenomeno della saltazione richieda una distanza orizzontale compresa tra circa 1 m (Andreotti et al., 2010) e circa 10-20 m (Dong et al., 2004; Shao & Raupach, 1992) per saturarsi.

### **2.2.2 Parametri Influenti sul Fenomeno Erosivo**

Alla luce delle evidenze emerse dagli esperimenti che correlano la velocità d'attrito limite con la dimensione delle particelle coinvolte nel fenomeno erosivo, si evince che il sollevamento diretto di particelle fini richiede generalmente velocità del vento superiori rispetto alle velocità di soglia per la saltazione; di conseguenza, emerge che la saltazione è il fenomeno

che assume maggiore importanza nella generazione di polveri da superfici erodibili esposte al vento (Gillette et al., 1974; Loosmore & Hunt, 2000; Shao, Raupach, et al., 1993).

Una conoscenza approfondita dei parametri che influenzano il fenomeno della saltazione è fondamentale per comprendere le difficoltà nel quantificare l'emissione di polveri da superfici granulari, soprattutto in assenza della definizione del contesto sito-specifico e di un'analisi dettagliata delle proprietà dei materiali. Comprendere questi meccanismi costituisce un passo necessario per sviluppare formulazioni generali, basate su principi fisici, per la stima del flusso di polvere. In particolare, occorre rispondere a una serie di quesiti riguardanti la dinamica delle particelle nella saltazione e la conseguente generazione di un flusso verticale di polveri. Una migliore comprensione di tali processi potrebbe facilitare la parametrizzazione del flusso verticale di polvere in funzione della velocità del vento e delle condizioni del suolo, avvicinandosi così a una rappresentazione più accurata (Kok et al., 2012).

I numerosi parametri che esercitano un'influenza sul fenomeno erosivo possono incidere su uno o più degli stadi coinvolti nel processo di saltazione. Questi stadi comprendono:

- 1) l'innesco del fenomeno, ovvero il momento in cui le prime particelle vengono espulse dalla superficie e compiono un salto;
- 2) il flusso di saltazione allo stato stazionario, caratterizzato dalla quantità di saltatori coinvolti nel fenomeno erosivo;
- 3) la generazione di un flusso verticale di polveri, che si origina dall'impatto dei saltatori sugli aggregati presenti sulla superficie.

Un'analisi approfondita dei parametri influenti su ciascuno di questi stadi del verrà discussa nei paragrafi seguenti.

### **2.2.2.1 Parametri Influenti sull'Innesco della Saltazione**

L'innesco del fenomeno di saltazione è determinato dalla velocità d'attrito limite, la quale dipende principalmente da due fattori: la distribuzione granulometrica delle particelle, che influisce sulla forza gravitazionale  $F_g$ , e la coesione tra le particelle, che determina l'entità delle forze interparticellari  $F_{ip}$  (vedi sezione 2.2.1.2). Queste dipendenze fanno sì che la velocità d'attrito limite sia una caratteristica intrinseca di ciascun materiale.

La grandezza e la massa delle particelle sono fattori determinanti, poiché maggiore è uno di questi parametri, maggiore deve essere la forza di sollevamento generata dal vento affinché si verifichi il fenomeno. Pertanto, per il sollevamento di una particella di grandi

dimensioni aerodinamiche è richiesta una velocità del vento più elevata, con un conseguente incremento della velocità d'attrito limite del materiale. La presenza di una maggiore quantità di particelle di grandi dimensioni aerodinamiche può inoltre generare un effetto di "schermatura". In questo caso, le particelle più grossolane formano uno strato protettivo che riduce l'esposizione delle particelle più fini alle correnti d'aria, proteggendole dall'erosione.

La particella soggetta al sollevamento può sia presentarsi come particella elementare sia come aggregato. Nel secondo caso, la dimensione dell'aggregato è influenzata anche dalle forze coesive che si instaurano tra le particelle elementari che lo compongono. Infatti, in assenza di tali forze, l'aggregato non si genererebbe.

Nel contatto tra le particelle si verificano diversi tipi di forze coesive interparticellari, tra cui le forze di Van Der Waals, le forze di adsorbimento dell'acqua e le forze elettrostatiche (Castellanos, 2005). Tali forze sono influenzate dalle proprietà chimiche del materiale, nonché dalla dimensione delle particelle elementari (le particelle più fini presentano una densità maggiore di cariche elettriche nette) e dal contenuto d'acqua, oltre che dalla presenza di sali.

La presenza di umidità nel suolo può indurre forze interparticellari significative anche tra le particelle sciolte, specialmente nei terreni sabbiosi (Chepil, 1956; McKenna-Neuman & Nickling, 1989; Sherman et al., 1998). Per contenuti d'acqua bassi (inferiori a circa il 65%), queste forze interparticellari sono prodotte principalmente dal legame di strati d'acqua adsorbiti adiacenti (forze igroscopiche), mentre per contenuti d'acqua elevati (superiori a circa il 65%) ciò avviene principalmente attraverso la formazione di cunei d'acqua attorno ai punti di contatto (forze capillari) (Hillel, 1980; Nickling & McKenna Neuman, 2009; Ravi et al., 2006).

L'adsorbimento dell'acqua è governato dalle interazioni elettrostatiche della superficie minerale con le molecole polari dell'acqua. I terreni sabbiosi, infatti, presentano tipicamente una bassa densità di cariche elettriche nette, permettendo così un adsorbimento idrico notevolmente inferiore rispetto ai terreni argillosi (Hillel, 1980). Di conseguenza, nei terreni sabbiosi, si osserva la formazione di ponti d'acqua con un contenuto d'acqua relativamente basso, che generano forze capillari significative.

Le principali tecniche di contenimento delle polveri agiscono sulla generazione di elevate forze interparticellari che incrementano la velocità d'attrito limite (e.g., la bagnatura o l'applicazione di leganti chimici). Tali tecniche favoriscono inoltre la formazione di una crosta superficiale, caratterizzata da un'elevata coesione, che protegge il materiale sottostante dall'azione del vento.

Per descrivere l'aumento della velocità d'attrito limite dovuto alla presenza di umidità nel suolo, Fécan et al (1999) hanno proposto le seguenti espressioni empiriche:

$$\frac{u_{*wt}}{u_{*ft}} = 1 \quad w < w'$$

$$\frac{u_{*wt}}{u_{*ft}} = \sqrt{1 + 1,21(w - w')^{0,68}} \quad w > w' \quad (2.8)$$

in cui  $u_{*wt}$  e  $u_{*ft}$  sono rispettivamente le velocità d'attrito limite in presenza e in assenza di umidità del suolo,  $w$  è il contenuto volumetrico di acqua del suolo in percentuale e  $w'$  indica la frazione volumetrica di acqua che il suolo può assorbire prima che le forze capillari diventino significative a causa della presenza di argilla nel suolo. In base ai dati sperimentali ottenuti, Fécan et al. (1999) hanno sviluppato la seguente espressione per stimare  $w'$ :

$$w' = 0,17c_s + 0,0014c_s^2 \quad (2.9)$$

in cui  $c_s$  è il contenuto di argilla presente nel suolo in percentuale.

Nel corso degli anni, diversi altri autori (Bagnold, 1941; Duan et al., 2013; Gillette et al., 1980; Nickling & Ecclestone, 1981; Sharratt & Vaddella, 2014) hanno cercato di stabilire una correlazione tra la velocità d'attrito limite e uno o più dei numerosi parametri influenti, tra cui la dimensione media e il peso specifico delle particelle elementari, la distribuzione granulometrica degli aggregati, lo spessore della crosta superficiale, la rugosità della superficie, la concentrazione dei sali, il contenuto d'acqua e il contenuto di argilla. Tuttavia, la comprensione della dipendenza della velocità d'attrito limite da tutti i parametri influenti rimane ancora limitata.

### 2.2.2.2 Parametri Influenti sul Flusso di Saltazione

Il flusso di saltazione  $Q$ , determinato mediante l'integrazione verticale del flusso orizzontale dei saltatori, rappresenta il movimento totale della sabbia nella saltazione e pertanto rappresenta una misura fondamentale per gli studi sull'erosione eolica. Di conseguenza, sono stati dedicati numerosi sforzi alla formulazione di equazioni che prevedano efficacemente il flusso di saltazione.

Il primo ad aver formulato un'equazione per il flusso di saltazione è stato Bagnold (1941), il quale, attraverso studi empirici condotti sulla sabbia, ha espresso  $Q$  come:

$$Q = C_B \sqrt{\frac{D_p}{D_{250}}} \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \quad (2.10)$$

in cui  $C_B$  è una costante che varia tra 1,5 e 2,8 a seconda dall'uniformità della classe granulometrica della sabbia,  $D_p$  è il diametro dei saltatori,  $D_{250}$  è il diametro di riferimento di 250  $\mu\text{m}$ ,  $\rho_a$  è il peso specifico dell'aria,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $u_*$  è la velocità d'attrito.

In seguito Kawamura (1951) formulò la seguente espressione:

$$Q = C_K \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) \left(1 + \frac{u_{*t}}{u_*}\right) \quad (2.11)$$

in cui  $C_K$  è una costante adimensionale pari a 2,78 e  $u_{*t}$  è la velocità d'attrito limite. In seguito White (1979) determinò  $C_K$  pari a 2,61.

Altre formulazioni sono state proposte da Owen (1964):

$$Q = \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(0,25 + \frac{v_t}{3u_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) \quad (2.12)$$

in cui  $v_t$  è la velocità terminale di caduta di una particella; da Lettau e Lettau (1978):

$$Q = C_L \sqrt{\frac{D_p}{D_{250}}} \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) \quad (2.13)$$

in cui  $C_B$  è una costante pari a 6,7; da Ungar e Haff (1987):

$$Q = C_{UH} \cdot \rho_a \sqrt{\frac{D_p}{g}} u_*^2 \left(1 - \frac{u_{*sfc}^2}{u_*^2}\right) \quad (2.14)$$

in cui  $C_{HU}$  è una costante non determinata da Ungar e Haff e  $u_{*sfc}$  è la tensione di taglio sulla superficie; da Sorensen (Sørensen, 2004):

$$Q = \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) \left(\alpha + \gamma \frac{u_{*t}}{u_*} + \beta \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) \quad (2.15)$$

in cui  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  sono parametri che caratterizzano le dimensioni di un tipico salto di saltazione; e da Durán et al. (2011):

$$Q = C_{DK} \frac{\rho_a}{g} u_{*t} u_*^2 \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) \quad (2.16)$$

in cui  $C_{DK}$  assume un valore di circa 5.

Tutte le equazioni riportate dipendono dalla massa volumica dell'aria  $\rho_a$ , dalla velocità del vento  $u_*$  e dalla velocità d'attrito limite  $u_{*t}$ . Alcune formulazioni considerano ulteriori parametri, quali la dimensione delle particelle e la velocità terminale, sebbene la correlazione del flusso di saltazione a tali parametri non sia stata scientificamente validata.

### 2.2.2.3 Parametri Influenti sul Flusso Verticale di Polveri

Nel caso in cui le particelle non si dispongano in aggregati, è sufficiente che la velocità del vento superi la velocità d'attrito limite caratteristica delle particelle affinché si verifichi un flusso verticale di polveri. Pertanto, l'emissione risulta dipendente esclusivamente da quei parametri che incidono sulla forza gravitazionale delle particelle e sulla forza generata dal trasferimento dell'energia del vento alla superficie erodibile, ovvero il peso specifico e le dimensioni delle particelle, nonché la velocità del vento. Tuttavia, tale condizione non si verifica frequentemente in presenza di particelle di piccole dimensioni, caratteristica comune nei materiali granulari industriali, dove si osserva una tendenza a formare aggregati.

In presenza di aggregati, la quantità di polveri emesse da una superficie è determinata principalmente dal rilascio delle particelle elementari che costituiscono gli aggregati a seguito dell'impatto tra saltatori e superficie. Tale quantità dipende essenzialmente dalla forza che il saltatore applica al suolo, espressa come energia cinetica di impatto, e dalla forza che si oppone a tale impatto, ovvero la coesione degli aggregati.

L'energia d'impatto  $E_i$  di un singolo saltatore può essere calcolata tramite l'equazione:

$$E_i = \frac{1}{2} m_s v_i^2 \quad (2.17)$$

in cui dove  $m_s$  è la massa del saltatore e  $v_i$  è la velocità d'impatto del saltatore. La massa  $m_s$  dipende dal diametro e dalla massa volumica del saltatore.

Non è chiaro se la velocità di impatto sia influenzata dalla velocità del vento (Kok et al., 2012). La comunità scientifica è divisa riguardo a tale indicazione, con alcuni studi che supportano tale indicazione (Shao, Mctainsh, et al., 1993; Shao, Raupach, et al., 1993) e altri che sostengono l'indipendenza reciproca dei due parametri (Creyssels et al., 2009; Ho et al., 2011; Namikas, 2003; Rasmussen & Sørensen, 2008). Secondo Kok et al. (2012) è prevedibile che la velocità media delle particelle nella parte alta dello strato di saltazione aumenti con la velocità d'attrito; tuttavia, i profili verticali della velocità delle particelle devono convergere verso un valore comune vicino alla superficie pari a circa 1 m/s.

Kok (2010) ha fornito una formulazione per la stima della velocità d'impatto media su una distribuzione esponenziale. Per un dato saltatore, il valore medio della velocità d'impatto si ottiene con l'equazione (2.18):

$$V_i = \frac{(1-B)\sqrt{g_{eff}D_s}}{2a} - \frac{1}{2\gamma} + \sqrt{\frac{1}{4\gamma} + \left(\frac{1-B}{2a}\right)^2 g_{eff}D_s + \frac{(1+B)\sqrt{g_{eff}D_s}}{2a\gamma}} \quad (2.18)$$

in cui  $D_s$  è il diametro del saltatore,  $a$  è una costante adimensionale,  $B$  è la probabilità che un saltatore rimbalzi dopo aver colpito la superficie,  $\gamma$  è il parametro che scala il decadimento esponenziale della probabilità di rimbalzo di un saltatore con la velocità d'impatto e  $g_{eff}$  è l'accelerazione effettiva della particella, dovuta sia alla gravità che alla componente verticale delle forze coesive (Kok & Renno, 2006; Kok, 2010). Kok e Renno (2006) hanno suggerito un valore di  $a$  pari a 0.020,  $B$  pari a 0.96 e  $\gamma$  pari a  $1 \text{ s m}^{-1}$ . L'accelerazione effettiva delle particelle può essere espressa come:

$$g_{eff} = g + \frac{6\beta}{\pi\rho_p D_s^2} \quad (2.19)$$

in cui  $\rho_p$  è la massa volumica del saltatore e  $\beta$  è una costante di proporzionalità dimensionale che per i terreni asciutti è dell'ordine di  $10^{-4} \text{ N m}^{-1}$  (Shao & Lu, 2000). Kok e Renno (2006) hanno proposto un valore di  $\beta$  pari a  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ N m}^{-1}$ .

La forza che si oppone all'impatto, ovvero la coesione degli aggregati, è determinata da numerosi parametri. Proprietà del suolo quali il contenuto di argilla (i.e., la presenza di particelle fini più propense a generare aggregati), la composizione chimica del composto il materiale stoccato (i.e., composti chimici più sensibili a formare legami elettrostatici forti tra particelle rispetto ad altri) o la presenza di acqua (i.e., le forze di adsorbimento generate dall'acqua) sono solo alcuni dei parametri che determinano le forze di coesione degli aggregati.

A causa del numero elevato di parametri coinvolti, non sono ancora disponibili equazioni che correlano la coesione degli aggregati con la rottura degli aggregati a seguito di impatti derivanti da fenomeni di erosione eolica. In altri contesti di ricerca sono state sviluppate equazioni specifiche per determinati materiali, tra cui quelle fornite da Thornton et al. (1996) e da Deng e Davé (2017).

Nel loro studio, Thornton et al. (1996) analizzarono i risultati di simulazioni al computer dell'impatto di un array bidimensionale di particelle coesive contro una parete elastica. Per le simulazioni bidimensionali dell'impatto, sono stati generati agglomerati di 1000 particelle elementari. Le particelle elementari presentavano le seguenti caratteristiche: un raggio di  $100 \mu\text{m}$ , una densità di  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ , un modulo di Young pari a  $70 \text{ GPa}$  e un coefficiente di Poisson di  $0,3$ . Le forze di coesione interparticellare esaminate presentavano valori che variavano tra  $0,35$  e  $3,0 \text{ J m}^{-2}$ . Dai risultati delle simulazioni effettuate, gli autori hanno sviluppato l'espressione (2.20):

$$DR = \alpha \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (2.20)$$

in cui  $DR$  è il *Damage Ratio*, che rappresenta il rapporto tra il numero dei contatti tra le particelle elementari rotti a seguito dell'impatto e il numero totale di contatti esistenti prima della collisione,  $\alpha$  è un parametro che dipende dalla coesione,  $V$  è la velocità d'impatto e  $V_0$  rappresenta la velocità soglia di danneggiamento, ovvero la velocità al di sotto della quale non si verificano danni significativi. Gli autori forniscono le seguenti equazioni per stimare  $\alpha$  e  $V_0$ :

$$\alpha = 0,155 + 0,019 \gamma \quad (2.21)$$

$$V_0 = 0,0025 \exp(0,98 \gamma) \quad (2.22)$$

in cui  $\gamma$  è l'energia di superficie delle particelle.

In seguito, Kafui e Thornton (2000) definirono  $\alpha$  come una costante adimensionale pari a 0,35 e  $V_0$  secondo l'equazione:

$$V_0 = 0,17 \gamma^{1,5} \quad (2.23)$$

Deng e Davé (2017) studiarono la rottura degli agglomerati utilizzando il metodo degli elementi discreti (*Discrete Element Method* - DEM) per aggregati composti da particelle elementari con un diametro pari a 5  $\mu\text{m}$ , una densità di 2,0  $\text{g cm}^{-3}$ , un modulo di Young pari a 0,13 GPa e un coefficiente di Poisson pari a 0,3. L'espressione ottenuta per il *Damage Ratio* fu espressa in funzione della dimensione frattale, ovvero un parametro che descrive la capacità di un oggetto irregolare di occupare lo spazio, con valori che possono variare da 1 a 3, corrispondenti rispettivamente a una struttura a catena e ad aggregati sferici, secondo l'espressione:

$$DR = \beta \left( \frac{W_e}{D_f^2} \right)^\alpha \quad (2.24)$$

in cui  $D_f$  è la dimensione frattale e  $\alpha$  e  $\beta$  sono parametri che dipendono da  $W_e$ , ovvero il numero di Weber, che rappresenta il rapporto tra l'energia cinetica in ingresso e l'energia di coesione ed è espresso come:

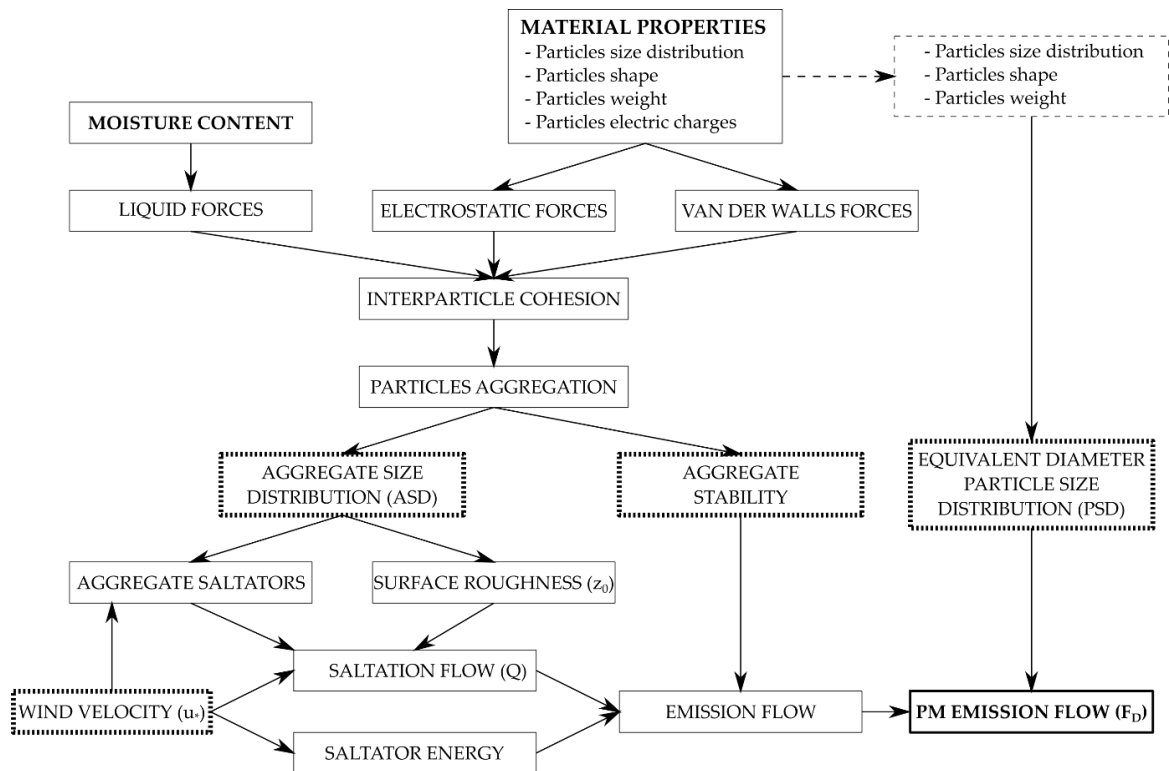
$$W_e = \frac{\rho R V^2}{\Gamma} \quad (2.25)$$

in cui  $\rho$  e  $R$  sono rispettivamente la massa volumica e il raggio delle particelle elementari,  $V$  è la velocità d'impatto e  $\Gamma$  è l'energia di superficie delle particelle. I parametri  $\alpha$  e  $\beta$  vengono espressi secondo le seguenti formulazioni:

$$\alpha = 0,82 - 0,06 W_e \quad (2.26)$$

$$\beta = 0,78 + 2,12 \exp(-W_e) \quad (2.27)$$

In Figura 2.9 è riportato un diagramma a blocchi che rappresenta schematicamente l'insieme dei parametri che influenzano il meccanismo di emissione di PM in atmosfera da un letto granulare esposto all'erosione eolica. Rispetto alla versione proposta da Dentoni et al. (2022), questo diagramma costituisce un'evoluzione e mira a evidenziare le relazioni tra i diversi parametri che influenzano il fenomeno erosivo.



**Figura 2.9.** Rappresentazione schematica dell'insieme dei parametri che influenzano il meccanismo di emissione di PM in atmosfera da un letto granulare esposto all'erosione eolica (rivisitata da dentoni et al. (2022)).

### 2.2.3 Quantificazione delle Emissioni di Particolato

Nonostante gli sforzi profusi per comprendere appieno la natura e i legami tra i vari parametri che influenzano l'erosione eolica, la comprensione della dipendenza del flusso verticale delle polveri dalle condizioni del vento e del suolo rimane ancora limitata. Nel corso degli anni sono state proposte diverse formulazioni e modelli per la quantificazione delle emissioni di particolato. Tuttavia le relazioni semi-empiriche che correlano i vari parametri sono spesso adattate per specifiche condizioni del suolo e mancano formulazioni generali e scientificamente valide che consentano di stimare l'emissione di polveri per un'ampia gamma di terreni (Kok et al., 2012).

### 2.2.3.1 Metodologia U.S. EPA

Nel capitolo 13 del documento AP42 (U.S. EPA, 2006), viene proposto un fattore di emissione per il calcolo del particolato emesso da superfici erodibili esposte al vento in aree industriali, assimilabili a materiali con un potenziale di erodibilità limitato. Il fattore di emissione è stato calibrato su sorgenti caratterizzate da superfici non omogenee caratterizzate dalla presenza di elementi non erodibili, ovvero con un diametro maggiore di 1 centimetro, costituite da cumuli di carbone e altri materiali industriali. Dalle prove di emissione condotte in situ è emerso che i tassi di emissione di particolato (PM) si riducevano in modo significativo durante un evento erosivo. Tale comportamento ha evidenziato che tutte le sorgenti di emissione esaminate presentavano un potenziale erodibile limitato. Durante le prove, le velocità di soglia del vento dei materiali esaminati hanno superato i 5 m/s a 15 cm dal suolo. Riferendo tali valori alle altimetrie delle stazioni di monitoraggio del vento impiegate negli Stati Uniti (7 metri) è stato ottenuto un valore di 10 m/s, superiore alle medie orarie di velocità registrate in buona parte della nazione americana.

Questi valori medi delle velocità del vento risultano inadeguati per promuovere l'erosione eolica delle superfici esaminate; nonostante ciò, le raffiche possono rapidamente rimuovere una quantità significativa di materiale erodibile. Di conseguenza, in considerazione dell'elevata sensibilità del potenziale erodibile a tale tipologia di correnti d'aria, la stima delle emissioni viene eseguita sulla base delle raffiche di vento più intense. Fra i parametri che descrivono le caratteristiche del vento, quello che meglio rappresenta l'intensità delle raffiche è la *fastest mile*, corrispondente alla velocità massima raggiunta dal vento nel percorrere un miglio. La durata della *fastest mile*, pari a circa due minuti, si adatta perfettamente con la durata dei processi erosivi, la cui emivita è compresa tra un minimo di uno e un massimo di quattro minuti. La velocità d'attrito  $u^*$ , corrispondente alla *fastest mile*  $u^+$  misurata ad una altezza di riferimento, può essere ottenuta mediante l'applicazione della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento, riportata nell'equazione (2.2). Applicando le opportune modifiche, si ottiene l'equazione (2.28):

$$u^* = \frac{k \cdot u_z^+}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.28)$$

in cui  $u_z^+$  è la *fastest mile* misurata all'altezza di riferimento  $z$  e  $z_0$  è la rugosità caratteristica del materiale in esame. Per le aree aperte, si assume una  $z_0$  pari a 0,5 cm.

Secondo la definizione fornita dall'U.S. EPA per le superfici a potenziale erodibile limitato, le emissioni causate dall'erosione eolica sono influenzate dalla frequenza con cui si manifestano i disturbi sulla superficie erodibile, ovvero dalle azioni che espongono materiale fresco alla superficie. Nelle aree industriali, la rigenerazione del potenziale erodibile dei materiali granulari stoccati si osserva durante l'aggiunta o la rimozione di materiali sulla superficie preesistente, eventi che si verificano con una certa regolarità, oppure dal rimescolamento del materiale superficiale fino a una profondità che supera le dimensioni degli elementi più grandi presenti sulla superficie.

Il fattore di emissione utilizzato per il calcolo delle emissioni generate dall'azione del vento su superfici di materiale erodibile e non erodibile soggette a disturbo, possono essere stimate tramite la seguente equazione (2.29):

$$EF = k \cdot \sum_{i=1}^N P_i \quad (2.29)$$

in cui  $EF$  è la massa di polvere generata in un anno per unità di superficie esposta [ $\text{g m}^{-2} \text{anno}^{-1}$ ],  $k$  è fattore adimensionale moltiplicativo che dipende dal diametro aerodinamico medio delle particelle emesse,  $N$  è il numero di disturbi in un anno e  $P_i$  è il potenziale erodibile, determinato in funzione della velocità del vento corrispondente al *fastest mile* rilevato o probabile nel periodo  $i$ -esimo tra due successivi disturbi [ $\text{g m}^{-2}$ ]. Il fattore adimensionale  $k$  assume i valori riportati in Tabella 2.2 in relazione al diametro aerodinamico medio  $d_a$ .

**Tabella 2.2.** Valori del fattore moltiplicativo  $k$  in funzione del diametro aerodinamico.

$d_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	< 30	< 15	< 10	< 2,5
$k$	1,0	0,6	0,5	0,075

In base all'equazione (2.29), emerge la necessità di aggiornare periodicamente il valore del fattore di emissione  $EF$  ogni qualvolta venga applicata un'azione di disturbo che ripristina il potenziale erodibile  $P$  del materiale granulare stoccato. Il potenziale erodibile  $i$ -esimo  $P_i$  per una superficie esposta asciutta può essere calcolato mediante l'applicazione dell'equazione:

$$P = 58 \cdot (u^* - u_t^*)^2 + 25 \cdot (u^* - u_t^*) \quad (2.30)$$

in cui  $u^*$  è la velocità d'attrito e  $u_t^*$  è la velocità d'attrito limite. Quando  $u^*$  risulta minore o uguale a  $u_t^*$  si assume un potenziale erodibile  $P$  pari a 0. Il valore della velocità d'attrito è ricavabile dalla equazione (2.28) in funzione della *fastest mile*. Il valore di  $u^+$  riscontrabile nel

periodo compreso tra due disturbi può essere ottenuto dall'elaborazione dei dati mensili della stazione meteorologica più vicina e rappresentativa del sito oggetto di studio, i quali riportano i valori effettivi delle maggiori velocità raggiunte dal vento giornalmente. A causa della forma non lineare dell'equazione (2.30), ogni evento erosivo deve essere trattato separatamente e il calcolo risultante è valido solo per periodi uguali o superiori al tempo che intercorre tra due disturbi successivi.

L'U.S. EPA (*Environmental Protection Agency*) propone una metodologia sperimentale per determinare la velocità d'attrito limite di una superficie priva di croste superficiali, effettuata mediante vagliatura a secco. L'analisi viene svolta mediante una preliminare setacciatura del materiale granulare attraverso un vaglio con maglia di 1 cm, al fine di rimuovere gli aggregati di maggiori dimensioni. Successivamente, il materiale viene sottoposto a un processo di vagliatura su una serie di setacci con maglie di dimensioni decrescenti (4, 2, 1, 0,50 e 0,25 mm). Il materiale, inizialmente collocato alla sommità della pila dei vagli, viene setacciato manualmente mediante un numero limitato di movimenti circolari (20 rotazioni). In seguito, il materiale residuo sulla superficie di ciascun vaglio viene pesato e viene determinata la moda della distribuzione granulometrica, associandola a una corrispondente velocità d'attrito limite deducibile dalla Tabella 2.3. Nel caso in cui la superficie presenti elementi di grandi dimensioni, tali da essere esclusi nel processo di vagliatura iniziale (i.e., vagliatura a 1 cm), è necessario considerare l'effetto di tali elementi, incrementando la velocità di attrito limite per il materiale oggetto di studio (Cowherd et al., 1988).

**Tabella 2.3.** Relazione tra  $u^*$ , e moda dell'analisi granulometrica eseguita secondo la procedura proposta dall'U.S. EPA (2006).

Apertura dei vagli [mm]	Moda [mm]	$u^*_t$ [ $m s^{-1}$ ]
4		
2	3	1
1	1,5	0,76
0,5	0,75	0,58
0,25	0,375	0,43

### 2.2.3.2 Metodologie Alternative

A partire dal presupposto che la saltazione costituisca il fenomeno di maggiore rilevanza nella generazione di polveri da superfici erodibili esposte al vento, diversi autori hanno ipotizzato la sussistenza di una relazione di proporzionalità fra il flusso verticale di polvere emesso da una superficie  $F_d$  e il flusso di saltazione  $Q_s$  (Gillette, 1977; Kok et al., 2012; Shao, Raupach, et al., 1993; Wang et al., 2019), esprimibile attraverso la seguente equazione:

$$F_d = \alpha Q_s \quad (2.31)$$

in cui  $\alpha$  [ $\text{m}^{-1}$ ] rappresenta l'efficienza del fenomeno di *sandblasting* (Gillette, 1977) ed è influenzato dalle forze di coesione che generano gli aggregati.

Sia il flusso verticale di polvere  $F_d$  che il flusso di saltazione  $Q_s$  aumentano in funzione della velocità d'attrito del vento  $u^*$ . Tuttavia, la dipendenza del parametro  $\alpha$  dalla velocità d'attrito non risulta univocamente definita. In diverse ricerche, è stato osservato che i flussi di PM e di saltazione sono stati influenzati dalla velocità del vento, con risultati pressoché sovrapponibili (Gillette, 1979; Gomes et al., 2003; Shao, Raupach, et al., 1993). In altri studi, la crescita di  $F_d$  in funzione della velocità del vento è risultata più rapida rispetto alla crescita di  $Q_s$  (Gillette & Walker, 1977; Nickling et al., 1999). Tale dissonanza nei risultati può essere attribuita, in linea preliminare, all'incremento di  $\alpha$  in funzione di  $u^*$ , per determinati tipi di suoli (Kok et al., 2012).

Partendo dall'ipotesi che la velocità del vento fosse un parametro indipendente, Shao et al. (1993) hanno formulato un'ipotesi secondo cui il flusso di polvere emesso da una superficie erodibile è funzione del cubo della velocità d'attrito, analizzando tale legame in maniera teorica. L'ipotesi formulata si fonda sul principio di proporzionalità tra  $F_d$  e  $Q_s$ , espresso dall'equazione (2.31), e sull'equazione di Owen (1964) per il flusso di saltazione:

$$Q_s = \frac{c_s \rho u_*^3}{g} \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) \quad (2.32)$$

in cui  $c_s$  è una costante adimensionale e  $\rho$  è la densità dell'aria.

Sulla base dell'ipotesi che il fenomeno emissivo fosse causato dal fenomeno del *sandblasting*, ovvero dall'impatto delle particelle sulla superficie, Shao et al. (1993) ipotizzarono una proporzionalità tra il flusso verticale di polvere e l'energia cinetica complessiva trasferita dalle particelle sulla superficie di contatto. Più specificatamente, il numero di particelle fini emesse dalla superficie a seguito di un impatto di una particella saltatrice ( $N$ ) è stato assunto proporzionale alla perdita di energia cinetica risultante dall'impatto

stesso ( $E_1-E_2$ ) rapportata all'energia di legame fra la particella e la superficie ( $\psi$ ) e moltiplicata per una costante di proporzionalità  $c_N$ , come descritto dall'equazione (2.33):

$$N = \frac{c_N(E_1-E_2)}{\psi} \quad (2.33)$$

La determinazione del flusso verticale di polvere emesso da una superficie ( $F_d$ ) è stata effettuata calcolando il prodotto tra il numero di particelle di polvere espulse dalla superficie  $N$  e la massa di una particella di polvere  $m_d$ , moltiplicato per il numero di impatti delle particelle saltatrici  $n$  [ $s^{-1} m^{-2}$ ]:

$$F_d = m_d N n \quad (2.34)$$

Il numero di impatti ( $n$ ) è stato stimato mediante le equazioni di Raupach (1991), mentre la perdita di energia cinetica ( $E_1-E_2$ ) è stata quantificata in funzione della velocità di espulsione  $U_0$  e di impatto di una particella saltatrice  $U_1$ . Di conseguenza, l'espressione (2.34) viene così esplicitata:

$$F_d = m_d \left( \frac{c_N m_s (U_1^2 - U_0^2)}{2\psi} \right) \left( \frac{\rho u_*^2 \left( 1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2} \right)}{m_s (U_1 - U_0)} \right) \quad (2.35)$$

Semplificando ulteriormente l'equazione (2.35) con l'equazione (2.32), l'espressione del flusso di polvere  $F_d$  ottenuta da Shao et al. (1993) diventa:

$$F_d = \frac{m_d g}{\psi} \left( \frac{c_N}{2} \right) \frac{(U_1 - U_0)}{u_*} Q_s = \alpha_1 u_*^3 \left[ 1 - \left( \frac{u_{*t}(d_s)}{u_*} \right)^2 \right] \quad (2.36)$$

A partire dall'equazione (2.36), Shao et al. (1996) svilupparono il *Wind Erosion Assessment Model (WEAM)*. Tale modello permetteva di stimare il flusso monodimensionale di particelle con diametro  $d_d$ , determinato mediante la saltazione di particelle di diametro  $d_s$ , mediante l'equazione:

$$\hat{F}(d_d, d_s) = \frac{\gamma c_b \rho m_d}{\psi} u_*^3 \left[ 1 - \left( \frac{u_{*t}(d_s)}{u_*} \right)^2 \right] \quad (2.37)$$

in cui  $\gamma$  rappresenta il rapporto adimensionale  $(U_0+U_1)/2u_*$ ,  $c_b$  esprime l'efficienza del bombardamento, ovvero l'efficienza con la quale l'energia cinetica viene convertita in emissione di polvere,  $\rho$  è la densità dell'aria,  $m_d$  è la massa delle particelle emesse,  $\psi$  è l'energia di legame fra le particelle e la superficie,  $u_*$  è la velocità d'attrito e  $u_{*t}$  è la velocità d'attrito limite.

Tuttavia, non sono attualmente disponibili informazioni esplicite e generali riguardo alle relazioni che correlano il flusso verticale di polvere con le dimensioni delle singole particelle, le forze interparticellari, la presenza di croste superficiali e il contenuto d'acqua della superficie emittente. Tali parametri vengono incorporati nelle equazioni sotto forma di valori di costanti e sito-specifici, determinati sperimentalmente per ciascun caso di studio in esame.

Al fine di facilitare lo sviluppo di formulazioni generali del flusso di polvere basate su principi fisici, è necessario rispondere a una serie di domande relative al movimento delle particelle del suolo nella saltazione e al conseguente flusso verticale di polvere. Una migliore comprensione di tali questioni potrebbe facilitare la parametrizzazione del flusso verticale di polvere in funzione della velocità del vento e delle condizioni del suolo, avvicinandosi così a una rappresentazione più accurata del flusso (Kok et al., 2012).

### **2.2.3.3 Metodologia Integrata**

Poiché l'emissione di polveri può essere generata da tipologie di terreno di natura molto variabile (Gillette, 1979; Nickling & Gillies, 1993), le parametrizzazioni esistenti non riescono a descrivere in modo completo la complessa dipendenza del flusso verticale di polveri dalle condizioni del vento e del suolo (Gillette, 1974; McKenna Neuman et al., 2009).

Per affrontare questa complessità, nell'ambito del progetto di Dottorato si è posto come obiettivo la definizione di una metodologia integrata capace di:

- (i) descrivere le dinamiche di emissione in contesti ambientali diversi;
- (ii) quantificare le emissioni di PM in maniera affidabile;
- (iii) tenere in considerazione sia l'insieme dei parametri influenti sia la loro variabilità nel tempo e nello spazio.

A tal fine, si è inteso integrare differenti tecniche che includono la caratterizzazione fisico-chimica dei materiali, l'esecuzione di misure sperimentali e le simulazioni numeriche computazionali (Figura 2.10).

La caratterizzazione fisico-chimica dei materiali potenzialmente soggetti a erosione consente di determinare i principali parametri influenti, necessari per alimentare i modelli numerici e statistici che verranno discussi nei capitoli successivi, dei differenti materiali granulari stoccati all'aperto. Le analisi di base, come la determinazione della distribuzione granulometrica o del contenuto d'acqua, possono essere condotte mediante metodiche di laboratorio standard a basso costo (e.g., analisi granulometrica degli aggregati tramite

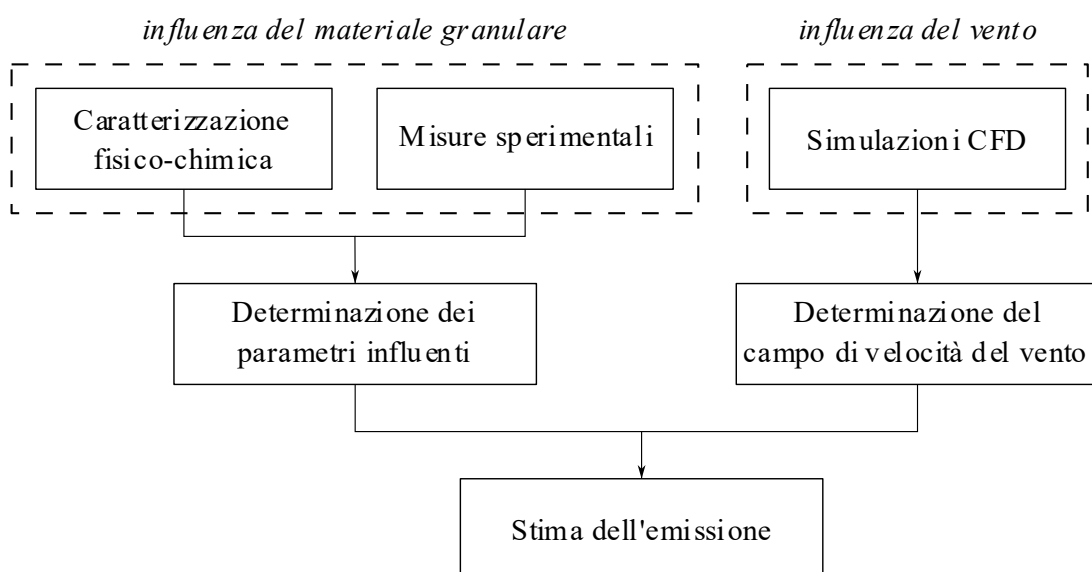
vagliatura, analisi della massa volumica tramite picnometro, etc.). Altri parametri, come la determinazione delle fasi mineralogiche coinvolte o delle forze di coesione degli aggregati, richiedono metodologie più sofisticate e dispendiose.

Particolare attenzione deve essere dedicata alla stima della velocità d'attrito limite poiché questo parametro non può essere determinato attraverso analisi di laboratorio convenzionali, ma richiede sperimentazioni controllate, come quelle condotte in gallerie del vento ambientali, che consentono di misurare direttamente la risposta dei materiali a diverse intensità di vento.

Le simulazioni numeriche CFD (*Computational Fluid Dynamics*) forniscono informazioni complementari, permettendo di modellare la distribuzione spaziale della velocità su scala locale e, di conseguenza, quella dei flussi emissivi.

L'approccio integrato consente dunque di combinare la variabilità spaziale dei materiali granulari con quella della velocità del vento, stimando così i flussi verticali di polveri generati da singoli eventi erosivi. L'aggregazione di questi flussi permette di quantificare l'emissione complessiva dell'intero sito industriale.

L'insieme di questi elementi costituisce il fondamento del futuro approccio integrato. Il risultato finale sarà un modello predittivo in grado di stimare le emissioni di polveri in diverse condizioni ambientali, fornendo una base solida per la valutazione degli impatti e per lo sviluppo di strategie di controllo e riduzione.



**Figura 2.10.** Rappresentazione schematica della metodologia integrata.

## **2.3 Apparecchiature Sperimentali per la Stima delle Emissioni di Polveri**

La stima diretta delle emissioni generate dall'erosione eolica può essere effettuata tramite strumentazioni capaci di simulare lo sforzo di taglio esercitato dal vento sulle superfici granulari. La strumentazione sperimentale maggiormente impiegata in questi studi è rappresentata dalle gallerie del vento ambientali. Tuttavia, negli ultimi decenni sono state sviluppate nuove apparecchiature alternative più compatte che permettono di svolgere agevolmente studi in situ, come il PI-SWERL (*Portable In-Situ Wind ERosion Lab*) (Etyemezian et al., 2007).

### **2.3.1 Gallerie del Vento Ambientali**

Le gallerie del vento ambientali a strato limite sviluppato sono progettate per ricreare lo Strato Limite Atmosferico (SLA), ovvero la porzione inferiore dell'atmosfera in cui il vento interagisce direttamente con la superficie terrestre. Una prima distinzione tra le diverse tipologie di gallerie del vento ambientali può essere effettuata in base alle caratteristiche di circolazione dell'aria: è possibile, infatti, differenziare le gallerie in gallerie a circuito chiuso e gallerie a circuito aperto. Le gallerie a circuito chiuso sono costituite da strutture ad anello all'interno delle quali l'aria viene riciclata senza essere scambiata con l'esterno. Le gallerie a circuito aperto, invece, sono dotate di un'entrata e un'uscita che permettono lo scambio d'aria con l'ambiente esterno e sono caratterizzate da una maggiore rumorosità del ventilatore e dalla perdita di energia dovuta alla liberazione nell'ambiente esterno del flusso d'aria accelerato.

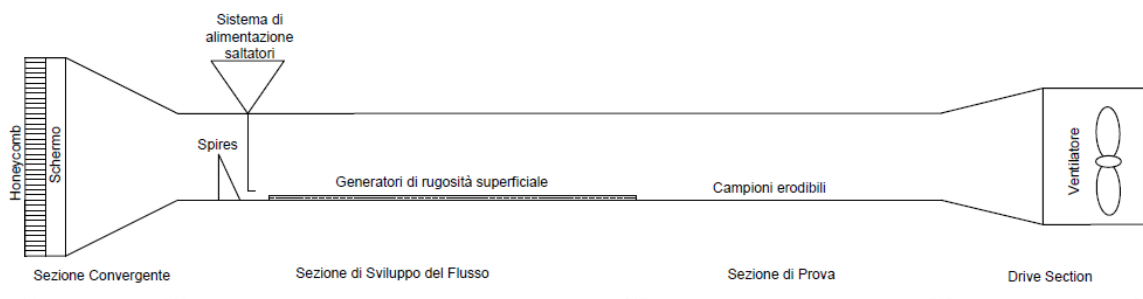
Le gallerie a circuito aperto comportano costi di costruzione inferiori, presentano schemi progettuali più semplici e necessitano di spazi ridotti. Al contrario, le gallerie a circuito chiuso necessitano di costi di gestione inferiori poiché l'energia cinetica non viene totalmente persa all'uscita del circuito e la potenza richiesta per il funzionamento dell'impianto è inferiore. Nonostante ciò, le gallerie a circuito aperto sono utilizzate soprattutto per lo studio delle emissioni di particolato generate dall'erosione eolica, in quanto non sono richieste velocità elevate e il risparmio energetico non giustifica la scelta di una galleria a circuito chiuso che, al contrario, richiede costi di investimento maggiori (Snyder, 1979).

In base al sistema di movimentazione dell'aria al loro interno, le gallerie a circuito aperto a strato limite sviluppato possono essere aspiranti o premententi. Diversi studi sull'erosione eolica sono stati condotti utilizzando gallerie aspiranti con ventilatore montato a valle della

sezione di prova, in quanto il flusso d'aria generato non è influenzato dal disturbo creato dalla rotazione del ventilatore e, di conseguenza, dai vortici prodotti dallo stesso. Inoltre, all'interno di una galleria aspirante si genera una pressione negativa che mantiene tutte le pareti e i coperchi rimovibili pressati contro le loro posizioni (Bagnold, 1941).

Una galleria del vento ambientale può essere suddivisa in quattro sezioni principali (Figura 2.11):

- Sezione convergente (*Convergence Section*), che promuove l'accelerazione e l'allineamento del flusso d'aria lungo le pareti della galleria, riducendo al contempo i livelli di turbolenza sulle medesime. All'ingresso possono essere presenti griglie di raddrizzamento del flusso (*honeycomb*) e schermi che hanno lo scopo di eliminare i disturbi generati dall'ambiente esterno;
- Sezione di sviluppo del flusso (*Flow Development Section*), che favorisce il completo sviluppo dello Strato Limite Atmosferico (SLA) a monte della sezione di prova. Per ottenere questo risultato, si impiegano spesso generatori di rugosità superficiale e generatori passivi di turbolenza (come gli *spires*), installati sul pavimento della sezione. Il tetto della sezione può essere dotato di sistemi di alimentazione di particelle saltatrici.
- Sezione di prova (*Test Section*), adibita all'alloggiamento dei campioni erodibili e dei tubi di campionamento dell'aria, connessi agli strumenti impiegati per misurare la velocità del vento e le concentrazioni di polveri. In tale sezione il flusso è completamente sviluppato.
- Sezione divergente (*Drive Section*), che accoglie il ventilatore aspirante che genera l'effetto erosivo del vento sulla superficie dei campioni inseriti in galleria.



**Figura 2.11.** Rappresentazione schematica di una galleria del vento a strato limite sviluppato (Pinna, 2021).

### 2.3.2 Pi-SWERL

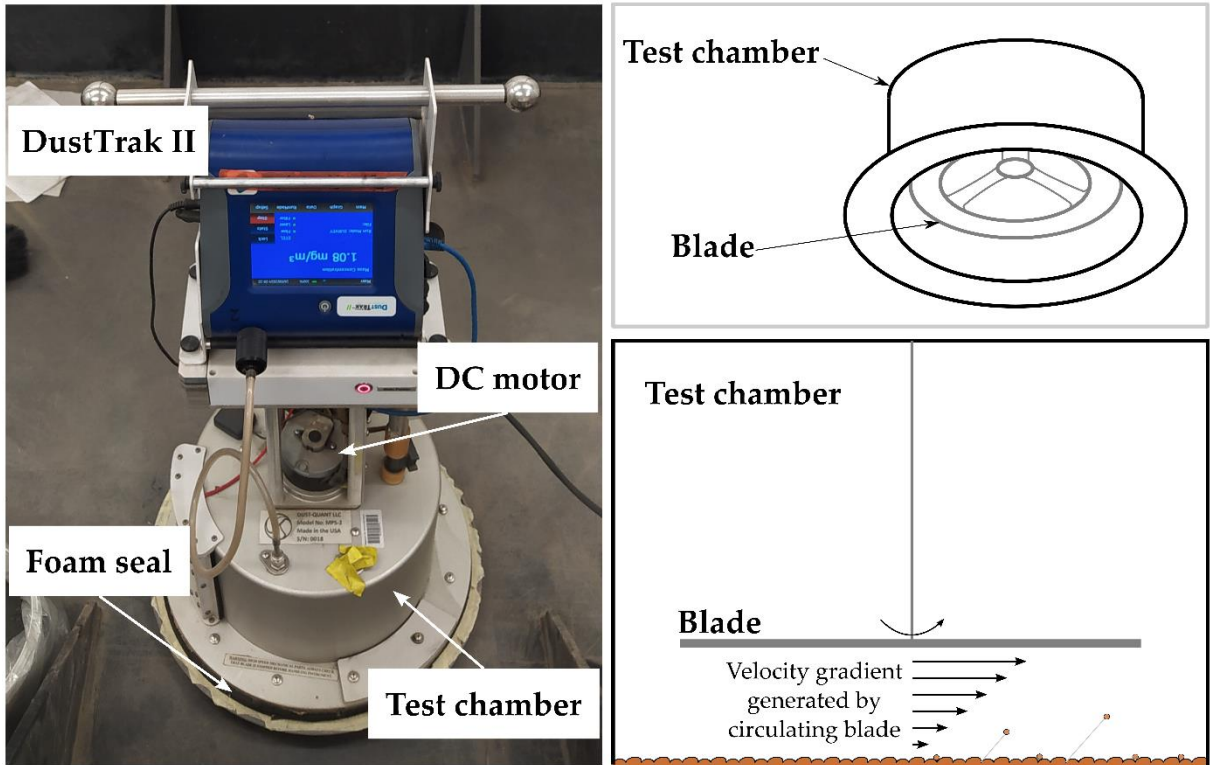
Il PI-SWERL (*Portable In-Situ Wind ERosion Lab*) è un dispositivo portatile che consente di effettuare test in situ, progettato per misurare le emissioni di particolato (PM) generate da un determinato sforzo di taglio (*shear stress*). A differenza delle gallerie del vento, non genera lo Strato Limite Atmosferico che caratterizza il profilo di velocità del vento, solamente lo sforzo tangenziale a cui sono sottoposte le superfici granulari durante l'azione eolica (Sweeney, 2022).

Il dispositivo è costituito da una camera cilindrica con fondo aperto (camera di prova, *test chamber*) che ospita una piastra circolare piatta (*blade*) posizionata parallelamente alla superficie del terreno a un'altezza di circa 5 cm. A seconda dei modelli, il diametro della camera cilindrica varia da 30 a 50 cm e l'altezza varia da 20 a 25 cm. Una guarnizione in schiuma lungo il bordo della camera di prova si adatta alla rugosità naturale della superficie garantendo una chiusura perfetta. Un motore (*DC motor*), controllato da computer, aziona la rotazione della piastra circolare, creando un gradiente di velocità tra la piastra e la superficie sottostante che simula lo sforzo di taglio che agisce sul terreno durante un evento erosivo eolico.

Il monitoraggio della concentrazione di PM è effettuato a intervalli di un secondo da un fotometro laser (*DustTrak*, sviluppato dalla TSI Incorporated), collegato alla camera di prova tramite campionamento attivo con portata di  $3 \text{ L min}^{-1}$ . Un sistema di ventilazione integrato garantisce il ricambio dell'aria all'interno della camera di prova, mediante l'immissione di aria pulita esterna e la rimozione della polvere emessa tramite un tubo di scarico.

Un'indicazione dei saltatori generati dall'evento erosivo è fornita da quattro *Optical Gate Sensors* (Etyemezian et al., 2017), ovvero dei sensori ottici per la rilevazione del passaggio delle particelle saltatrici, installati all'interno della camera di prova. Un'applicazione denominata *SwerlView*, installata su un dispositivo elettronico esterno collegato al PI-SWERL, consente di monitorare la concentrazione di particolato durante ogni test e di sincronizzare i sistemi di acquisizione dei dati, come la velocità di rotazione della piastra e le concentrazioni di polveri.

Il PI-SWERL e una schematizzazione del suo funzionamento sono raffigurati in Figura 2.12.



*Figura 2.12. Rappresentazione schematica del PI-SWERL (Lai et al., 2025).*

## 3 Materiali e Metodi

Il presente capitolo descrive nel dettaglio le attrezzature, i materiali e le procedure utilizzate per la conduzione del progetto di Dottorato.

Nel paragrafo 3.1 vengono descritti gli strumenti e le apparecchiature impiegate nello studio per l'acquisizione dei dati e l'esecuzione delle prove sperimentali. Questa sezione comprende sia strumenti per la misura diretta delle velocità del vento e delle concentrazioni di PM, sia apparecchiature di laboratorio, oltre a una descrizione del modello fisico-matematico di riferimento, dal quale è stato sviluppato il codice di simulazione numerica utilizzato nelle sperimentazioni

Il paragrafo 3.2 è dedicato ai materiali campionati e utilizzati durante le sperimentazioni, illustrandone le proprietà fisiche e granulometriche nella loro condizione originale (*tal quale*), ossia senza alcun trattamento preliminare.

Infine, nel paragrafo 3.3 vengono presentate le procedure sperimentali e computazionali adottate, descrivendo nel dettaglio le metodologie seguite per l'esecuzione delle prove e per l'elaborazione dei dati raccolti.

### 3.1 Strumentazioni e Attrezzature

#### 3.1.1 Anemometro a Tubo di Pitot

Uno degli strumenti impiegati nell'ambito della presente ricerca è l'anemometro a tubo di Pitot, modello HD350, illustrato in Figura 3.1. Questo strumento, connesso al tubo di Pitot mediante due tubi in silicone, è dotato di un manometro differenziale che consente la misura simultanea della temperatura, della pressione, della velocità e portata di una corrente d'aria.



*Figura 3.1. Anemometro a tubo di Pitot.*

Il tubo di Pitot è costituito da due prese di pressione, una disposta tangenzialmente alla corrente (presa totale) sull'estremità anteriore e l'altra disposta perpendicolarmente al flusso (presa statica) sul corpo del tubo. La differenza tra queste due pressioni, denominata pressione dinamica, è ottenibile dal manometro differenziale collegato tra le due prese e risulta proporzionale al quadrato del modulo della velocità macroscopica secondo la seguente equazione:

$$p_{tot} = p_{st} + \frac{1}{2}\rho|v|^2 \quad (3.1)$$

Attraverso la rielaborazione dell'equazione (3.1), è possibile determinare il valore della velocità tramite la seguente espressione:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{tot} - p_{st})}{\rho}} \quad (3.2)$$

### 3.1.2 DustTrak

Nell'ambito del Progetto di Ricerca, sono stati impiegati dei fotometri laser, denominati *DustTrak* (modello DRX 8533, raffigurato in Figura 3.2) per la misurazione delle concentrazioni di particolato atmosferico (PM). Tali dispositivi operano aspirando un flusso di aerosol pari a 3 L min<sup>-1</sup> e forniscono in tempo reale la concentrazione di PM, sfruttando il principio dello scattering ottico (*light scattering*).



**Figura 3.2.** Analizzatore di polvere DustTrak DRX 8533.

Il *DustTrak DRX 8533* è uno strumento multicanale, progettato per la determinazione simultanea delle concentrazioni delle principali frazioni dimensionali del particolato (PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>4</sub> o frazione respirabile, PM<sub>10</sub> e PM<sub>100</sub> o particolato totale), attraverso un sistema di segregazione dimensionale. Il suo funzionamento si basa sul convogliamento del flusso d'aria

in una camera ottica, generato da una pompa interna allo strumento stesso. All'interno della camera ottica una porzione del campione viene illuminata da raggio di luce laser di piccole dimensioni. Le particelle illuminate diffondono la luce in tutte le direzioni, provocando il fenomeno dello scattering (*light scattering*). Una parte di essa viene raccolta da una lente collocata a 90° rispetto sia al flusso che al raggio laser, e successivamente focalizzata su un fotorilevatore. Il segnale luminoso raccolto viene convertito in segnale elettrico, la cui ampiezza è proporzionale all'intensità della luce diffusa e, quindi, alla concentrazione in massa delle particelle presenti nell'aerosol.

Entrambi gli strumenti utilizzati nei test sperimentali sono stati sottoposti a calibrazione in fabbrica dal produttore TSI, utilizzando le polveri Arizona Road Dust, come stabilito dalla norma ISO 12103-1, A1 (2024).

### **3.1.3 Galleria del Vento DICAAR**

Presso il DICAAR (Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e Architettura dell'Università di Cagliari) sono stati condotti diversi studi utilizzando un primo modello di una galleria del vento ambientale, a circuito aperto e funzionante in aspirazione, per stimare il potenziale di emissione di PM delle materie prime granulari tipicamente stoccate negli impianti industriali e dei fanghi rossi smaltiti nei bacini di decantazione (ovvero discariche di residui di lavorazione mineralogica) (Dentoni et al., 2020, 2021, 2022). Recentemente, è stata progettata e realizzata una nuova galleria del vento, sempre a circuito aperto e funzionante in aspirazione, sulla base di un'approfondita review dei casi di studio correlabili trattati nella letteratura scientifica (Avecilla et al., 2016; McKenna Neuman et al., 2009; Panebianco et al., 2016; Roney & White, 2006; Sanderson et al., 2014; Wu et al., 2018).

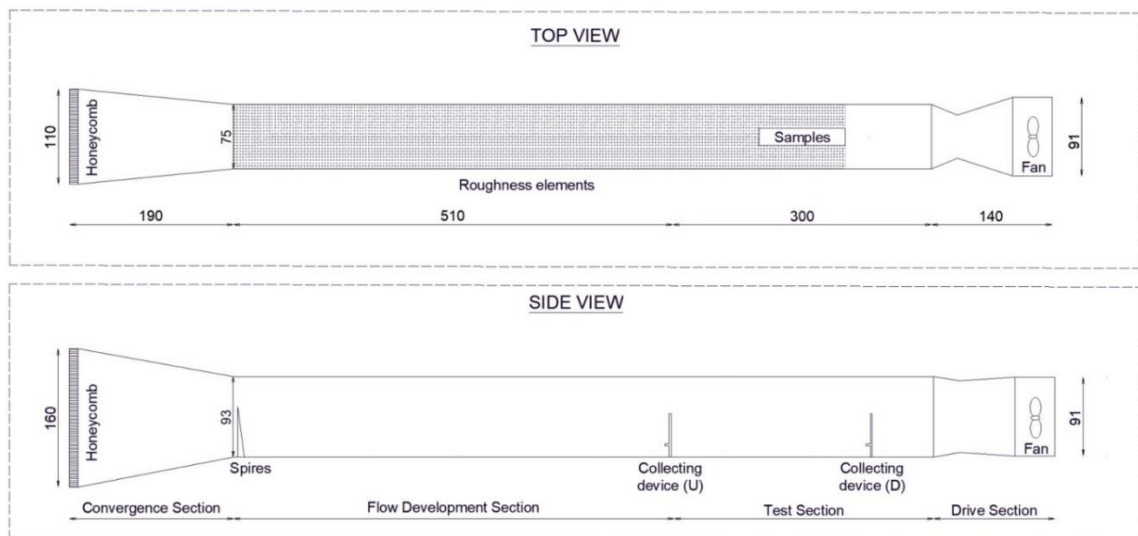
Rispetto alla versione precedente, la nuova galleria del vento (Figura 3.3) presenta dimensioni maggiori: l'altezza e la larghezza della sezione trasversale sono aumentate del 50% al fine di ridurre al minimo gli effetti di bordo delle pareti, in particolare a valle della sezione di prova, dove devono essere effettuate le misurazioni della concentrazione di PM. Le pareti sono costituite da pannelli di plexiglass trasparenti dello spessore di 1 cm, al fine di ottimizzare la gestione operativa della fase sperimentale (e.g., il corretto posizionamento delle sonde di misurazione e il successivo controllo e regolazione durante le prove sperimentali), nonché per consentire l'osservazione visiva dei processi di erosione ed emissione oggetto di studio. La trasparenza delle pareti, in particolare, consentirà la registrazione video di tali processi con telecamere ad alta velocità e la rilevazione del moto delle particelle nella fase di emissione

(tramite metodologie di *Particle Image Velocimetry*, PIV), attraverso l'acquisizione futura di nuove strumentazioni.



**Figura 3.3.** (a) Vista della galleria del vento DICAAR dalla sezione convergente (ingresso del flusso); (b) vista della galleria del vento DICAAR dalla sezione divergente (uscita del flusso) (Pinna et al., 2024).

La galleria è composta da quattro sezioni principali, ovvero una sezione di ingresso convergente (*Convergence Section*), una sezione di sviluppo del flusso (*Flow Development Section*), una sezione di prova (*Test Section*) e una sezione divergente (*Drive Section*), secondo lo schema indicato in Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Rappresentazione schematica della galleria del vento DICAAR (Pinna et al., 2024).

Il flusso d'aria entra nella galleria attraverso la sezione di ingresso convergente, dove la contrazione iniziale accelera e allinea il flusso, riducendo la turbolenza laterale. All'ingresso della sezione è installata una griglia a nido d'ape (*honeycomb*) alta 1,60 m e larga 1,10 m, la cui funzione è quella di rimuovere i disturbi causati dall'ambiente esterno e generare un profilo di velocità uniforme. La griglia a nido d'ape è costituita da piccoli tubi di raddrizzamento del flusso dalla sezione esagonale, con un rapporto lunghezza/diametro pari a 8. Le dimensioni dei tubi sono state determinate per dirigere il flusso parallelamente all'asse longitudinale della galleria e ridurre le variazioni dello stesso nelle direzioni perpendicolari, come riportato nelle indicazioni di Metha e Bradshaw (1979) e Mathew et al. (2005).

La sezione di lavoro della galleria, costituita dalla sezione di sviluppo del flusso e dalla sezione di prova, è lunga 8,10 m, alta 0,93 m e larga 0,75 m. La sezione di sviluppo del flusso, lunga 5,10 m, consente il pieno sviluppo del profilo dello Strato Limite Atmosferico in corrispondenza delle superfici erodibili studiate prima della sezione di prova. All'ingresso della sezione in esame, è presente un sistema composto da quattro generatori di turbolenza triangolari, noti come *spires*, progettati per accelerare la crescita dello Strato Limite Atmosferico all'interno della galleria. La superficie del fondo della sezione di sviluppo del flusso è stata rivestita con carta abrasiva, la cui rugosità superficiale è determinata in funzione della dimensione dei granuli abrasivi e risulta paragonabile a quella delle superfici in studio. I dettagli sulla simulazione dello Strato Limite Atmosferico sono riportati nel paragrafo 3.3.1.

La sezione di prova, destinata alla sperimentazione, accoglie i campioni erodibili attraverso un apposito alloggiamento lungo 1 m, profondo 0,02 m e largo 0,2 m, predisposto nel pavimento della galleria in maniera tale da costituire un continuo piano orizzontale tra la superficie del campione e il pavimento della galleria. L'alloggiamento consente di ospitare fino a due vassoi di alluminio contenenti il campione di materiale granulare da testare, aventi una lunghezza di 0,50 m, larghezza di 0,20 m e profondità 0,02 m. Lungo una delle pareti della sezione di prova sono presenti due sistemi di guide (a monte e a valle della postazione adibita all'inserimento dei campioni) collegati a due tubi di campionamento metallici con apertura perpendicolare al flusso d'aria in entrata. Durante i test sperimentali, la velocità del vento viene misurata, a monte dell'alloggiamento che accoglie i campioni granulari, mediante un anemometro a tubo di Pitot, mentre le concentrazioni di particolato vengono misurate, a monte e a valle dei campioni, mediante due analizzatori di polvere *DustTrak DRX 8533* collegati ai tubi di campionamento metallici tramite due tubi in silicone. I sistemi di guide sulla parete consentono lo spostamento, in altezza e in profondità, del tubo di Pitot e dei tubi di

campionamento dell'aria connessi ai due *DustTrak*, in modo tale da coprire tutti i punti di misurazione all'interno delle due sezioni trasversali su cui sono stati installati.

La *Drive Section*, costituita da un raccordo in lamiera zincata, garantisce una transizione dalla sezione rettangolare della sezione di prova alla sezione circolare di un ventilatore assiale da 5,5 kW, funzionante in aspirazione, posizionato all'estremità della galleria del vento. Il ventilatore installato a valle della sezione divergente è collegato ad un regolatore di velocità (inverter) che consente di variare la frequenza (giri al minuto) [Hz] del motore e, di conseguenza, la velocità del flusso d'aria all'interno della galleria.

### 3.1.3.1 Messa a Punto della Galleria

La messa a punto della galleria è determinata dalle caratteristiche del materiale da testare e richiede il corretto dimensionamento dei generatori passivi di turbolenza all'ingresso della galleria (ovvero gli *spires*) e la riproduzione della rugosità del materiale da testare sulla pavimentazione lungo la sezione di sviluppo del flusso. L'equazione (3.3) rappresenta la Legge di potenza (*Power Law*) che descrive il profilo del vento da simulare all'interno della sezione di prova:

$$\frac{u(z)}{u_\delta} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha \quad (3.3)$$

in cui dove  $u(z)$  è la velocità del vento a una data distanza  $z$  dal fondo del tunnel,  $\alpha$  è il coefficiente di attrito di Helmann, dipendente dalla rugosità delle superfici esposte e da diversi parametri climatici,  $\delta$  è lo spessore dello Strato Limite Atmosferico da simulare e  $u_\delta$  è la velocità del vento a una quota pari a  $\delta$ .

Una volta definiti i parametri target  $\alpha$  e  $\delta$ , è possibile determinare le dimensioni degli *spires* tramite l'applicazione delle equazioni (3.4) e (3.5) proposte da Irwin (1981):

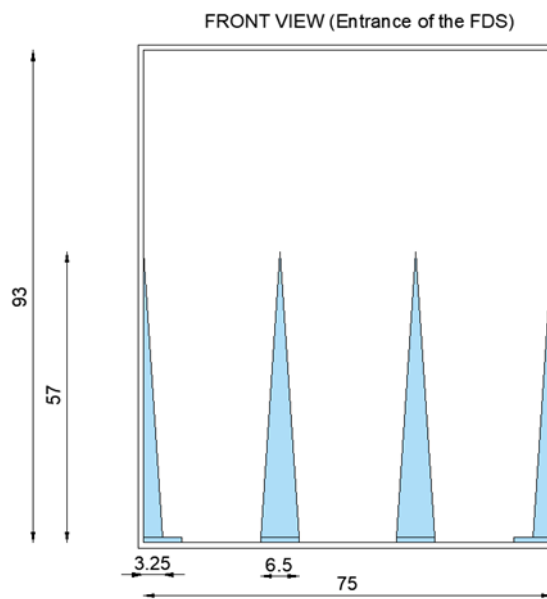
$$h = \frac{1,39\delta}{1 + \frac{\alpha}{2}} \quad (3.4)$$

$$\frac{b}{h} = 0,5 \left[ \frac{\psi\left(\frac{H}{\delta}\right)}{1 + \psi} \right] \left( 1 + \frac{\alpha}{2} \right) \quad (3.5)$$

dove  $h$  e  $b$  sono l'altezza e la base degli *spires*,  $\alpha$  e  $\delta$  sono i parametri del progetto,  $H$  è l'altezza della galleria del vento nella sezione di lavoro e  $\psi$  è una funzione di  $\alpha$  e  $\delta$  (Irwin, 1981).

Secondo Irwin, gli *spires* progettati generano lo Strato Limite Atmosferico desiderato a una distanza pari a 6 volte  $h$ . Tale distanza garantisce l'uniformità laterale del flusso quando gli *spires* sono distanziati a intervalli di  $h/2$ .

Il valore di progetto  $\delta$  è stato stabilito a 0,45 m, corrispondente a circa la metà dell'altezza della sezione di sviluppo del flusso, seguendo la procedura adottata da Al Nehari (2010). L'esponente di Hellman ( $\alpha$ ) è stato posto pari a 0,16, in conformità con le raccomandazioni della letteratura tecnica per i terreni aperti o indisturbati (Davenport, 1963; Kaltschmitt et al., 2007). Sulla base delle equazioni (3.4) e (3.5), all'ingresso della sezione di sviluppo del flusso sono stati installati tre *spires*, di cui uno suddiviso in due alle estremità, con altezza pari a 57 cm, base pari a 6,5 cm e distanziati di 25 cm, secondo lo schema riportato in Figura 3.5. In Tabella 3.1 sono sintetizzati i parametri progettuali e le dimensioni degli *spires* della galleria del vento DICAAR.



**Figura 3.5.** Rappresentazione schematica degli *spires* installati all'ingresso della sezione di sviluppo del flusso (Pinna et al., 2024).

**Tabella 3.1.** Parametri di progetto e dimensioni degli *spires* della galleria del vento DICAAR.

$\alpha$ [cm]	$\delta$ [cm]	$h_{spires}$ [cm]	$b_{spires}$ [cm]
0,16	45	57	6,5

A valle degli *spires*, il fondo della sezione di sviluppo del flusso è stato rivestito con carta vetrata grana P800.

### 3.1.4 PI-SWERL

Presso il *Department of Environmental Sciences* (Dipartimento di Scienze Ambientali) dell'Università di Basilea è stato condotto uno studio sperimentale volto alla caratterizzazione della velocità di soglia dei materiali campionati, utilizzando il PI-SWERL (*Portable In-Situ Wind Erosion Lab*). Per i test è stato impiegato il modello PI-SWERL MPS-2p, versione del novembre 2018. Le dimensioni della camera di prova sono pari a 30 cm di diametro e 20 cm di altezza.

L'entità della velocità di attrito dipende dalla velocità di rotazione della piastra (RPM), secondo l'equazione (3.6) proposta da Etyemezian et al. (2014):

$$u^* = C_1 \alpha^4 RPM^{\frac{C_2}{\alpha}} \quad (3.6)$$

in cui  $u^*$  è la velocità di attrito [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $C_1$  è una costante pari a 0,000683,  $C_2$  è una costante pari a 0,832 e  $\alpha$  è un parametro che dipende dalla rugosità superficiale. I valori assunti da  $\alpha$  sono basati su quattro categorie di rugosità descritte in dettaglio da Etyemezian et al. (2014) e riportati sinteticamente in Tabella 3.2.

**Tabella 3.2.** *Correlazione tra  $\alpha$  e rugosità del materiale (Etyemezian et al., 2014).*

Intervallo di valori di $\alpha$	Categoria di rugosità	Descrizione della gamma approssimativa di rugosità coperta.
$\alpha \geq 0,96$	A: usare 0,98	Carta abrasiva con grana compresa tra 60 e 120. Esempio: letto di lago prosciugato con crosta di limo-argilla con crepe minime e ghiaia sparsa (con meno del 2,5% della copertura)
$0,96 > \alpha \geq 0,92$	B: usare 0,94	Carta abrasiva con grana compresa tra 36 e 60. Esempio: tipico terreno desertico sabbioso-argilloso con meno del 5% di copertura di ghiaia.
$0,92 > \alpha \geq 0,88$	C: usare 0,90	Carta abrasiva con grana compresa tra 20 e 36. Esempio: terreno con meno del 10% di copertura di ghiaia; sabbia sciolta con piccole increspature (7 mm dalla cresta al fondo).
$0,88 > \alpha \geq 0,84$	D: usare 0,86	Carta abrasiva con grana compresa tra 12 e 20. Esempio: copertura di ghiaia compreso tra il 10% e il 35%.

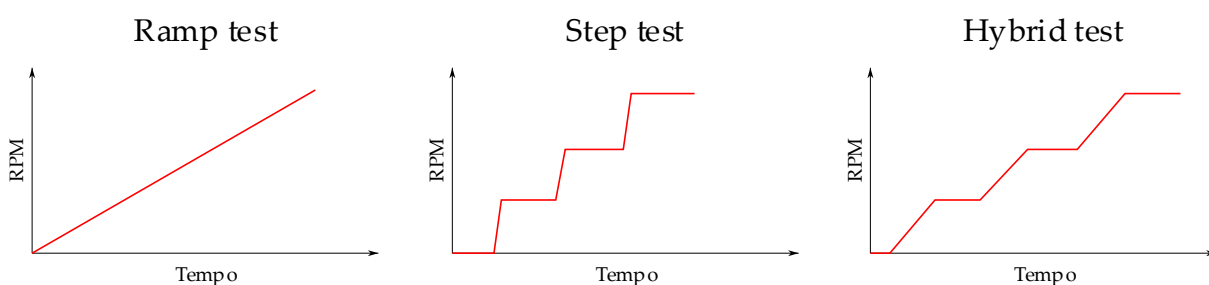
In base all'obiettivo sperimentale, con il PI-SWERL possono essere eseguite tre diverse tipologie di test: il *ramp test*, lo *step test* e l'*hybrid test*.

Nella prima tipologia, denominata *ramp test*, gli RPM della piastra aumentano gradualmente e in modo continuo e costante durante l'esperimento, determinando un graduale incremento della velocità di attrito sulla superficie. Tali test vengono impiegati per l'individuazione delle velocità d'attrito di innesco.

La seconda tipologia, denominata *step test*, è caratterizzata da una serie di aumenti repentini degli RPM, seguiti da una fase costante della velocità di rotazione della piastra rotante. Tali test vengono impiegati per misurare le emissioni di PM a velocità di attrito specifiche.

La terza tipologia, denominata *hybrid test*, combina entrambi gli elementi dei primi due approcci: una serie di aumenti graduali degli RPM sono seguiti da una fase a velocità costante della velocità di rotazione della piastra rotante. Questa categoria raggruppa i benefici delle prime due tipologie di test e consente di ottenere sia la velocità di attrito limite sia le emissioni corrispondenti

La Figura 3.6 riporta un esempio grafico delle tre tipologie di test. La linea rossa rappresenta l'andamento della velocità di rotazione della piastra in funzione del tempo, evidenziando le differenze tra *ramp test*, *step test* e *hybrid test*.



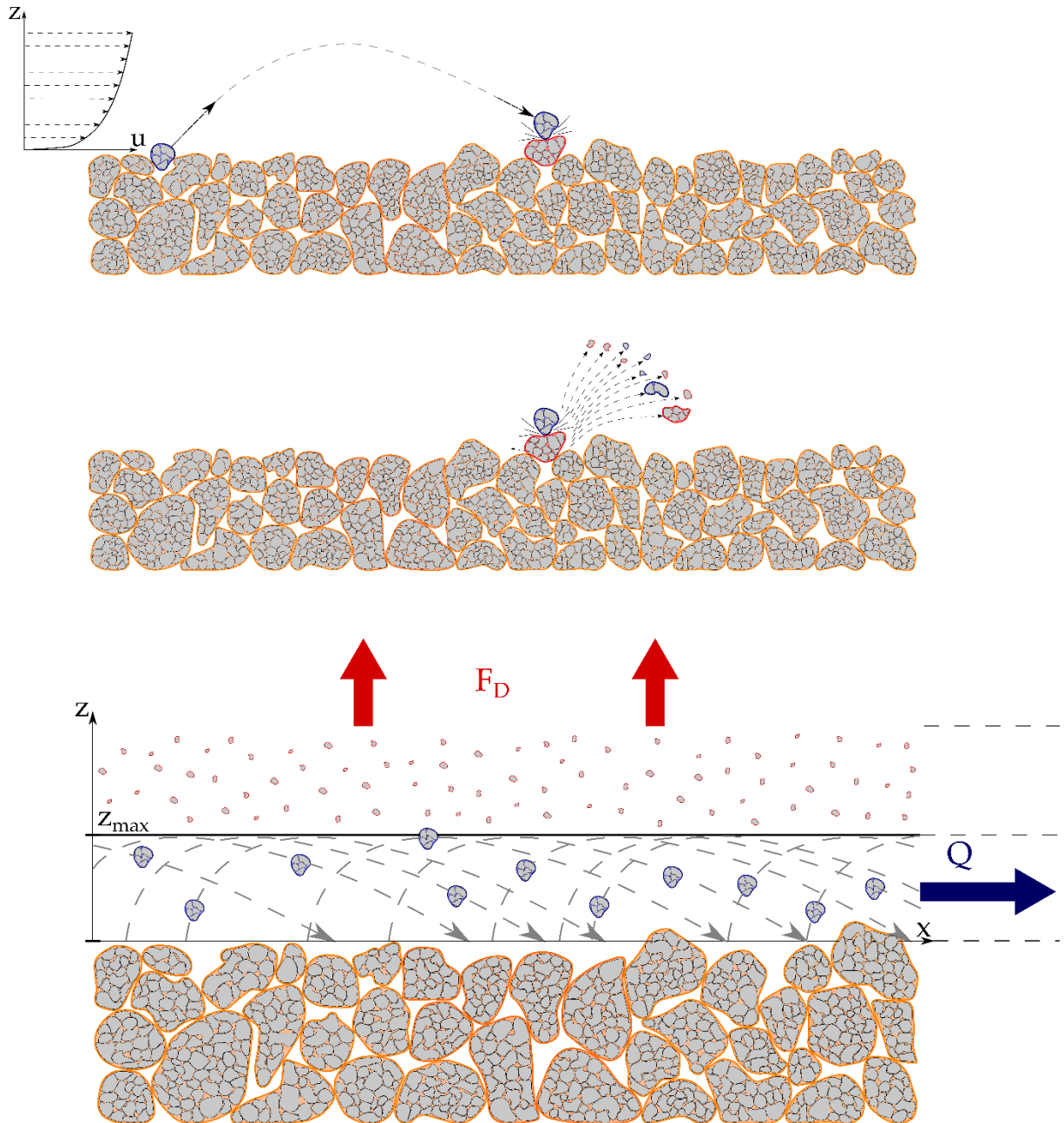
**Figura 3.6.** Esempi di *ramp test*, *step test* e *hybrid test*.

### **3.1.5 Modello Fisico-Matematico per la Stima dell'Emissione di PM da Superfici Granulari**

Recentemente, Dentoni et al. (2022) hanno sviluppato un modello fisico-matematico per stimare l'emissione di polvere da superfici di materiali granulari esposti all'erosione eolica. Il modello si fonda sul presupposto che l'emissione di polvere (particolato con diametro inferiore a 70  $\mu\text{m}$ ) sia innescata principalmente dal fenomeno del *sandblasting*, ovvero dal movimento

di rimbalzo (i.e., saltazione) di aggregati con diametro compreso tra 70 e 500  $\mu\text{m}$  (Bagnold, 1941; Kok et al., 2012; Shao, 2008; Sweeney, 2022). Durante l'impatto, i saltatori colpiscono la superficie granulare, causando la frammentazione sia del saltatore sia degli aggregati posti sulla superficie. Questo processo libera particelle più fini, denominate particelle elementari, che vengono disperse nell'atmosfera, generando dunque l'emissione di PM in atmosfera (Kok, 2011; Kun & Herrmann, 1999; Nickling & McKenna Neuman, 2009).

Per rappresentare questo fenomeno, è stato sviluppato un codice MATLAB basato su un approccio probabilistico di tipo Monte Carlo, che consente di simulare gli impatti tra aggregati per stimare l'emissione della frazione fine dell'aerosol di polvere ( $d < 20 \mu\text{m}$ ). Il codice, applicabile in condizioni di materiale asciutto (i.e., contenuto d'acqua nullo) e potenziale erodibile illimitato, simula il movimento di rimbalzo di un dato saltatore ( $S_i$ ) e il suo impatto con un aggregato posto sulla superficie ( $B_i$ ), nell'ipotesi che il processo di saltazione abbia raggiunto lo stato stazionario (i.e., ciascuna particella che impatta sulla superficie viene sostituita da una nuova particella che diventa parte del flusso di saltazione). In seguito, calcola la rottura parziale o completa di entrambi gli aggregati e il rilascio delle particelle elementari nell'aria (tutte le particelle o parte di esse, a seconda dell'energia d'impatto). La Figura 3.7 mostra schematicamente la sequenza di eventi, dal movimento e impatto del saltatore fino al rilascio delle particelle fini.



**Figura 3.7.** Rappresentazione schematica del modello di emissione sviluppato: impatto dei saltatori sulla superficie; rottura dell'aggregato saltatore e posto sulla superficie, con conseguente liberazione delle particelle elementari; sviluppo del flusso verticale di polveri (rivisitata da Dentoni et al. (2022)).

Per eseguire il codice, è necessario fornire i seguenti dati di input: la distribuzione granulometrica degli aggregati (ASD) del materiale che forma la superficie granulare; la distribuzione granulometrica dei saltatori (SSD), determinata sulla base dell'ASD del materiale e sulla relazione (2.6) riportata da Shao e Lu (2000); la distribuzione granulometrica delle particelle elementari (PSD) che costituiscono gli aggregati; la densità delle particelle elementari ( $\sigma_p$ ); l'energia di coesione delle particelle elementari ( $I$ ); la velocità d'attrito ( $u^*$ ); la velocità di soglia ( $u^*_t$ ).

Per una data velocità di attrito  $u^*$ , il flusso orizzontale di polveri  $Q$  viene calcolato con l'equazione (2.11), utilizzando una costante  $C_K$  pari a 2,61 (White, 1979).

Al saltatore  $S_i$  e all'aggregato posto sulla superficie  $B_i$  viene assimilata una forma sferica con diametri  $D_{S_i}$  e  $D_{B_i}$ , estratti casualmente rispettivamente dalla distribuzione granulometrica dei saltatori (SSD) e dalla distribuzione granulometrica degli aggregati (ASD). Le particelle elementari che costituiscono gli aggregati  $S_i$  e  $B_i$  vengono estratte separatamente dalla distribuzione granulometrica delle particelle elementari (PSD), in quantità tale da eguagliare la massa complessiva del saltatore ( $M_{S_i}$ ) e dell'aggregato posto sulla superficie ( $M_{B_i}$ ).

La quantità di particelle rilasciate dipende dall'energia di impatto descritta dall'equazione (2.17) e dalla coesione degli aggregati (paragrafo 2.2.2.3). La velocità  $V_i$  con cui il saltatore impatta l'aggregato  $B_i$  viene calcolata mediante l'equazione (2.18). Il numero e la massa delle particelle elementari rilasciate dall'impatto di un singolo saltatore  $MPM_i$  vengono valutati mediante il *Damage Ratio* (DR), descritto dalle equazioni (2.20), nella versione aggiornata da Kafui e Thornton (2000), o (2.24), ipotizzando che il rapporto tra il numero dei contatti tra le particelle elementari rotti a seguito dell'impatto e il numero totale di contatti esistenti prima della collisione corrisponda al rapporto tra il numero delle particelle elementari rilasciate a seguito dell'impatto e il numero totale di particelle costituenti l'aggregato.

La simulazione descritta viene ripetuta per un numero di saltatori corrispondente alla massa totale del flusso di saltazione  $Q$ . La somma delle masse  $MPM_i$  fornisce la massa complessiva di particelle emesse ( $MPM$ ) dalla superficie granulare esposta all'azione del vento. Infine, il flusso verticale di polvere  $F_D$  viene calcolato secondo l'equazione (3.7):

$$F_D = MPM \frac{z_{max}}{l_{salt}} \quad (3.7)$$

in cui  $z_{max}$  rappresenta l'altezza massima raggiunta dal flusso dei saltatori  $Q$  e  $l_{salt}$  indica la lunghezza media della traiettoria dei saltatori. Diversi studi indicano un valore del rapporto tra  $z_{max}$  e  $l_{salt}$  dell'ordine di  $1 \cdot 10^{-1}$  (Ho et al., 2014; Liu et al., 2021; Valance et al., 2015).

Il diagramma riportato Figura 3.8 riassume in maniera schematica il ciclo di calcolo descritto precedentemente.

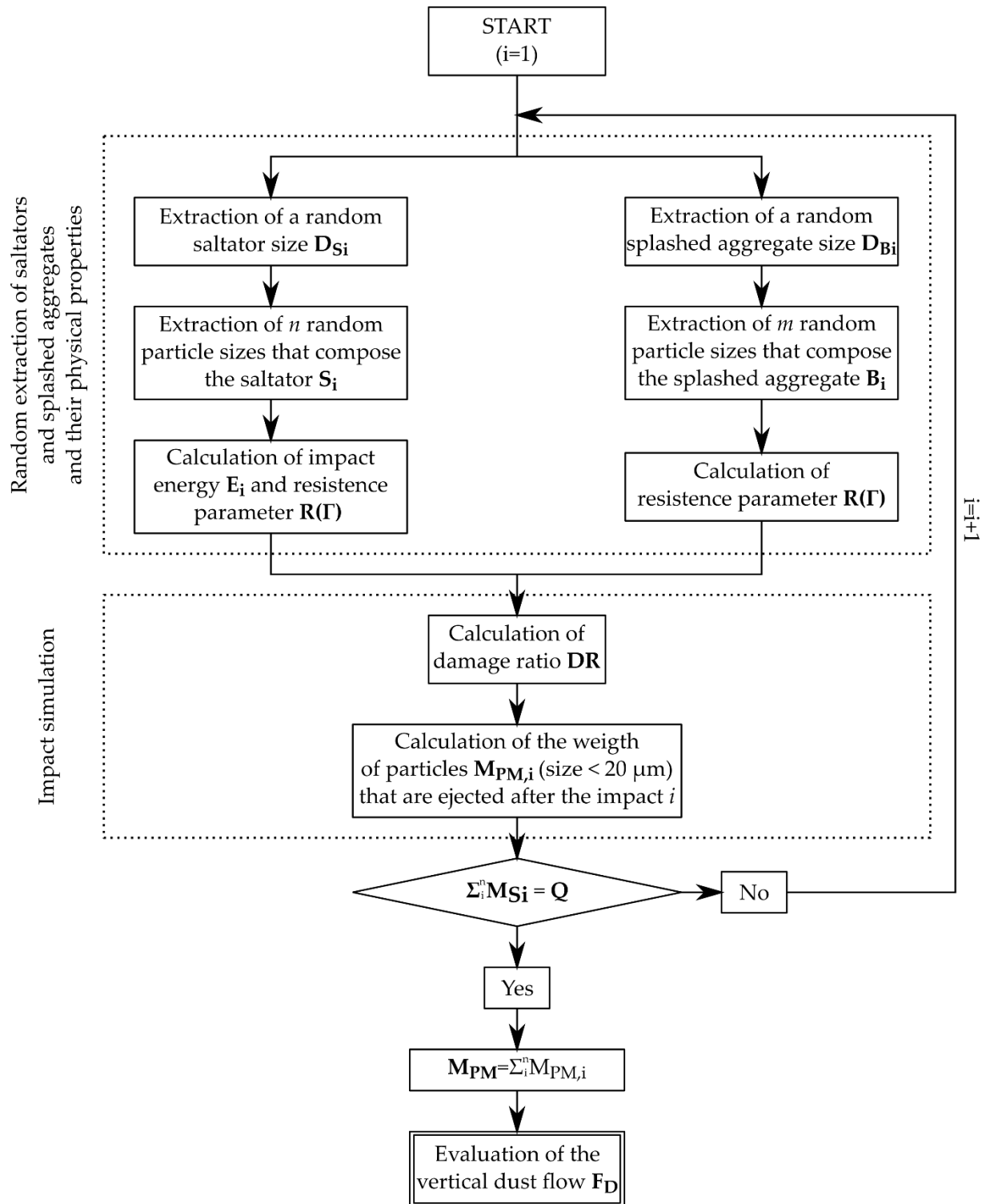


Figura 3.8. Rappresentazione schematica del ciclo di calcolo (Dentoni et al., 2022).

## 3.2 Campioni Granulari e Caratterizzazione Tal Quale

Per i test sperimentali sono stati campionati nove materiali provenienti da *stockpiles* situati in un impianto metallurgico in Sardegna (Italia). I campioni includono tre concentrati di

solfo di piombo o galena (MS, PN e PR), due concentrati di solfuri di zinco o blenda (PR e RD), due solfati misti composti prevalentemente da solfati di piombo e argento (AD e BD), un campione di ossidi misti composti prevalentemente da zinco (WL) e uno di gesso (GP). Prima della procedura di test sperimentale, per ogni materiale è stata effettuata la caratterizzazione del contenuto d'acqua, del peso specifico degli aggregati, della distribuzione granulometrica delle particelle (*Particle Size Distribution* - PSD) e della distribuzione granulometrica degli aggregati (*Aggregate Size Distribution* - ASD).

Il contenuto d'acqua è stato determinato seguendo le direttive dell'Australian Standard AS 1289.2.1.1 (AS, 2016) che prevede l'asciugatura del materiale in stufa a 105 °C per un tempo minimo di 24 ore. Per il gesso GP, invece, in conformità con la norma ASTM C471M-13 (ASTM, 2025), il campione è stato essiccato a 45 °C per 24 ore. Il livello di umidità dei materiali è stato determinato calcolando il rapporto percentuale tra la massa d'acqua evaporata nel forno ( $m_w$ ) e la massa del materiale essiccato ( $m_d$ ), utilizzando l'equazione (3.8):

$$w = m_w/m_d = \frac{m_u - m_d}{m_d} \quad (3.8)$$

in cui  $m_u$  è la massa iniziale del campione.

Al termine dell'asciugatura di 24 ore, la massa del campione essiccato è stata determinata sottoponendolo a ulteriori fasi di essiccazione della durata di un'ora ciascuna, fino a quando la differenza tra le ultime due pesate effettuate è risultata inferiore allo 0,1% della massa iniziale del campione.

Il peso specifico è stato misurato secondo la direttiva ASTM D854-23 (ASTM, 2023), utilizzando il metodo del picnometro. L'analisi è stata eseguita su materiale essiccato in forno, con dimensioni comprese tra 100 e 75  $\mu\text{m}$ , al fine di correlare il peso specifico di materiali diversi con aggregati di dimensioni comparabili. Il peso specifico  $\rho_s$  [ $\text{kN m}^{-3}$ ] è stato determinato utilizzando l'equazione (3.9):

$$\rho_s = \frac{M_s \cdot \rho_L}{(M_1 - M_2)} \quad (3.9)$$

in cui  $M_s$  è il peso del materiale granulare utilizzato nella prova,  $\rho_L$  è il peso specifico del liquido di immersione (acqua) a 23 °C,  $M_1$  è la massa del picnometro riempito con un volume noto  $V_p$  della dispersione costituita dal materiale granulare e dal liquido di immersione e  $M_2$  è la massa del picnometro riempito con il medesimo volume noto  $V_p$  del solo liquido di immersione.

L'analisi della distribuzione granulometrica delle particelle elementari (PSD) è stata condotta mediante l'utilizzo di un granulometro laser Mastersizer 3000E, equipaggiato con l'unità di dispersione a umido Hydro EV. L'analisi è stata condotta dopo una preliminare applicazione di ultrasuoni (40 W) sui campioni per circa 20 minuti. Gli ultrasuoni facilitano la rottura dei legami chimici interparticellari negli aggregati, liberando le particelle elementari. Le analisi PSD sono state condotte utilizzando l'acqua come mezzo disperdente su tutti i materiali, ad eccezione del gesso GP, per il quale è stato impiegato l'etanolo, al fine di impedire la dissoluzione e l'idratazione del campione.

L'analisi della distribuzione granulometrica degli aggregati (ASD) è stata condotta tramite vagliatura a secco, utilizzando una serie di setacci con aperture di dimensioni decrescenti (10, 4, 2, 1, 0,50, 0,25, 0,125, 0,100 e 0,075 mm). La vagliatura è stata effettuata meccanicamente utilizzando un vibrovaglio per una durata minima di tre minuti su ciascun vaglio.

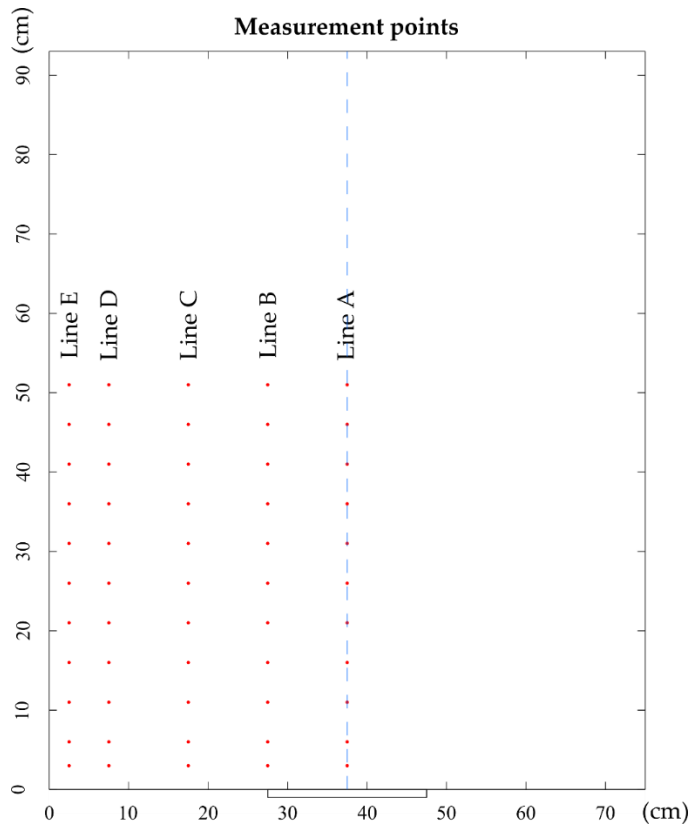
Per garantire l'affidabilità delle misurazioni, ogni parametro è stato calcolato come media di tre misurazioni ripetute.

### **3.3 Metodologie**

#### **3.3.1 Analisi della Velocità del Vento e Intensità di Turbolenza nella Galleria del Vento DICAAR**

Per caratterizzare il profilo verticale di velocità generato all'interno della galleria e valutare l'influenza delle pareti laterali in prossimità dei materiali da analizzare, è stata effettuata la misurazione del campo di velocità in una sezione trasversale di riferimento, posta a 10 cm a valle dell'alloggiamento dei campioni.

I punti di campionamento utilizzati per l'analisi dei profili di velocità sono riportati in Figura 3.9 e sono posizionati lungo cinque linee verticali, in corrispondenza della sezione trasversale in cui è installato l'anemometro: la verticale A, posta a 37,5 cm dalla parete laterale e coincidente con l'asse della sezione trasversale della galleria; la verticale E, posta a 2,5 cm dalla parete laterale; e le verticali B, C e D, poste a una distanza intermedia tra le due precedenti, rispettivamente a 27,5, 17,5 e 7,5 cm dalla parete laterale. Lungo ciascuna verticale sono stati presi in esame 11 diversi punti di campionamento, posti a 3, 6, 11, 16, 21, 26, 31, 36, 41, 46 e 51 cm dal fondo della galleria del vento.



**Figura 3.9.** Rappresentazione schematica dei punti di misura nella galleria del vento DICAAR (Pinna et al., 2024).

Le misure sperimentali di velocità del vento sono state eseguite per due regimi di funzionamento del ventilatore pari a 1500 RPM e 2700 RPM e sono state protratte per 300 secondi, al fine di ottenere un valore della velocità media del vento stabile e ridurre al minimo le incertezze derivanti da singole rilevazioni errate del flusso d'aria.

Per ogni punto di misura sulla verticale e per ogni frequenza analizzata è stata valutata anche l'intensità di turbolenza in direzione del flusso secondo, l'equazione (3.10):

$$I_{x,i} = \frac{\sigma_u}{\bar{u}(z)} \quad (3.10)$$

in cui  $\sigma_u$  è la deviazione standard e  $\bar{u}(z)$  è il valore medio della velocità del vento alla quota  $z$ .

I valori di velocità media del vento e di intensità di turbolenza, individuati lungo le cinque linee verticali posizionate lungo la sezione trasversale indagata, sono stati interpolati mediante l'impiego del software *MATLAB* al fine di generare delle rappresentazioni grafiche dei campi di velocità del vento e di intensità di turbolenza relative ai due regimi di funzionamento del ventilatore investigati (1500 e 2700 RPM).

In seguito, le misure di velocità del vento sono state ripetute sulla sola verticale A per regimi di funzionamento del ventilatore compresi tra 1750 e 2700 RPM, con un passo di 150 RPM. I dati ricavati dalle sperimentazioni, protratte per 120 secondi, sono stati impiegati per la determinazione dei profili verticali di velocità generati all'interno della galleria del vento in funzione della velocità di rotazione del ventilatore. In seguito, è stato eseguito il fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento, definita dall'equazione (3.3), sui dati misurati, al fine di validare i profili verticali di velocità determinati. Tale validazione è stata effettuata confrontando i parametri di progetto, definiti in fase di messa a punto della galleria al fine di riprodurre un profilo dello Strato Limite Atmosferico desiderato, con i valori dei parametri caratteristici della Legge di potenza ottenuti tramite il fitting.

I valori di velocità d'attrito  $u^*$  corrispondenti ai diversi regimi di funzionamento del ventilatore, compresi tra 1750 RPM e 2550 RPM, sono stati ottenuti mediante il fitting della Legge logaritmica di velocità del vento definita dall'equazione (2.2) sui valori determinati lungo la verticale A. Oltre alla velocità d'attrito, l'analisi, eseguita con l'ausilio del software *CurveExpert Basic*, ha consentito di determinare anche i coefficienti di determinazione  $R^2$  e la rugosità  $z_0$ , altro parametro caratteristico della Legge logaritmica.

### **3.3.2 Modellazione CFD della Galleria del Vento DICAAR**

Un modello CFD (*Computational Fluid Dynamics*) della galleria del vento DICAAR è stato sviluppato per riprodurre e analizzare il campo del moto dell'aria all'interno dell'intero volume del tunnel e per valutare, in via preliminare, l'impatto di possibili modifiche al progetto originale.

Il modello CFD è concepito come uno strumento complementare all'apparato sperimentale, permettendo di analizzare i processi erosivi ed emissivi all'interno dell'intero volume del tunnel. I dati derivati dalla simulazione CFD consentono inoltre di descrivere in maniera continua i risultati delle misurazioni sperimentali (ad esempio, misurazioni della velocità del vento o della concentrazione di PM), che di norma sono disponibili solo in punti discreti posizionati all'interno di specifiche sezioni trasversali del tunnel. Inoltre, il modello CFD consentirà di studiare in anticipo l'effetto di variazioni della configurazione della galleria sul flusso d'aria generato all'interno della stessa (Abubaker et al., 2018; Z. Chen et al., 2022; Hlevca & Degeratu, 2020; Yeo & Shi, 2018).

Il modello CFD della galleria del vento DICAAR è stato sviluppato mediante l'impiego del software *ANSYS Fluent 2022 R2*. La geometria del tunnel e la mesh sono state generate mediante l'impiego delle applicazioni *Ansys Design Modeler* e *Ansys Meshing*.

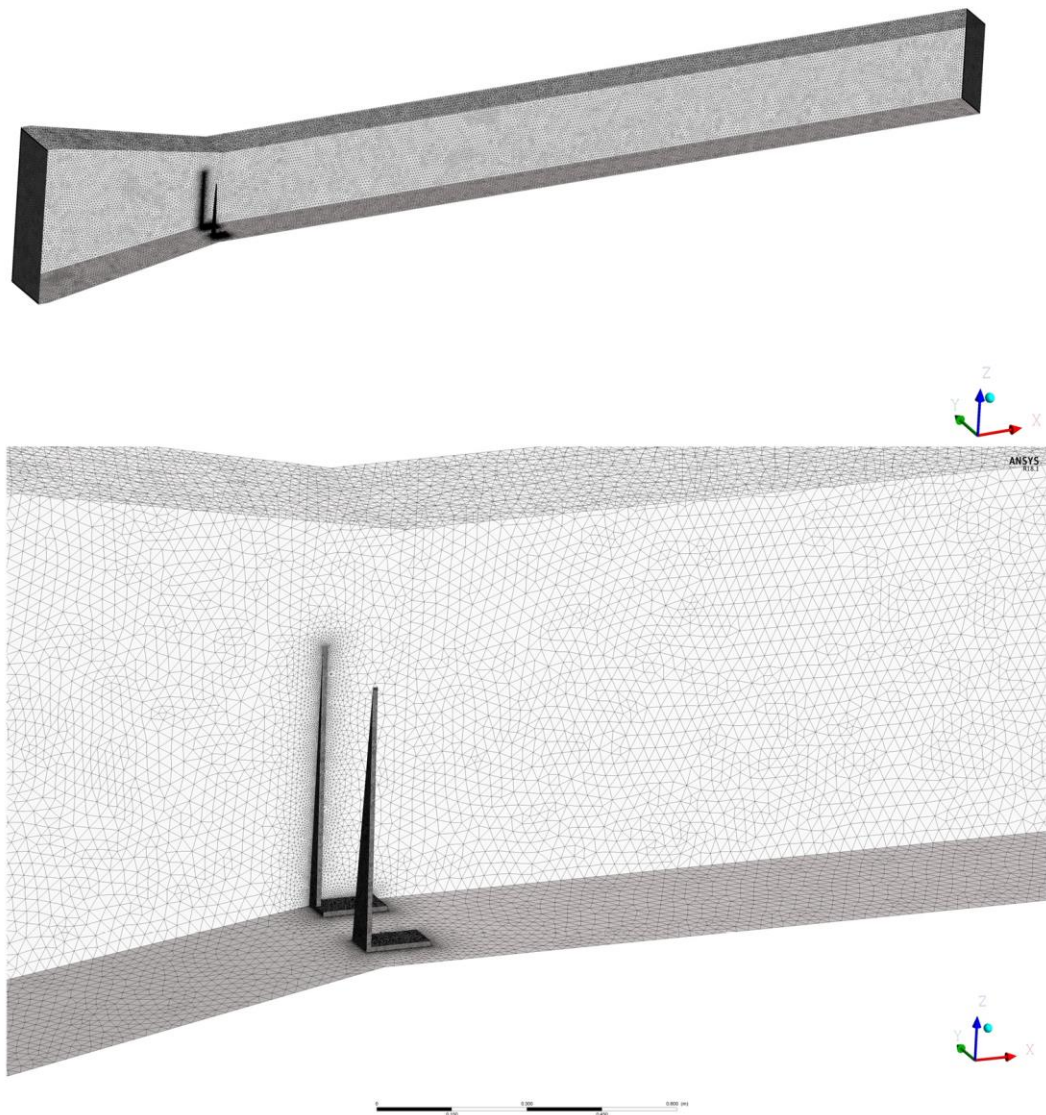
Per migliorare l'efficienza computazionale, è stata modellata solo metà della geometria, sfruttando la simmetria del tunnel rispetto al suo asse longitudinale verticale. Questo approccio ha permesso di ridurre significativamente il numero di elementi della mesh e, di conseguenza, il tempo di simulazione.

È stata utilizzata una mesh non strutturata composta da circa 4,7 milioni di celle tetraedriche, come mostrato nella Figura 3.10. Per affinare localmente la mesh è stata adottata una strategia di discretizzazione del volume di controllo (immagine inferiore della Figura 3.10). Inoltre, in prossimità degli *spires* e del fondo della galleria, sono stati impiegati dei comandi per infittire la mesh al fine di ottenere un valore accettabile per il parametro  $y^+$  (denominati rispettivamente *mesh face sizing* e *inflation layer*).

Il modello è stato impostato per replicare le condizioni del vento generate nella galleria per regimi di funzionamento del ventilatore di 1.500 e 2.700 RPM. A tale scopo, è stato adottato un approccio tridimensionale in condizioni stazionarie, utilizzando il metodo *Reynolds-averaged Navier–Stokes* (RANS) con il modello di turbolenza *k- $\omega$  SST*.

Le condizioni al contorno della velocità in ingresso e in uscita sono state impostate sulla base dei dati di velocità misurati durante i test sperimentali in galleria del vento. Sono state applicate condizioni al contorno simmetriche sul piano mediano, mentre le pareti laterali, superiori e inferiori della galleria sono state impostate come a scorrimento libero (*no-slip walls*). La rugosità della parete inferiore è stata impostata a  $1 \cdot 10^{-4}$  m.

Nell'algoritmo di risoluzione pressione-velocità, è stato adottato un approccio di soluzione accoppiata (*Coupled solution*) ed è stato applicato uno schema upwind di secondo ordine (*second-order upwind scheme*) alle equazioni di quantità di moto, energia cinetica turbolenta e tasso di dissipazione specifico. La convergenza è stata considerata raggiunta quando la portata massica in uscita è risultata stabile nel tempo.



*Figura 3.10. Geometria della mesh non strutturata impiegata nel modello CFD (Pinna et al., 2024).*

L'attendibilità del modello CFD realizzato è stata verificata mediante un confronto tra i dati della simulazione CFD e i risultati delle misurazioni sperimentali.

### **3.3.3 Determinazione della Velocità d'Attrito Limite**

Per valutare l'influenza della metodologia adoperata sulla identificazione della velocità d'attrito limite, i materiali granulari campionati sono stati analizzati attraverso l'applicazione di tre differenti procedure e apparecchiature sperimentali: la Procedura EPA (che è stata qui rivisitata in seguito ad osservazioni sperimentali), la Galleria del Vento DICAAR e il PI-SWERL.

### 3.3.3.1 Procedura EPA Rivisitata

I materiali campionati sono stati inizialmente analizzati secondo la procedura suggerita dall'EPA e descritta nel paragrafo 2.2.3.1. Tuttavia, durante il test sperimentale, è stato osservato che per diversi campioni una quantità significativa di materiale superava la dimensione dell'ultimo setaccio previsto dalla procedura EPA (0,250 mm). Per tenere conto dell'elevata quantità di aggregati di piccole dimensioni, la procedura EPA è stata integrata con l'aggiunta di un ulteriore setaccio da 0,125 mm, da inserire in fondo alla pila di vagli prevista dalla normativa, ovvero 4, 2, 1, 0,50 e 0,25 mm. Di conseguenza, è stata aggiunta un'ulteriore classe granulometrica, la cui moda è pari a 0,188 mm.

Analogamente a quanto previsto dalla procedura originale, dopo il processo di vagliatura, il materiale trattenuto su ciascuna superficie del setaccio è stato pesato e si è determinata la moda della distribuzione granulometrica. Poiché la classe granulometrica aggiunta è più piccola delle altre già previste dalla procedura originale, la velocità d'attrito corrispondente risulterà dunque inferiore a quella più bassa tra quelle originariamente previste, pari a 0,43 m/s. L'associazione tra le classi granulometriche e le velocità d'attrito corrispondenti per la procedura rivisitata è riportata nella Tabella 3.3.

*Tabella 3.3. Relazione tra  $u^*t$  e moda dell'analisi granulometrica eseguita secondo la procedura proposta dall'U.S. EPA (2006) nella versione rivisitata.*

Apertura dei vagli [mm]	Moda [mm]	$u^*t$ [ $m\ s^{-1}$ ]
4		
2	3	1
1	1,5	0,76
0,5	0,75	0,58
0,25	0,375	0,43
0,125	0,188	< 0,43

### 3.3.3.2 Galleria del Vento DICAAR

I campioni destinati alla prova nella galleria del vento sono stati preliminarmente sottoposti a vagliatura utilizzando un setaccio con maglie di diametro pari a 1 cm. Il materiale

passante sotto 1 cm è stato collocato all'interno dei portacampioni di alluminio aventi dimensioni di 0,50 m di lunghezza, 0,20 m di larghezza e 0,02 m di profondità, come mostrato in Figura 3.11. La superficie dei campioni è stata lisciata (senza compattazione), in modo da risultare allo stesso livello del pavimento della galleria una volta inserita nell'alloggiamento designato.



**Figura 3.11.** Esempi dei campioni collocati all'interno di vassoi di alluminio e testati nella galleria del vento: a) gesso GP; b) solfati BD; c) galena MS; d) blenda PR (Lai et al., 2025).

Ogni materiale è stato sottoposto a tre test (per ogni velocità d'attrito investigata) per la determinazione della velocità d'attrito limite attraverso la galleria del vento DICAAR, con una durata di 120 secondi per ciascun esperimento. Al termine di ciascun esperimento, il materiale residuo è stato mescolato con materiale già setacciato dallo stesso campione, al fine di ottenere una superficie omogenea e rappresentativa per il test successivo.

Per ciascun materiale analizzato, i test sono stati avviati alla velocità minima del regime di funzionamento del ventilatore pari a 1650 RPM, che è stata incrementata gradualmente di 150 RPM fino all'osservazione dell'inizio dell'emissione di polvere. La velocità d'attrito limite (i.e., l'inizio dell'emissione di polvere) è stata considerata raggiunta quando la concentrazione media di PM<sub>10</sub>, rilevata dal *DustTrak* a valle, risultava superiore del 20% rispetto alla concentrazione media registrata a monte dei campioni per ciascuno dei tre test effettuati. Per ciascun test condotto, la concentrazione media di PM<sub>10</sub> è stata mantenuta al di sotto di 0,03 mg m<sup>-3</sup> al fine di garantire la coerenza dei valori tra i diversi test effettuati.

### 3.3.3.3 PI-SWERL

Per le sperimentazioni condotte con il PI-SWERL è stato effettuato un *hybrid test*, ripetuto cinque volte per ciascun materiale, secondo la seguente procedura:

- (i) fase di avvio, 10 secondi a 0 RPM con il sistema di ventilazione attivo [ $100 \text{ L min}^{-1}$ ] per pulire l'aria nella camera;
- (ii) fase di rampa: incremento graduale degli RPM da 0 a un valore target di 1500 RPM in 60 secondi.
- (iii) fase costante: mantenuti costanti per 60 secondi.
- (iv) fase di rampa, incremento graduale di 250 RPM in un lasso temporale di 20 secondi.
- (v) ripetizione delle fasi (iii) e (iv) fino al raggiungimento di un RPM costante pari a 2750.
- (vi) fase finale: riduzione dell'RPM a 0 entro 30 secondi.

La durata complessiva di ciascuna prova è stata di 560 secondi.

Al fine di conferire maggiore robustezza ai dati e di investigare velocità di attrito più elevate sui materiali meno emissivi, il set di dati è stato integrato con tre ulteriori test ibridi, strutturati come segue:

- (i) fase di avvio: 10 secondi a 0 RPM con ventilazione attiva [ $100 \text{ L min}^{-1}$ ] per pulire l'aria;
- (ii) fase di rampa: incremento graduale degli RPM da 0 a un valore target di 2750 RPM in 60 secondi;
- (iii) fase costante: RPM mantenuti costanti a 2750 per 60 secondi;
- (iv) fase di rampa: incremento graduale degli RPM da 2750 a un valore target di 3000 RPM in 20 secondi;
- (v) fase costante: RPM mantenuti costanti a 3000 per 60 secondi;
- (vi) fase finale: diminuzione dei giri al minuto a 0 in 30 secondi.

La durata totale di questi test aggiuntivi è stata di 240 secondi.

Per determinare le velocità di attrito in funzione della velocità di rotazione della piastra è stato selezionato un valore di  $\alpha$  pari a 0,94, corrispondente alla categoria di rugosità A descritta in Tabella 3.2. Di conseguenza, considerando il numero massimo di giri al minuto durante le prove (3000 RPM) e applicando l'equazione (3.6), è stato studiato il comportamento di emissione dei materiali fino a una velocità di attrito massima di 0,64 m/s.

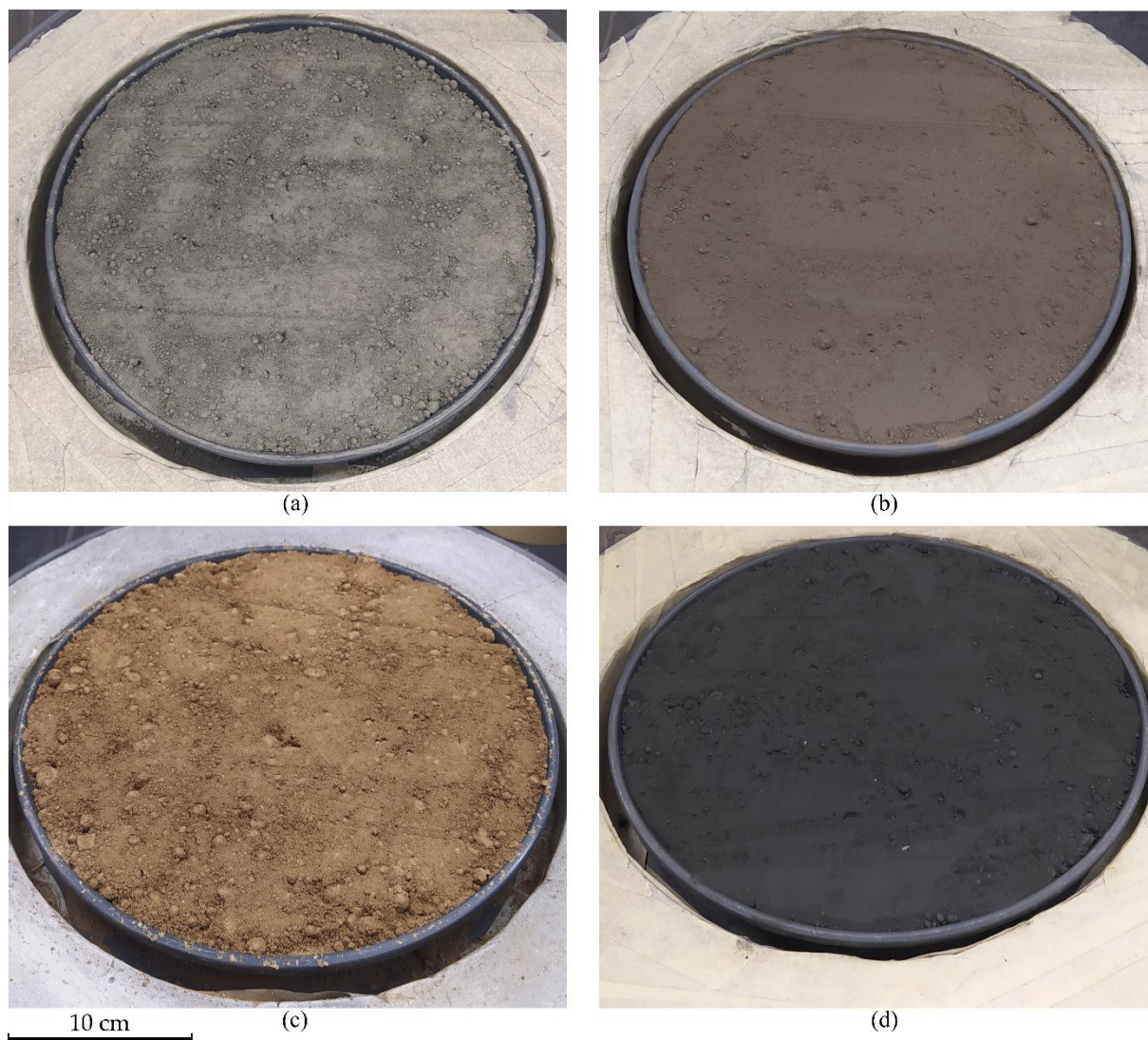
Per ciascun campione testato, un vassoio circolare, avente un diametro pari a 40,5 cm, è stato riempito con 5 litri di materiale e una barra di alluminio è stata utilizzata per livellare la superficie, come è stato fatto per le prove condotte nella galleria del vento (Figura 3.12).

Al termine di ciascun test e in preparazione del successivo, il materiale residuo dell'esperimento precedente è stato riciclato e miscelato con materiale fresco per rigenerare la superficie esposta al vento e garantire un campione omogeneo. Al fine di prevenire la contaminazione incrociata tra gli esperimenti, a seguito di ciascun test è stato condotto un ciclo di pulizia, costituito da un *ramp test* su un vassoio campione vuoto a 5000 RPM per una durata di 300 secondi.

Nei *ramp test* e negli *hybrid test*, descritti nel paragrafo 3.1.4, il valore della velocità di attrito limite corrisponde al valore dello sforzo tangenziale  $u^*$ , associato a sua volta alla velocità di rotazione (RPM) della piastra rotante, al quale la polvere viene emessa per la prima volta. Si identifica, pertanto, l'istante in cui le concentrazioni di  $PM_{10}$  rilevate dal *DustTrak*, installato sul PI-SWERL, mostrano un incremento significativo all'interno della camera di prova.

In particolare, nell'ambito del presente lavoro, l'identificazione della  $u^*_t$  è stata effettuata mediante un codice appositamente sviluppato su *MATLAB* che consentiva di automatizzare la rilevazione della velocità di attrito corrispondente all'inizio di otto aumenti consecutivi della concentrazione di  $PM_{10}$  all'interno della camera di prova.

La metodologia illustrata è stata originariamente sviluppata da Van Leeuwen et al. (2021). Originariamente, la metodologia richiedeva un numero di incrementi consecutivi pari a 10 al fine di determinare la velocità d'attrito limite. Tuttavia, tale numero è stato rivisto e ridotto a 8 incrementi consecutivi in questo studio, a seguito di un'analisi approfondita dei dati sperimentali ottenuti.



**Figura 3.12.** Esempi dei campioni collocati all'interno dei vassoi circolari e testati con il PI-SWERL: a) ossidi WL; b) blenda RD; c) solfati BD; d) galena PN (Lai et al., 2025).

### 3.3.4 Calcolo delle Emissioni di PM

Oltre alla determinazione della velocità d'attrito limite, i materiali granulari campionati sono stati sottoposti a test sperimentali nella Galleria del Vento DICAAR volti alla quantificazione del loro potenziale emissivo. La stima dell'emissione è stata effettuata sia su tutti i materiali *tal quale*, ovvero senza alcun trattamento preliminare, sia sulla galena PN e sulla blenda RD dopo essere stati sottoposti a essiccazione in stufa, ovvero con un contenuto d'acqua nullo. L'emissione di questi ultimi due materiali granulari è stata inoltre stimata attraverso il modello fisico-matematico descritto nel paragrafo 3.1.5. Il confronto tra le emissioni generate dei due materiali granulari essiccati con quelle riprodotte dal codice numerico consentirà di valutare la capacità predittiva di quest'ultimo nel riprodurre il fenomeno emissivo.

### 3.3.4.1 Galleria del Vento DICAAR

La stima dell'emissione tramite la galleria del vento DICAAR è stata effettuata mediante l'applicazione del metodo del volume di controllo proposto da Roney e White (2006) sui profili verticali di concentrazione di PM e sulla velocità del vento (Figura 3.13).

La dimensione del volume di controllo è stata definita come il prodotto tra la superficie del campione erodibile  $A_B$  e l'altezza dell'ultimo punto della linea di misura A investigato (i.e., 51 cm, come osservabile in Figura 3.9). La scelta di questo punto come parametro di riferimento è stata determinata dall'osservazione che, sopra i 16 cm di altezza del tunnel, le concentrazioni di PM misurate tendevano a valori prossimi allo zero.

Il tasso di emissione ( $E$ ), attribuibile all'erosione della superficie della sorgente emissiva  $A_B$ , è stato ottenuto mediante un bilancio di massa applicato al volume di controllo, secondo l'equazione (3.11):

$$E = \frac{1}{A_B} (m_{out} - m_{in}) \quad (3.11)$$

in cui  $m_{out}$  e  $m_{in}$  rappresentano rispettivamente le portate massiche in uscita e in ingresso al volume di controllo, calcolate come:

$$m_{out} = \int_0^{H_\delta} c_{out} u_{out} W_B dz \quad (3.12)$$

$$m_{in} = \int_0^{H_\delta} c_{in} u_{in} W_B dz \quad (3.13)$$

Ne consegue che il tasso di emissione può essere espresso come:

$$E = \frac{1}{L_B} \int_0^{H_\delta} (c_{out} u_{out} - c_{in} u_{in}) dz \quad (3.14)$$

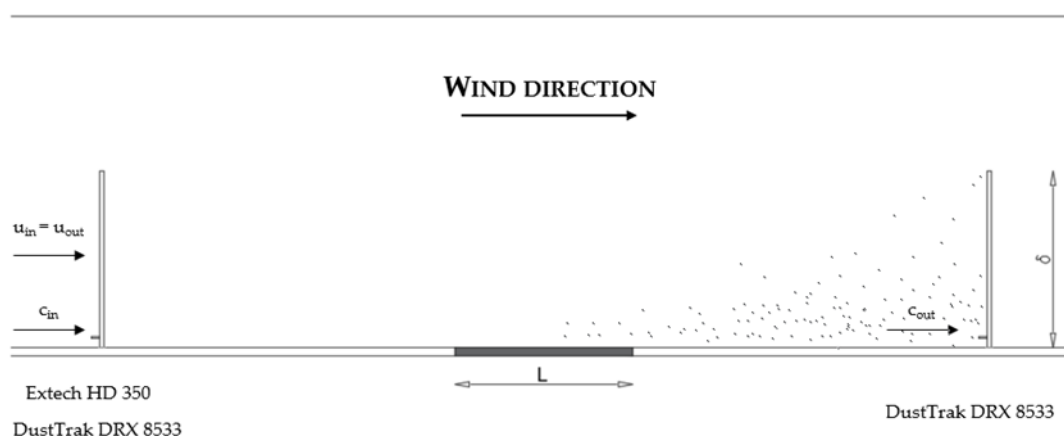
in cui  $c_{out} u_{out}$  e  $c_{in} u_{in}$  rappresentano rispettivamente il prodotto tra concentrazione di particolato e velocità a valle e a monte del campione e  $L_B$  è la lunghezza del campione.

Per quanto concerne le velocità a monte e a valle del campione, è stata formulata l'ipotesi che i profili di velocità rimanessero costanti in prossimità e oltre l'alloggiamento del campione erodibile, come evidenziato anche dai risultati ricavati dal modello CFD della galleria del vento.

Le misurazioni istantanee della concentrazione di PM sono state condotte mediante l'impiego di due fotometri laser *DustTrak DRX 8533*. Il profilo verticale della concentrazione di PM<sub>10</sub>  $c_{out}$  è stato misurato da un primo fonometro posizionato nella sezione trasversale a valle del campione (descritta nel paragrafo 3.3.1) lungo gli 11 punti distribuiti lungo l'asse verticale

della galleria a quote comprese fra 3 e 51 cm (*Line A*, Figura 3.9). Per ciascun punto, la misura è stata eseguita per un lasso temporale di 10 secondi. La distribuzione orizzontale della concentrazione è stata considerata uniforme su tutta la larghezza del campione e nulla ai lati dello stesso, come confermato da un precedente studio (Pinna et al., 2024), seguendo la procedura standard utilizzata da Mckenna et al. (2009), Roney e White (2006) e Wang et al. (2019).

La concentrazione di PM a monte è stata determinata in base al valore di fondo rilevato all'interno della galleria dal secondo fotometro laser *DustTrak DRX 8533* e mantenuto su livelli costantemente molto bassi ( $< 0,03 \text{ mg/m}^3$ ).



**Figura 3.13.** Schematizzazione del modello del volume di controllo utilizzato per il calcolo delle emissioni.

Le emissioni sono state determinate in funzione della velocità d'attrito del vento per l'intera gamma di materiali elencati nel paragrafo 3.2 nello stato *tal quale* (i.e., senza pretrattamento), per un range di funzionamento del ventilatore compreso tra 2400 e 2700 RPM per il gesso GP, con un passo di 150 RPM, e tra 1650 e 2400 RPM per i restanti materiali, con un passo di 150 RPM (un singolo test sperimentale per ciascun materiale granulare e velocità d'attrito investigato). Come specificato precedentemente, le sperimentazioni sono state replicate per la galena PN e la blenda RD per un range di funzionamento del ventilatore compreso tra 1650 e 2550 RPM, con un passo di 150 RPM, portando i campioni a un contenuto d'acqua pari a 0% dopo averli lasciati asciugare in stufa per almeno 3 giorni a 60 °C (tre test sperimentali per ciascun materiale granulare e velocità d'attrito investigato).

Per questi ultimi due materiali granulari sono state condotte inoltre delle misure delle concentrazioni di PM di lunga durata al fine di analizzare la loro variabilità temporale. In queste prove sperimentali il tubo di campionamento dell'aria è stato mantenuto in una posizione fissa, a

valle dei campioni a 3 cm dal pavimento. La durata di queste misure sperimentali è stata impostata pari a 4 minuti per adattarsi alla durata massima dei processi erosivi, la cui emivita è compresa tra un minimo di uno e un massimo di quattro minuti per i materiali granulari di origine industriale (U.S. EPA, 2006).

### 3.3.4.2 Codice Numerico

Nell'ambito del progetto di Dottorato il codice descritto nel paragrafo 3.1.5 è stato aggiornato al fine di determinare automaticamente la distribuzione granulometrica dei saltatori (SSD) a partire dalla distribuzione granulometrica degli aggregati (ASD).

Inoltre, per ridurre il costo computazionale, il codice è stato aggiornato per simulare un numero limitato di 1000 impatti tra un saltatore e un aggregato posto sulla superficie granulare. Al termine della simulazione, viene calcolato il peso totale dei 1000 saltatori e il rapporto tra il peso dei saltatori coinvolti nel flusso di saltazione per unità di superficie e di tempo e il peso complessivo dei saltatori simulati. La quantità di  $PM_{10}$  e di  $PM_{2,5}$  emessa è quindi stimata moltiplicando il peso delle particelle con diametro inferiore rispettivamente a  $10\ \mu\text{m}$  e a  $2,5\ \mu\text{m}$  per il rapporto ottenuto precedentemente.

Per l'esecuzione del codice, è dunque attualmente necessario fornire i seguenti dati di input: la distribuzione granulometrica (ASD) del materiale che forma la superficie granulare; la distribuzione granulometrica delle particelle elementari (PSD) che costituiscono gli aggregati; la massa volumica delle particelle ( $\sigma_p$ ); l'energia di coesione delle particelle ( $I$ ); la velocità d'attrito ( $u^*$ ); la velocità di soglia ( $u^*_t$ ).

Il codice è stato utilizzato per stimare le emissioni della galena PN e della blenda RD per le medesime velocità d'attrito  $u^*$  investigate in galleria del vento. La distribuzione granulometrica degli aggregati (ASD) e la distribuzione granulometrica delle particelle elementari (PSD) che sono state utilizzate come dati di input sono le medesime riportate nel paragrafo 3.2, mentre i valori della densità delle particelle ( $\sigma_p$ ) e dell'energia di coesione delle particelle ( $I$ ) sono stati ricavati dalla bibliografia scientifica e sono riportate in Tabella 3.4. La velocità di soglia  $u^*_t$  utilizzata come parametro in ingresso è quella rilevata nei test sperimentali in galleria del vento per i materiali asciutti (contenuto d'acqua pari a 0%) descritti nel paragrafo 3.3.4.1.

**Tabella 3.4.** Dati di input ricavati dalla bibliografia scientifica e adoperati per l'esecuzione del codice numerico.

	<b>Massa volumica</b> (Bass, 2013; Tromans & Meech, 2002)	<b>Energia di coesione</b> (Hosseini Anvari et al., 2017)
	[kg m <sup>-3</sup> ]	[J m <sup>-2</sup> ]
<b>Galena (PbS)</b>	7597	0,32
<b>Blenda (ZnS)</b>	4088	0,51

Il codice è stato eseguito utilizzando alternativamente il *Damage Ratio (DR)* individuato da Thornton et al. (1996), nella versione aggiornata da Kafui e Thornton (2000), e quello descritto da Deng e Davé (2017), entrambi riportati nel paragrafo 2.2.2.3.

## 4 Risultati della Sperimentazione

Il presente capitolo riporta i risultati ottenuti dalle attività sperimentali e di simulazione condotte nel corso del progetto di Dottorato.

Nel paragrafo 4.1 vengono presentati i risultati delle analisi di caratterizzazione dei campioni *tal quale*.

Il paragrafo 4.2 illustra i risultati delle prove sperimentali condotte nella galleria del vento del DICAAR, con particolare riferimento ai campi della velocità del vento e dell'intensità di turbolenza generati all'interno dell'apparato sperimentale. Vengono inoltre riportati i risultati relativi alla validazione del profilo verticale dello Strato Limite Atmosferico e alla determinazione della velocità d'attrito in funzione del regime di funzionamento del ventilatore della galleria.

Il paragrafo 4.3 presenta i risultati delle simulazioni CFD sul modello della galleria del vento DICAAR sviluppato.

Nel paragrafo 4.4 vengono illustrati i risultati relativi alla determinazione della velocità d'attrito limite dei materiali campionati, ottenuti mediante l'applicazione della procedura EPA rivisitata e delle prove sperimentali condotte tramite la galleria del vento DICAAR e il PI-SWERL.

Il paragrafo 4.5 riporta i risultati relativi all'emissione dei materiali nella loro condizione originale (*tal quale*) riportando sia i profili verticali di concentrazione di particolato sia la stima quantitativa delle emissioni di PM<sub>10</sub>.

Infine, il paragrafo 4.6 è dedicato all'emissione dei materiali asciutti, valutata sia mediante prove in galleria del vento DICAAR, sia tramite il codice numerico originariamente sviluppato da Dentoni et al. (2022).

### 4.1 Caratterizzazioni dei Campioni Tal Quale

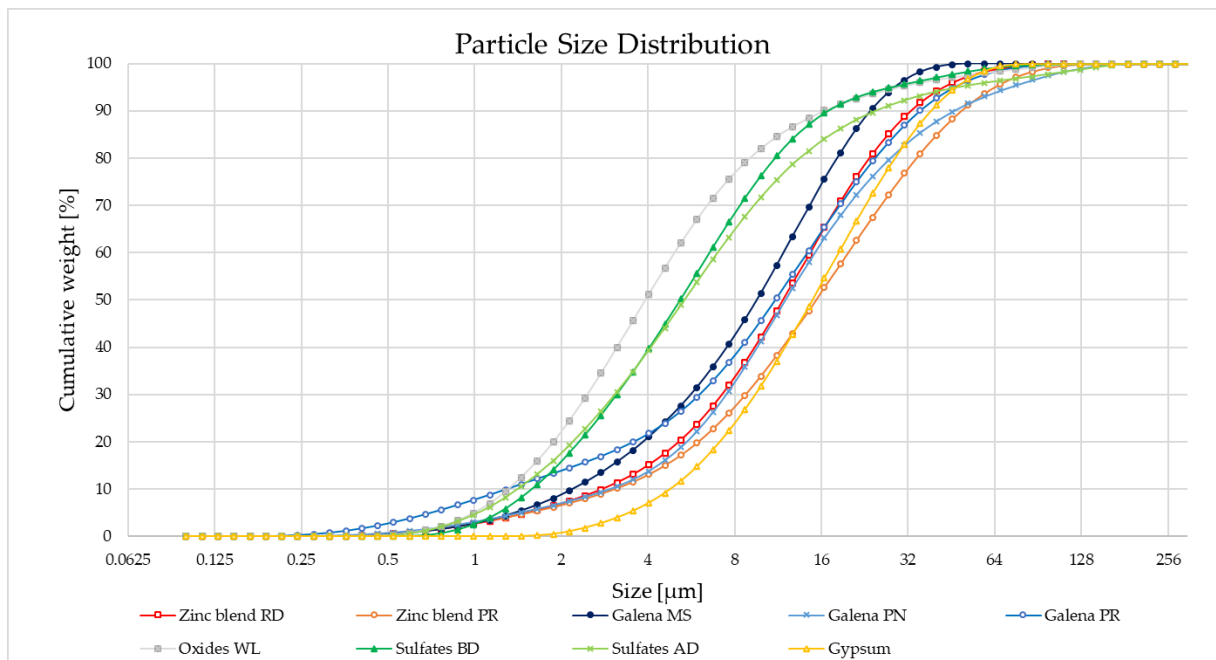
I risultati delle analisi PSD (*Particle Size Distribution*) e ASD (*Aggregate Size Distribution*) sono riportati rispettivamente in Figura 4.1 e Figura 4.2, mentre in Tabella 4.1 sono riportati in maniera sintetica i risultati della caratterizzazione dei materiali *tal quale*.

Per quanto riguarda il contenuto d'acqua, la maggior parte dei materiali granulari campionati presenta un valore del parametro prossimi allo 0%; infatti, gli ossidi WL, le galene

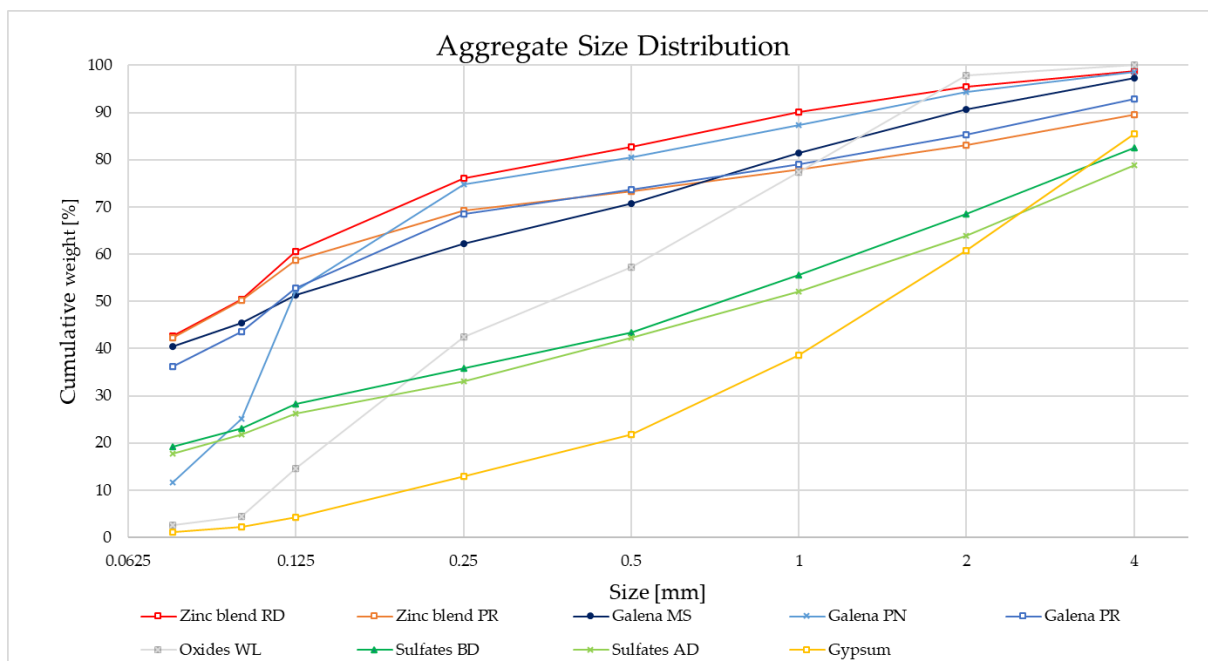
MS, PN e PR e le blende PR e RD mostrano un contenuto d'acqua inferiore all'8%. Al contrario, il gesso GP e i solfati AD e BD risultano più umidi, con valori superiori al 15%.

Per quanto riguarda il peso specifico, il gesso GP presenta il valore più basso, mentre le galene MS, PN e PR sono i materiali granulari con i valori più elevati. La differenza tra queste due tipologie di materiali risulta significativa, con un rapporto tra le galene e il gesso di circa tre. Dopo le galene, gli ossidi WL rappresenta il materiale più denso, seguito dalle blende PR e RD e dai solfati AD e BD.

Dall'analisi della Figura 4.1 emerge che gli ossidi WL e i solfati AD e BD presentano granulometrie leggermente inferiori rispetto ai materiali restanti, con differenze del  $d_{50}$  di circa 10  $\mu\text{m}$ . Sebbene tali variazioni siano limitate, si osserva una variabilità significativa se si considera la propensione dei materiali granulari a formare aggregati (Figura 4.2). In particolare, le blende e le galene presentano una maggiore presenza di aggregati con dimensioni inferiori a 500  $\mu\text{m}$  (ovvero dimensioni paragonabili ai saltatori coinvolti nel fenomeno erosivo). Questi materiali, insieme agli ossidi WL, sono inoltre caratterizzati da contenuti d'acqua minori rispetto ai restanti, inferiori al 10% (Tabella 4.1).



**Figura 4.1.** Distribuzione granulometrica delle particelle elementare condotta mediante l'impiego del granulometro laser Mastersizer 3000E (Lai et al., 2025).



**Figura 4.2.** Distribuzione granulometrica degli aggregati condotta mediante l'impiego di un vibrovaglio (Lai et al., 2025).

**Tabella 4.1.** Sintesi dei risultati della caratterizzazione fisica dei materiali granulari campionati.

Materiale	Gesso GP	Ossidi WL	Solfati BD	Solfati AD	Galena MS	Galena PN	Galena PR	Blenda PR	Blenda RD
Contenuto d'acqua [%]	38	7	21	17	6	3	2	4	3
Peso specifico [kN m <sup>-3</sup> ]	16	44	27	31	54	52	51	34	34
PSD - $d_{50}$ [μm]	17	4	6	6	11	14	13	17	13
ASD - $d_{50}$ [mm]	1,500	0,375	0,750	0,875	0,110	0,125	0,110	0,105	0,100

## **4.2 Analisi della Velocità del Vento e Intensità di Turbolenza nella Galleria del Vento DICAAR**

### **4.2.1 Campi di Velocità del Vento**

Nelle Tabelle 4.2 e 4.3 sono riportati i profili di velocità misurati lungo le linee di misura A, B, C, D ed E per i regimi di funzionamento del ventilatore pari a 1500 e 2700 RPM. Nella Tabella 4.4 sono invece riportati i profili di velocità misurati lungo la sola verticale A per regimi di funzionamento del ventilatore pari 1650, 1800, 1950, 2100, 2250, 2400 e 2550 RPM.

I risultati riportati nelle Tabelle 4.2 e 4.3 hanno messo in luce l'aumento della velocità del vento in funzione della distanza dei punti di misura dalle pareti della galleria, sia verticalmente sia lateralmente (al passaggio dalla linea di misura A alla linea di misura C). I dati misurati lungo la linea A e la linea B sono risultati sostanzialmente sovrapponibili, a testimonianza dell'uniformità trasversale dei profili di velocità all'interno della sezione di controllo definita per il calcolo delle emissioni di PM. I campi di velocità del vento generati in galleria sono rappresentati nella Figura 4.3.

I risultati riportati nella Tabella 4.4 hanno messo in luce l'aumento della velocità del vento in funzione del regime di funzionamento del ventilatore.

**Tabella 4.2.** *Profili di velocità del vento in galleria misurati lungo le linee di misura A, B, C, D ed E (regime di funzionamento del ventilatore di 1500 RPM).*

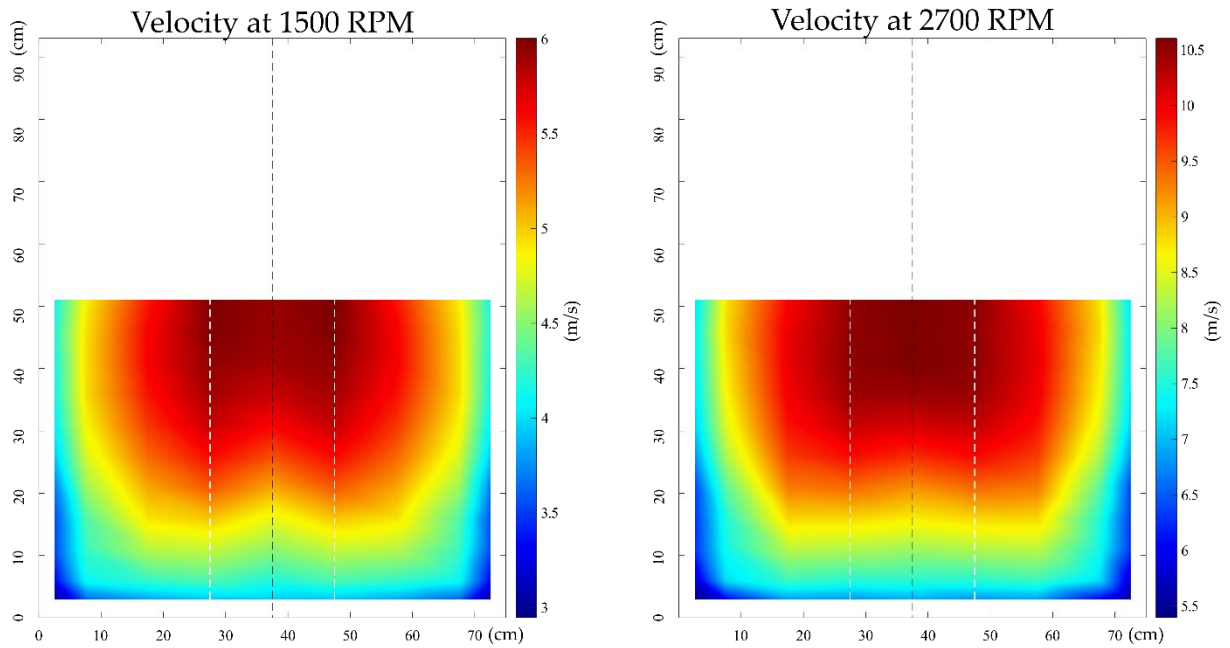
<b>Velocità del vento [m s<sup>-1</sup>]</b>					
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>0,51</b>	5,92	6,00	5,55	4,89	4,14
<b>0,46</b>	5,91	5,99	5,62	4,94	4,19
<b>0,41</b>	5,89	5,94	5,63	4,95	4,15
<b>0,36</b>	5,78	5,89	5,57	4,94	4,14
<b>0,31</b>	5,61	5,79	5,45	4,87	4,06
<b>0,26</b>	5,38	5,60	5,31	4,74	3,93
<b>0,21</b>	5,11	5,36	5,12	4,57	3,69
<b>0,16</b>	4,80	5,02	4,92	4,34	3,55
<b>0,11</b>	4,51	4,68	4,64	4,26	3,54
<b>0,06</b>	4,19	4,32	4,25	4,11	2,95
<b>0,03</b>	3,93	3,92	3,82	3,62	2,32

**Tabella 4.3.** *Profili di velocità del vento in galleria misurati lungo le linee di misura A, B, C, D ed E (regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM).*

<b>Velocità del vento [m s<sup>-1</sup>]</b>					
<b>h [m]</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>0,51</b>	10,60	10,52	9,95	8,76	7,21
<b>0,46</b>	10,59	10,51	10,04	8,82	7,31
<b>0,41</b>	10,60	10,52	10,05	8,74	7,28
<b>0,36</b>	10,46	10,46	10,00	8,66	7,22
<b>0,31</b>	10,15	10,25	9,86	8,50	7,10
<b>0,26</b>	9,72	9,90	9,64	8,23	6,81
<b>0,21</b>	9,20	9,41	9,31	7,83	6,40
<b>0,16</b>	8,71	8,83	8,84	7,52	6,31
<b>0,11</b>	8,15	8,24	8,30	7,43	6,28
<b>0,06</b>	7,55	7,55	7,65	7,17	5,78
<b>0,03</b>	6,92	6,80	6,85	6,04	5,40

**Tabella 4.4.** *Profili di velocità del vento in galleria misurati lungo la linea di misura A (regimi di funzionamento del ventilatore di 1650, 1800, 1950, 2100, 2250, 2400 e 2550 RPM).*

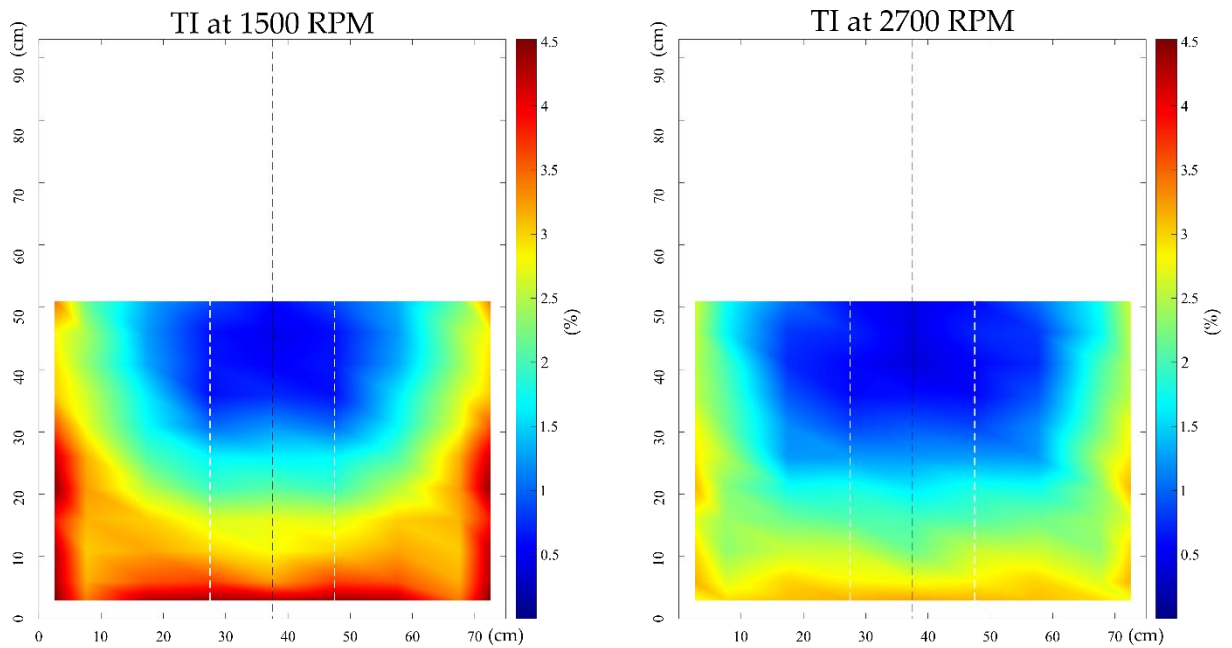
<b>Velocità del vento [m s<sup>-1</sup>]</b>							
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>1650</b>	<b>1800</b>	<b>1950</b>	<b>2100</b>	<b>2250</b>	<b>2400</b>	<b>2550</b>
	<b>RPM</b>	<b>RPM</b>	<b>RPM</b>	<b>RPM</b>	<b>RPM</b>	<b>RPM</b>	<b>RPM</b>
<b>0,51</b>	6,51	7,10	7,67	8,25	8,87	9,42	10,00
<b>0,46</b>	6,45	7,07	7,64	8,22	8,85	9,38	9,98
<b>0,41</b>	6,43	7,05	7,64	8,21	8,80	9,34	9,94
<b>0,36</b>	6,32	6,97	7,49	8,09	8,67	9,14	9,75
<b>0,31</b>	6,13	6,79	7,29	7,86	8,40	8,92	9,49
<b>0,26</b>	5,94	6,54	7,04	7,56	8,06	8,54	9,15
<b>0,21</b>	5,66	6,16	6,74	7,17	7,58	8,08	8,60
<b>0,16</b>	5,32	5,88	6,32	6,74	7,21	7,65	8,08
<b>0,11</b>	4,88	5,36	5,86	6,30	6,72	7,07	7,58
<b>0,06</b>	4,56	5,09	5,47	5,79	6,22	6,56	6,99
<b>0,02</b>	3,98	4,36	4,74	4,99	5,39	5,70	6,08



**Figura 4.3.** Campi di velocità del vento in galleria individuati tramite i dati sperimentali (1500 e 2700 RPM) (Pinna et al., 2024).

## 4.2.2 Campi di Intensità di Turbolenza

L'analisi dei campi di intensità di turbolenza (IT), illustrati nella Figura 4.4, ha evidenziato la diminuzione dei livelli di intensità all'aumentare della distanza dal pavimento e dalle pareti laterali della galleria, dove l'IT raggiunge valori inferiori all'1%. Si osserva inoltre una diminuzione dell'intensità di turbolenza all'aumentare della velocità di rotazione del ventilatore. I risultati ottenuti rimangono comunque soddisfacenti, in quanto le intensità di turbolenza rimangono ridotte e non superano mai il 4,5% nei regimi di funzionamento del ventilatore studiati.



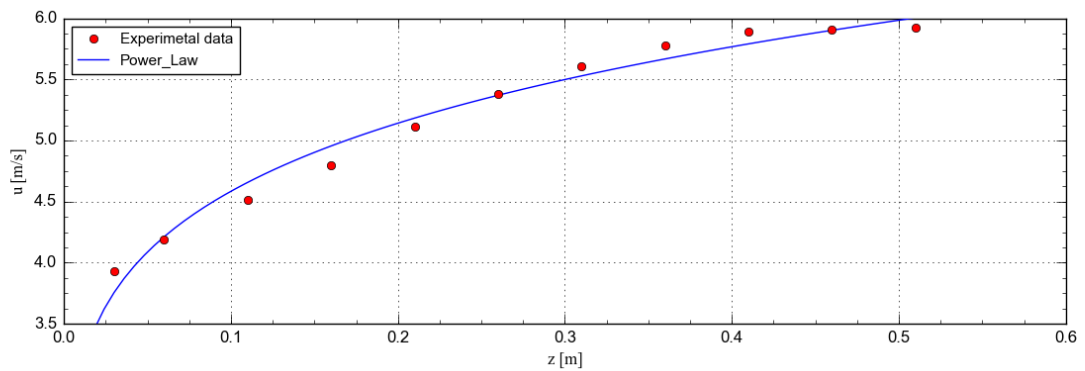
**Figura 4.4.** Campi di intensità di turbolenza in galleria individuati tramite i dati sperimentali (1500 e 2700 RPM) (Pinna et al., 2024).

### 4.2.3 Validazione del Profilo Verticale dello SLA

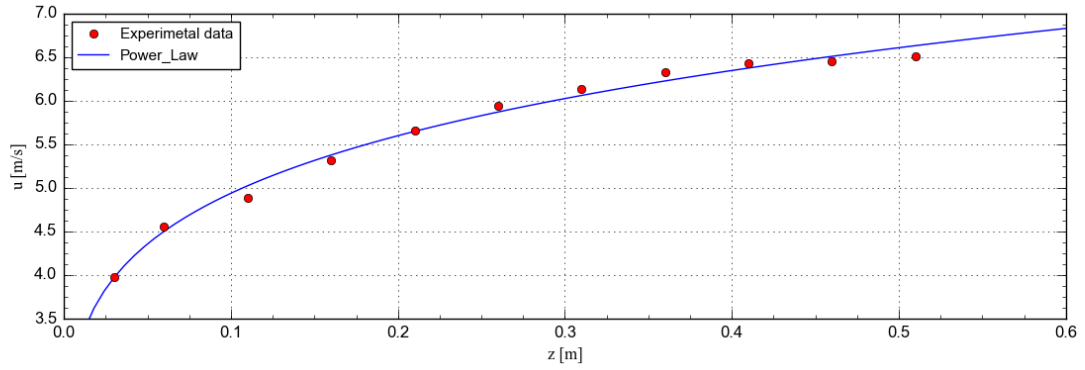
I risultati del fitting della Legge di potenza del profilo di velocità, effettuato sui dati di velocità misurati lungo la linea di mezzeria della galleria DICAAR (linea di misura A) al variare del regime di funzionamento del ventilatore, sono riportati in Tabella 4.5. Questi risultati sono espressi in termini di coefficiente d'attrito  $\alpha$  e spessore dello strato limite  $\delta$ , che rappresentano parametri caratteristici della Legge, e del coefficiente di determinazione  $R^2$ . I dati ricavati hanno mostrato una ottima coerenza con i parametri di progetto stabiliti durante la fase di messa a punto della galleria (Tabella 3.1). Dall'analisi emerge inoltre che la Legge di potenza si adatta con elevata accuratezza ai dati simulati ( $R^2 \geq 0,98$ ). Nelle Figure 4.5-4.13, i risultati del fitting sono riportati in forma grafica.

**Tabella 4.5.** Risultati del fitting della Legge di potenza sui dati sperimentali.

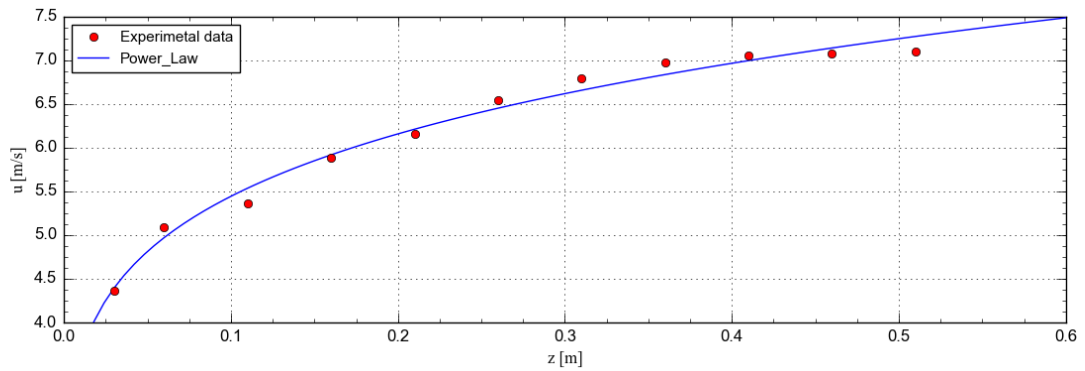
RPM	$\alpha$ [-]	$\delta$ [m]	$R^2$
1500	0,17	0,47	0,98
1650	0,17	0,45	0,98
1800	0,17	0,45	0,98
1950	0,16	0,45	0,99
2100	0,17	0,45	0,99
2250	0,17	0,46	0,98
2400	0,17	0,46	0,99
2550	0,17	0,46	0,98
2700	0,17	0,45	0,98
<b>Valori medi</b>	<b>0,17</b>	<b>0,46</b>	



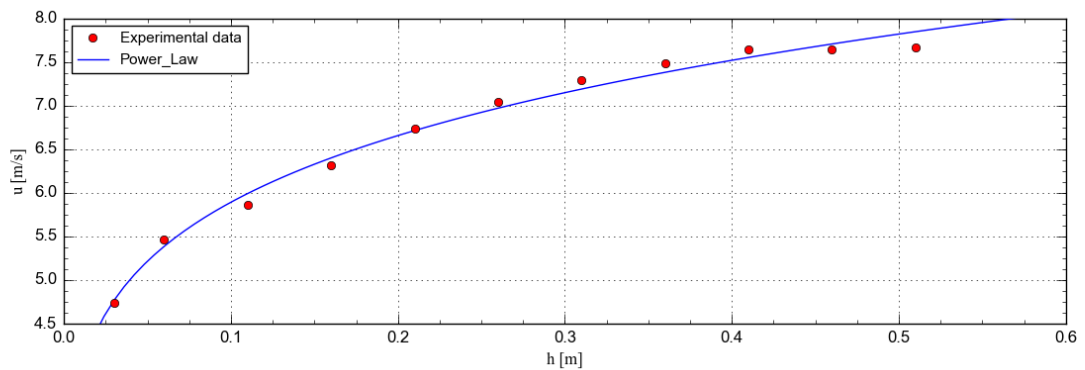
**Figura 4.5.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1500 RPM.



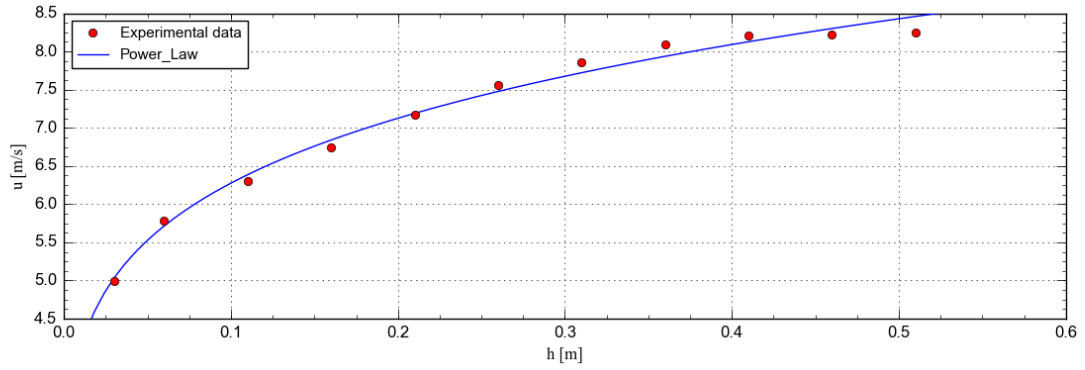
**Figura 4.6.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1650 RPM.



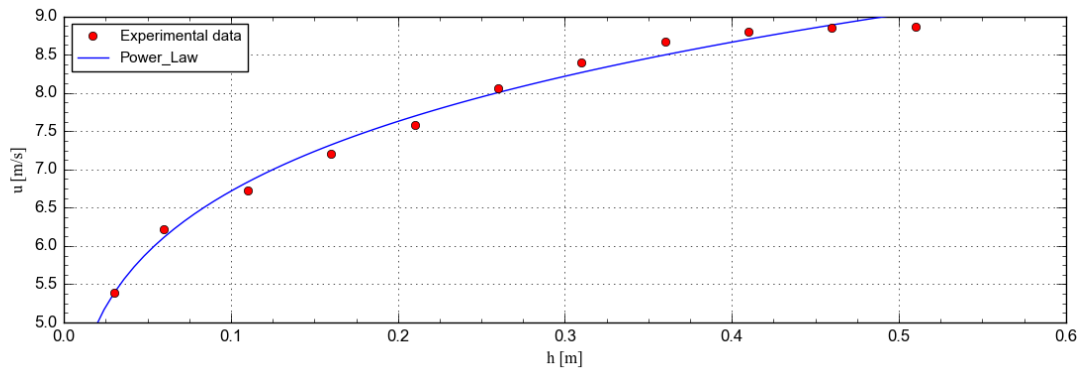
**Figura 4.7.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1800 RPM.



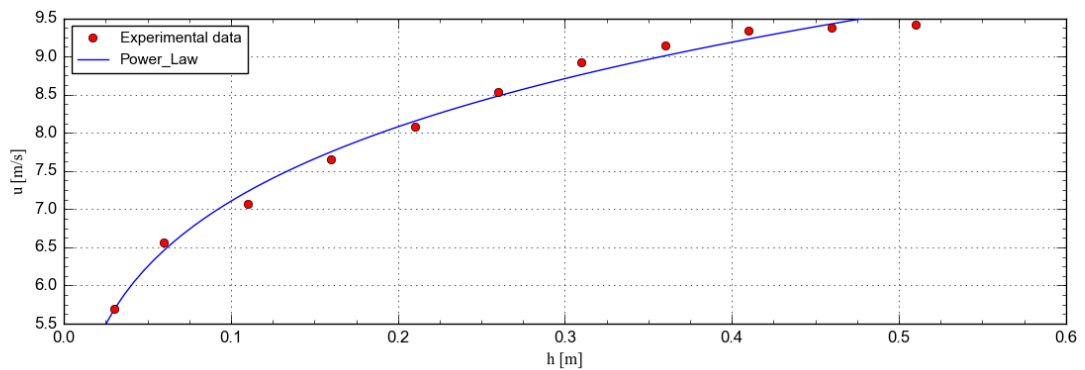
**Figura 4.8.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1950 RPM.



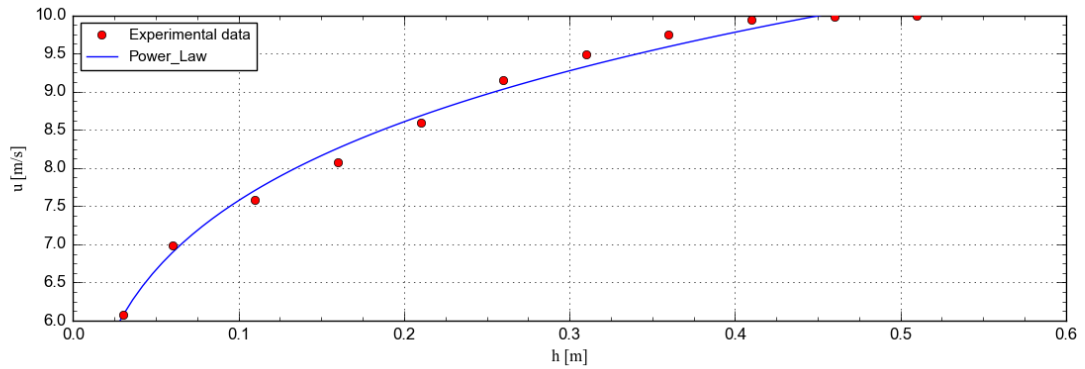
**Figura 4.9.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2100 RPM.



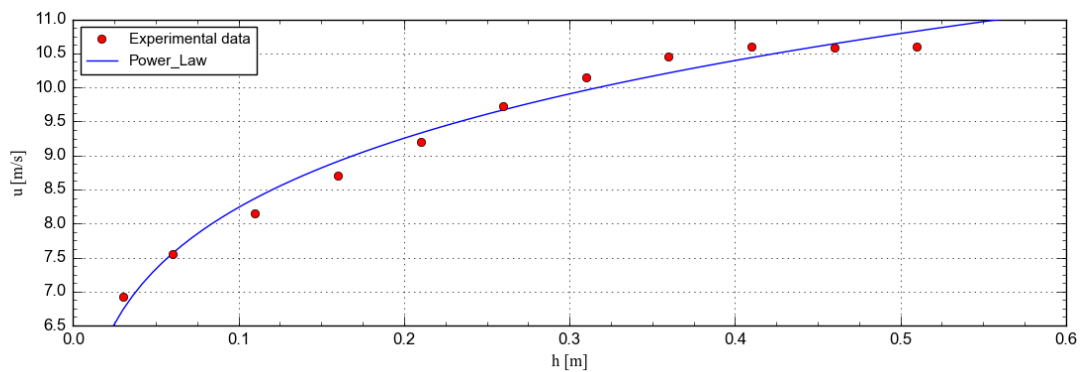
**Figura 4.10.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2250 RPM.



**Figura 4.11.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2400 RPM.



**Figura 4.12.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2550 RPM.



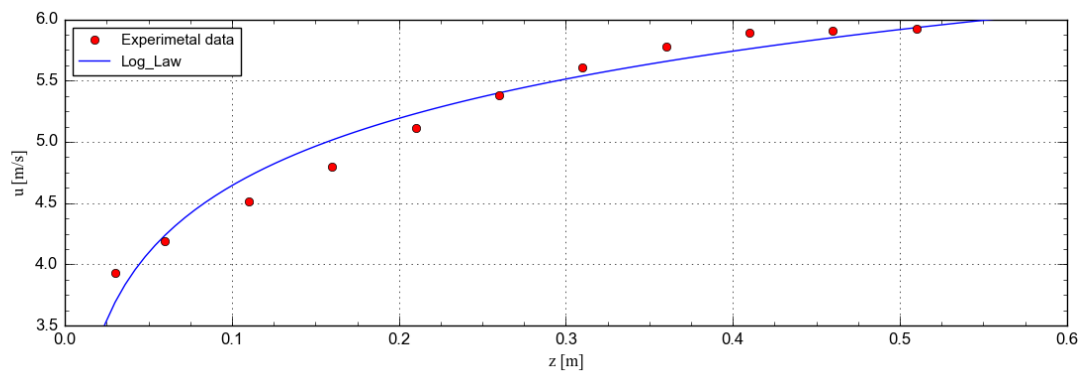
**Figura 4.13.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM.

#### 4.2.4 Determinazione della Velocità d'Attrito

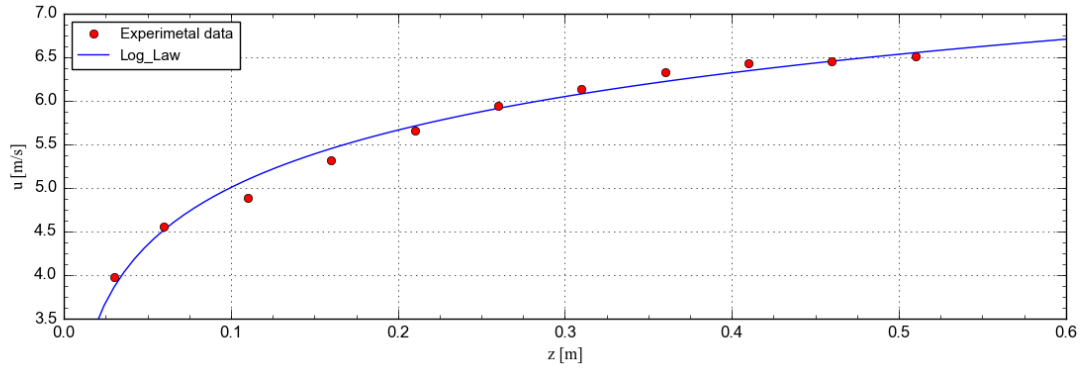
I risultati del fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità sui dati di velocità misurati all'interno della galleria sono riportati, nelle Figure 4.14-4.22 e in Tabella 4.6 per i diversi regimi di funzionamento del ventilatore indagati. I risultati ottenuti sono stati espressi in termini di valore dei parametri caratteristici della Legge logaritmica (velocità d'attrito  $u^*$  e coefficiente di rugosità  $z_0$ ). Inoltre, sono stati riportati i corrispondenti coefficienti di determinazione  $R^2$ .

**Tabella 4.6.** Velocità di flusso libero  $u_\delta$ , velocità d'attrito  $u^*$  e coefficiente  $z_0$  al variare del regime di funzionamento del ventilatore.

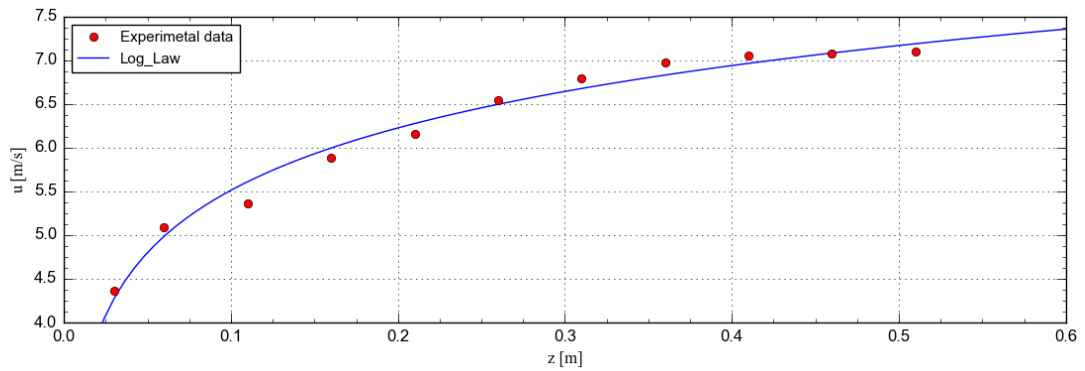
RPM	$u_\delta$ [m s <sup>-1</sup> ]	$u^*$ [m s <sup>-1</sup> ]	$z_0$ [mm]	$R^2$
1500	5,91	0,32	0,28	0,96
1650	6,45	0,34	0,26	0,97
1800	7,07	0,37	0,25	0,97
1950	7,64	0,40	0,22	0,97
2100	8,22	0,44	0,29	0,97
2250	8,85	0,47	0,28	0,97
2400	9,38	0,50	0,30	0,97
2550	9,98	0,53	0,29	0,96
2700	10,59	0,58	0,32	0,97



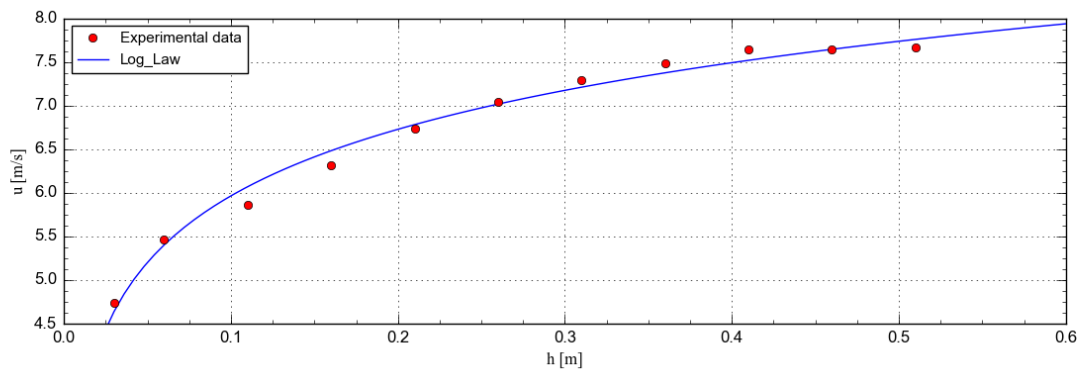
**Figura 4.14.** Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1500 RPM.



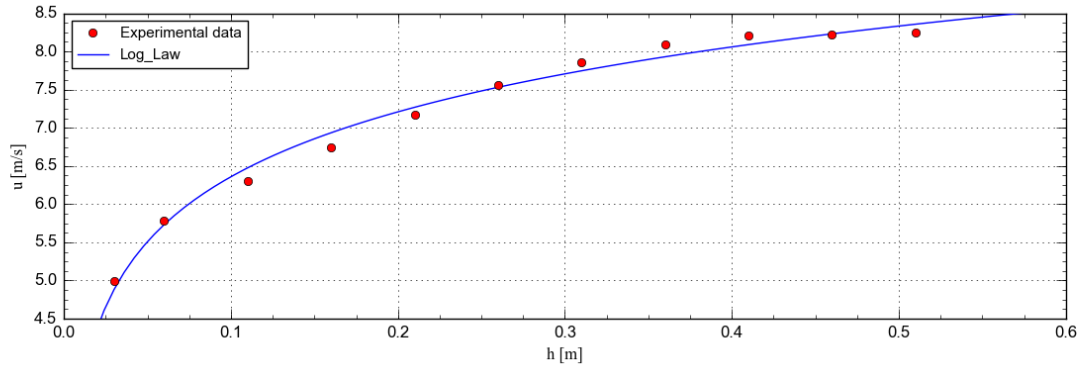
**Figura 4.15.** Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1650 RPM.



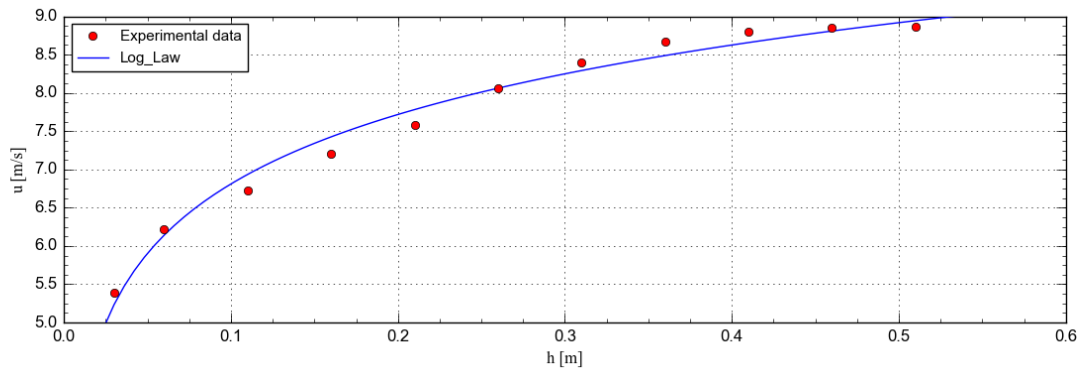
**Figura 4.16.** Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1800 RPM.



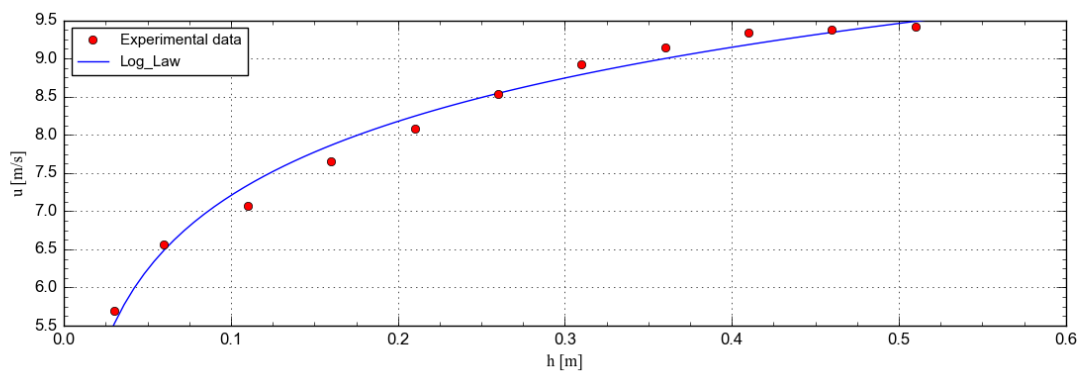
**Figura 4.17.** Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 1950 RPM.



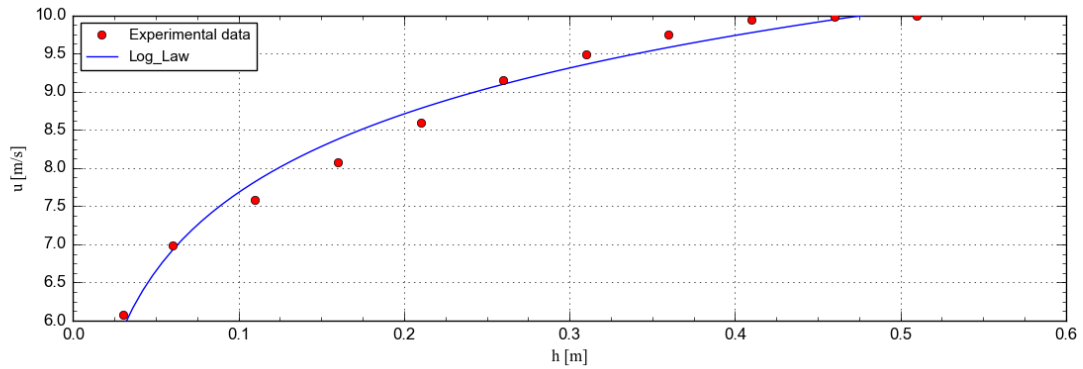
**Figura 4.18.** Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2100 RPM.



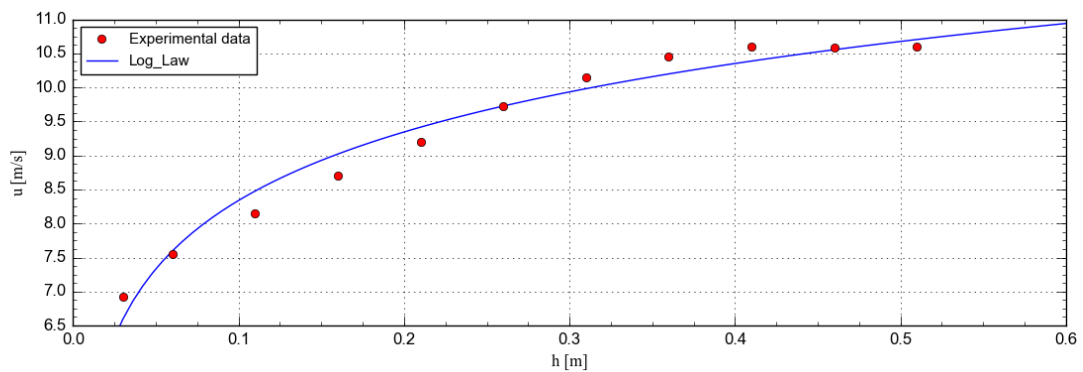
**Figura 4.19.** Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2250 RPM.



**Figura 4.20.** Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2400 RPM.



*Figura 4.21. Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2550 RPM.*



*Figura 4.22. Fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità del vento sui dati di velocità misurati per un regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM.*

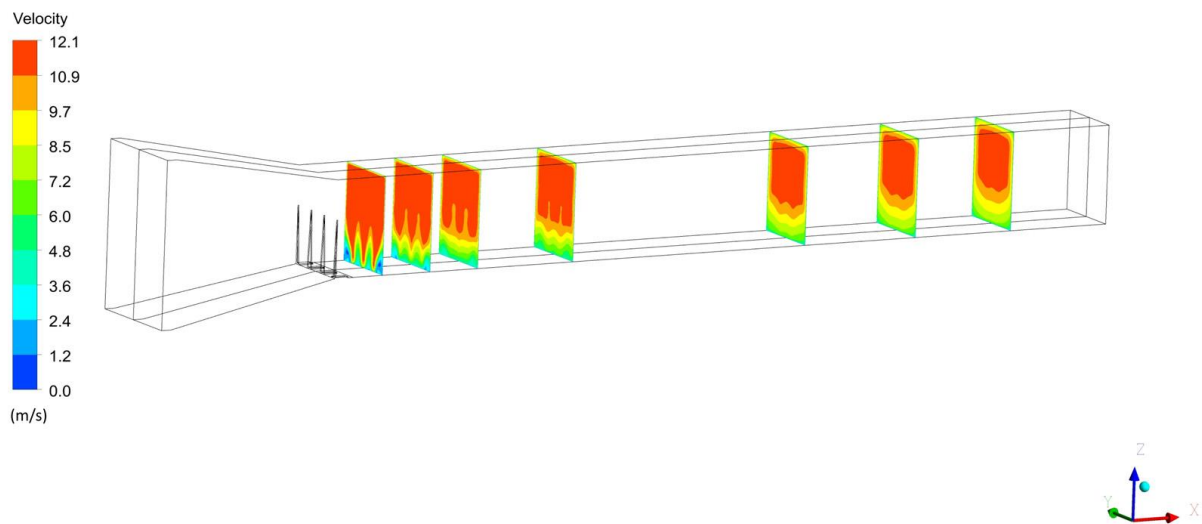
### 4.3 Analisi della Velocità del Vento nel Modello CFD della Galleria del Vento DICAAR

#### 4.3.1 Campi di Velocità del Vento

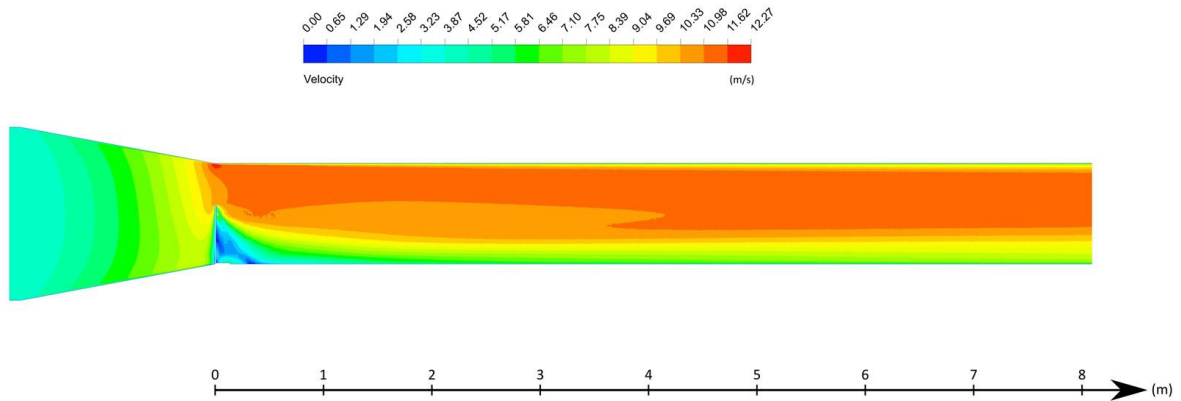
I risultati delle simulazioni CFD sono stati impiegati per analizzare lo sviluppo del campo di velocità del vento all'interno della galleria del vento DICAAR. A tal fine sono state definite sette sezioni trasversali di controllo, collocate a 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2,5 m, 5 m, 6 m e 7 m dall'ingresso della sezione di sviluppo del flusso. Le prime quattro sezioni ricadono interamente nella sezione di sviluppo, le ultime due si trovano all'interno della sezione di prova

in corrispondenza delle estremità dell'alloggiamento destinato ai campioni erodibili, mentre la quinta è posizionata nella zona di transizione tra le due sezioni.

Le Figure 4.23 e 4.24 illustrano l'influenza degli *spires* sulla generazione del campo di velocità. Gli *spires*, inducendo turbolenze sul pavimento della galleria, generano una non uniformità dei campi di velocità sul piano orizzontale della sezione di controllo per una distanza di circa tre metri. Tuttavia, come mostrato in Figura 4.23, nelle sezioni di controllo collocate all'interno della sezione di prova (a 5, 6 e 7 m dagli *spires*, ultimi tre grafici), i campi di velocità risultano pressoché uniformi in direzione laterale. La Figura 4.24 evidenzia che il campo di velocità si stabilizza completamente già prima dell'ingresso nella sezione di prova.

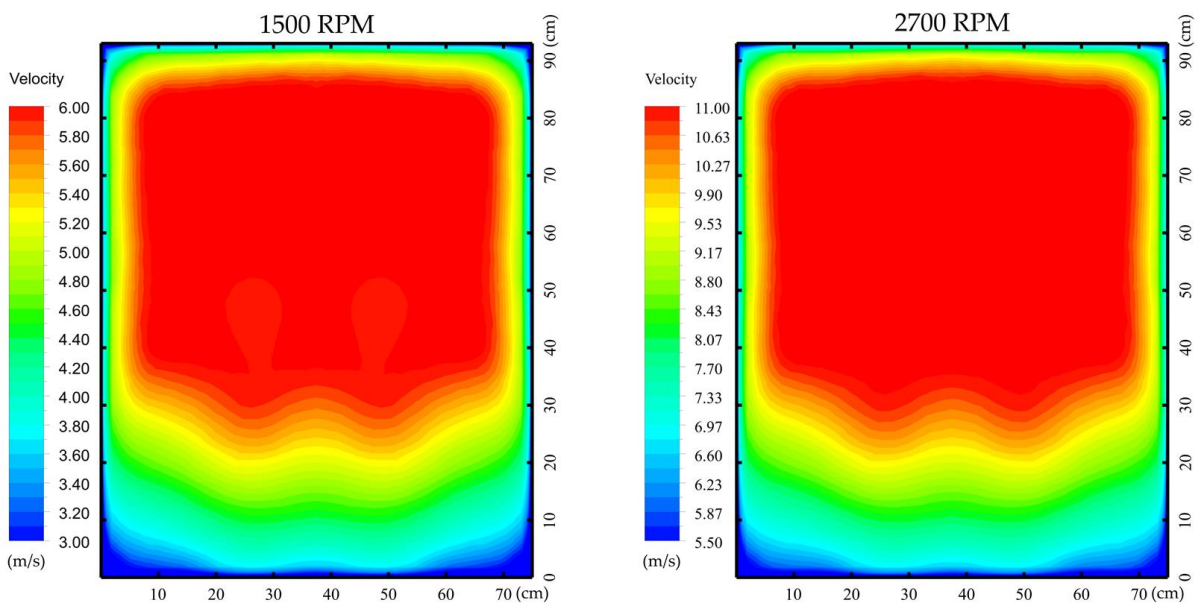


**Figura 4.23.** Sviluppo del campo di velocità all'interno della galleria del vento DICAAR lungo le sezioni trasversali di controllo (2700 RPM) (Pinna et al., 2024).



**Figura 4.24.** Sviluppo del campo di velocità all'interno della galleria del vento DICAAR lungo l'asse longitudinale (2700 RPM) (Pinna et al., 2024).

I campi di velocità simulati all'ingresso della sezione di prova sono riportati in Figura 4.25 per i due regimi di funzionamento del ventilatore indagati (1500 e 2700 RPM).



**Figura 4.25.** Campi di velocità del vento in galleria individuati tramite le simulazioni CFD (Pinna et al., 2024).

### 4.3.2 Profilo Verticale dello SLA

La Tabella 4.7 riporta i valori di velocità del vento simulati nei punti di misura lungo la linea di misura A, utilizzati per la validazione sperimentale (Figura 3.9). Il confronto con i dati sperimentali (linea di misura A in Tabella 4.2 e Tabella 4.3) evidenzia che la simulazione CFD

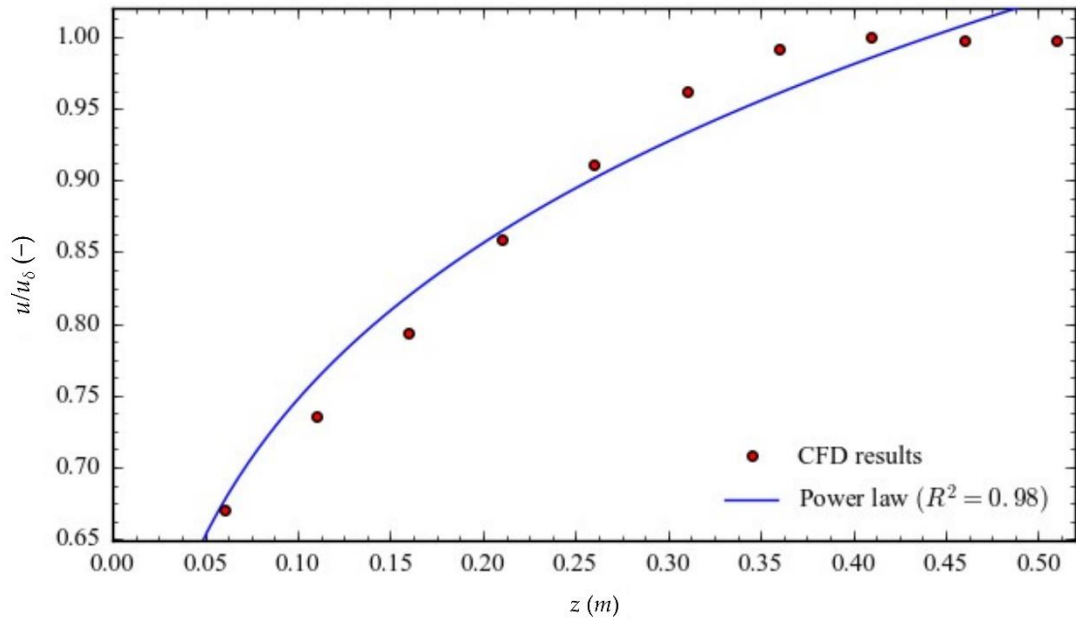
tende a sovrastimare le velocità del vento di circa il 5%. Per una caratterizzazione più accurata, ai dati simulati della Tabella 4.7 è stato eseguito il fitting della Legge di potenza, i cui risultati sono illustrati nelle Figure 4.26 e 4.27 e sintetizzati in Tabella 4.8.

**Tabella 4.7.** Profili di velocità del vento in galleria simulati con il CFD lungo la linea di misura A.

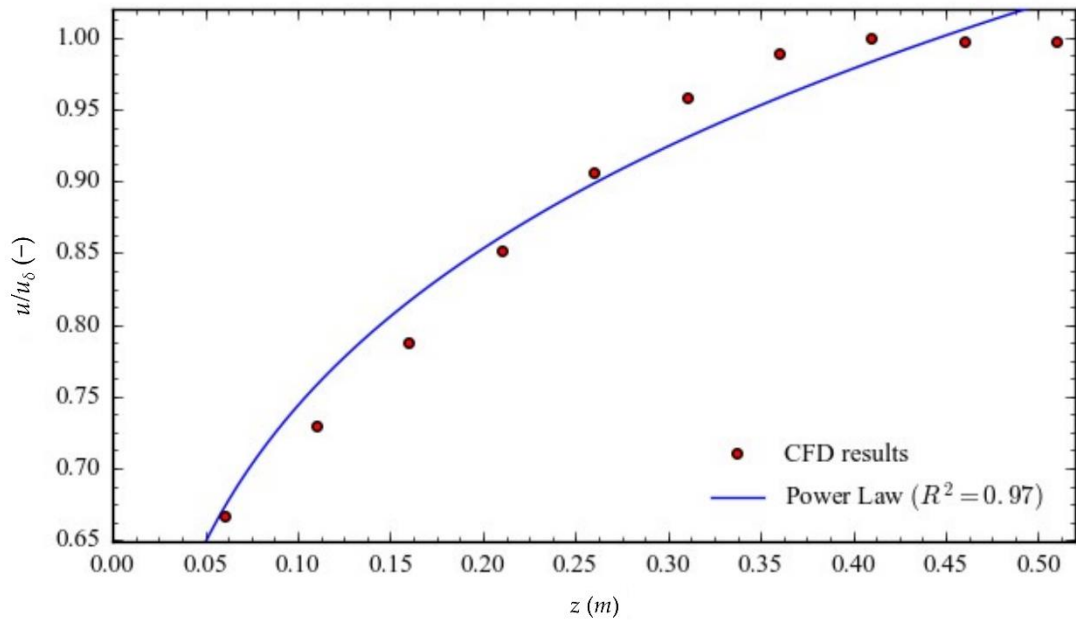
Velocità del vento [m s <sup>-1</sup> ]		
<i>h</i> [m]	1500 RPM	2700 RPM
<b>0,51</b>	6,02	11,11
<b>0,46</b>	6,02	11,12
<b>0,41</b>	6,04	11,14
<b>0,36</b>	5,99	11,02
<b>0,31</b>	5,81	10,68
<b>0,26</b>	5,51	10,10
<b>0,21</b>	5,19	9,50
<b>0,16</b>	4,80	8,78
<b>0,11</b>	4,44	8,13
<b>0,06</b>	4,05	7,44
<b>0,03</b>	3,69	6,92

**Tabella 4.8.** Risultati del fitting della Legge di potenza sui dati ricavati dalle simulazioni CFD.

RPM	$\alpha$ [-]	$\delta$ [m]	$R^2$
<b>1500</b>	0,20	0,44	0,98
<b>2700</b>	0,20	0,45	0,97
<b>Valori medi</b>	<b>0,20</b>	<b>0,45</b>	



**Figura 4.26.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità sui dati ricavati dalle simulazioni CFD (1500 RPM) (Pinna et al., 2024).



**Figura 4.27.** Fitting della Legge di potenza del profilo di velocità sui dati ricavati dalle simulazioni CFD (2700 RPM) (Pinna et al., 2024).

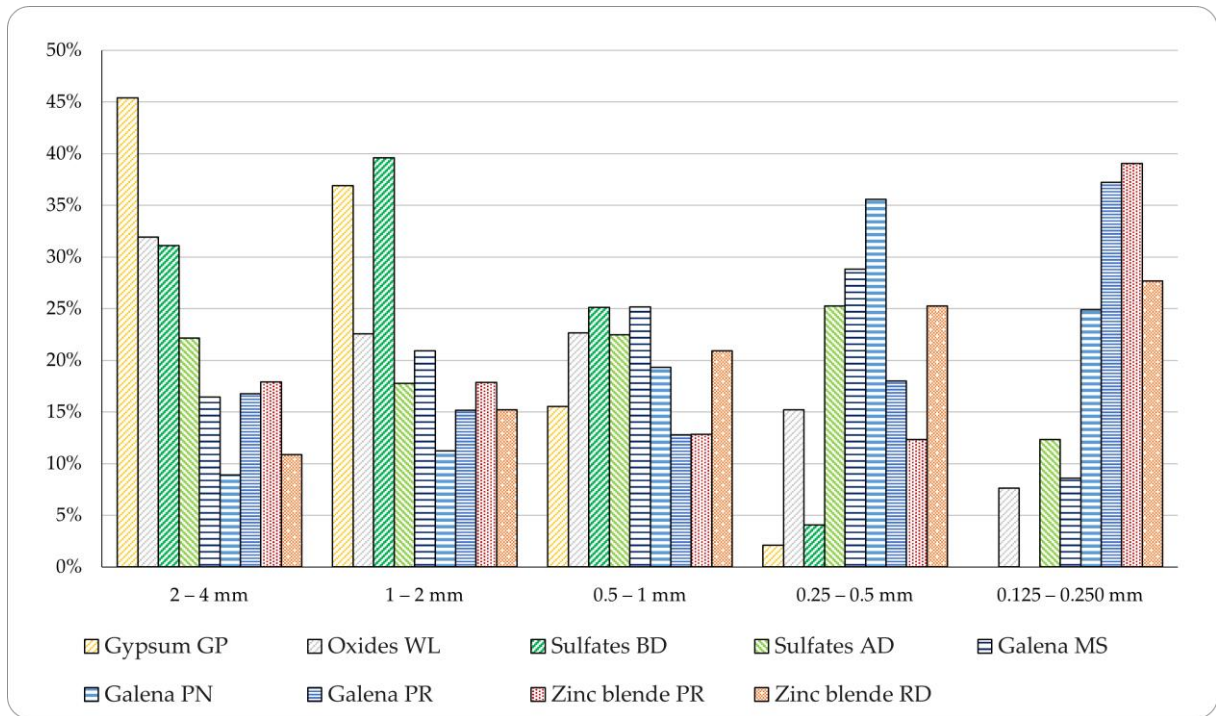
## 4.4 Determinazione della Velocità d'Attrito Limite dei Materiali

### 4.4.1 Procedura EPA Rivisitata

I risultati dei test condotti secondo la procedura EPA rivisitata sono riportati in Figura 4.28 e mostrano una presenza significativa di macroaggregati ( $d > 1$  mm) nel gesso GP (87%) e, in misura minore, nei solfati BD (70%). Una percentuale elevata di macroaggregati è stata riscontrata anche nei campioni di ossidi WL (55%  $> 1$  mm), mentre i campioni di solfati AD, le blende e le galene risultano costituiti in prevalenza da aggregati con dimensioni inferiori a 1 mm. In particolare, nei campioni di galena PR e di blenda PR è stata rilevata una notevole frazione di materiale fine, con circa il 40% del totale compreso nella classe granulometrica più bassa (125–250  $\mu\text{m}$ ).

La moda delle distribuzioni granulometriche determinate sperimentalmente è riportata in Tabella 4.9. È importante evidenziare che, poiché in questo studio è stato introdotto un setaccio aggiuntivo da 0,125 mm (non previsto nella procedura ufficiale EPA), per i campioni di galena PR e di blenda PR e RD è stata ottenuta una moda pari a 0,188 mm.

I valori di velocità di attrito limite, stimati attraverso le correlazioni fornite dall'EPA (Tabella 3.3), sono riportati in Tabella 4.10. I risultati indicano che i materiali caratterizzati da una predominanza di macroaggregati (gesso GP, ossidi WL e solfati BD) presentano la maggiore resistenza all'azione erosiva del vento ( $u^*_t = 0,76$  m/s per i solfati BD,  $u^*_t = 1$  m/s per il gesso GP e gli ossidi WL). Al contrario, i restanti materiali mostrano valori di  $u^*_t$  pari a 0,43 m/s (solfati AD e galena PN e MS) o inferiori (galena PR e blenda PR e RD).



**Figura 4.28.** Distribuzione granulometrica degli aggregati determinata attraverso la procedura EPA rivisitata (Lai et al., 2025).

**Tabella 4.9.** Moda della distribuzione granulometrica degli aggregati determinata tramite la procedura EPA rivisitata.

Materiale	Gesso GP	Ossidi WL	Solfati BD	Solfati AD	Galena MS	Galena PN	Galena PR	Blenda PR	Blenda RD
<b>Moda [mm]</b>	3,00	3,00	1,50	0,375	0,375	0,375	0,188	0,188	0,188

**Tabella 4.10.** Velocità d'attrito limite determinata tramite la procedura EPA rivisitata.

Materiale	Gesso GP	Ossidi WL	Solfati BD	Solfati AD	Galena MS	Galena PN	Galena PR	Blenda PR	Blenda RD
<b><math>u^*_{t,EPA}</math> [m s<sup>-1</sup>]</b>	1	1	0,76	0,43	0,43	0,43	< 0,43	< 0,43	< 0,43

## 4.4.2 Galleria del Vento DICAAR

I risultati ottenuti tramite i test eseguiti nella galleria del vento DICAAR (*Environmental Wind Tunnel* - EWT) sono riportati in Tabella 4.11 e mostrano la differenza percentuale media dei tre test tra le concentrazioni medie di PM<sub>10</sub> misurate a monte e a valle dei campioni. Nella suddetta Tabella, i valori della velocità di attrito limite di ciascun materiale individuati tramite la procedura descritta nel paragrafo 3.3.3.2 sono evidenziati in grassetto.

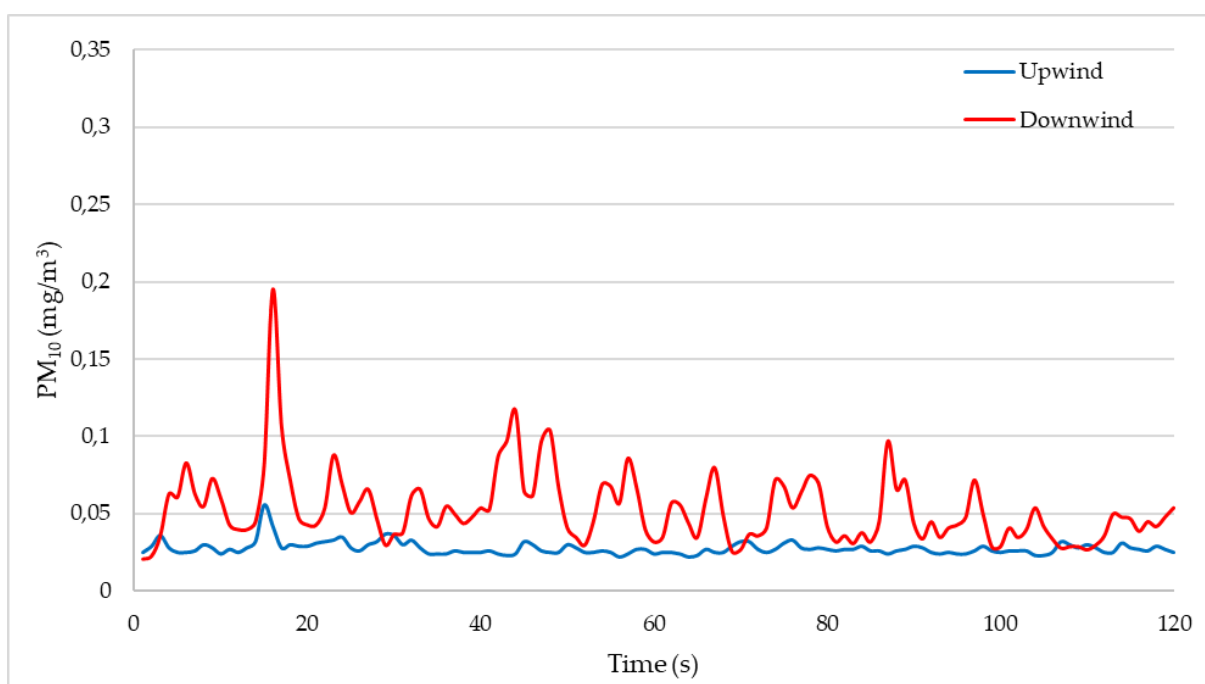
I test eseguiti nella galleria del vento DICAAR evidenziano che i materiali meno resistenti all'erosione eolica sono i solfati AD e la blenda PR, che iniziano a rilasciare quantità significative di PM<sub>10</sub> a una velocità d'attrito limite pari a 0,34 m/s. Il fenomeno erosivo ha avuto inizio a velocità d'attrito pari a 0,40 m/s per la blenda RD e per la galena PR e PN, mentre valori leggermente più elevati sono stati riscontrati per i solfati BD e la galena MS (0,44 m/s). Infine, i materiali caratterizzati dalla maggiore resistenza all'azione del vento sono risultati gli ossidi WL e il gesso GP, con velocità di soglia rispettivamente pari a 0,47 m/s e 0,53 m/s.

**Tabella 4.11.** Differenza percentuale media delle concentrazioni medie di PM<sub>10</sub> (sottovento - sopravvento) determinate in funzione della velocità di attrito e velocità di soglia individuate attraverso i test nella galleria del vento DICAAR (EWT).

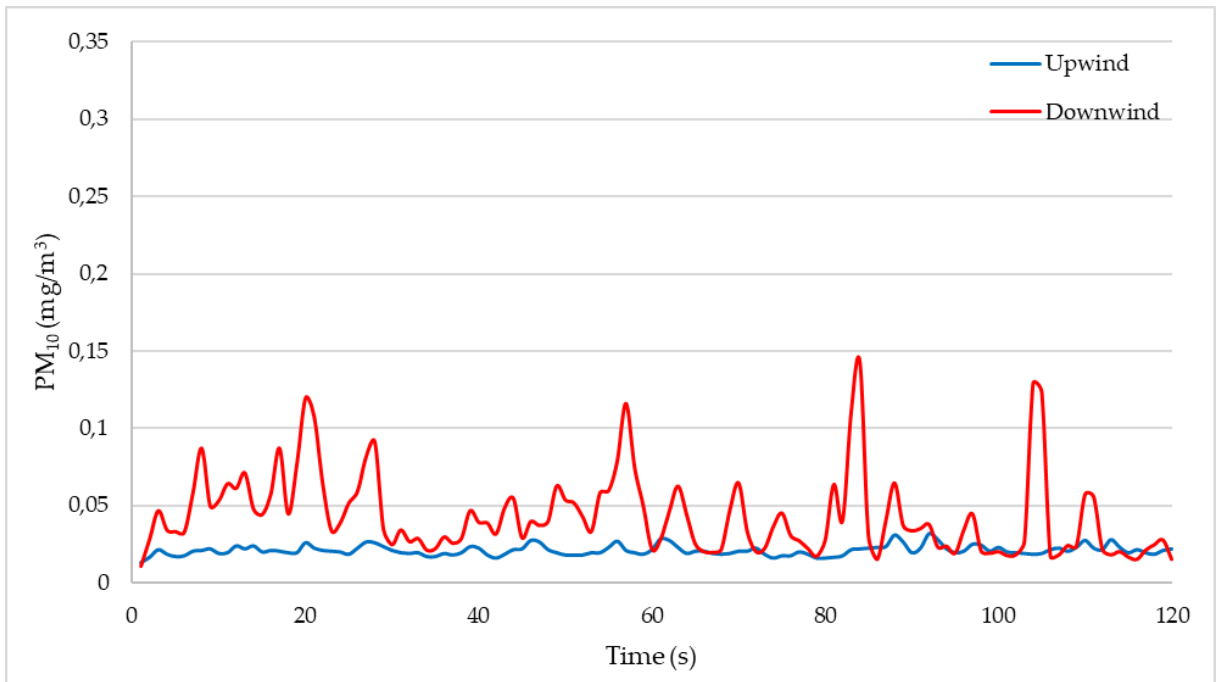
Variazione delle concentrazioni di PM <sub>10</sub> (sottovento - sopravvento) [%]									
$u^*$ [m s <sup>-1</sup> ]	Gesso GP	Ossidi WL	Solfati BD	Solfati AD	Galena MS	Galena PN	Galena PR	Blenda PR	Blenda RD
<b>0,34</b>	0	0	0	<b>92</b>	0	0	5	<b>22</b>	0
<b>0,37</b>	0	0	16	-	8	4	5	68	19
<b>0,40</b>	0	0	0	-	0	<b>107</b>	<b>49</b>	-	<b>125</b>
<b>0,44</b>	0	0	<b>34</b>	-	<b>36</b>	-	-	-	-
<b>0,47</b>	0	<b>29</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>0,50</b>	0	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>0,53</b>	<b>39</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>0,56</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$u^*_{t,EWT}$ [m s <sup>-1</sup> ]	<b>0,53</b>	<b>0,47</b>	<b>0,44</b>	<b>0,34</b>	<b>0,44</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,34</b>	<b>0,40</b>

I risultati sperimentali hanno evidenziato che la soglia del 20% di differenza di concentrazione media di  $PM_{10}$  tra i *DustTrak* posizionati a monte e a valle, utilizzata come procedura per l'individuazione dell' $u^*_t$  (paragrafo 3.3.3.2), è stata raggiunta dai campioni granulari analizzati attraverso due meccanismi distinti. A titolo esemplificativo, si riportano le Figure 4.29-4.32 che illustrano le curve di concentrazione di  $PM_{10}$  misurate alla velocità di attrito soglia, per i punti di campionamento sopravento (linea blu) e sottovento (linea rossa).

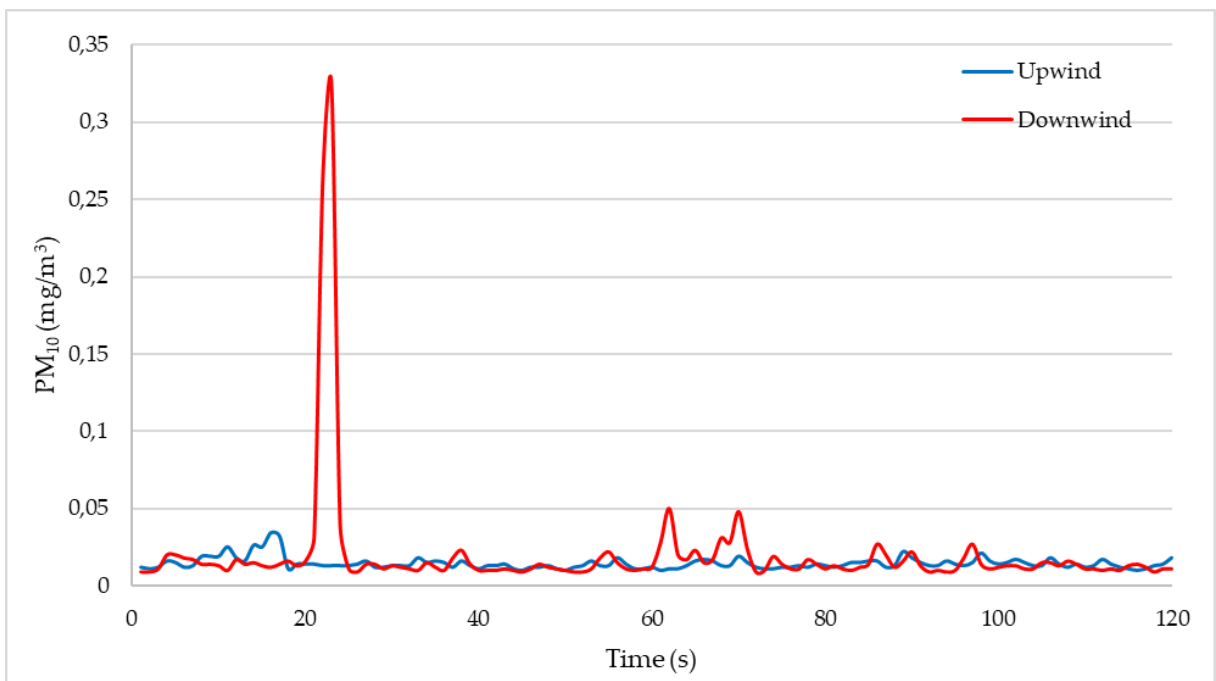
Per alcuni materiali (solfati AD e galena PN, Figure 4.29 e 4.30), il superamento della velocità di soglia coincide con l'avvio di un'emissione sostenuta, riconducibile al fenomeno della saltazione. In altri casi (solfati BD e gesso GP, Figure 4.31 e 4.32), l'incremento della concentrazione media a valle è stato determinato prevalentemente da picchi istantanei di PM, piuttosto che da una condizione di emissione continua, caratteristica tipica dei processi di sollevamento diretto (Macpherson et al., 2008; Wu et al., 2018).



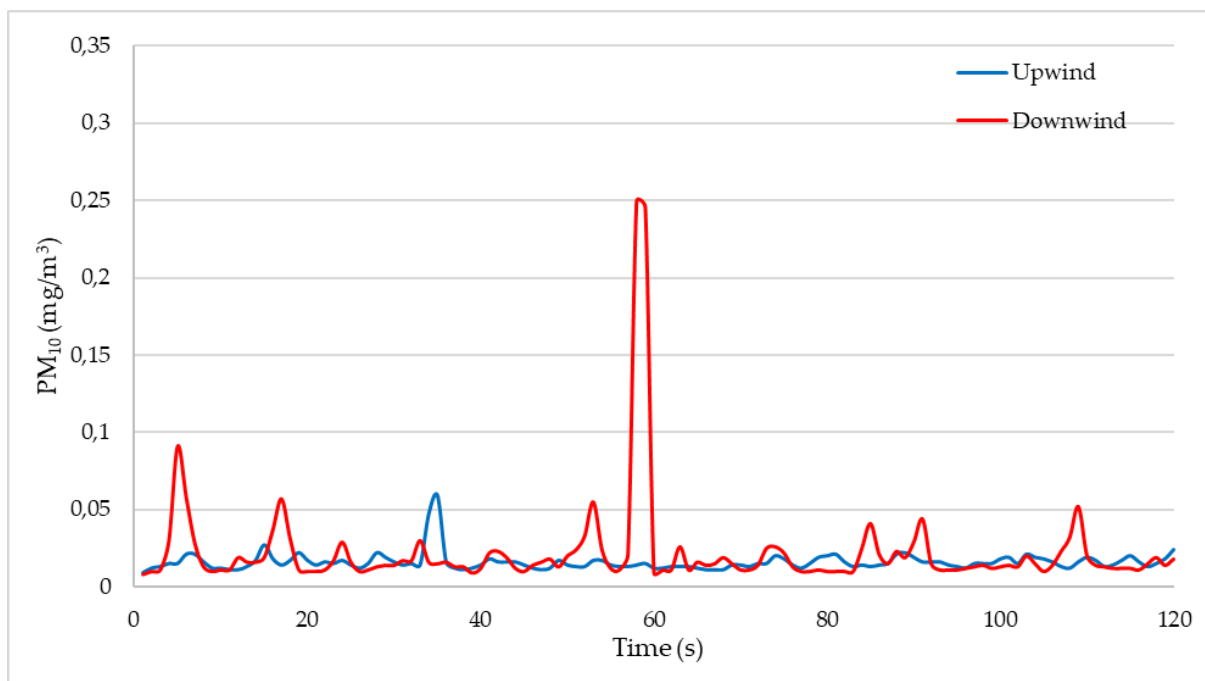
**Figura 4.29.** Concentrazioni di  $PM_{10}$  misurate sopravento (blu) e sottovento (rosso) rispetto al campione di solfati AD, alla velocità di attrito soglia  $u^*_t = 0,34$  m/s.



**Figura 4.30.** Concentrazioni di  $PM_{10}$  misurate sopravento (blu) e sottovento (rosso) rispetto al campione di galena PN, alla velocità di attrito soglia  $u^*_t = 0,40$  m/s.



**Figura 4.31.** Concentrazioni di  $PM_{10}$  misurate sopravento (blu) e sottovento (rosso) rispetto al campione di solfati BD, alla velocità di attrito soglia  $u^*_t = 0,44$  m/s.



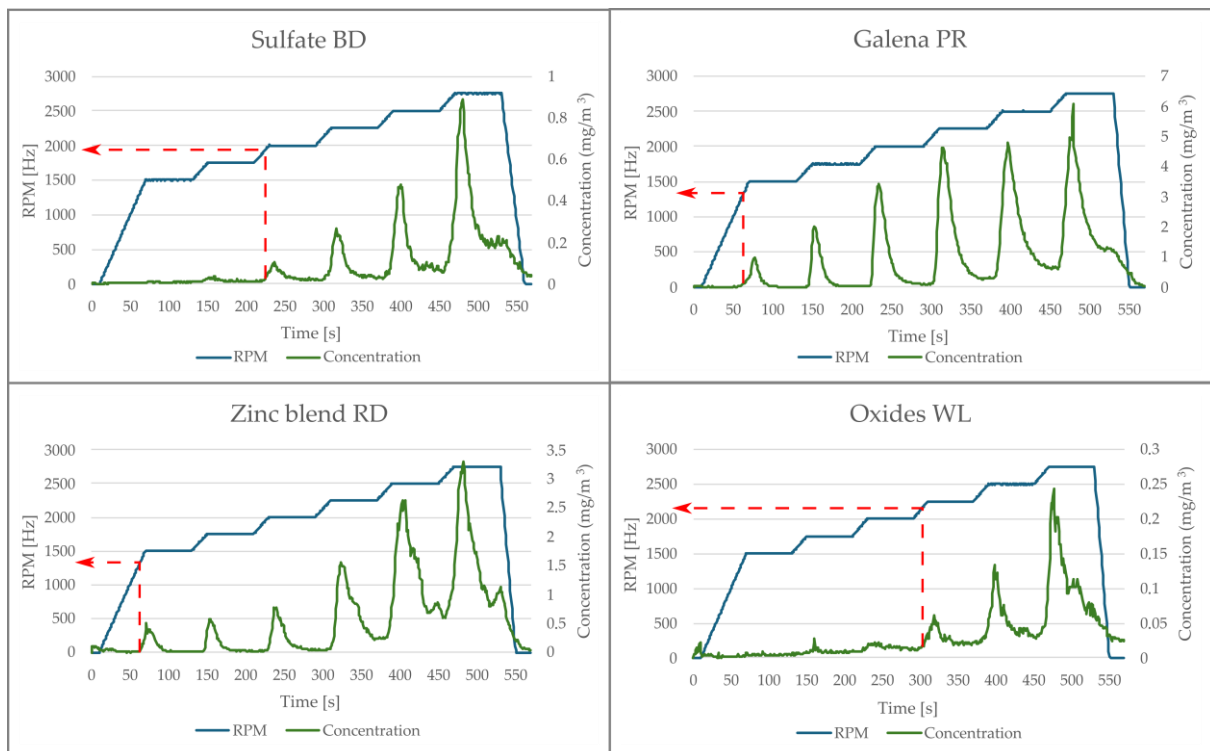
**Figura 4.32.** Concentrazioni di  $PM_{10}$  misurate sopravento (blu) e sottovento (rosso) rispetto al campione di gesso GP, alla velocità di attrito soglia  $u^*_t = 0,52$  m/s.

#### 4.4.3 PI-SWERL

I risultati dei test eseguiti tramite il PI-SWERL sono riportati nella Tabella 4.12. I valori di velocità di attrito limite sono risultati inferiori a 0,30 m/s per la blenda PR (0,29 m/s), mentre velocità di soglia leggermente superiori sono state osservate per i solfati AD, galena PN, galena PR e RD (tutti compresi tra 0,31 e 0,32 m/s). Gli ossidi WL si sono dimostrati i materiali che mostrano la maggiore resistenza all'azione del vento ( $u^*_t = 0,60$  m/s), leggermente superiore a quella dei solfati BD ( $u^*_t = 0,54$  m/s). Un valore intermedio è stato riscontrato per la galena MS ( $u^*_t = 0,41$  m/s). Le prove non sono state eseguite sul gesso GP, a causa del deterioramento dei campioni durante il trasporto dall'Università di Cagliari all'Università di Basilea, dove sono state eseguite le misure con il PI-SWERL. La Figura 4.33 rappresenta, a titolo esemplificativo, la determinazione dell' $u^*_t$  da alcune prove effettuate con il PI-SWERL. Si osserva che, a seguito di una folata di polvere indotta durante ciascuna fase di incremento della velocità di rotazione della piastra rotante, si verifica una rapida diminuzione dei valori di concentrazione di  $PM_{10}$  durante la fase costante. Questo comportamento può essere associato sia al sollevamento diretto della polvere sia a materiali a potenziale erodibile limitato.

**Tabella 4.12.** Velocità d'attrito limite determinata tramite il PI-SWERL e deviazione standard.

Materiale	Gesso GP	Ossidi WL	Solfati BD	Solfati AD	Galena MS	Galena PN	Galena PR	Blenda PR	Blenda RD
$u^*_{i,PI-SWERL}$ [m s <sup>-1</sup> ]	/	0,60	0,54	0,31	0,41	0,31	0,31	0,29	0,32
<b>Deviazione standard</b>	/	0,065	0,059	0,006	0,087	0,011	0,018	0,017	0,025



**Figura 4.33.** Esempi di identificazione dell' $u^*_i$ , attraverso i test sperimentali con il PI-SWERL. La linea rossa tratteggiata indica l'inizio del processo di erosione e la corrispondente velocità di rotazione della piastra (RPM). Per determinare la velocità di attrito limite viene infine utilizzata l'equazione (3.6) (Lai et al., 2025).

## 4.5 Emissione dei Materiali Tal Quale

### 4.5.1 Profili Verticali di Concentrazione

I profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> misurati nel corso delle prove sperimentali sui campioni granulari investigati hanno evidenziato la dipendenza delle concentrazioni misurate dalla velocità d'attrito e dalla vicinanza del punto di misura al pavimento della galleria. Le

Tabelle 4.13-4.21 riportano le concentrazioni medie di PM<sub>10</sub> individuate nei test sperimentali nella galleria del vento DICAAR.

**Tabella 4.13.** *Profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (gesso GP).*

<b>Concentrazioni Gesso GP [mg m<sup>-3</sup>]</b>			
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,50 m/s</b>	<b>0,53 m/s</b>	<b>0,58 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00
<b>0,06</b>	0,02	0,00	0,00
<b>0,03</b>	0,00	0,00	0,01

**Tabella 4.14.** Profili di concentrazione di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito (ossidi WL).

<b>Concentrazioni ossidi WL [mg m<sup>-3</sup>]</b>						
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
<b>0,06</b>	0,00	0,00	0,02	0,04	0,03	0,01
<b>0,03</b>	0,03	0,01	0,07	0,32	0,17	0,12

**Tabella 4.15.** *Profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (solfati BD).*

<b>Concentrazioni solfati BD [mg m<sup>-3</sup>]</b>						
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,06</b>	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,03</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06

**Tabella 4.16.** *Profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (solfati AD).*

<b>Concentrazioni solfati AD [mg m<sup>-3</sup>]</b>						
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,02	0,01	0,02	0,02
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,11</b>	0,01	0,03	0,04	0,06	0,12	0,01
<b>0,06</b>	0,07	0,20	0,21	0,41	0,46	0,30
<b>0,03</b>	0,24	0,59	0,40	0,50	0,27	1,10

**Tabella 4.17.** *Profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (galena MS).*

<b>Concentrazioni galena MS [mg m<sup>-3</sup>]</b>						
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,06</b>	0,00	0,00	0,04	0,01	0,05	0,12
<b>0,03</b>	0,00	0,00	0,01	0,06	0,39	0,48

**Tabella 4.18.** *Profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (galena PN).*

<b>Concentrazioni galena PN [mg m<sup>-3</sup>]</b>						
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
<b>0,06</b>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,81
<b>0,03</b>	0,00	0,00	0,03	0,03	0,34	2,03

**Tabella 4.19.** *Profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (galena PR).*

<b>Concentrazioni galena PR [mg m<sup>-3</sup>]</b>						
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,36</b>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
<b>0,06</b>	0,00	0,01	0,01	0,13	0,02	0,05
<b>0,03</b>	0,01	0,00	0,02	0,04	0,18	0,23

**Tabella 4.20.** *Profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (blenda PR).*

<b>Concentrazioni blenda PR [mg m<sup>-3</sup>]</b>						
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01
<b>0,06</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,12	0,91
<b>0,03</b>	0,01	0,00	0,01	0,18	0,57	1,09

**Tabella 4.21.** *Profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (blenda RD).*

<b>Concentrazioni blenda RD [mg m<sup>-3</sup>]</b>						
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02
<b>0,06</b>	0,01	0,00	0,02	0,04	0,03	0,32
<b>0,03</b>	0,00	0,00	0,18	0,07	0,23	2,48

#### **4.5.2 Emissioni**

Analogamente a quanto ottenuto con i profili di concentrazione misurati, anche le emissioni dei materiali granulari investigati hanno evidenziato la loro dipendenza dalla velocità d'attrito. I risultati determinati nel corso delle prove sui campioni di materiale granulare sono riportati in Tabella 4.22. Si evidenzia che il gesso GP risulta il materiale avente un minore potenziale emissivo, seguito dagli ossidi WL e solfati BD. I materiali con un potenziale emissivo maggiore risultano invece la galena PN, le blende PR e RD e i solfati AD. Si evidenzia inoltre che i solfati AD risultano gli unici materiali che emettono più di 0,10 mg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> per le tre minori velocità d'attrito indagate ( $u^* \leq 0,40$  m/s).

**Tabella 4.22.** Emissioni di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito per i diversi campioni granulari.

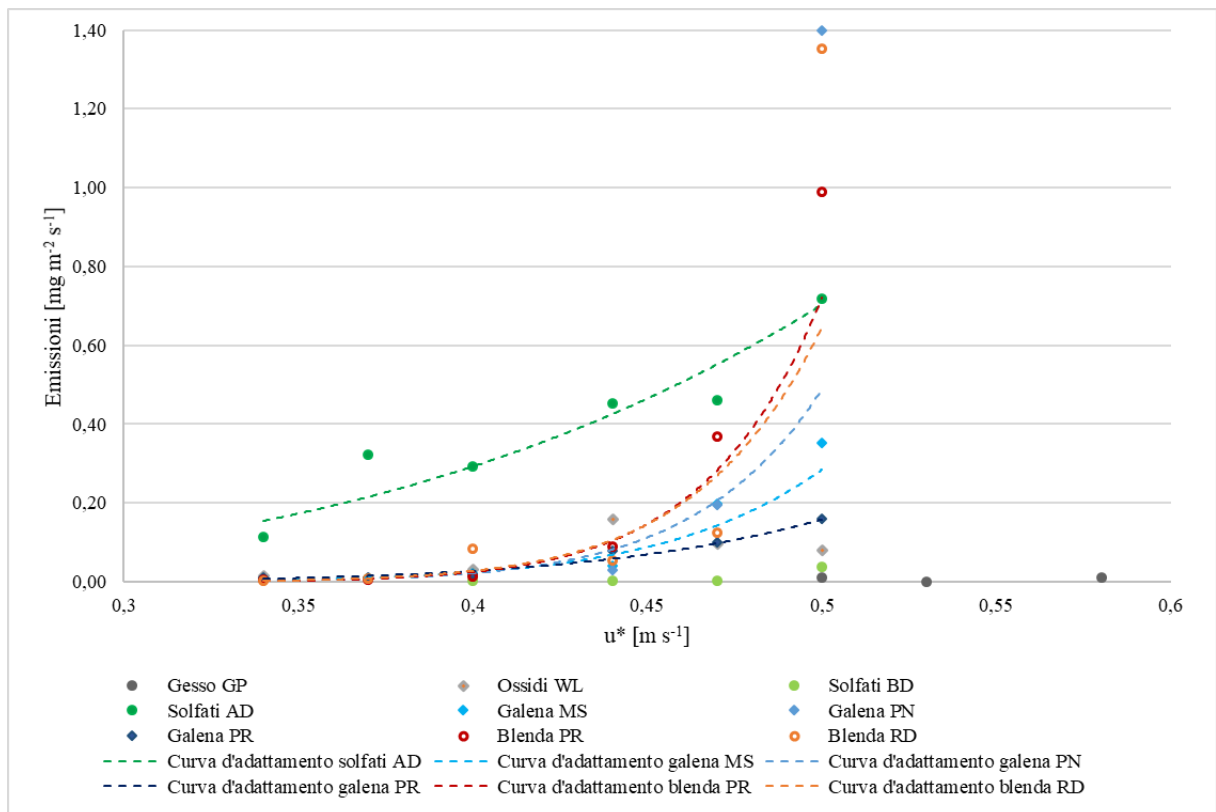
Materiale	Emissioni [ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]							
	0,34 m/s	0,37 m/s	0,40 m/s	0,44 m/s	0,47 m/s	0,50 m/s	0,53 m/s	0,58 m/s
<b>Gesso GP</b>						0,01	0,00	0,01
<b>Ossidi WL</b>	0,01	0,01	0,05	0,16	0,10	0,08		
<b>Solfati BD</b>	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04		
<b>Solfati AD</b>	0,11	0,32	0,29	0,45	0,46	0,72		
<b>Galena MS</b>	0,01	0,01	0,02	0,04	0,20	0,35		
<b>Galena PN</b>	0,01	0,00	0,01	0,03	0,20	1,40		
<b>Galena PR</b>	0,01	0,01	0,02	0,08	0,10	0,16		
<b>Blenda PR</b>	0,00	0,00	0,01	0,09	0,37	0,99		
<b>Blenda RD</b>	0,00	0,01	0,08	0,05	0,12	1,35		

È stata osservata una relazione positiva di tipo potenziale tra le emissioni di  $PM_{10}$  e la velocità d'attrito del vento, descrivibile con una legge del tipo  $E = a \cdot u_*^b$  (Figura 4.34). Tale relazione è stata identificata per tutti i campioni, ad eccezione dei materiali meno emissivi (gesso GP, ossidi WL e solfati BD), per i quali le quantità di polvere emessa risultavano troppo basse per l'identificazione di una curva di tendenza affidabile. I risultati del fitting della legge di potenza sui dati sperimentali sono riportati nella Tabella 4.23.

La presenza di una relazione di tipo potenziale tra le emissioni di  $PM_{10}$  e la velocità d'attrito del vento risulta coerente con la letteratura scientifica, nella quale tale legge è comunemente utilizzata per rappresentare la variabilità delle emissioni in funzione della velocità di attrito (Gillette, 1977; Nickling & Gillies, 1993; Shao, 2008).

**Tabella 4.23.** Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR in funzione della velocità d'attrito (materiali allo stato tal quale).

Materiale	$a$	$b$	$R^2$
Solfati AD	7,87	3,54	0,90
Galena MS	$1,8 \cdot 10^3$	12,31	0,98
Galena PN	$7,6 \cdot 10^3$	13,92	0,92
Galena PR	26,86	7,37	0,97
Blenda PR	$1,3 \cdot 10^5$	16,97	1,00
Blenda RD	$1,1 \cdot 10^4$	14,11	0,89



**Figura 4.34.** Dipendenza delle emissioni di  $PM_{10}$  dalla velocità d'attrito del vento per i campioni di materiale granulare allo stato tal quale.

## 4.6 Emissione dei Materiali Asciutti

### 4.6.1 Galleria del Vento DICAAR

#### 4.6.1.1 Profili Verticali di Concentrazione

Anche per i due materiali asciutti investigati, i profili di concentrazione misurati nel corso delle prove sperimentali hanno evidenziato la dipendenza delle concentrazioni misurate dalla velocità d'attrito e dalla vicinanza del punto di misura al pavimento della galleria. Le Tabelle 4.24-4.27 riportano le concentrazioni di  $PM_{10}$  individuate, riportate come media dei tre test sperimentali effettuati nella galleria del vento DICAAR.

*Tabella 4.24. Profili di concentrazione di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito (galena PN asciutta).*

Concentrazioni galena PN [ $mg\ m^{-3}$ ]							
<i>h</i> [m]	0,34 m/s	0,37 m/s	0,40 m/s	0,44 m/s	0,47 m/s	0,50 m/s	0,53 m/s
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
<b>0,46</b>	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,11</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,09
<b>0,06</b>	0,01	0,01	0,02	0,06	0,11	0,37	1,66
<b>0,03</b>	0,00	0,02	0,04	0,18	0,74	1,78	3,45

**Tabella 4.25.** *Profili di concentrazione di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito (blenda RD asciutta).*

<b>Concentrazioni blenda RD [mg m<sup>-3</sup>]</b>							
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>	<b>0,53 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
<b>0,16</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,06	0,08
<b>0,06</b>	0,01	0,02	0,22	0,36	0,71	1,74	4,29
<b>0,03</b>	0,04	1,00	1,48	1,52	3,04	10,98	11,71

**Tabella 4.26.** *Profili di concentrazione di PM<sub>2,5</sub> al variare della velocità d'attrito (galena PN asciutta).*

<b>Concentrazioni galena PN [mg m<sup>-3</sup>]</b>							
<b><i>h</i> [m]</b>	<b>0,34 m/s</b>	<b>0,37 m/s</b>	<b>0,40 m/s</b>	<b>0,44 m/s</b>	<b>0,47 m/s</b>	<b>0,50 m/s</b>	<b>0,53 m/s</b>
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07
<b>0,06</b>	0,00	0,01	0,02	0,04	0,09	0,29	1,41
<b>0,03</b>	0,00	0,01	0,02	0,14	0,63	1,47	2,91

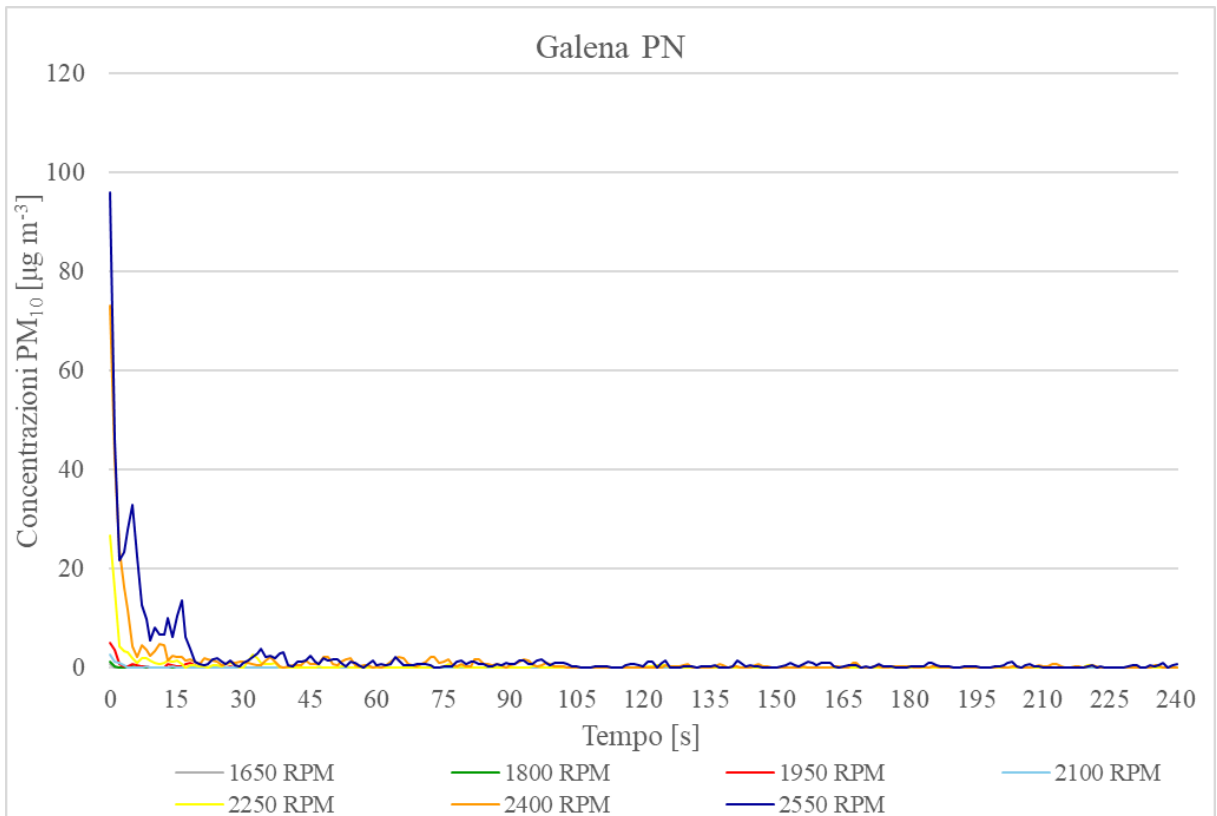
**Tabella 4.27.** Profili di concentrazione di  $PM_{2,5}$  al variare della velocità d'attrito (blenda RD asciutta).

Concentrazioni blenda RD [ $mg\ m^{-3}$ ]							
<i>h</i> [m]	0,34 m/s	0,37 m/s	0,40 m/s	0,44 m/s	0,47 m/s	0,50 m/s	0,53 m/s
<b>0,51</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,46</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,41</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,36</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,31</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,26</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,21</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,16</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,06
<b>0,06</b>	0,00	0,01	0,18	0,30	0,65	1,51	3,79
<b>0,03</b>	0,00	0,84	1,33	1,22	2,75	9,95	10,21

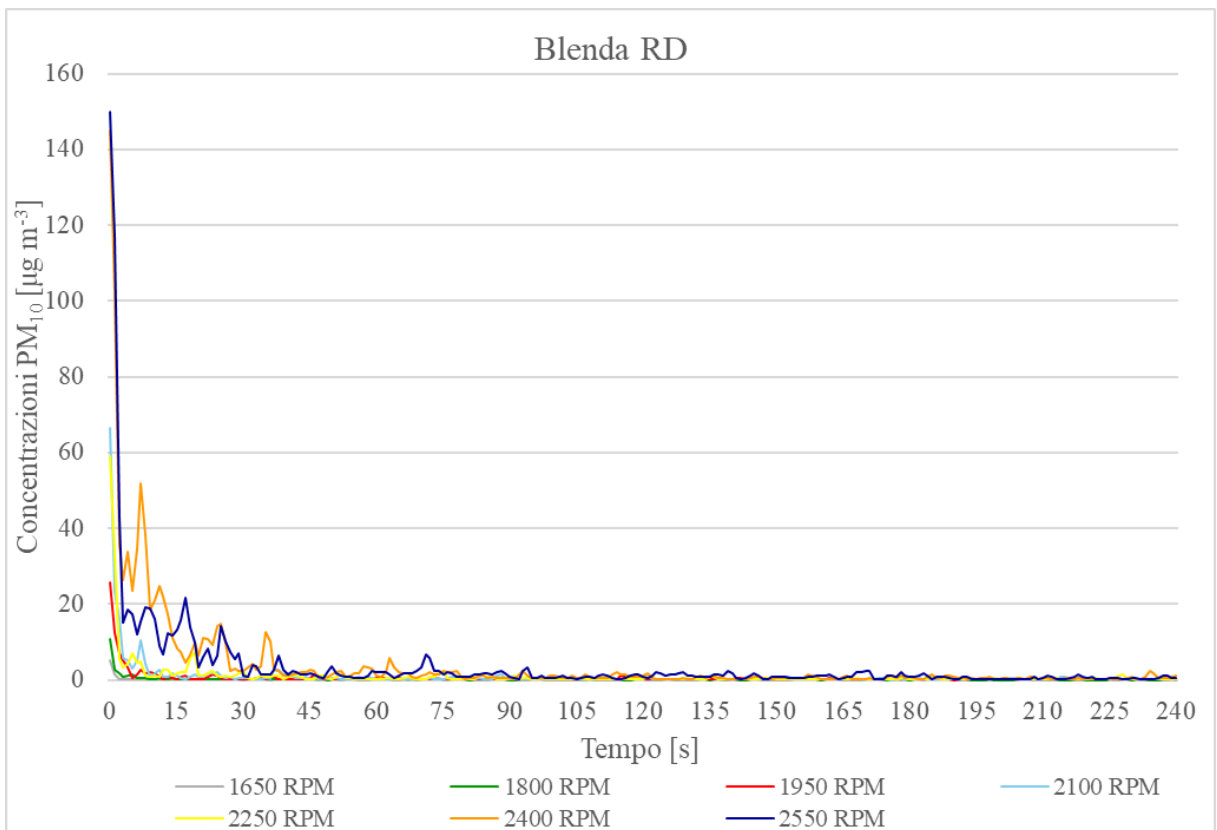
#### 4.6.1.2 Andamento delle Concentrazioni nel Tempo

I risultati delle misure di concentrazione di  $PM_{10}$  a lungo termine sono riportati nella Figura 4.35 e nella Figura 4.36. Le Figure mostrano, per ciascuna velocità d'attrito investigata, la presenza di un picco iniziale di concentrazione, seguito da un rapido decadimento. L'intensità dei picchi, così come le concentrazioni misurate negli istanti successivi, aumentano con l'incremento della velocità d'attrito del vento.

Il comportamento decrescente riscontrato può essere associato sia al sollevamento diretto della polvere sia a materiali a potenziale erodibile limitato ed è coerente con i risultati ottenuti e riportati nel paragrafo 4.4.



**Figura 4.35.** Andamento delle concentrazioni di  $PM_{10}$  nel tempo (galena PN).

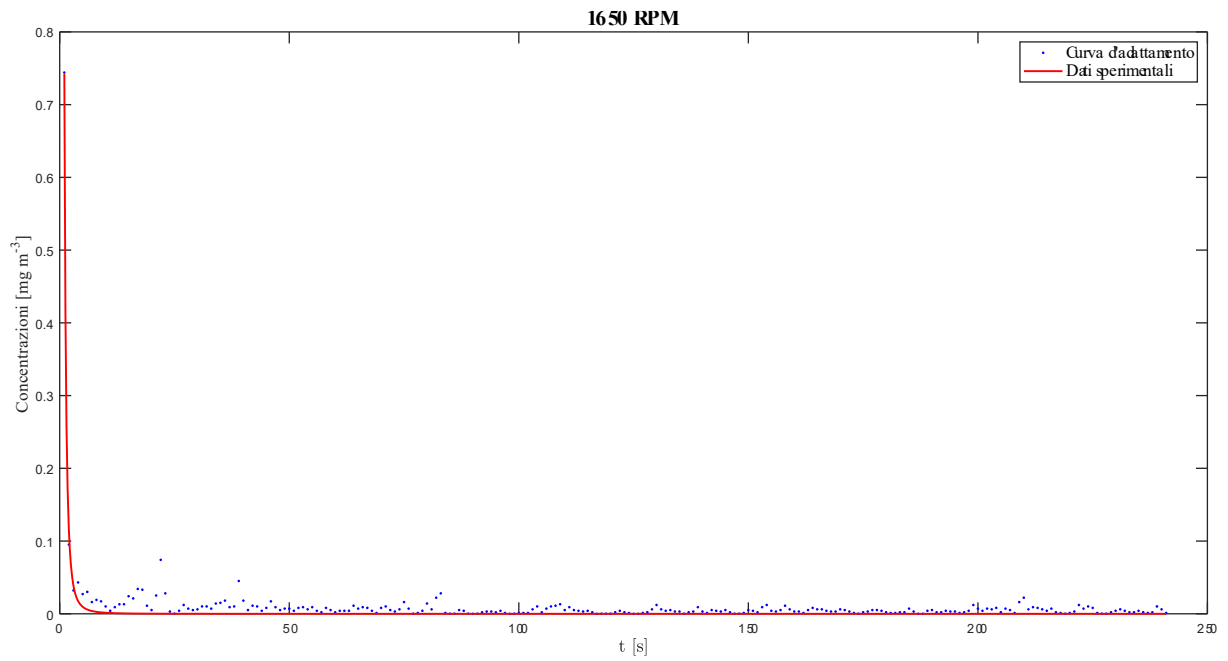


**Figura 4.36.** Andamento delle concentrazioni di  $PM_{10}$  nel tempo (blenda RD).

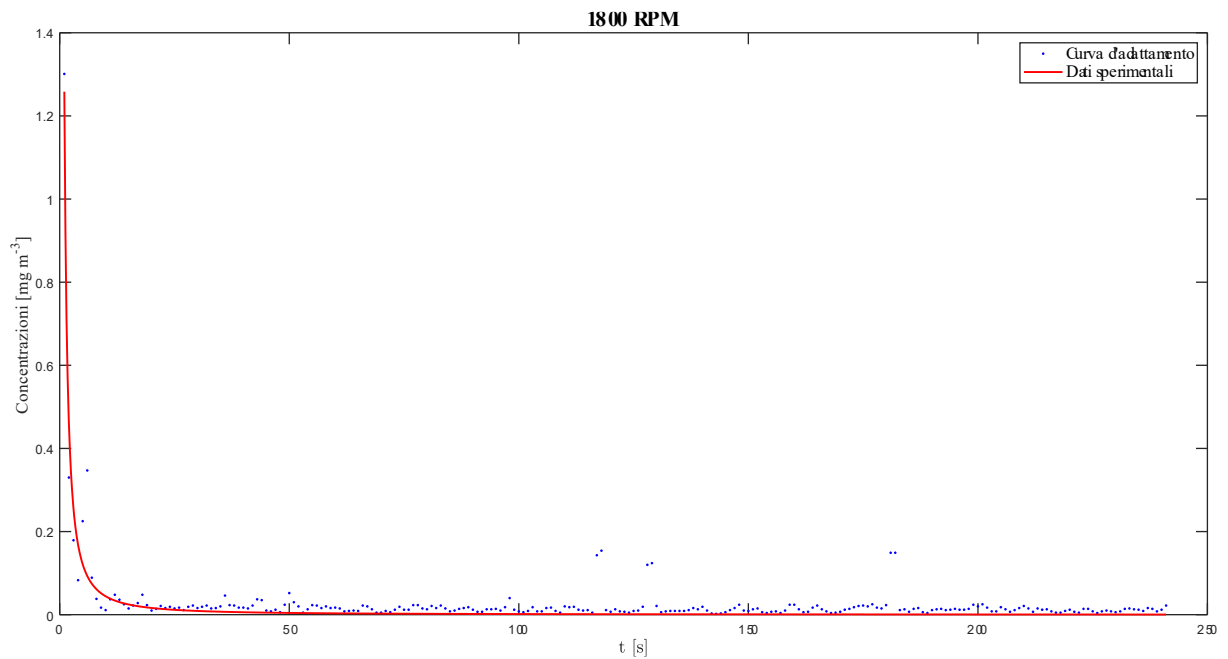
L'andamento temporale decrescente delle concentrazioni può essere descritto in modo soddisfacente mediante una legge di potenza del tipo  $c = a \cdot t^b$ . Nella Tabella 4.28 sono riportati i coefficienti di determinazione  $R^2$  e i valori dei parametri  $a$  e  $b$  ottenuti dal fitting della legge di potenza, eseguito con il software *MATLAB*. Nelle Figure 4.37-4.50 sono riportati in forma grafica i risultati del fitting sui dati sperimentali di entrambi i materiali granulari indagati.

**Tabella 4.28.** Risultati del fitting della legge di potenza sulle concentrazioni in funzione del tempo.

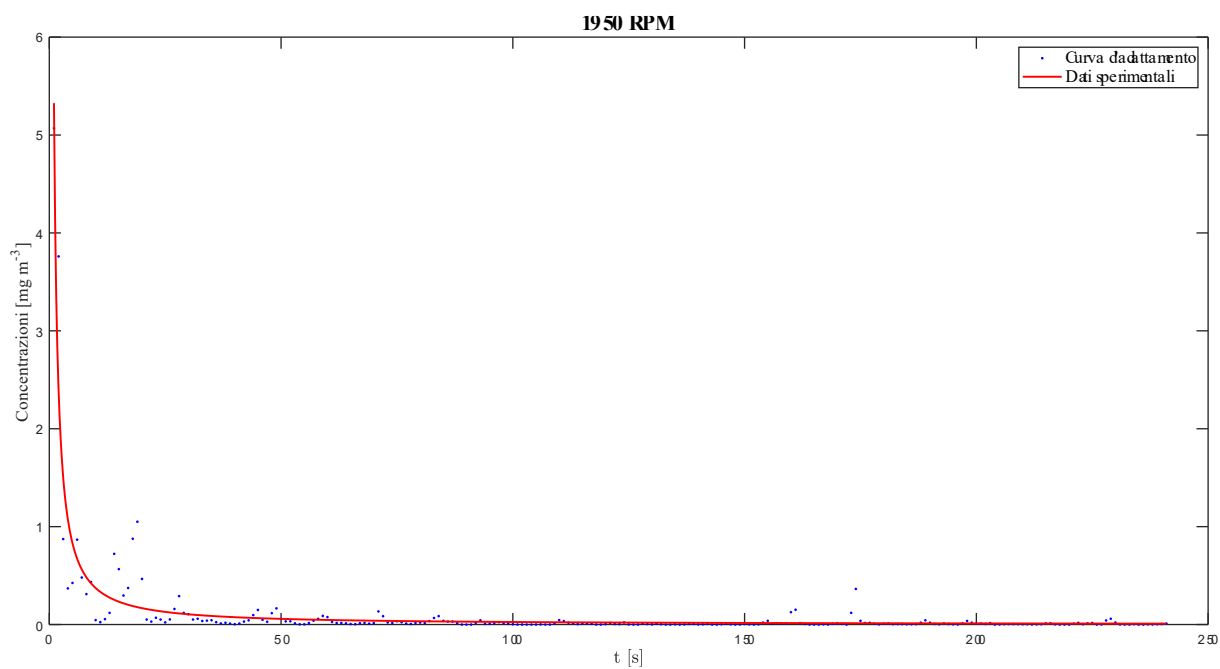
RPM	Galena PN			Blenda RD		
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
1650	0,74	-2,70	0,95	5,081	-2,02	0,98
1800	1,26	-1,45	0,87	10,66	-1,71	0,98
1950	5,32	-1,16	0,88	26,11	-1,26	0,98
2100	2,73	-1,24	0,95	66,08	-1,42	0,98
2250	27,42	-1,25	0,95	60,16	-1,35	0,93
2400	75,94	-1,17	0,97	151,5	-0,93	0,92
2550	95,78	-1,00	0,94	158,9	-1,042	0,92



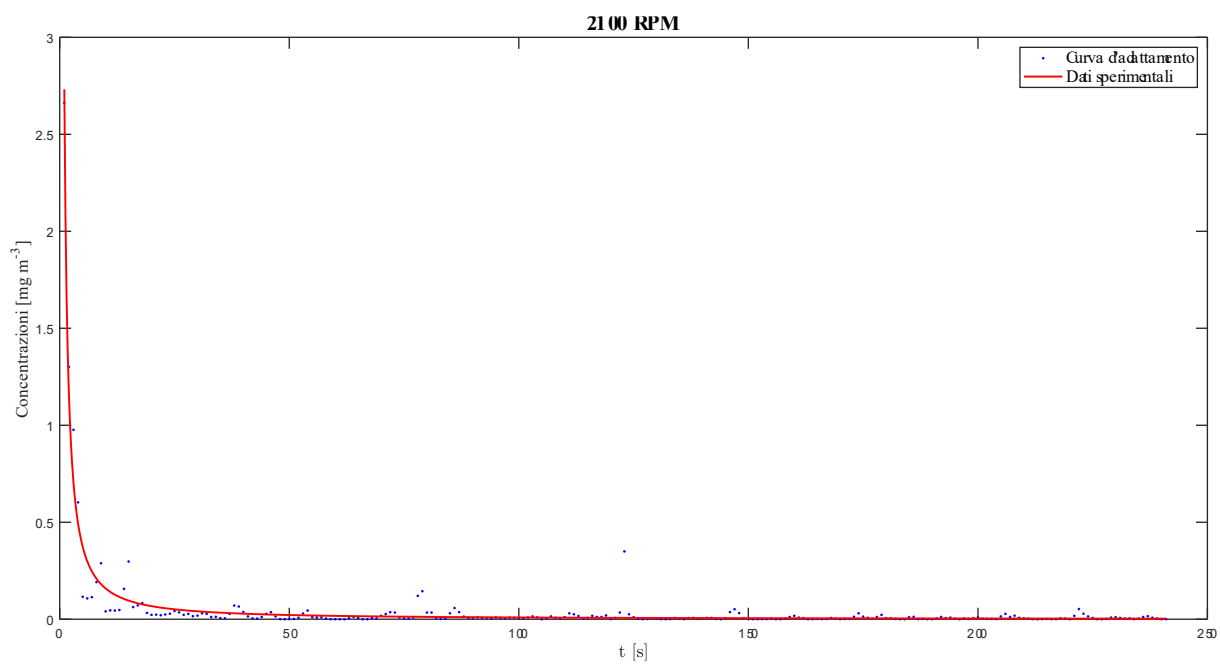
**Figura 4.37.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1650 RPM (galena PN).



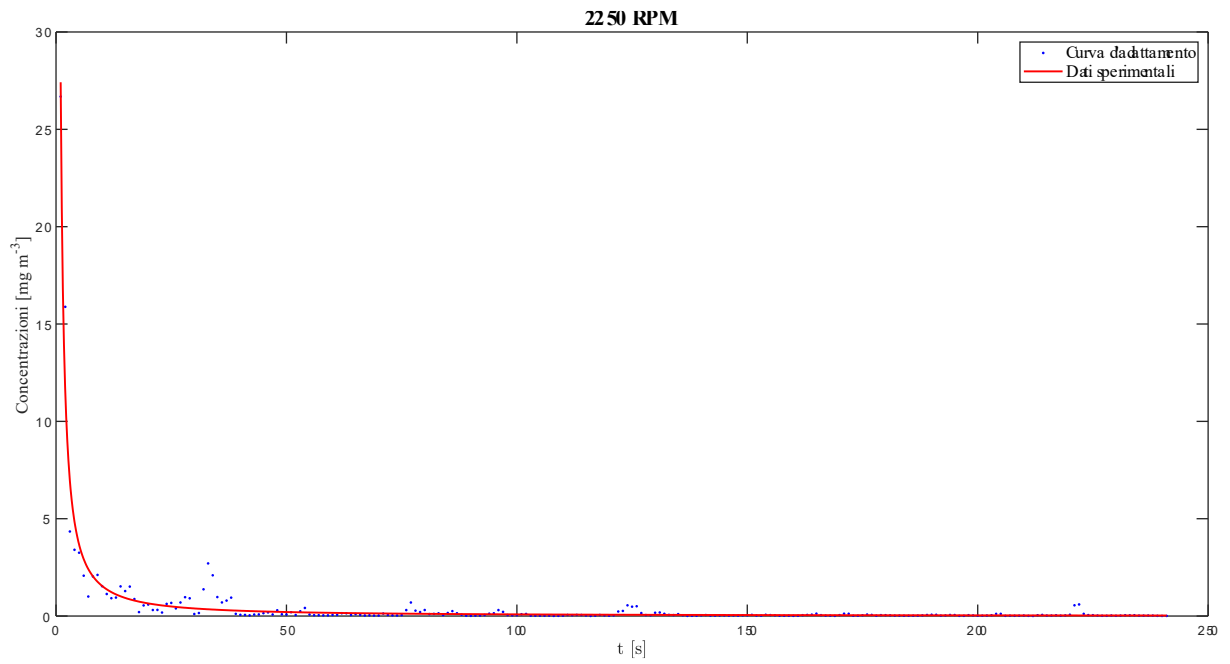
**Figura 4.38.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1800 RPM (galena PN).



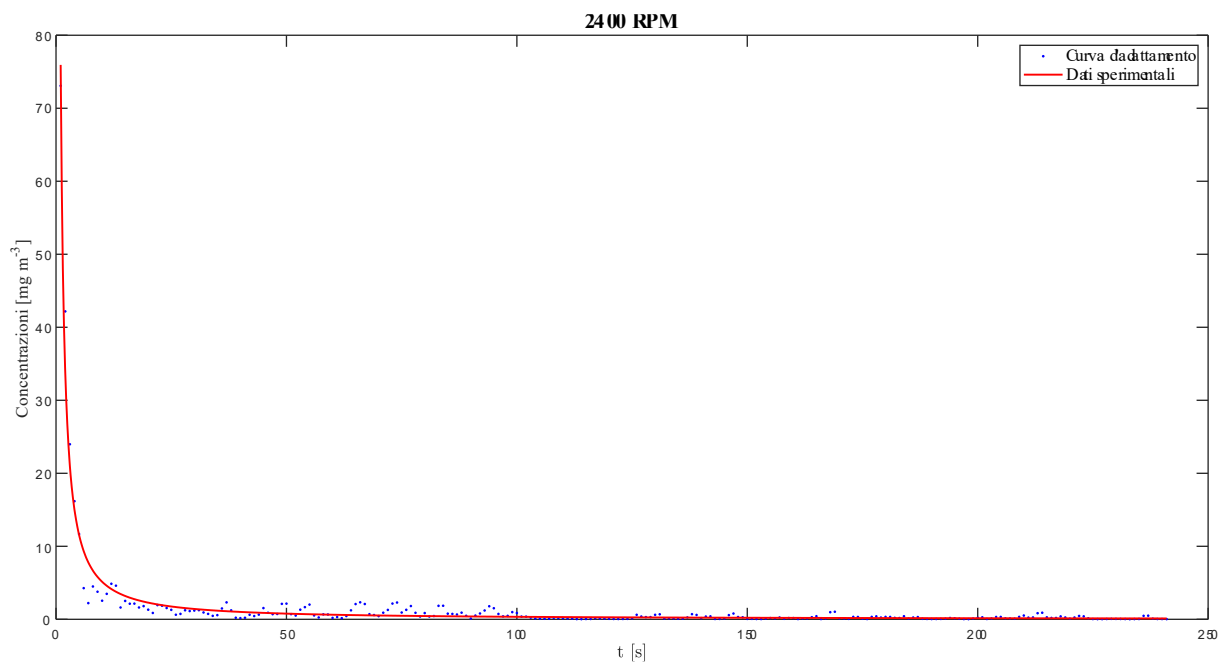
**Figura 4.39.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1950 RPM (galena PN).



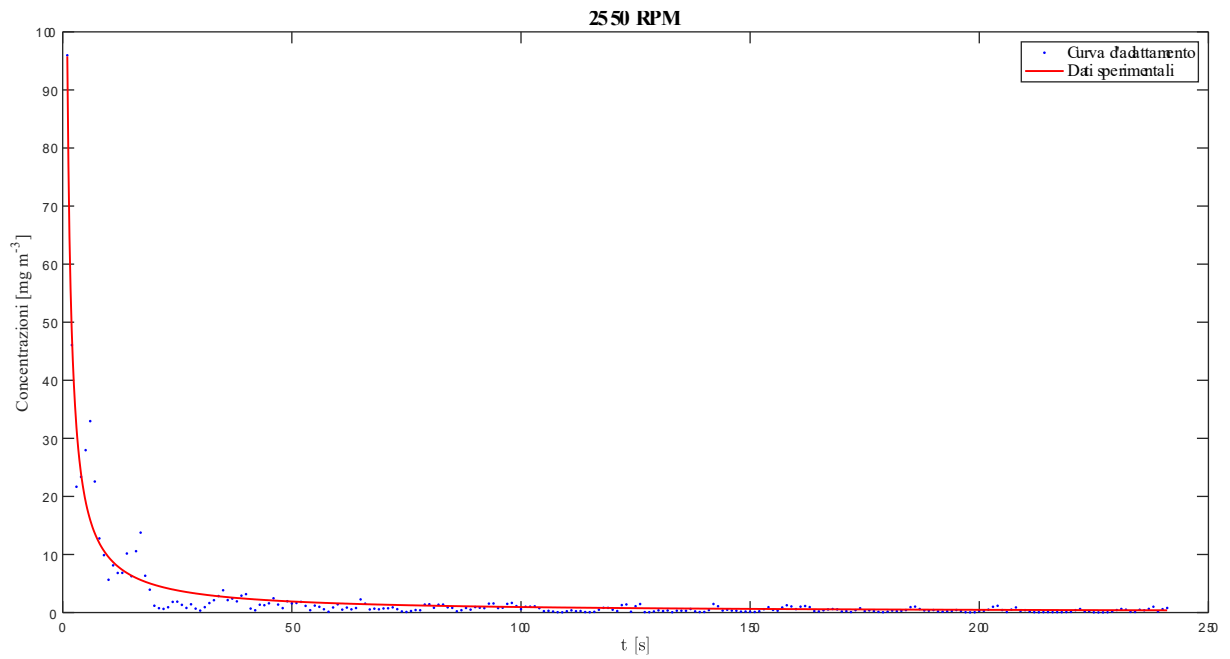
**Figura 4.40.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2100 RPM (galena PN).



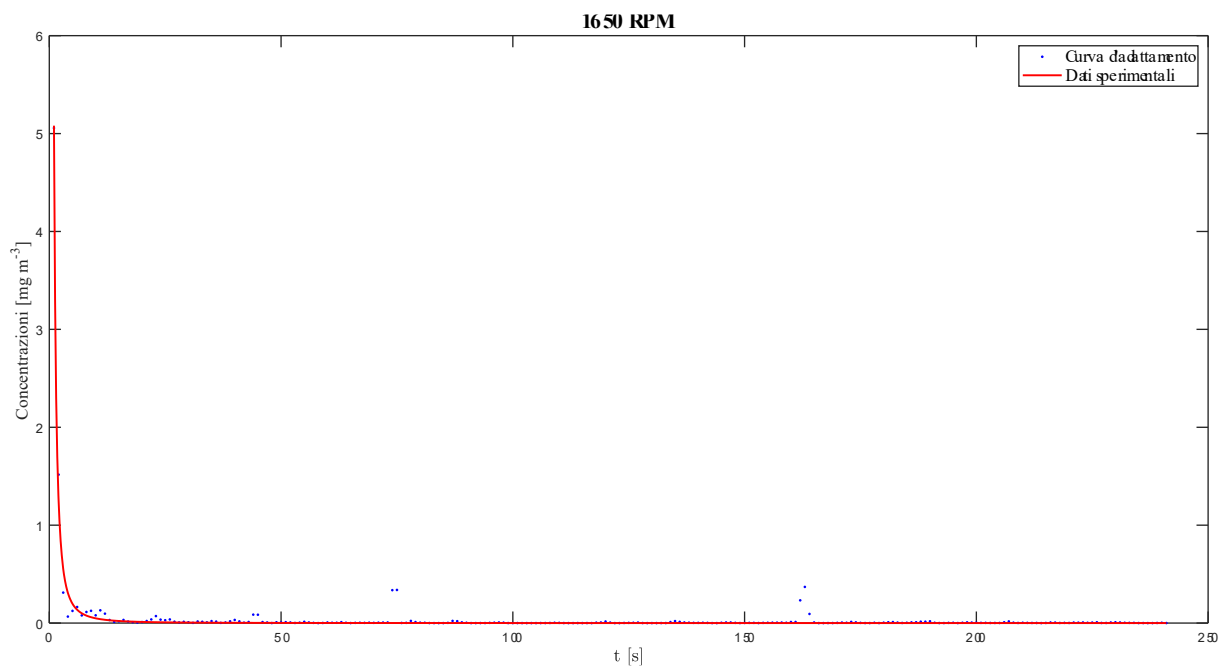
**Figura 4.41.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2250 RPM (galena PN).



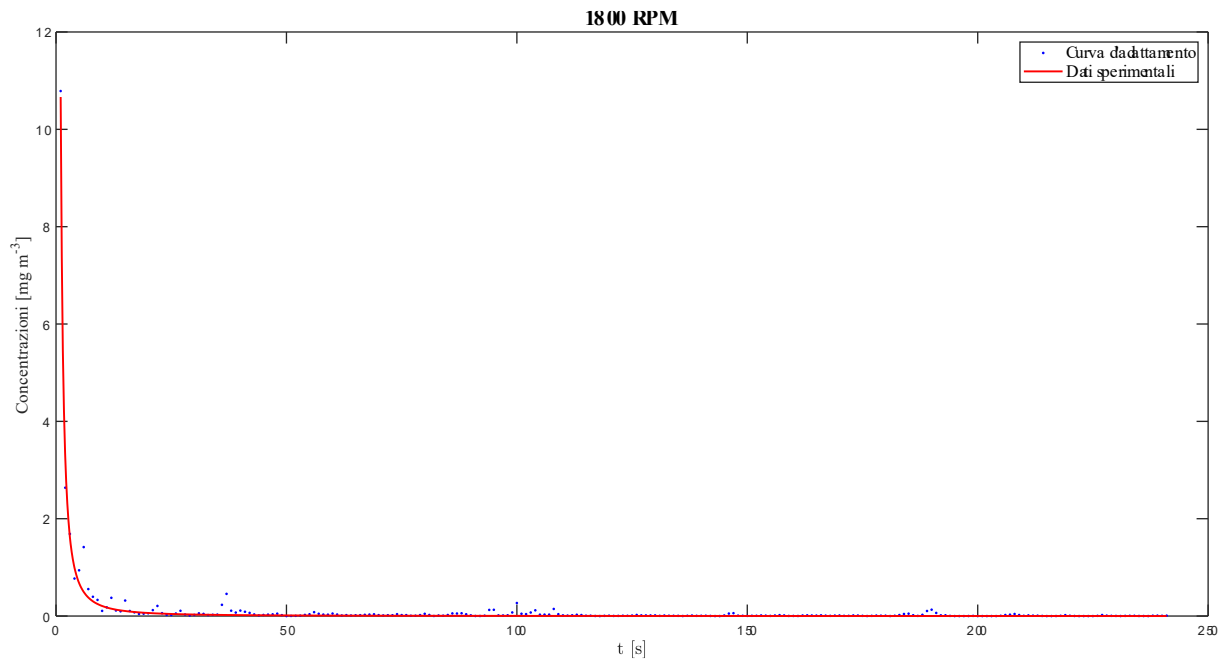
**Figura 4.42.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2400 RPM (galena PN).



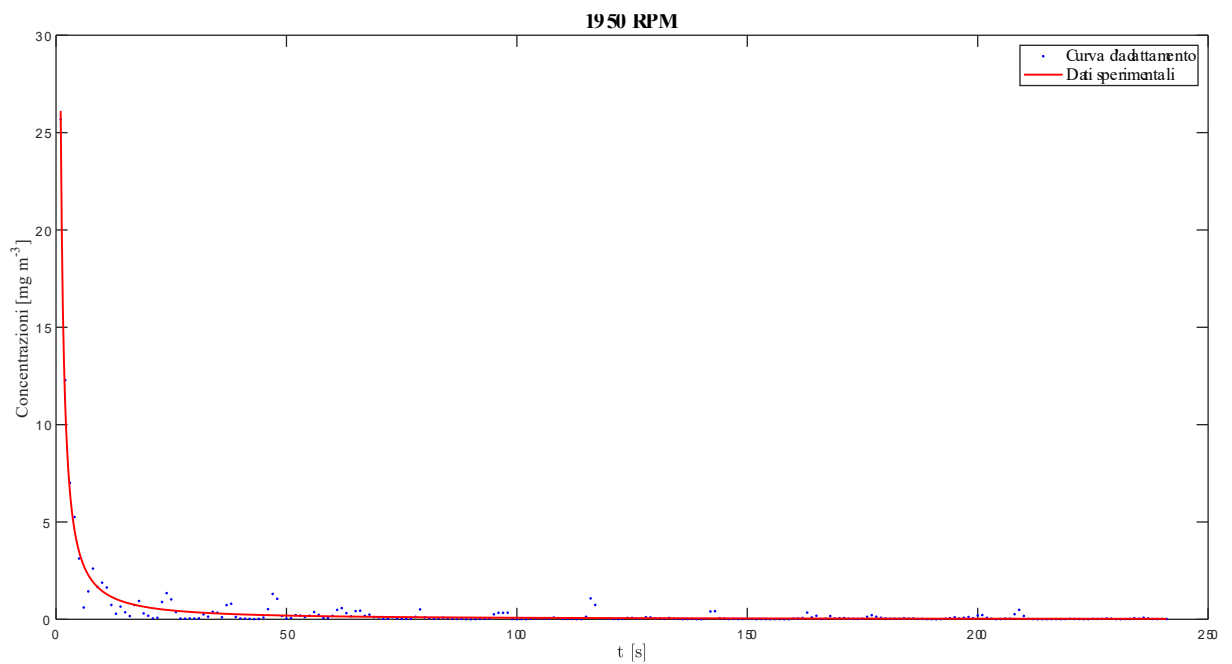
**Figura 4.43.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2550 RPM (galena PN).



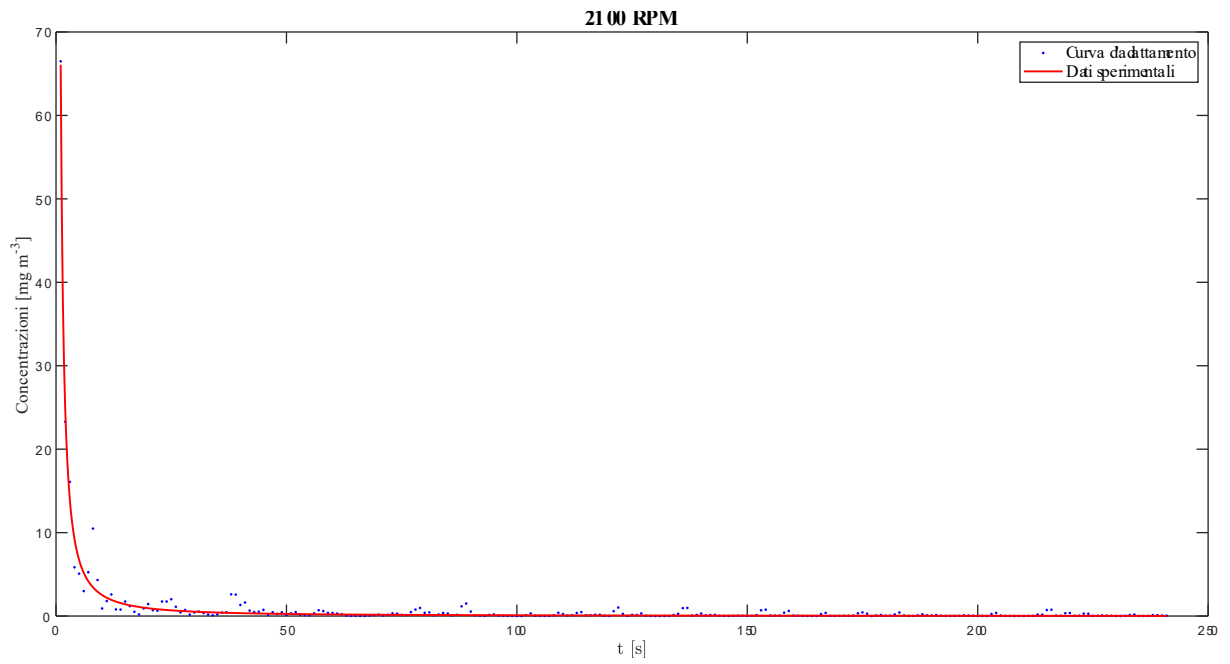
**Figura 4.44.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1650 RPM (blenda RD).



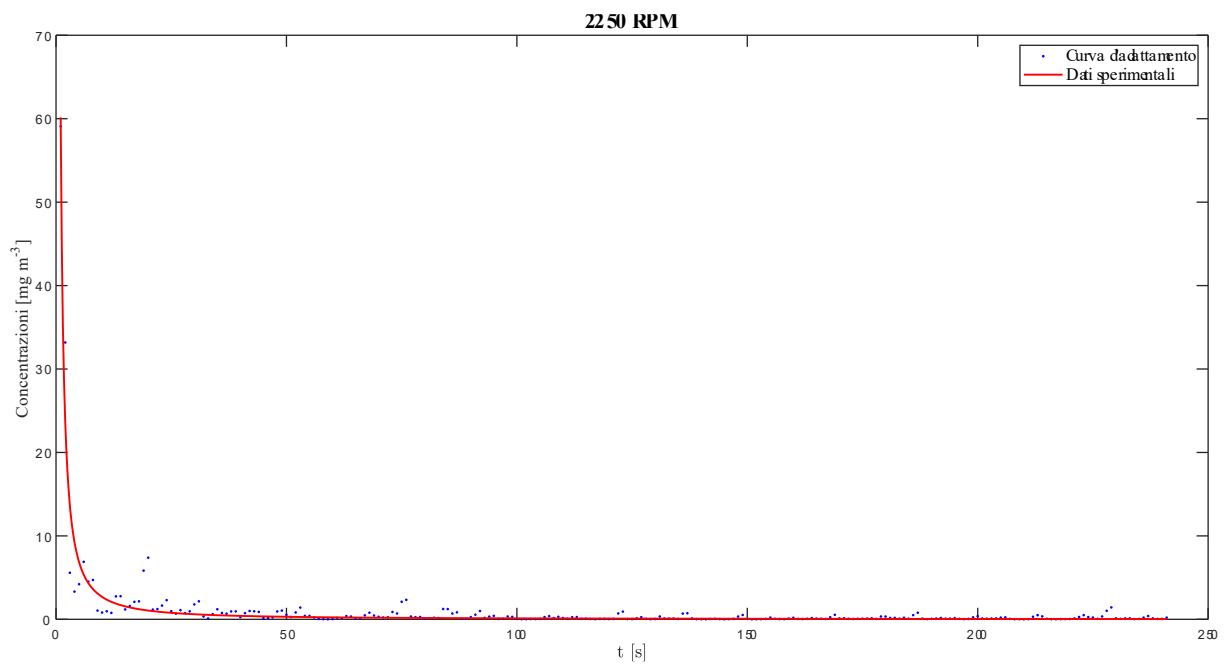
**Figura 4.45.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1800 RPM (blenda RD).



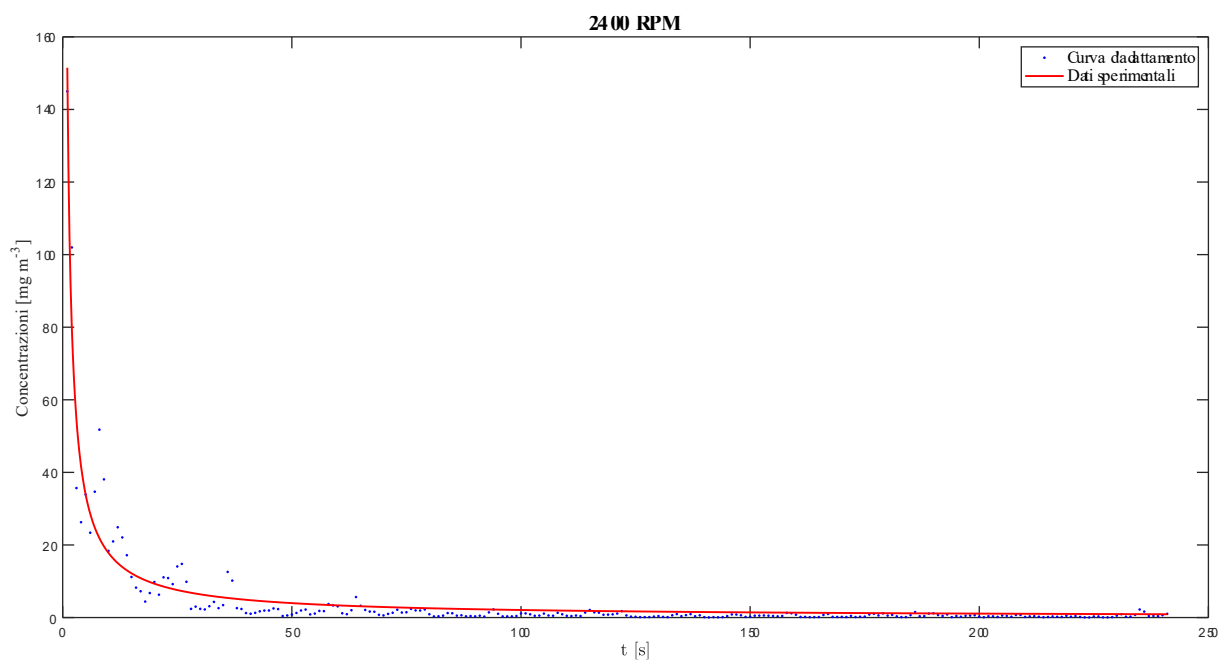
**Figura 4.46.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 1950 RPM (blenda RD).



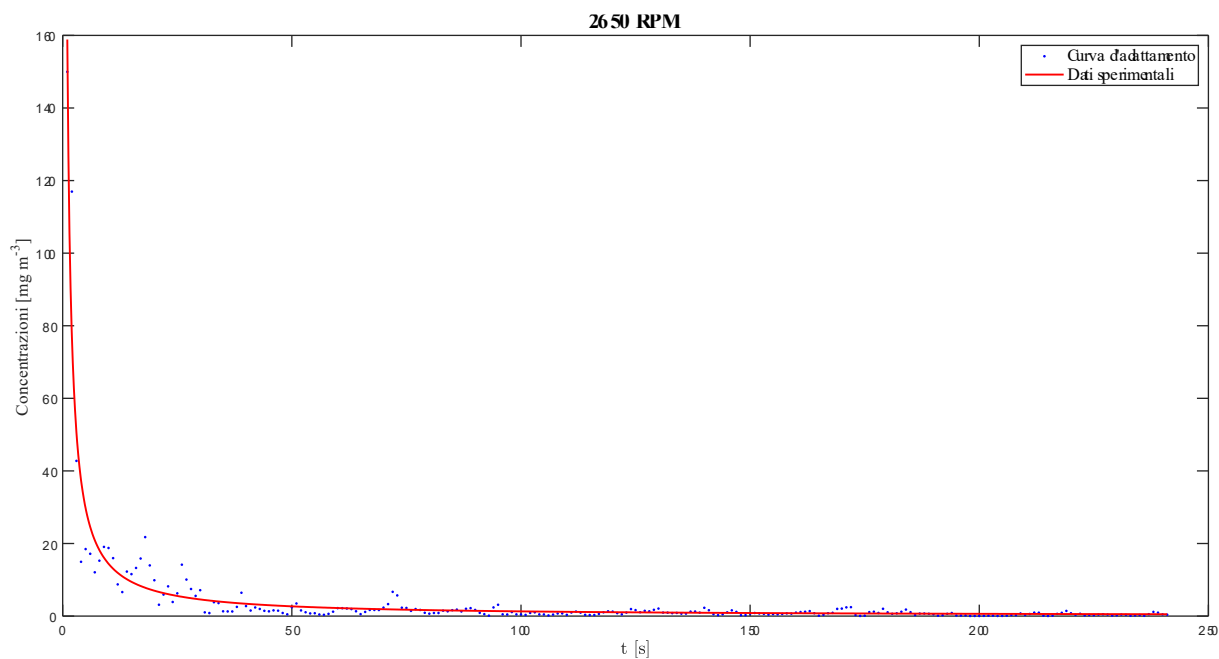
**Figura 4.47.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2100 RPM (blenda RD).



**Figura 4.48.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2250 RPM (blenda RD).



**Figura 4.49.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2400 RPM (blenda RD).



**Figura 4.50.** Fitting della legge di potenza sui dati di concentrazione per una velocità di funzionamento del ventilatore di 2550 RPM (blenda RD).

### 4.6.1.3 Emissioni

Le emissioni determinate nel corso delle prove sui campioni di galena PN e blenda RD sono riportati in Tabella 4.29 e in Tabella 4.30 come media dei 3 test sperimentali effettuati. Si

evidenzia che, coerentemente con quanto riportato nella letteratura scientifica, le emissioni rilevate di PM<sub>10</sub> risultano più elevate degli stessi materiali nel loro stato *tal quale* (paragrafo 4.5.2), caratterizzati da un contenuto d'acqua pari al 3% (paragrafo 4.1). La velocità di innesco di emissioni significative, attribuibile all'innesco del fenomeno di saltazione, è risultata pari a 0,37 m/s per la blenda RD e 0,43 m/s per la galena PN.

Le emissioni di PM sono aumentate all'aumentare della velocità d'attrito del vento con un andamento descritto in maniera affidabile da una legge di tipo potenziale ( $E = a \cdot u^b$ ). I risultati del fitting della legge di potenza sui dati sperimentali sono riportati nella Tabella 4.31 e nella Tabella 4.32 e in Figura 4.51 e Figura 4.52.

**Tabella 4.29.** Emissioni di PM<sub>10</sub> al variare della velocità d'attrito per la galena PN e la blenda RD asciutte ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR.

		Emissioni [mg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]						
Materiale		0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
		m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Galena PN</b>		0,01	0,03	0,04	0,12	0,43	1,14	2,93
<b>Blenda RD</b>		0,02	0,40	0,74	0,87	1,86	6,60	8,96

**Tabella 4.30.** Emissioni di PM<sub>2,5</sub> al variare della velocità d'attrito per la galena PN e la blenda RD asciutte ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR.

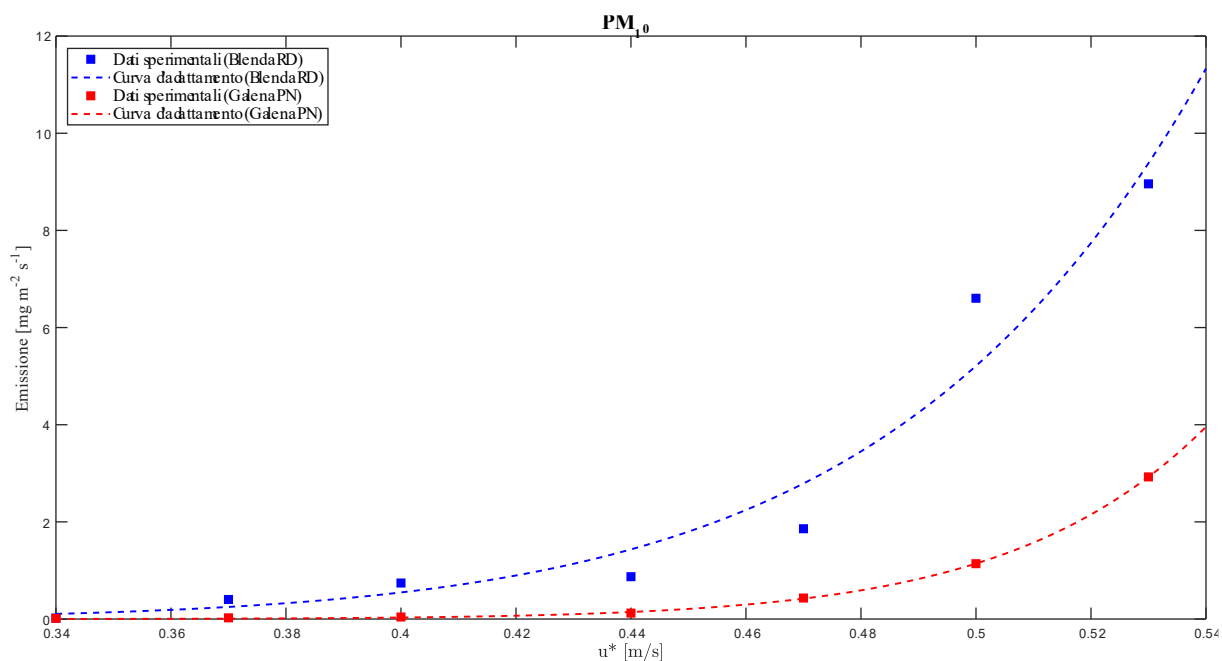
		Emissioni [mg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]						
Materiale		0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
		m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Galena PN</b>		0,00	0,01	0,02	0,09	0,36	0,91	2,44
<b>Blenda RD</b>		0,01	0,34	0,65	0,70	1,68	5,92	7,79

**Tabella 4.31.** Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni di  $PM_{10}$  ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR in funzione della velocità d'attrito (materiali asciutti).

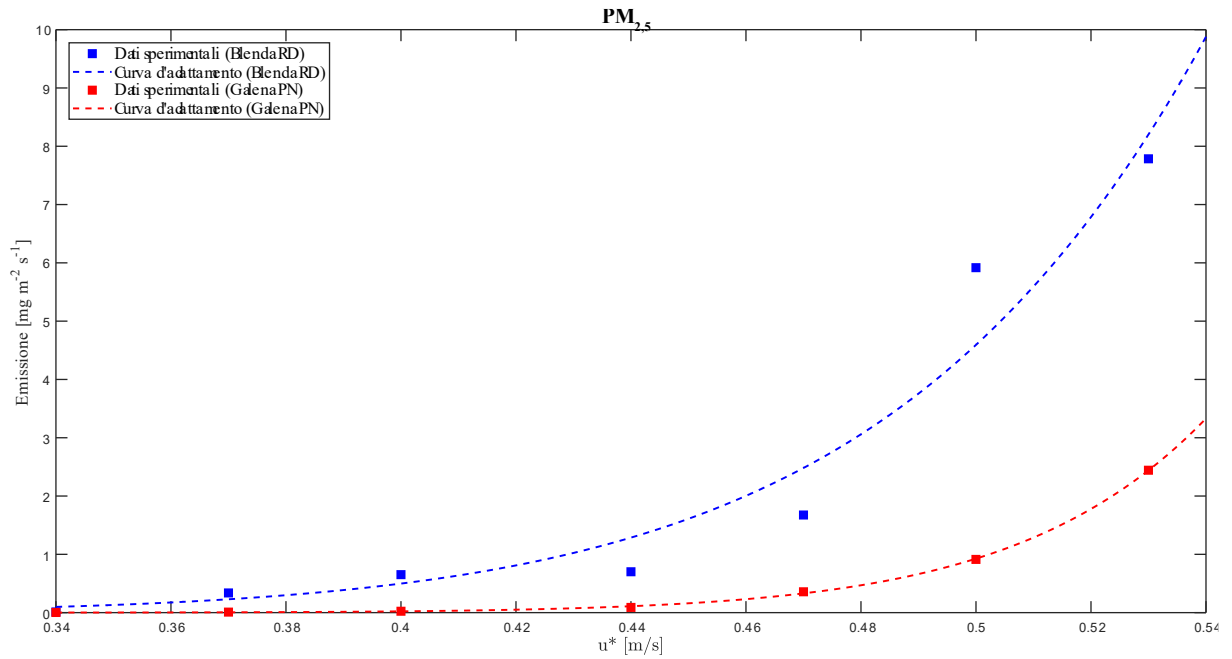
Galena PN			Blenda RD		
$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
$8,2 \cdot 10^4$	16,14	1,00	$5,7 \cdot 10^3$	10,09	0,95

**Tabella 4.32.** Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni di  $PM_{2,5}$  ottenute mediante i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR in funzione della velocità d'attrito (materiali asciutti).

Galena PN			Blenda RD		
$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
$9,4 \cdot 10^4$	15,98	1,00	$4,5 \cdot 10^3$	9,95	0,95



**Figura 4.51.** Emissioni di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito: dati misurati nella galleria del vento DICAAR e fitting della legge di potenza.



**Figura 4.52.** Emissioni di  $PM_{2,5}$  al variare della velocità d'attrito: dati misurati nella galleria del vento DICAAR e fitting della legge di potenza.

## 4.6.2 Codice Numerico

Le emissioni di  $PM_{10}$  e di  $PM_{2,5}$  della galena PN e della blenda RD, determinate mediante il codice numerico, sono riportate rispettivamente nelle Tabelle 4.33 e 4.34 (galena PN) e nelle Tabelle 4.35 e 4.36 (blenda RD) come valori medi delle tre simulazioni eseguite. Per il parametro di input relativo alla velocità d'attrito limite si è scelto di adottare un valore pari a 0,34 m/s per la blenda RD e 0,40 m/s per la galena PN. Tale scelta deriva dal fatto che le relazioni sul flusso di saltazione, presentate nel paragrafo 2.2.2.2, prevedono un flusso nullo (e quindi emissioni pari a zero) per velocità d'attrito uguali alla  $u^*_t$ , mentre le velocità di soglia individuate nel paragrafo 4.6.1.3, relativo alle prove sperimentali dei materiali asciutti in galleria del vento, corrispondono a condizioni in cui il fenomeno di saltazione risulta già attivo, con emissioni già significative. Per questo motivo si è optato per utilizzare, come dato di input, la velocità d'attrito immediatamente inferiore a quella di soglia individuata nelle prove sperimentali condotte nella galleria del vento DICAAR per i materiali asciutti.

Le emissioni di  $PM_{10}$  calcolate dal codice numerico risultano complessivamente inferiori rispetto a quelle misurate sperimentalmente nella galleria del vento, sia adottando il *Damage Ratio (DR)* di Thornton et al., sia quello di Deng e Davé. Si osserva inoltre una differenza significativa, dell'ordine di circa un ordine di grandezza, tra le emissioni stimate con

le due formulazioni: i valori ottenuti con il *DR* di Thornton et al. risultano sistematicamente più elevati rispetto a quelli calcolati con il *DR* di Deng e Davé di circa uno-due ordini di grandezza.

Per entrambi i materiali e per entrambi i *DR*, le emissioni di  $PM_{10}$  e di  $PM_{2,5}$  aumentano con la velocità d'attrito del vento, mostrando un andamento ben descritto da una legge di tipo potenziale ( $E = a \cdot u^{*b}$ ). I risultati del fitting di tale relazione sui dati sperimentali sono riportati nella Tabella 4.37 ( $PM_{10}$ ) e Tabella 4.38 ( $PM_{2,5}$ ) e illustrati nelle Figure 4.53-4.60.

**Tabella 4.33.** Emissioni di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito per la galena PN ottenute attraverso il codice numerico.

Emissioni galena PN [ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]							
<i>DR</i>	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Thornton et al.</b>	/	/	/	0,10	0,18	0,28	0,39
<b>Deng e Davé</b>	/	/	/	0,004	0,007	0,012	0,017

**Tabella 4.34.** Emissioni di  $PM_{2,5}$  al variare della velocità d'attrito per la galena PN ottenute attraverso il codice numerico.

Emissioni galena PN [ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]							
<i>DR</i>	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Thornton et al.</b>	/	/	/	0,020	0,039	0,058	0,080
<b>Deng e Davé</b>	/	/	/	0,0006	0,0013	0,0016	0,0024

**Tabella 4.35.** Emissioni di  $PM_{10}$  ottenute attraverso il codice numerico al variare della velocità d'attrito per la blenda RD.

Emissioni blenda RD [ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]							
<i>DR</i>	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Thornton et al.</b>	/	0,04	0,09	0,16	0,23	0,29	0,41
<b>Deng e Davé</b>	/	0,001	0,003	0,005	0,007	0,009	0,012

**Tabella 4.36.** Emissioni di  $PM_{2,5}$  ottenute attraverso il codice numerico al variare della velocità d'attrito per la blenda RD.

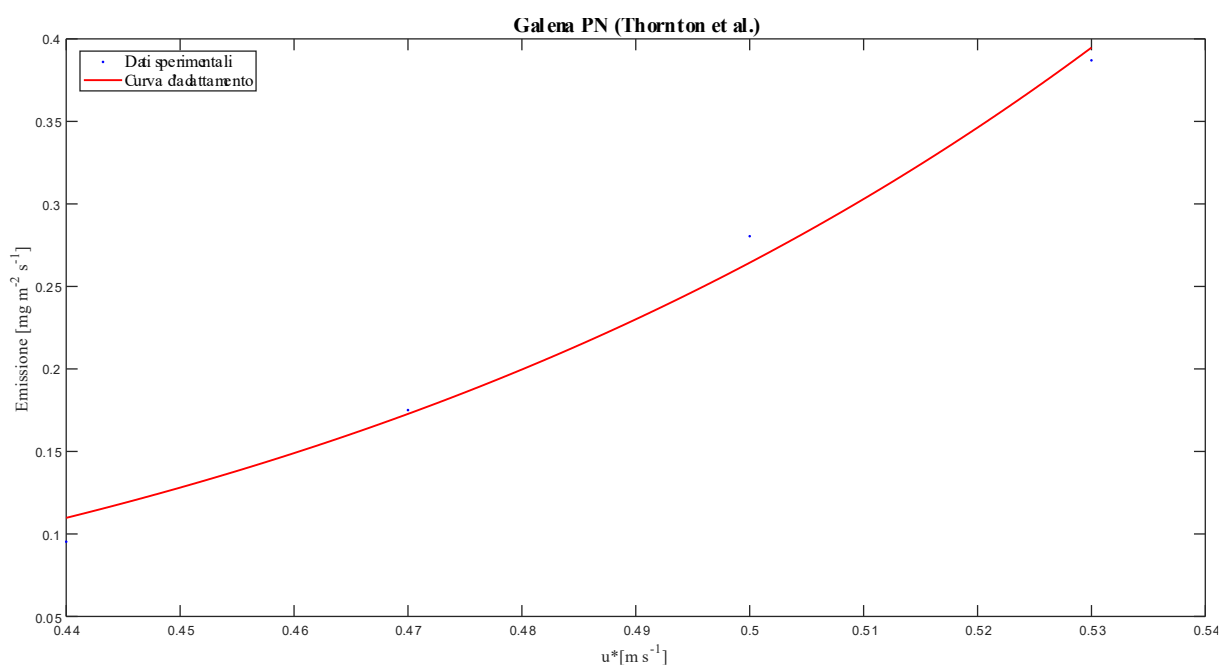
Emissioni blenda RD [ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]							
<i>DR</i>	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Thornton et al.</b>	/	0,007	0,016	0,030	0,041	0,059	0,071
<b>Deng e Davé</b>	/	0,0002	0,0004	0,0009	0,0011	0,0016	0,0020

**Tabella 4.37.** Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni di  $PM_{10}$  attraverso il codice numerico in funzione della velocità d'attrito.

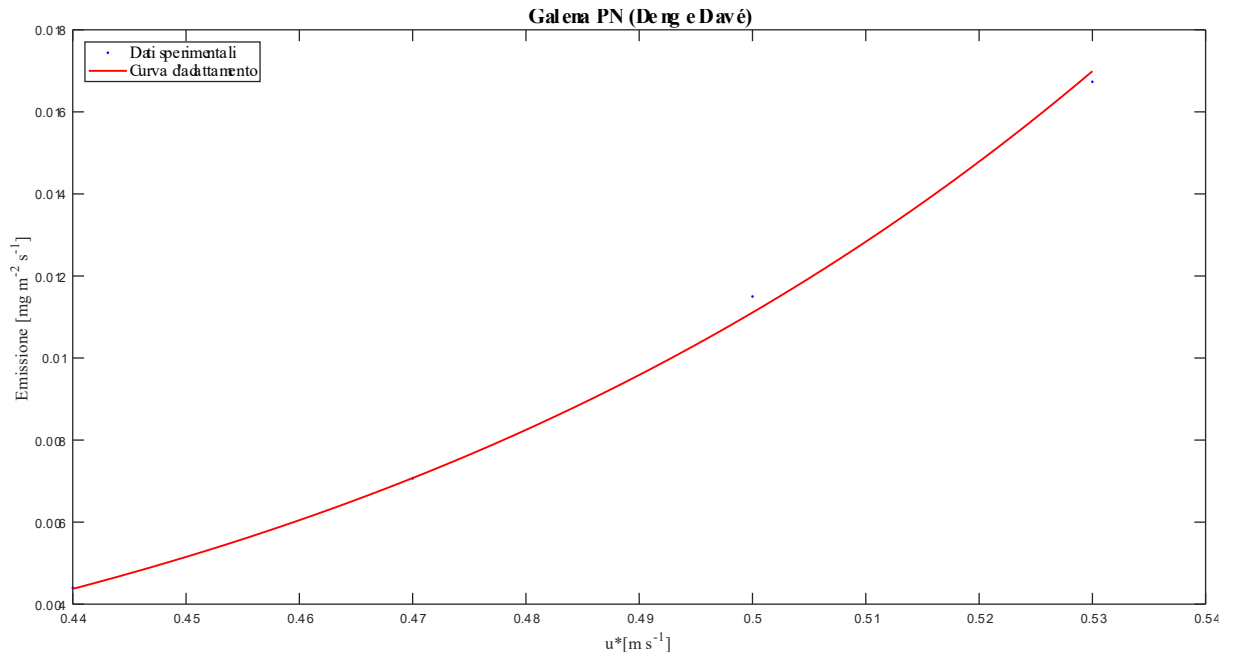
<i>DR</i>	Galena PN			Blenda RD		
	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$
<b>Thornton et al.</b>	31,09	6,88	0,99	12,89	5,43	0,99
<b>Deng e Davé</b>	1,74	7,29	1,00	0,308	5,10	0,98

**Tabella 4.38.** Risultati del fitting della legge di potenza sulle emissioni di  $PM_{2,5}$  attraverso il codice numerico in funzione della velocità d'attrito.

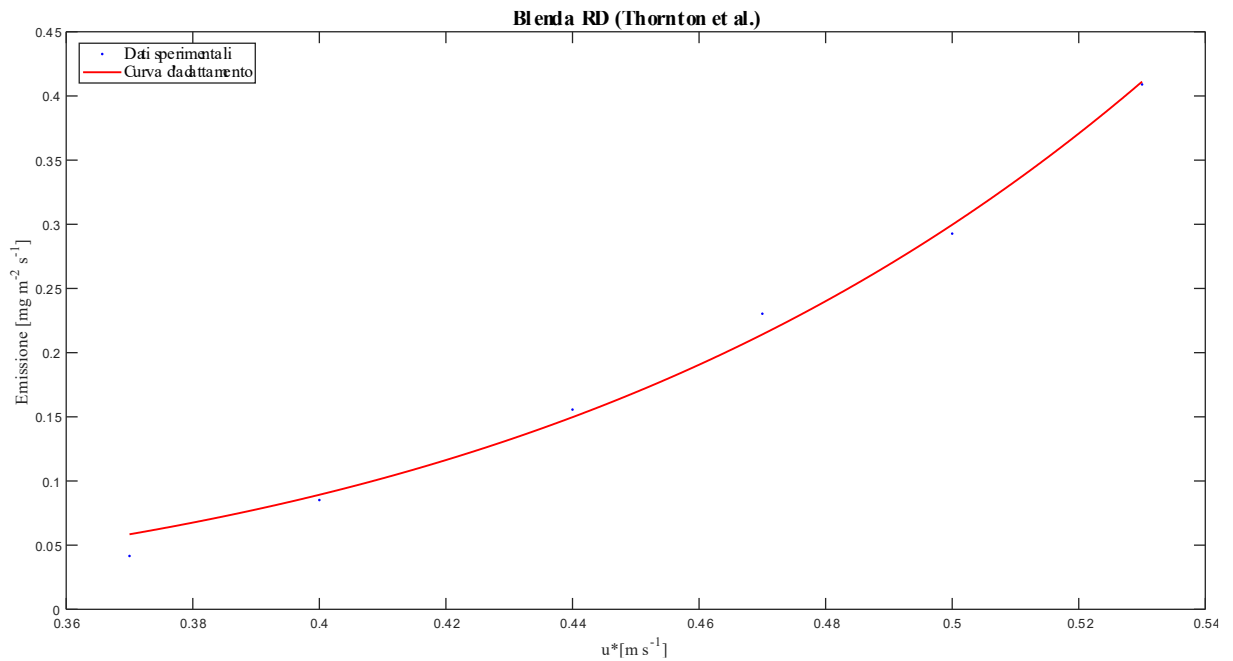
	Galena PN			Blenda RD		
<i>DR</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$
<b>Thornton et al.</b>	5,30	6,57	0,99	1,87	5,09	0,98
<b>Deng e Davé</b>	0,797	9,02	0,86	0,319	7,79	0,84



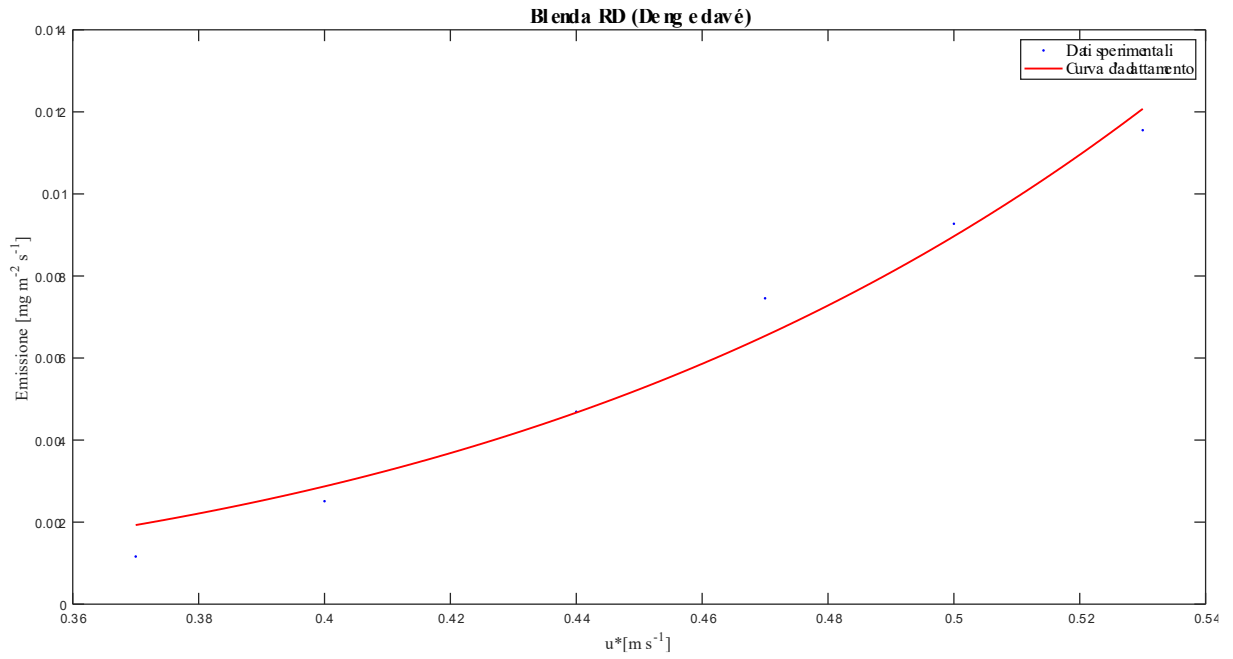
**Figura 4.53.** Emissioni di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (galena PN e DR di Thornton et al.).



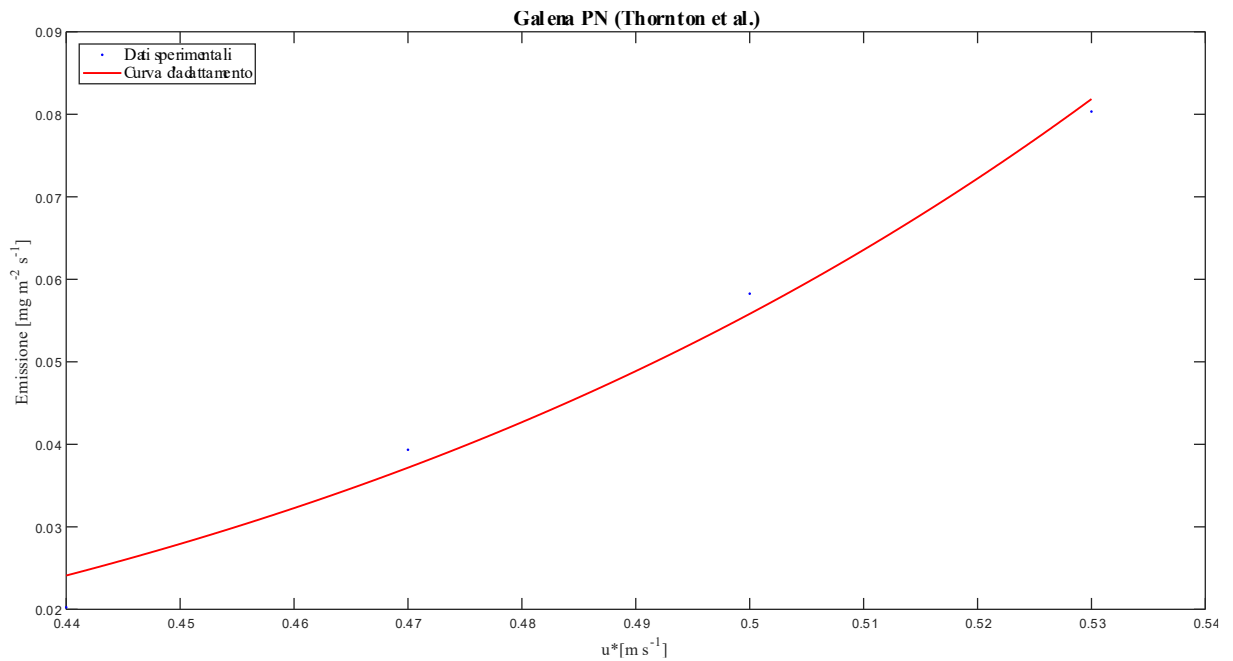
**Figura 4.54.** Emissioni di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (galena PN e DR di Deng e Davé).



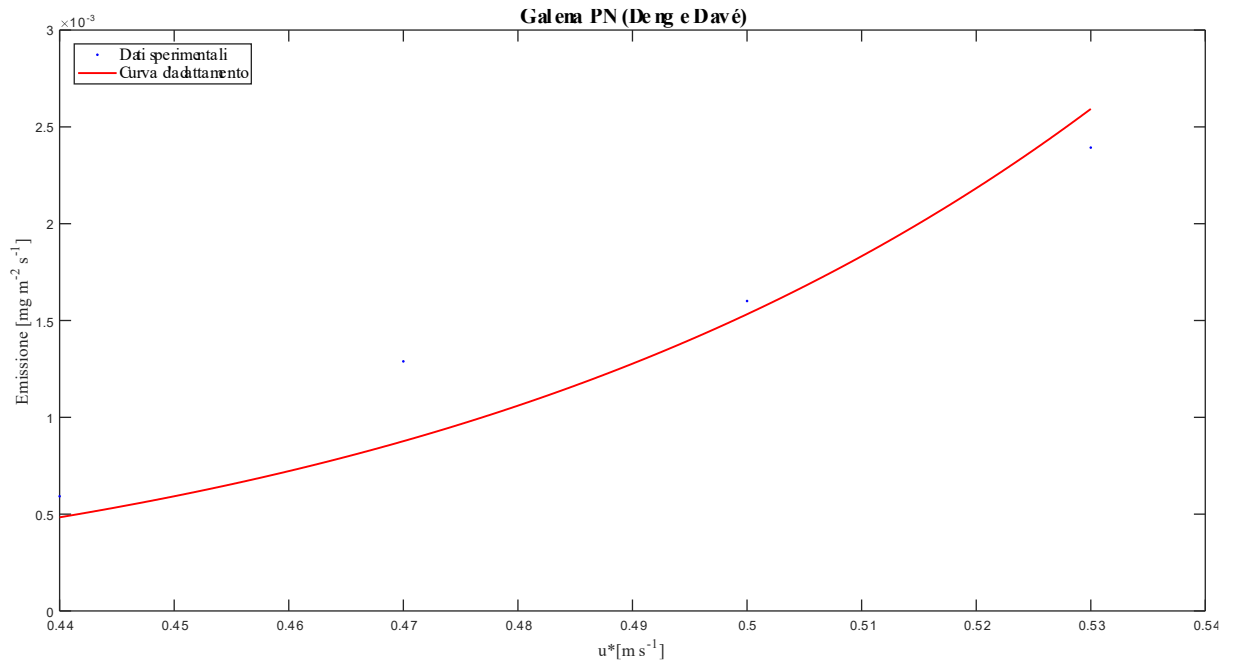
**Figura 4.55.** Emissioni di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (blenda RD e DR di Thornton et al.).



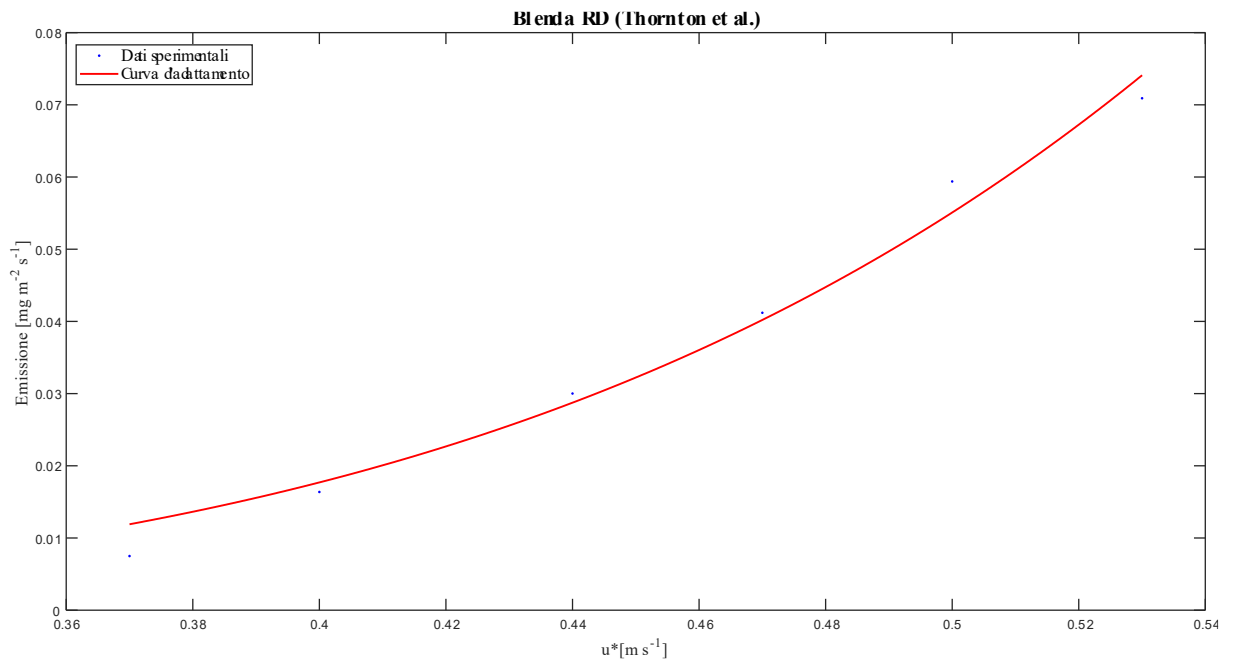
**Figura 4.56.** Emissioni di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (blenda RD e DR di Deng e Davé).



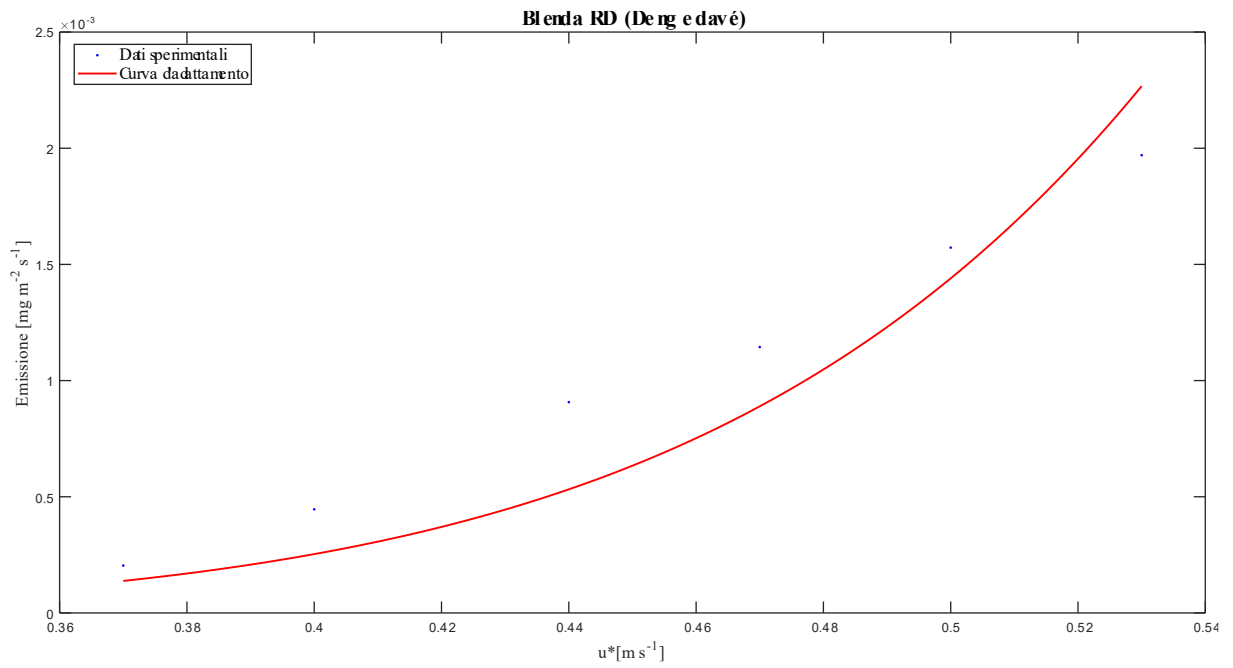
**Figura 4.57.** Emissioni di  $PM_{2.5}$  al variare della velocità d'attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (galena PN e DR di Thornton et al.).



**Figura 4.58.** Emissioni di  $PM_{2,5}$  al variare della velocità d'attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (galena PN e DR di Deng e Davé).



**Figura 4.59.** Emissioni di  $PM_{2,5}$  al variare della velocità d'attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (blenda RD e DR di Thornton et al.).



**Figura 4.60.** Emissioni di  $PM_{2.5}$  al variare della velocità d'attrito: dati simulati con il codice numerico e fitting della legge di potenza (blenda RD e DR di Deng e Davé).

## 5 Discussione

Il presente capitolo è dedicato alla discussione e interpretazione dei risultati sperimentali e numerici ottenuti nel corso del progetto di Dottorato.

Nel paragrafo 5.1 vengono discussi in dettaglio i risultati sperimentali, analizzando le caratteristiche dei materiali granulari, la distribuzione dei campi di velocità e di turbolenza nella galleria del vento DICAAR e nel corrispondente modello CFD, nonché la determinazione delle velocità d'attrito limite ottenute con le diverse metodologie sperimentali. In questa sezione vengono inoltre confrontati le emissioni di PM<sub>10</sub> rilevate nella galleria del vento DICAAR sia per i materiali nello stato *tal quale* (senza pretrattamento) sia per quelli asciutti, oltre a quelle simulate attraverso il codice numerico.

Il paragrafo 5.2 è dedicato alla definizione di una metodologia integrata per la stima delle emissioni di particolato, basata sulla sinergia tra i risultati sperimentali e i modelli di simulazione numerica, al fine di fornire un approccio più robusto e generalizzabile per la valutazione dell'impatto sull'ambiente dell'azione erosiva del vento sulle superfici di materiali granulari.

Nel paragrafo 5.3 vengono discusse le limitazioni delle attività sperimentali e modellistiche, con particolare attenzione alle incertezze legate alla determinazione della velocità d'attrito limite e al codice numerico.

Infine, il paragrafo 5.4 delinea i principali sviluppi futuri del lavoro di ricerca.

### 5.1 Risultati Sperimentali

#### 5.1.1 Caratterizzazione dei Materiali Granulari

Oltre alla varietà chimica dei materiali granulari campionati, le analisi di caratterizzazione svolte hanno evidenziato una notevole eterogeneità anche dal punto di vista fisico, in particolare per quanto riguarda il contenuto d'acqua, il peso specifico e la distribuzione granulometrica degli aggregati. Il parametro che ha mostrato la minore variabilità è risultato essere la distribuzione granulometrica delle particelle elementari, sebbene sia stato possibile distinguere due macrogruppi tra i materiali indagati.

Dall'analisi dei dati emerge che i materiali con un contenuto d'acqua più elevato sono anche quelli caratterizzati da una maggiore presenza di aggregati di grandi dimensioni (gesso

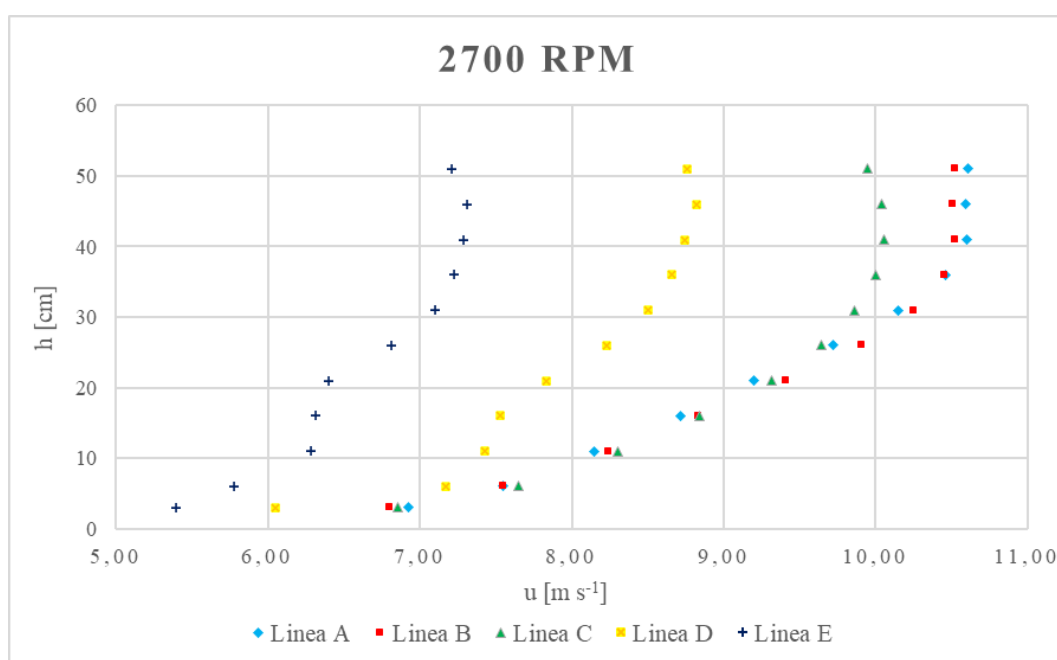
GP e solfati AD e BD). Questo comportamento può essere attribuito all'influenza dell'acqua sulle interazioni interparticellari: l'umidità, infatti, contribuisce a rafforzare le forze coesive tra le particelle elementari, favorendo la formazione di aggregati più stabili e di dimensioni maggiori.

Non sono state osservate ulteriori correlazioni significative tra i restanti parametri fisici dei materiali granulari.

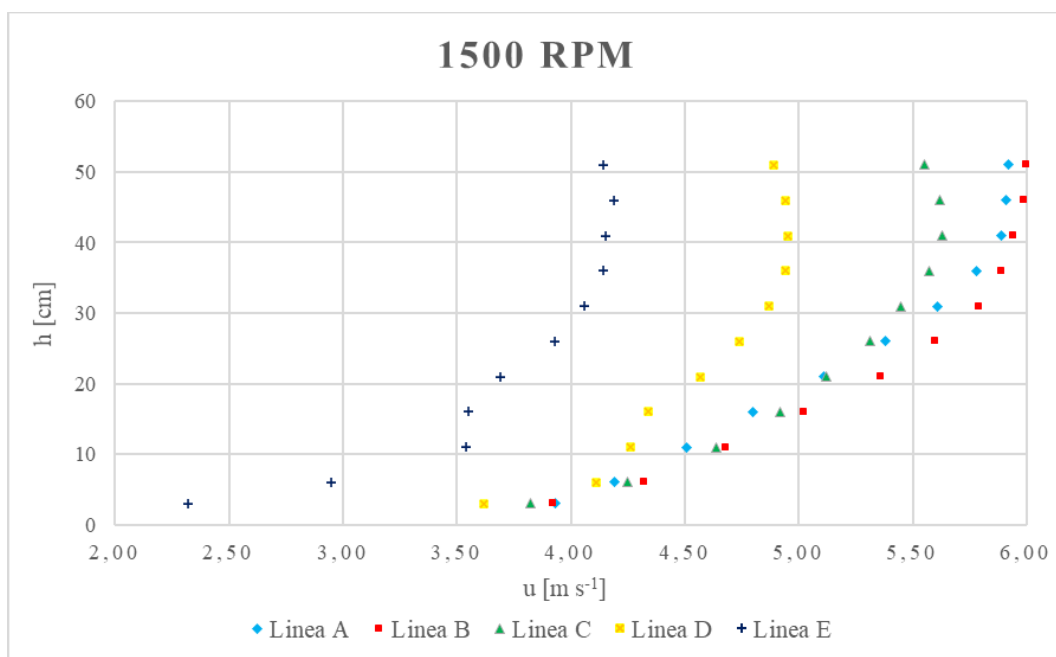
## 5.1.2 Velocità del Vento nella Galleria del Vento DICAAR

### 5.1.2.1 Campi di Velocità del Vento

Come mostrato nella Figura 5.1 e nella Figura 5.2, le velocità aumentano all'aumentare della distanza del punto di misura dalle pareti, sia direzione verticale (valori maggiori a distanze crescenti dal pavimento della galleria) sia in direzione laterale (valori maggiori passando dalla linea di misura A alla linea di misura E, rappresentate in Figura 3.9). Tuttavia, in corrispondenza del limite laterale in cui è collocato l'alloggiamento del campione (linea di misura B in Figura 3.9), la velocità del vento risulta pressoché indisturbata dall'influenza delle pareti laterali, determinando un'elevata omogeneità trasversale del profilo di velocità del vento che agisce sui campioni investigati. Tale condizione è confermata sia dalla sovrapposizione delle linee di misura A e B nelle Figure 5.1 e 5.2, sia dal campo di velocità rappresentato in Figura 4.3.



**Figura 5.1.** Profili verticali di velocità del vento misurati lungo le linee di misura A, B, C, D ed E (regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM).



**Figura 5.2.** Profili verticali di velocità del vento misurati lungo le linee di misura A, B, C, D ed E (regime di funzionamento del ventilatore di 1500 RPM).

### 5.1.2.2 Campi di Intensità di Turbolenza

Come mostrato nella Figura 4.4, i livelli di intensità di turbolenza sono aumentati al diminuire della velocità di rotazione del ventilatore e all'avvicinarsi dei punti di misura alle pareti e al pavimento della galleria. È importante precisare che gli effetti generati dalle pareti laterali sono da considerare un effetto di disturbo. Al contrario, la stratificazione verticale dei livelli di intensità di turbolenza, indotta dalla presenza delle *spires* e del rivestimento in carta vetrata sul pavimento della galleria, costituisce un fenomeno necessario per garantire il completo sviluppo dello Strato Limite Atmosferico.

### 5.1.2.3 Validazione dello SLA

Il profilo dello Strato Limite Atmosferico generato all'interno della galleria è stato analizzato eseguendo il fitting della Legge di potenza del profilo di velocità, espressa dall'equazione (3.3), sui dati di velocità misurati. I parametri caratteristici della Legge,  $\alpha$  e  $\delta$ , ottenuti mediante il fitting, sono risultati consistenti con i valori di progetto ( $\alpha = 0,16$ ,  $\delta = 0,45$  m), definiti in fase di messa a punto della galleria (paragrafo 3.1.3.1), con  $\alpha$  compreso tra 0,16 e 0,17 e  $\delta$  tra 0,45 e 0,47 m. I valori elevati del coefficiente di determinazione  $R^2$  (compresi tra 0,98 e 0,99) indicano che la Legge di potenza descrive in modo estremamente accurato il profilo di velocità, con scostamenti minimi tra dati sperimentali e di progetto.

#### 5.1.2.4 Determinazione della Velocità d'Attrito

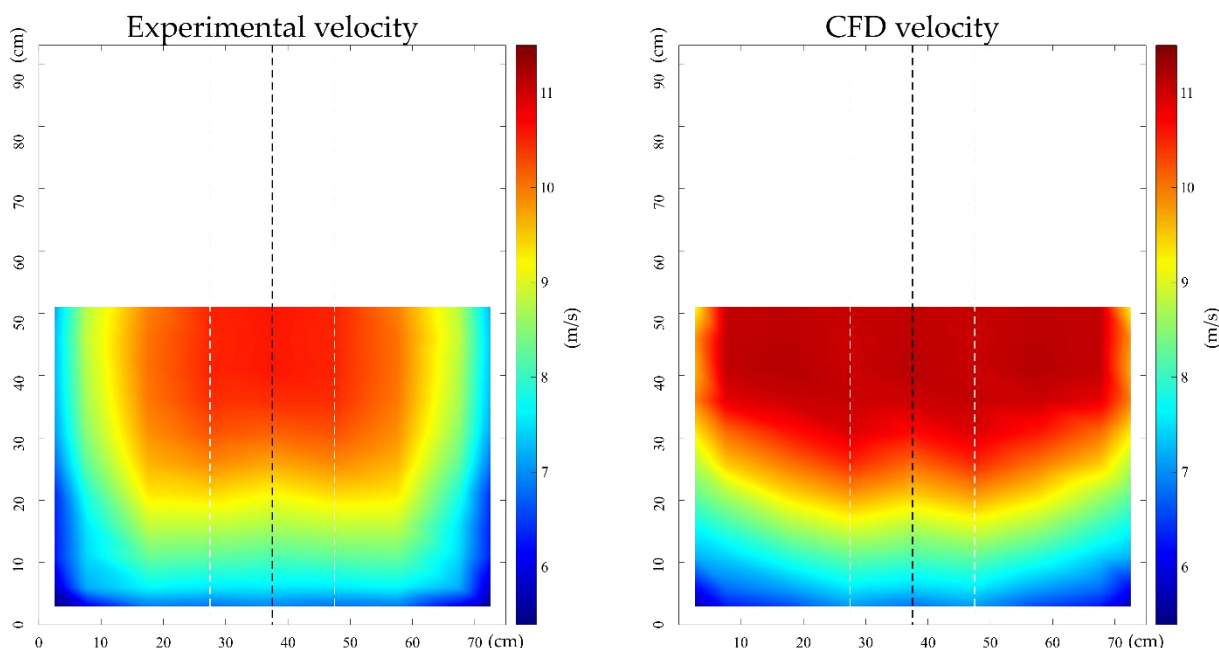
Le velocità d'attrito del vento  $u^*$  corrispondenti ai diversi regimi di funzionamento del ventilatore sono state ottenute eseguendo il fitting della Legge logaritmica del profilo di velocità (equazione (2.2)) sui dati di velocità misurati in galleria ( $R^2$  compreso tra 0,96 e 0,97). I valori di  $u^*$  risultano compresi fra 0,32 e 0,58 m/s e consentono di indagare un intervallo di velocità d'attrito tipicamente di interesse per le attività industriali minerarie e metallurgiche. Si evidenzia che i regimi di funzionamento del ventilatore analizzati non coincidono con i limiti operativi estremi dell'apparecchiatura (0 e 3000 RPM); pertanto, la galleria del vento DICAAR consente potenzialmente di esplorare anche velocità d'attrito inferiori e superiori rispetto a quelle investigate in questo studio sperimentale.

Oltre ai valori di velocità d'attrito, sono stati determinati i valori del coefficiente di rugosità  $z_0$  corrispondenti ai diversi profili ottenuti mediante il fitting. Il valore medio del coefficiente  $z_0$  ( $2,8 \cdot 10^{-4}$  m) è caratteristico di superfici piane ed estese, in assenza di elementi di rugosità di grande scala, e risulta coerente con il coefficiente d'attrito  $\alpha$  adottato come valore di progetto ( $\alpha = 0,16$ ).

### 5.1.3 Velocità del Vento nel Modello CFD della Galleria del Vento DICAAR

La Figura 5.3 riporta il confronto tra i campi di velocità del vento misurati attraverso le prove sperimentali e simulati mediante il modello CFD della galleria del vento DICAAR, nella sezione di controllo, per un regime di funzionamento del ventilatore pari a 2700 RPM. Analogamente ai dati sperimentali, le velocità del vento simulate con il modello CFD diminuiscono progressivamente con l'avvicinarsi al fondo della galleria, a causa dell'effetto combinato sia degli *spires* sia della rugosità generata dalla carta vetrata posta sul pavimento. Entrambi i campi di velocità mostrano inoltre una buona uniformità laterale nell'area destinata all'alloggiamento dei campioni, situata a una distanza di 27,5 cm dalle pareti laterali della galleria, corrispondente alla linea di misura B riportata in Figura 3.9.

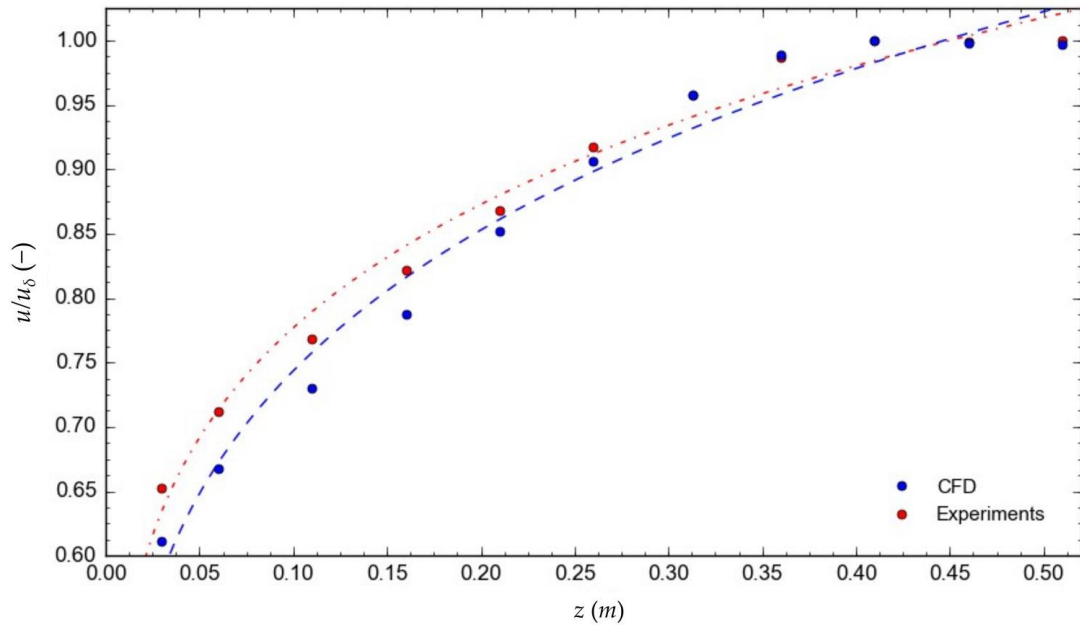
I valori di velocità del vento simulati risultano tuttavia leggermente superiori rispetto a quelli misurati. Tale discrepanza risulta più evidente in prossimità delle pareti laterali, dove il valore di rugosità superficiale adottato nella simulazione CFD è stato probabilmente sottostimato.



**Figura 5.3.** Confronto tra i campi di velocità del vento misurati e simulati tramite CFD (regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM) (Pinna et al., 2024).

Dall'analisi del fitting della Legge di potenza sui dati simulati emerge che la Legge di Potenza si adatta con elevata accuratezza ai dati simulati ( $R^2 \geq 0,97$ ).

La Tabella 5.1 mostra i valori dei parametri caratteristici dello Strato Limite Atmosferico ( $\alpha$  e  $\delta$ ) fissati come parametri di progetto, insieme a quelli medi ottenuti sperimentalmente e a quelli medi derivati dalle simulazioni CFD. Si osserva che, mentre lo spessore dello strato limite ( $\delta$ ) simulato risulta in ottimo accordo con quello misurato sperimentalmente e quello di progetto, è presente una discrepanza del 18% tra il valore medio di  $\alpha$  ricavato tramite le simulazioni CFD e quello derivante dai test sperimentali. La Figura 5.4 mostra chiaramente tale differenza: la curva di adattamento dei dati CFD (in blu) presenta infatti un gradiente più elevato rispetto a quella riferita ai dati sperimentali (in rosso). Tale discrepanza può essere probabilmente dovuta da lievi imprecisioni nelle condizioni al contorno. Tuttavia, questa differenza risulta coerente con quanto riportato dalla letteratura scientifica, dove sono evidenziate discrepanze significative tra i valori sperimentali e quelli simulati di  $\alpha$  (Abdulrahim et al., 2019).



**Figura 5.4.** Fitting del profilo del vento della Legge di potenza ai dati sperimentali (punti rossi) e ai dati CFD (regime di funzionamento del ventilatore di 2700 RPM) (Pinna et al., 2024).

**Tabella 5.1.** Valori di progetto e valori medi di  $\alpha$  e  $\delta$  determinati sperimentalmente e tramite le simulazioni CFD.

	$\alpha$ [-]	$\delta$ [m]
<b>Parametro di progetto</b>	0,16	0,45
<b>Risultato sperimentale</b>	0,17	0,46
<b>Risultato CFD</b>	0,20	0,45

Nonostante i limiti riscontrati, la disponibilità del modello CFD ha consentito un'analisi dettagliata del campo di vento a valle degli *spires*, lungo la sezione di lavoro della galleria del vento DICAAR, confermando che la lunghezza della sezione di sviluppo del flusso è stata correttamente progettata e che il campo di vento risulta ben sviluppato e uniforme nella sezione destinata alle prove di emissione. Inoltre, ha consentito di indagare il campo di vento in prossimità del soffitto, che non è stato possibile valutare durante le prove sperimentali.

Infine, si reputa che il modello CFD sviluppato rappresenta uno strumento utile per future analisi e consentirà di valutare preliminarmente l'impatto di eventuali modifiche al progetto originale della galleria del vento DICAAR.

## **5.1.4 Determinazione della Velocità d'Attrito Limite**

### **5.1.4.1 Limitazioni della Procedura EPA Standard**

I risultati riportati nel paragrafo 4.4.1 evidenziano una significativa limitazione della procedura EPA: l'esclusione del setaccio da 0,125 mm dalla colonna di vagli impedisce di rappresentare accuratamente le frazioni granulometriche più fini di alcuni materiali. Un caso emblematico è quello rappresentato dalla blenda PR: l'applicazione del metodo EPA originale avrebbe portato a una moda di 1,5 mm e, conseguentemente, a una stima della velocità d'attrito limite pari a 0,76 m/s, ovvero quasi il doppio del valore individuato includendo il setaccio da 0,125 mm.

Questa discrepanza mette in evidenza il rischio di una caratterizzazione inaccurata del potenziale erosivo dei materiali che contengono una quota significativa di particelle fini quando si adotta la procedura EPA standard. L'integrazione del vaglio aggiuntivo da 0,125 mm si dimostra pertanto essenziale per migliorare la rappresentatività della moda della distribuzione granulometrica e per evitare la sovrastima dei valori della velocità d'attrito limite.

### **5.1.4.2 Comparazione delle Velocità d'Attrito Limite Ricavate con le Differenti Metodologie Impiegate**

Le velocità d'attrito ricavate con le tre metodologie sono riportate in Tabella 5.2.

In tutte le metodologie indagate è stato riscontrato che i solfati BD e, in misura ancora maggiore, gli ossidi WL e il gesso GP esercitano una maggiore resistenza all'erosione eolica rispetto agli altri materiali. Invece, nonostante la loro somiglianza con BD, i solfati AD si sono rivelati i più sensibili all'azione del vento, insieme alle blende PR e RD. Le galene PR e PN hanno evidenziato una bassa resistenza all'erosione eolica nei test EPA e in quelli condotti con il PI-SWERL; tuttavia, nelle prove condotte in galleria del vento, è stato necessario raggiungere velocità d'attrito più elevate per innescare il fenomeno erosivo. Infine, per quanto riguarda la galena MS, le tre metodologie hanno fornito risultati coerenti tra loro.

**Tabella 5.2.** Velocità d'attrito limite determinata tramite la procedura EPA rivisitata, la galleria del vento DICAAR (EWT) e il PI-SWERL.

<b>Materiale</b>	<b>Gesso GP</b>	<b>Ossidi WL</b>	<b>Solfati BD</b>	<b>Solfati AD</b>	<b>Galena MS</b>	<b>Galena PN</b>	<b>Galena PR</b>	<b>Blenda PR</b>	<b>Blenda RD</b>
$u^*_{t,EPA}$ [m s <sup>-1</sup> ]	1	1	0,76	0,43	0,43	0,43	< 0,43	< 0,43	< 0,43
$u^*_{t,EWT}$ [m s <sup>-1</sup> ]	0,53	0,47	0,44	0,34	0,44	0,40	0,40	0,34	0,37
$u^*_{t,PI-SWERL}$ [m s <sup>-1</sup> ]	/	0,60	0,54	0,31	0,41	0,31	0,31	0,29	0,32

#### 5.1.4.3 Correlazione delle Velocità d'Attrito Limite con le Caratteristiche Fisiche dei Materiali Granulari

Al fine di individuare eventuali relazioni di dipendenza, i risultati ottenuti sono stati analizzati incrociandoli con le seguenti caratteristiche fisiche dei materiali:

- Distribuzione granulometrica delle particelle elementari (PSD): non è stata riscontrata alcuna correlazione tra la PSD e la velocità d'attrito limite. Materiali con PSD sovrapponibili, come il gesso GP e la blenda PR, hanno infatti mostrato valori di velocità di soglia molto diversi. L'assenza di una relazione diretta tra PSD ed emissività dei materiali sottoposti all'erosione eolica risulta coerente con quanto riportato da Alfaro et al. (2004).
- Peso specifico: anche il peso specifico non ha mostrato un'influenza evidente sulla velocità d'attrito limite dei campioni. Ad esempio, il gesso GP e i solfati BD (entrambi caratterizzati da elevate velocità di soglia) hanno pesi specifici inferiori rispetto a tutti i campioni di blenda e galena, i quali hanno invece mostrato velocità d'attrito limite inferiori in tutte le metodologie adottate;
- Distribuzione granulometrica degli aggregati (ASD): è stata osservata una chiara dipendenza tra la velocità di soglia e la distribuzione granulometrica degli aggregati, con le velocità d'attrito limite maggiori associate alle più elevate dimensioni mediane  $d_{50}$  degli aggregati. L'unico comportamento anomalo è stato osservato per i solfati AD, che hanno mostrato una velocità d'attrito limite molto bassa nonostante un ASD elevato. Tale risultato può essere attribuito sia

all'elevata propensione degli aggregati a rompersi durante la saltazione, sia alla maggiore disponibilità di materiale fine sciolto sulla superficie rispetto agli altri materiali. La dipendenza delle emissioni di PM dall'ASD è stata già documentata in studi precedenti (Alfaro et al., 2004; Alfaro & Gomes, 2001).

L'effetto del contenuto d'acqua sulle emissioni di PM<sub>10</sub> dovute all'erosione eolica è ampiamente trattato in letteratura per i materiali di composizione omogenea, ed è principalmente attribuito all'incremento delle forze di legame tra le particelle con l'aumentare dell'umidità (Cornelis et al., 2004; Sharratt et al., 2013). Nel presente studio di ricerca, la determinazione della velocità di attrito limite di ciascun materiale è stata condotta esclusivamente ai valori del contenuto d'acqua dei campioni nello stato *tal quale*, ovvero senza nessun pretrattamento. Poiché le forze di legame indotte dalla presenza dell'acqua dipendono dalla composizione chimica di ciascun materiale (Castellanos, 2005), e poiché ciascun materiale è stato testato per un unico valore del contenuto d'acqua, l'effetto di questo parametro sulla  $u^*_t$  non è stato indagato ulteriormente.

#### **5.1.4.4 Comparazione delle Metodologie Impiegate**

Il confronto tra i risultati ottenuti con le tre metodologie mostra che le velocità di attrito limite determinate secondo la metodologia EPA risultano generalmente più elevate rispetto a quelle derivate dalle prove sperimentali condotte con la galleria del vento DICAAR e con il PI-SWERL. Questa discrepanza può essere spiegata considerando che i valori dell' $u^*_t$  forniti dalla procedura EPA si riferiscono al fenomeno della saltazione. Infatti, la procedura EPA è basata su studi sperimentali che mettono in correlazione la moda della distribuzione granulometrica (ASD) del materiale con la velocità d'attrito che innesca la saltazione, identificata attraverso osservazione visiva (Gillette et al., 1980). Al contrario, le metodologie adottate con la galleria del vento DICAAR e il PI-SWERL consentono di individuare la velocità di attrito limite anche in caso di sollevamento diretto delle particelle. I risultati ottenuti con il PI-SWERL indicano che tutte le velocità di soglia sono state determinate per sollevamento diretto, mentre nelle sperimentazioni condotte in galleria del vento alcuni materiali hanno mostrato un comportamento misto: in parte riconducibile al sollevamento diretto (in particolare quelli caratterizzati da valori di  $u^*_t$  significativamente diversi da quelli stimati con la procedura EPA), in parte riconducibili alla saltazione (Figure 4.29-4.32).

Studi sperimentali precedenti hanno evidenziato che la velocità di attrito limite associata al sollevamento diretto può risultare inferiore rispetto a quella prevista dai modelli teorici basati

sull'identificazione visiva dell'inizio della saltazione. Tuttavia, le emissioni generate dal sollevamento diretto risultano in genere più limitate rispetto a quelle prodotte dalla saltazione (Loosmore & Hunt, 2000; Macpherson et al., 2008; Sweeney & Mason, 2013).

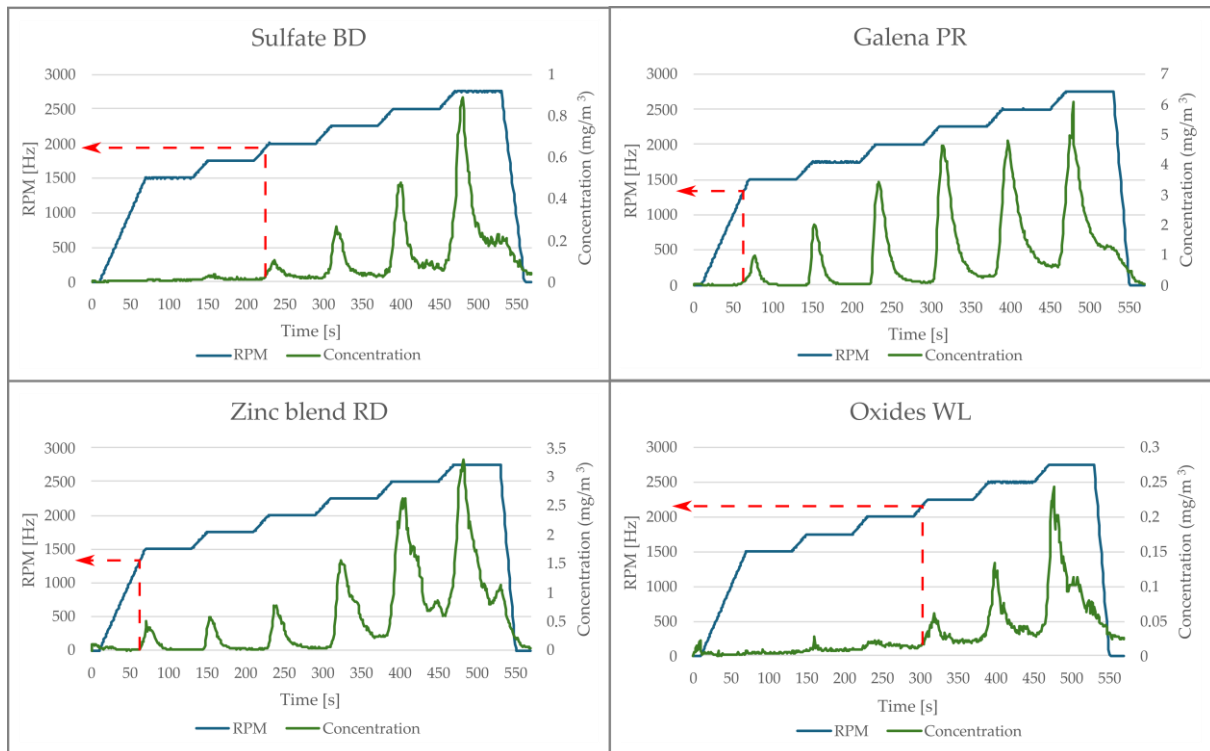
Nel complesso, i valori di velocità di attrito limite derivati dalle prove condotte con la galleria del vento e il PI-SWERL risultano comparabili per la maggior parte dei materiali analizzati. La massima differenza osservata tra tutti i campioni è stata pari a 0,13 m/s, registrata per gli ossidi WL. Tali differenze sono considerate accettabili e in linea con quanto riportato in studi precedenti (Van Leeuwen et al., 2021), dove sono state riscontrate discrepanze superiori al 33% (la massima differenza percentuale osservata nel presente studio è pari al 29%).

Un'analisi più approfondita mostra che il PI-SWERL tende a sovrastimare i valori dell' $u^*_t$  rispetto alla galleria del vento per i materiali che mostrano maggiore resistenza all'erosione eolica (ossidi WL e solfati BD). Al contrario, per alcuni materiali più erodibili (come galena PR e PN) si osserva l'effetto opposto, con valori dell' $u^*_t$  ricavati con il PI-SWERL inferiori rispetto a quelli ottenuti nella galleria del vento.

Queste differenze possono essere attribuite alle diverse metodologie adottate per la determinazione della velocità di attrito di soglia, dovute alle specifiche caratteristiche tecniche degli apparati sperimentali impiegati.

Il PI-SWERL è dotato di un sistema di sincronizzazione automatica tra il proprio sistema di acquisizione dati (che include la velocità di rotazione della piastra dalla quale si deduce velocità d'attrito) e le concentrazioni di  $PM_{10}$ . Tale sincronizzazione facilita l'applicazione della metodologia adottata in questa ricerca, basata sul rilevamento di un numero predefinito di incrementi consecutivi nella concentrazione misurata. È tuttavia opportuno sottolineare che il numero di otto incrementi consecutivi scelto, non rappresenta un parametro universale e deve essere adattato al comportamento emissivo dei materiali analizzati. Un numero di incrementi consecutivi troppo basso può portare a una sottostima dell' $u^*_t$ , indicando un'emissione prematura. Al contrario, per materiali a bassa emissività, anche quando l'emissione è effettivamente iniziata, la quantità di particelle emesse dal campione può essere così ridotta che gli incrementi di concentrazione risultano di modesta entità e spesso interrotti da diminuzioni istantanee della quantità di  $PM_{10}$  rilevate. La Figura 5.5 mostra un esempio in cui la velocità di soglia è stata identificata nel punto corrispondente a otto incrementi consecutivi della concentrazione. La linea verde rappresenta l'andamento temporale delle concentrazioni, mentre la freccia rossa tratteggiata indica il momento in cui è stata raggiunta la soglia. Questo esempio

evidenzia la limitazione intrinseca del criterio basato sul numero di incrementi consecutivi: un numero di incrementi superiore a otto non avrebbe condotto a una corretta individuazione dell' $u^*$ , anche se fenomeno emissivo risultava già avviato.



**Figura 5.5.** Esempio di diminuzioni istantanee e sporadiche della concentrazione rilevata durante i test sperimentali con il PI-SWERL. Si noti che un numero di incrementi consecutivi superiore a 8 non avrebbe consentito l'identificazione corretta della velocità di attrito limite nonostante il fenomeno erosivo risulti già avviato (Lai et al., 2025).

Nei test condotti con la galleria del vento, invece, la sincronizzazione tra le variazioni di velocità del vento e le letture delle concentrazioni di  $PM_{10}$  è risultata più complessa. Questa difficoltà deriva dall'assenza di un sistema automatico di sincronizzazione tra il regime di funzionamento del ventilatore e lo strumento di misura delle concentrazioni di  $PM_{10}$  (*DustTrak*), nonché dalla necessità di coordinamento tra due operatori situati in postazioni differenti, con conseguente possibilità di incertezza dei dati rilevati. Per questo motivo, nelle prove condotte nella galleria del vento DICAAR la determinazione della velocità d'attrito limite è stata effettuata sulla base della differenza percentuale tra le concentrazioni di  $PM_{10}$  misurate a monte e a valle dei campioni. Tale metodologia è tuttavia applicabile solo quando siano disponibili almeno due strumenti di misura del  $PM_{10}$  e quando la concentrazione di fondo all'interno della galleria rimanga costante. Anche in presenza di tali condizioni, la precisione

del valore dell' $u^*$ , risulta soggetta a un certo grado di incertezza, che dipende dalla differenza percentuale impostata, dalla durata della misura e dalla quantità di materiale erodibile presente nei vassoi di campionamento. Nella presente attività di ricerca, ad esempio, la velocità d'attrito limite è stata determinata su un intervallo di misura di 120 secondi, quando la concentrazione media di  $PM_{10}$  a valle dei campioni erodibili superava quella a monte del 20%. L'analisi dei dati riportati nella Tabella 4.11 mostra che, scegliendo una differenza percentuale target del 15%, si sarebbe ottenuta una sottostima della velocità d'attrito limite per i solfati BD e la blenda RD, mentre un target del 25% avrebbe prodotto una sovrastima per la blenda PR. Va inoltre sottolineato che le differenze percentuali medie riportate in Tabella 4.11 si riferiscono a un intervallo temporale di 120 secondi. Per i materiali che raggiungono la soglia con emissioni caratterizzate da picchi istantanei (come mostrato nelle Figure 4.31 e 4.32), la scelta dell'intervallo temporale su cui viene calcolata la media assume particolare rilievo: se un picco istantaneo si verificasse nella prima o nella seconda metà della prova, l'utilizzo di un intervallo di 60 secondi produrrebbe una differenza percentuale rispettivamente più alta o più bassa rispetto a quella osservata e, dunque, una potenziale sottostima o sovrastima della velocità d'attrito limite del materiale granulare indagato.

In conclusione, entrambe le metodologie presentano un certo grado di incertezza. Tuttavia, l'individuazione di un numero specifico di incrementi consecutivi di concentrazione rappresenta un approccio più oggettivo per l'identificazione della velocità di attrito di soglia. La possibilità di applicare tale metodologia anche nella galleria del vento DICAAR non è stata tuttavia possibile a causa della configurazione dell'apparato sperimentale.

## **5.1.5 Emissione dei Materiali Tal Quale**

### **5.1.5.1 Profili Verticali di Concentrazione**

Le concentrazioni di  $PM_{10}$  misurate durante i test sperimentali mostrano un incremento al crescere della velocità d'attrito lungo l'intera sezione verticale di misura. Tuttavia, esse diminuiscono rapidamente con l'aumentare dell'altezza del punto di campionamento rispetto al pavimento della galleria, in particolare nei primi 15-20 cm indagati, per poi tendere asintoticamente allo zero.

Per i materiali meno emissivi (i.e., gesso GP e solfati BD), le concentrazioni misurate in corrispondenza dei punti di campionamento più prossimi al pavimento della galleria si sono mantenute particolarmente basse ( $<0,10 \text{ mg m}^{-3}$  di  $PM_{10}$ ) per tutte le velocità d'attrito indagate. Inoltre, per tutti i materiali analizzati, le concentrazioni massime di  $PM_{10}$  rilevate nel corso delle

prove sperimentali non hanno mai superato i  $3 \text{ mg m}^{-3}$ , risultando inferiori ai valori massimi rilevati in studi analoghi condotti con velocità d'attrito comparabili (Pinna, 2021; Roney & White, 2006).

### 5.1.5.2 Emissioni nella Galleria del Vento DICAAR

Coerentemente con quanto osservato nelle concentrazioni di  $\text{PM}_{10}$  rilevate, anche le emissioni di particolato dei materiali nello stato *tal quale* sono aumentate al crescere della velocità d'attrito del vento.

Tra i campioni analizzati, il gesso GP, gli ossidi WL e i solfati BD non hanno mostrato emissioni significative, mentre i materiali più emissivi sono stati i solfati AD e le blende PR e RD. In particolare, i solfati AD rappresentano l'unico materiale che ha emesso quantità rilevanti di  $\text{PM}_{10}$  già alle velocità d'attrito più basse indagate. Le tre galene MS, PN e PR hanno invece mostrato un comportamento intermedio.

Analogamente a quanto fatto per l'analisi della velocità di attrito limite (paragrafo 5.1.4.3), i risultati delle emissioni di particolato sono stati correlati con le caratteristiche fisiche dei materiali per individuare eventuali relazioni di dipendenza. L'indagine ha evidenziato le stesse tendenze già osservate nel paragrafo 5.1.4.3: non sono state individuate correlazioni tra emissioni e distribuzione granulometrica delle particelle elementari (PSD) e tra emissioni e peso specifico, mentre è stata individuata una chiara dipendenza delle emissioni di  $\text{PM}_{10}$  dalla distribuzione granulometrica degli aggregati (ASD), con l'unico comportamento anomalo riscontrato per i solfati AD. Coerentemente con quanto fatto per la velocità d'attrito limite, non è stata analizzata l'influenza del contenuto d'acqua.

La legge di potenza ( $E = a \cdot u^b$ ) che rappresenta la relazione tra le emissioni di  $\text{PM}_{10}$  e la velocità d'attrito del vento ha descritto l'andamento dei dati sperimentali in modo soddisfacente, come indicato dai valori del coefficiente di determinazione  $R^2$ , compresi tra 0,89 e 1,00. Tuttavia, è opportuno sottolineare che tali risultati derivano da un singolo test sperimentale per ciascun materiale: la ripetizione delle prove potrebbe consentire l'eliminazione di eventuali valori anomali, migliorando ulteriormente la bontà dell'adattamento e incrementando di conseguenza i valori del coefficiente di determinazione  $R^2$ .

L'analisi ha inoltre evidenziato un'elevata sensibilità delle emissioni alle variazioni di velocità d'attrito, espressa attraverso l'esponente  $b$  della legge di potenza, che ha assunto valori compresi tra 3,5 e 17,0 (valore medio pari a 11,4). La letteratura scientifica riporta valori tipici

compresi tra 3 e 4,4 (Shao, 2008), suggerendo una risposta più marcata dei materiali analizzati in questo studio alle variazioni della velocità d'attrito.

## **5.1.6 Emissione dei Materiali Asciutti**

### **5.1.6.1 Profili Verticali di Concentrazione nella Galleria del Vento DICAAR**

Anche per i materiali sottoposti a essiccamento, le concentrazioni di PM<sub>10</sub> e di PM<sub>2,5</sub> misurate durante i test sperimentali mostrano un incremento con l'aumentare della velocità d'attrito lungo l'intera sezione verticale di misura. Inoltre, le concentrazioni diminuiscono rapidamente con l'aumentare dell'altezza del punto di campionamento rispetto al pavimento della galleria, in particolare nei primi 15–20 cm, per poi tendere asintoticamente a zero.

Le concentrazioni medie di PM<sub>10</sub> rilevate risultano superiori a quelle osservate per i materiali *tal quale*, ovvero non sottoposti ad alcun trattamento. Inoltre, a parità di velocità d'attrito, la blenda RD ha evidenziato valori di concentrazione più elevati rispetto alla galena PN, confermando l'andamento già riscontrato per i materiali non essiccati.

### **5.1.6.2 Andamento delle Concentrazioni nel Tempo**

I risultati delle misure di lunga durata hanno permesso di condurre un'analisi qualitativa sulla persistenza del fenomeno erosivo.

Durante le prove sperimentali condotte sono stati registrati picchi di breve durata (inferiore a 5 secondi), la cui intensità aumentava con la velocità del vento. Tali picchi erano seguiti da una graduale diminuzione delle concentrazioni misurate, particolarmente marcata alle velocità più basse. Dopo il picco iniziale, infatti, le concentrazioni di PM<sub>10</sub> tendevano a raggiungere i valori di fondo tanto più rapidamente quanto minore era la velocità d'attrito.

L'andamento temporale decrescente delle concentrazioni è stato descritto in modo soddisfacente mediante una legge di potenza del tipo  $c = a \cdot t^b$ . Per tutti i fitting effettuati, il coefficiente  $a$  è risultato prossimo al valore del picco iniziale, mentre il coefficiente  $b$  ha assunto valori compresi tra circa -1,4 e -1,0, ad eccezione delle velocità d'attrito più basse, per le quali ha raggiunto valori pari a -2,70 (galena PN) e -2,02 (blenda RD). Il valore più basso di  $b$  alle minori velocità d'attrito conferma che le concentrazioni tendevano a raggiungere più rapidamente i valori di fondo, in accordo con le osservazioni sperimentali precedentemente descritte (paragrafo 4.6.1.2).

Nel complesso, i coefficienti di determinazione  $R^2$ , compresi tra 0,87 e 0,98 e con un valore medio di 0,94, indicano una buona coerenza tra i dati sperimentali e la legge di potenza, confermando la buona capacità di quest'ultima nel descrivere il decadimento temporale del fenomeno erosivo. È opportuno sottolineare che tali risultati derivano comunque da un singolo test sperimentale per ciascuna velocità d'attrito investigata e che la ripetizione delle prove potrebbe consentire l'eliminazione di eventuali valori anomali, migliorando ulteriormente la bontà dell'adattamento e incrementando di conseguenza i valori di  $R^2$ .

### 5.1.6.3 Emissioni nella Galleria del Vento DICAAR

La velocità di innesco di emissioni significative, attribuibile all'avvio del fenomeno di saltazione, è risultata pari a 0,37 m/s per la blenda RD e 0,43 m/s per la galena PN. In base ai risultati ottenuti, la riduzione del contenuto d'acqua non ha comportato un evidente incremento delle velocità d'attrito limite rispetto a quelle determinate per i materiali granulari *tal quale* nella galleria del vento DICAAR (riportate nel paragrafo 4.4.2), pari a 0,40 m/s per entrambi i campioni. Tale comportamento risulta in apparente contrasto con quanto riportato in letteratura, che riporta un aumento della  $u^*_t$  con l'incremento del contenuto d'acqua nei materiali granulari, dovute all'aumento delle forze di legame interparticellari (Cornelis & Gabriels, 2003; Fécan et al., 1999). Tuttavia, è opportuno evidenziare che le metodologie applicate nei paragrafi 4.4.2 e 4.4.3 stimano la velocità d'attrito considerando sia il sollevamento diretto sia l'innesco della saltazione, mentre l'identificazione di una emissione significativa ha permesso isolare quest'ultimo fenomeno, riferendo la velocità d'attrito alla sola saltazione.

Nel corso degli studi sperimentali condotti sui campioni di materiale granulare sono stati determinati valori di emissione di PM<sub>10</sub> e di PM<sub>2,5</sub> relativamente elevati ( $1 \div 10 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  per velocità d'attrito superiori a 0,50 m/s), a conferma dell'elevato potenziale emissivo dei materiali analizzati dopo essere stati sottoposti ad essiccazione. Per entrambe le frazioni di particolato, le emissioni sono aumentate al crescere della velocità d'attrito del vento, passando da circa  $10^{-2} \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  per  $u^*$  di 0,34 m/s, fino a circa  $5 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  per velocità d'attrito pari a 0,53 m/s.

I valori di emissione di PM<sub>10</sub> determinati nel presente studio risultano consistenti con quelli riportati da Shao (2008) in una raccolta di risultati relativi a studi sperimentali su superfici erodibili per velocità d'attrito comprese tra 0,15 e 1 m/s, ma mediamente superiori (fino a circa due ordini di grandezza) rispetto a quelli ottenuti da McKenna et al. (2009) e Roney e White (2006), condotti su materiali con granulometria più grossolana e velocità d'attrito comprese tra 0,2 e 1,15 m/s. Si evidenzia, tuttavia, che McKenna et al. (2009) hanno osservato anche

emissioni più elevate ( $3 \cdot 10^2 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) rispetto a quelle determinate nel corso del presente studio, sottoponendo campioni di *tailings* in forma di materiale granulare asciutto a un flusso di particelle saltatrici proveniente dall'esterno della galleria del vento.

Come illustrato nel paragrafo 4.6.1.3 è stata riscontrata una relazione di tipo potenziale fra le emissioni di  $\text{PM}_{10}$  e di  $\text{PM}_{2,5}$  e la velocità d'attrito del vento ( $E = a \cdot u^{*b}$ ). Tale legge ha descritto in modo soddisfacente l'andamento dei dati sperimentali, come evidenziato dai coefficienti di determinazione  $R^2$  compresi tra 1,00 e 0,95. L'esponente  $b$ , che esprime la sensibilità delle emissioni alle variazioni di velocità d'attrito, ha assunto valori superiori a 9,9, significativamente più elevati rispetto a quelli generalmente riportati in letteratura dove, invece, si fa riferimento a valori compresi fra 3 e 4,4 (Shao, 2008).

Si osserva inoltre che la galena PN presenta valori dei coefficienti  $a$  e  $b$  maggiori rispetto alla blenda RD per entrambe le frazioni di particolato. Ciò implica che, sebbene il fenomeno erosivo si inneschi a velocità d'attrito più alte per la galena PN e la blenda RD mostri emissioni maggiori nell'intervallo delle  $u^*$  indagate nel presente studio, a velocità d'attrito più elevate si potrebbe verificare un'inversione di tendenza, con una maggiore emissività della galena PN.

#### 5.1.6.4 Emissioni Simulate col Codice Numerico

Attraverso le simulazioni numeriche sono stati determinati valori di emissione di  $\text{PM}_{10}$  e di  $\text{PM}_{2,5}$  da basse e moderate ( $0,001 \div 0,5 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

Le differenti formulazioni del *Damage Ratio* adottate hanno prodotto differenze significative nella stima delle emissioni: i valori ottenuti con il *DR* di Thornton et al. risultano nettamente superiori rispetto a quelli calcolati con il *DR* di Deng e Davé (Figure 5.6-5.9). Tali differenze derivano dal diverso valore medio del *DR* generato attraverso l'applicazione delle due formulazioni (Tabella 5.3), in cui il *DR* medio di Thornton et al. risulta superiore di quasi due ordini di grandezza rispetto a quello di Deng e Davé.

Le discrepanze tra le emissioni ricavate con i due *DR* possono essere ricondotte anche alle differenti ipotesi alla base delle rispettive formulazioni. In particolare, le due espressioni del *Damage Ratio* sono state sviluppate mediante simulazioni numeriche condotte su materiali caratterizzati da proprietà meccaniche diverse, in termini di modulo di Young e coefficiente di Poisson. Poiché tali parametri influenzano la deformazione elastica e la coesione che si instaura tra le particelle elementari, le diverse condizioni meccaniche di riferimento portano a differenti valori medi di *DR*, determinando differenze significative nella stima delle emissioni di PM.

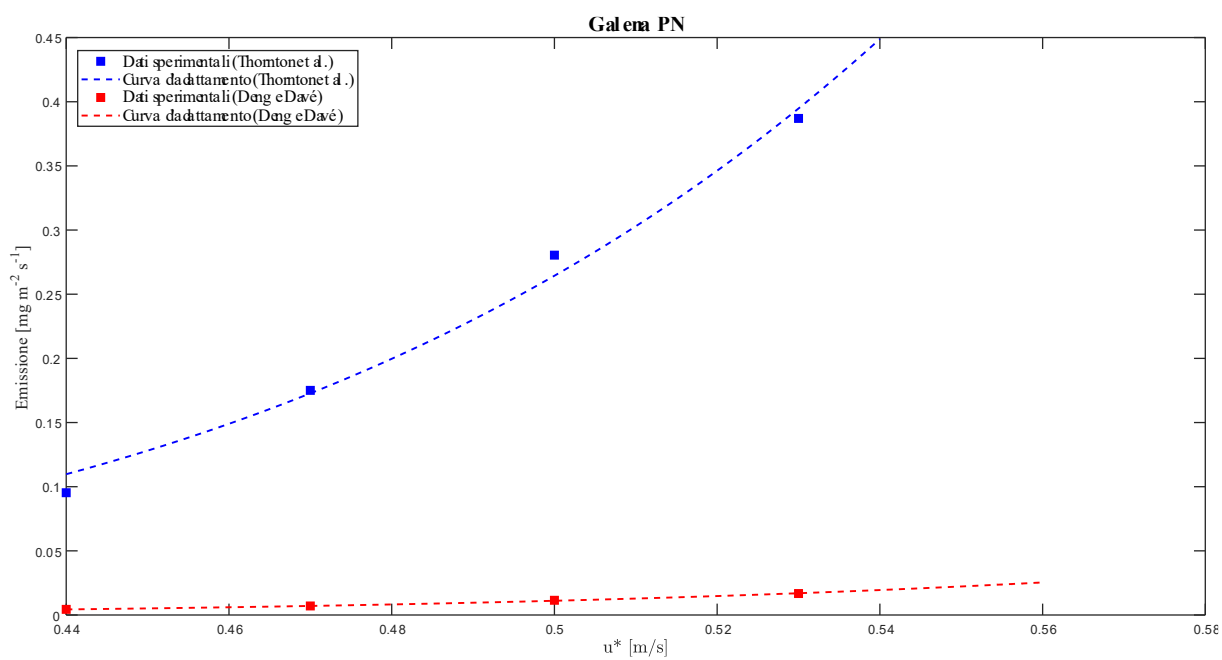
Nonostante tali differenze, le emissioni simulate con entrambi i *DR* sono aumentate al crescere della velocità d'attrito del vento, seguendo un andamento ben descritto dalla legge di tipo potenziale ( $E = a \cdot u^b$ ). Per entrambe le formulazioni del DR adoperate, l'esponente  $b$  relativo alla galena PN è risultato superiore a quello della blenda RD (circa 7 contro 5), indicando una maggiore emissività della galena alle velocità d'attrito più elevate. Questo comportamento risulta coerente con quanto osservato nelle sperimentazioni condotte in galleria del vento DICAAR, riportate nel paragrafo 5.1.6.3.

Un ulteriore aspetto di rilievo riguarda il costo computazionale del codice di simulazione, che è fortemente influenzato dalle distribuzioni granulometriche delle particelle elementari (PSD), degli aggregati (ASD) e dei saltatori SSD. A parità di dimensioni dell'aggregato, quanto più fini sono le particelle elementari del materiale analizzato, tanto maggiore è il numero di particelle che il codice deve generare per riempire ciascun aggregato o saltatore. Ne consegue che, al crescere della differenza tra la PSD e le distribuzioni ASD e SSD, aumenta significativamente anche il costo computazionale della simulazione.

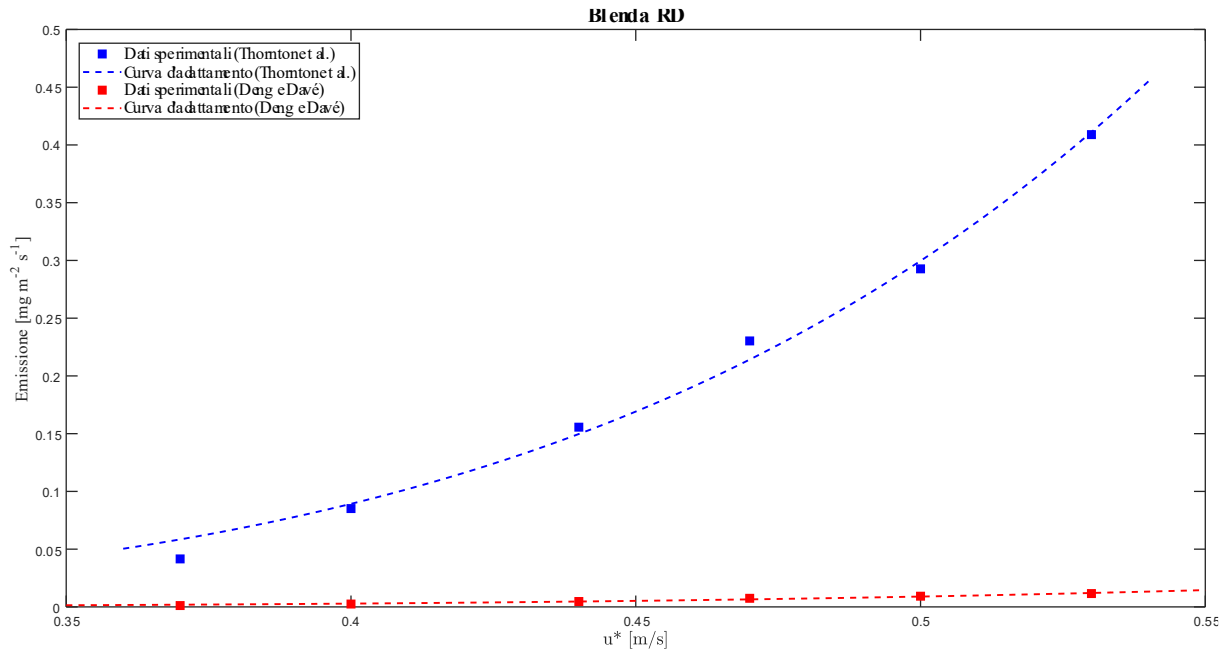
Nel presente caso di studio, la PSD e l'ASD, derivate dalle attività di caratterizzazione dei materiali granulari (paragrafo 4.1) e utilizzate come dati di input del codice numerico, presentavano differenze tali da comportare tempi di simulazione eccessivamente elevati: una singola simulazione richiedeva infatti oltre 3 giorni di calcolo (la simulazione è stata interrotta al terzo giorno consecutivo). Limitando in numero di impatti simulati 1000, il tempo di calcolo si è ridotto drasticamente, consentendo di ottenere una stima dell'emissione in meno di 10 ore. Con questa semplificazione, la massa totale dei 1000 saltatori è risultata sempre inferiore rispetto a quella necessaria per eguagliare il flusso di saltazione per unità di superficie e tempo previsto dal codice originale, fino all'ottenimento di un rapporto di circa 1/30.000 per le simulazioni alle velocità d'attrito più elevate simulate. Nonostante il limitato numero degli impatti simulati, la stima dell'emissione media è risultata comunque soddisfacente: la deviazione standard relativa delle emissioni simulate è rimasta contenuta, con una media pari al 7,2% per il *DR* di Thornton et al. e al 12,4% per il *DR* di Deng e Davé. Tali valori indicano una bassa aleatorietà generata dal codice numerico e confermano la buona riproducibilità delle simulazioni nonostante la semplificazione introdotta.

**Tabella 5.3.** *Damage Ratio medio generato nelle simulazioni numeriche.*

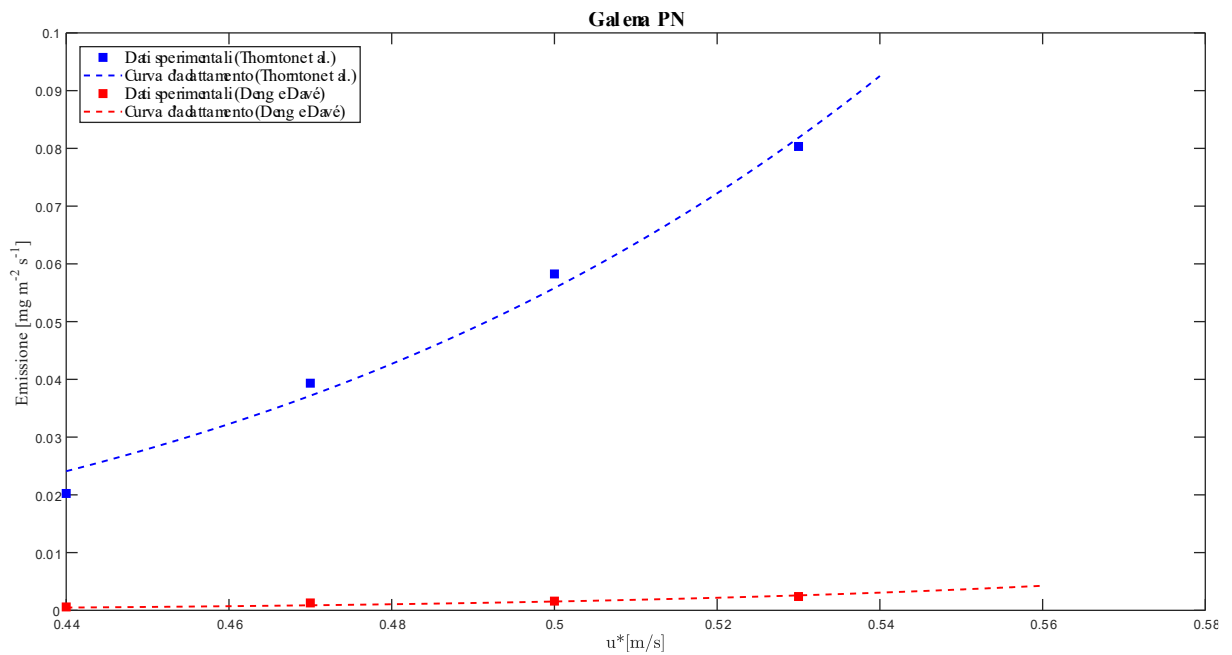
<b>DR medio [-]</b>		
	<b>Galena PN</b>	<b>Blenda RD</b>
<b>Thornton et al.</b>	0,64	0,48
<b>Deng e Davé</b>	0,017	0,009



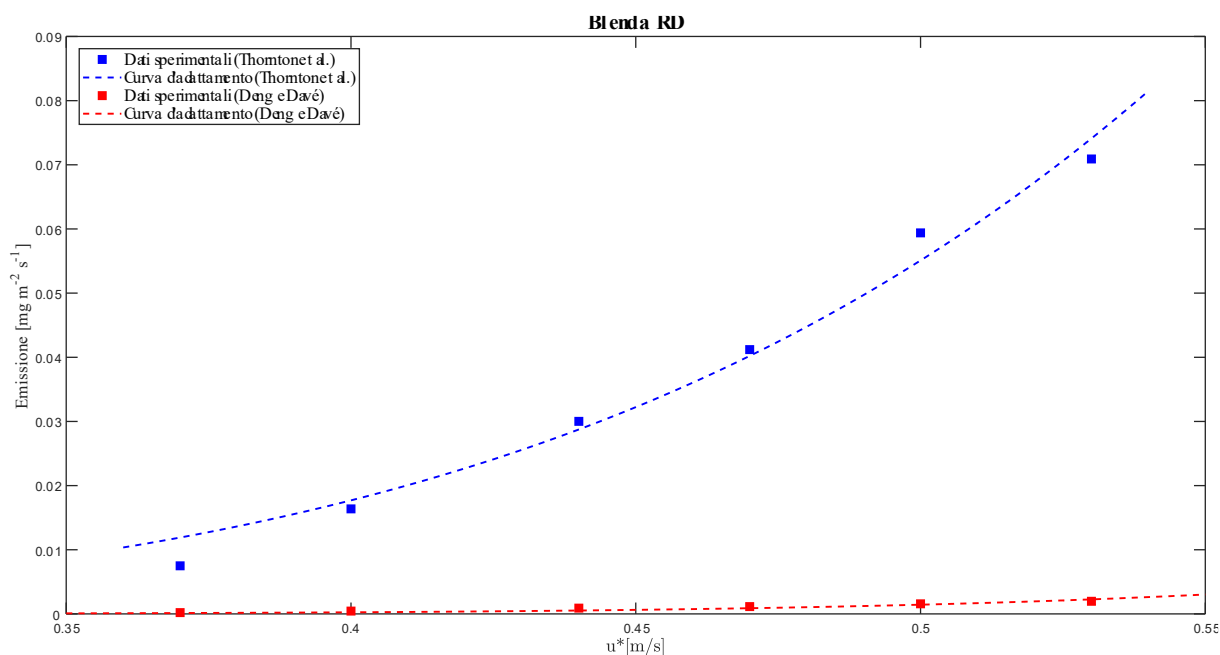
**Figura 5.6.** *Dipendenza delle emissioni di PM<sub>10</sub> dalla velocità d'attrito del vento per le due formulazioni del DR adottate (galena PN).*



**Figura 5.7.** Dipendenza delle emissioni di  $PM_{10}$  dalla velocità d'attrito del vento per le due formulazioni del DR adottate (blenda RD).



**Figura 5.8.** Dipendenza delle emissioni di  $PM_{2.5}$  dalla velocità d'attrito del vento per le due formulazioni del DR adottate (galena PN).



**Figura 5.9.** Dipendenza delle emissioni di  $PM_{2,5}$  dalla velocità d'attrito del vento per le due formulazioni del DR adottate (blenda RD).

### 5.1.6.5 Confronto delle Emissioni tra Galleria del Vento DICAAR e Codice Numerico

Come riportato nelle Tabelle 5.4-5.7, le emissioni di PM determinate attraverso le sperimentazioni nella galleria del vento DICAAR risultano più elevate rispetto a quelle simulate con il codice numerico di circa un ordine di grandezza rispetto a quelle ricavate con il DR di Thornton et al. e di due ordini di grandezza rispetto a quelle ricavate con il DR di Deng e Davé.

La maggiore sensibilità delle emissioni alle variazioni di velocità d'attrito osservata nei risultati sperimentali può essere attribuita, in parte, alla procedura adottata per il calcolo delle emissioni nella galleria del vento DICAAR. Come discusso nel paragrafo 4.6.1.2, le superfici di galena PN e blenda RD possono essere assimilate a superfici con un potenziale erodibile limitato, mentre il codice numerico si basa su formulazioni empiriche sviluppate per superfici a potenziale erodibile illimitato. Di conseguenza, il codice numerico tende a stimare un'emissione pressoché costante nel tempo, mentre nelle prove sperimentali le emissioni decrescono progressivamente con il tempo.

I dati sperimentali relativi alle concentrazioni di PM ottenuti tramite il *DustTrak* (paragrafo 4.6.1.1), rappresentano valori medi calcolati su specifici intervalli temporali (e.g., le concentrazioni medie misurate nel punto di misura posto a 3 cm dal pavimento della galleria possono essere associati alla media dei valori tra i 10 e i 20 secondi dei test sull'andamento

delle concentrazioni nel tempo illustrati nel paragrafo 4.6.1.2). Per ottenere stime sperimentali più rappresentative, sarebbe pertanto opportuno integrare l'andamento temporale decrescente delle concentrazioni di PM per ciascun punto di misura investigato. Tuttavia, con i dati attualmente a disposizione, tale operazione non è risultata possibile.

**Tabella 5.4.** Emissioni di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito per la galena PN ottenute attraverso i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR e il codice numerico.

		Emissioni galena PN [ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]						
		0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
		m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Dati sperimentali</b>	<b>Galleria del vento DICAAR</b>	0,01	0,03	0,04	0,12	0,43	1,14	2,93
<b>Codice numerico</b>	<b>DR di Thornton et al.</b>	/	/	/	0,10	0,18	0,28	0,39
	<b>DR di Deng e Davé</b>	/	/	/	0,004	0,007	0,012	0,017

**Tabella 5.5.** Emissioni di  $PM_{10}$  al variare della velocità d'attrito per la blenda RD ottenute attraverso i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR e il codice numerico.

		Emissioni blenda RD [ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]						
		0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
		m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Dati sperimentali</b>	<b>Galleria del vento DICAAR</b>	0,02	0,40	0,74	0,87	1,86	6,60	8,96
<b>Codice numerico</b>	<b>DR di Thornton et al.</b>	/	0,04	0,09	0,16	0,23	0,29	0,41
	<b>DR di Deng e Davé</b>	/	0,001	0,003	0,005	0,007	0,009	0,012

**Tabella 5.6.** Emissioni di  $PM_{2,5}$  al variare della velocità d'attrito per la galena PN ottenute attraverso i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR e il codice numerico.

		Emissioni galena PN [ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]						
		0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
		m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Dati sperimentali</b>	<b>Galleria del vento DICAAR</b>	0,00	0,01	0,02	0,09	0,36	0,91	2,44
<b>Codice numerico</b>	<b>DR di Thornton et al.</b>	/	/	/	0,020	0,039	0,058	0,08
	<b>DR di Deng e Davé</b>	/	/	/	0,0006	0,0013	0,0016	0,0024

**Tabella 5.7.** Emissioni di  $PM_{2,5}$  al variare della velocità d'attrito per la blenda RD ottenute attraverso i test sperimentali nella galleria del vento DICAAR e il codice numerico.

		Emissioni blenda RD [ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ]						
		0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53
		m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
<b>Dati sperimentali</b>	<b>Galleria del vento DICAAR</b>	0,01	0,34	0,63	0,70	1,68	5,92	7,79
<b>Codice numerico</b>	<b>DR di Thornton et al.</b>	/	0,007	0,016	0,030	0,041	0,059	0,071
	<b>DR di Deng e Davé</b>	/	0,0002	0,0004	0,0009	0,0011	0,0016	0,0020

Un'ulteriore causa delle differenze osservate tra i risultati sperimentali e quelli numerici può essere ricondotta alle formulazioni del *Damage Ratio* adottate nel codice numerico. Come illustrato nel paragrafo precedente (5.1.6.4), le due espressioni del *DR* sono state sviluppate mediante simulazioni numeriche condotte su materiali aventi proprietà meccaniche differenti,

in particolare per quanto riguarda il modulo di Young e il coefficiente di Poisson, parametri che influenzano la coesione tra le particelle elementari.

Il confronto tra i valori di tali parametri utilizzati nella definizione dei *DR* e i valori della galena e della blenda, calcolati utilizzando le costanti elastiche fornite da Bass (2013) e riportati nella Tabella 5.8, evidenzia che i coefficienti di Poisson utilizzati per la definizione delle formulazioni del *DR* risultano comparabili ai valori reali dei due minerali. Al contrario, il modulo di Young impiegato per la definizione del *DR* di Deng e Davé si discosta significativamente dai valori effettivi di galena e blenda, a differenza di quello utilizzato per la formulazione di Thornton et al. Ciò spiega la maggiore discrepanza tra i risultati sperimentali e le emissioni simulate adottando il *DR* di Deng e Davé rispetto a quelle ottenute con il *DR* di Thornton et al.

**Tabella 5.8.** Valori del modulo di Young e del coefficiente di Poisson della blenda e della galena, calcolati utilizzando le costanti elastiche fornite da Bass (2013), e valori utilizzati per la definizione delle formulazioni dei *DR*.

	<b>Modulo di Young [GPa]</b>	<b>Coefficiente di Poisson [-]</b>
<b>Galena</b>	81,0	0,27
<b>Blenda</b>	83,1	0,32
<b><i>DR</i> di Thornton et al.</b>	70	0,3
<b><i>DR</i> di Deng e Davé</b>	0,13	0,3

I fitting della legge di potenza sui dati di emissione sperimentali (paragrafo 5.1.6.3) e su quelli simulati con il codice numerico (paragrafo 5.1.6.4) in funzione della velocità d'attrito hanno evidenziato valori più elevati dell'esponente *b* per la galena PN (circa 16 per i dati sperimentali e circa 7 per quelli simulati) rispetto alla blenda RD (circa 10 per i dati sperimentali e circa 5 per quelli simulati). Questo risultato suggerisce una maggiore emissività della galena PN alle velocità d'attrito più elevate (maggiori a quelle indagate nel presente studio) rispetto alla blenda RD. Tale comportamento è coerente con le *Best Available Techniques* (BAT) della Commissione Europea (2006) relativo alle emissioni dei depositi (BREF), che classificano la galena come materiale altamente sensibile alla dispersione (classe S2) e la blenda come moderatamente sensibile (classe S4). I risultati sono inoltre coerenti con quanto riportato nel

documento *Trends Procedures Document* dell'EPA (1998), che fornisce un elenco di fattori di emissione per diverse sorgenti di polveri diffuse, espresse in termini di particelle sospese totali (TSP, *Total Suspended Particles*) e PM<sub>10</sub>. È tuttavia opportuno precisare che né la classificazione delle BAT né i fattori di emissione dell'EPA fanno riferimento a specifici meccanismi di emissione e includono, oltre al contributo dell'erosione eolica su superfici granulari (i.e., *industrial wind erosion*), anche quelli relativi ad altre fonti diffuse, come la movimentazione dei materiali e il trasporto su strade non asfaltate.

In aggiunta al confronto tra i valori assoluti delle emissioni di PM ottenuti mediante i test sperimentali in galleria del vento e le simulazioni numeriche, un ulteriore elemento di interesse riguarda il rapporto tra le emissioni di PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>, riportato in Tabella 5.9 e in Tabella 5.10.

Per quanto concerne le sperimentazioni condotte nella galleria del vento DICAAR, il rapporto tra le emissioni di PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub> risulta particolarmente elevato per entrambi i campioni in studio e, in particolare, per la blenda RD, per la quale sono stati ottenuti valori compresi tra 0,59 e 0,90. Per entrambi i materiali, i valori minimi del rapporto PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> sono stati riscontrati alla velocità d'attrito più bassa ( $u^* = 0.34$  m/s) e sono aumentati progressivamente con l'incremento della  $u^*$ , fino al raggiungimento di un valore pressoché costante pari a circa 0,81 per la galena PN e 0,88 per la blenda RD. Tali risultati risultano in contrasto con quanto riportato in letteratura da Li et al. (2015) e Alfaro et al. (1997), secondo cui le emissioni di PM<sub>10</sub> tendono ad aumentare più rapidamente rispetto a quelle di PM<sub>2,5</sub>. Tale comportamento viene attribuito al fatto che le particelle di dimensioni maggiori sono più facilmente soggette al fenomeno del *sandblasting*, in virtù della relazione inversa che lega la dimensione delle particelle con l'energia di legame interparticellare (Alfaro et al., 1997, 1998).

Al contrario, nelle simulazioni numeriche il rapporto tra le emissioni di PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub> risulta pressoché costante al variare della velocità d'attrito. Ciò è riconducibile al fatto che il codice numerico utilizza come dato di input un'energia di coesione costante, assunta rappresentativa di un valore medio del materiale oggetto di studio, e non tiene pertanto conto della dipendenza dell'energia di legame interparticellare dalla dimensione delle particelle elementari. Il range dei valori di PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> ottenuti tramite le simulazioni numeriche risulta tuttavia relativamente ristretto (0,13 ÷ 0,22) ed è coerente con i risultati emersi dalla fase di caratterizzazione granulometrica dei materiali (i.e., PSD - *Particle Size Distribution*), illustrata nel paragrafo 4.1 (Figura 4.1). È comunque possibile osservare lievi differenze nel rapporto tra le emissioni di PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub> in funzione della formulazione del *Damage Ratio* adottata: per la

galena PN, il valore medio ottenuto utilizzando il *DR* di Thornton et al. (media di 0,21) risulta leggermente superiore a quello ricavato con il *DR* di Deng e Davé (media di 0,19), mentre per la blenda RD si osserva un comportamento opposto, con valori medi pari a circa 0,15 e 0,17, rispettivamente.

Le differenze riscontrate nei rapporti tra le emissioni di  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$  derivanti dalle sperimentazioni in galleria del vento e in quelli ottenuti mediante il modello numerico risultano pertanto significative e non trascurabili. Le cause di tali discrepanze non risultano al momento pienamente chiarite e rappresentano un ulteriore aspetto di interesse che richiederà approfondimenti specifici nel proseguimento delle attività di ricerca.

**Tabella 5.9.** Rapporto tra le emissioni di  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$  ricavate attraverso le sperimentazioni in galleria del vento e il modello numerico (Galena PN).

<b>Galena PN</b>			
<b>Galleria del vento DICAAR</b>		<b>Modello numerico</b>	
<b><math>u^*</math> [m/s]</b>		<b><i>DR</i> di Thornton et al.</b>	<b><i>DR</i> di Deng e Davé</b>
<b>0,34</b>	0,21	/	/
<b>0,37</b>	0,38	/	/
<b>0,40</b>	0,59	/	/
<b>0,44</b>	0,73	0,21	0,13
<b>0,47</b>	0,83	0,22	0,18
<b>0,50</b>	0,80	0,21	0,14
<b>0,53</b>	0,83	0,21	0,14

**Tabella 5.10.** Rapporto tra le emissioni di  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$  ricavate attraverso le sperimentazioni in galleria del vento e il modello numerico (Blenda RD).

<b>Blenda RD</b>			
<b>Galleria del vento DICAAR</b>		<b>Modello numerico</b>	
$u^*$ [m/s]		<i>DR</i> di Thornton et al.	<i>DR</i> di Deng e Davé
<b>0,34</b>	0,59	/	/
<b>0,37</b>	0,84	0,18	0,18
<b>0,40</b>	0,88	0,19	0,18
<b>0,44</b>	0,81	0,19	0,19
<b>0,47</b>	0,90	0,18	0,15
<b>0,50</b>	0,90	0,20	0,17
<b>0,53</b>	0,87	0,17	0,17

## **5.2 Definizione di una Metodologia Integrata per la Stima delle Emissioni di PM**

Nel paragrafo 2.2.3.3 sono stati illustrati i fondamenti della metodologia integrata, obiettivo del progetto di Dottorato, per la quantificazione delle emissioni di particolato da superfici granulari esposte al vento. Alla luce dell'attività di ricerca svolta, si rende necessario definire più dettagliatamente la suddetta metodologia integrando al suo interno l'utilizzo del codice numerico sviluppato su *MATLAB*.

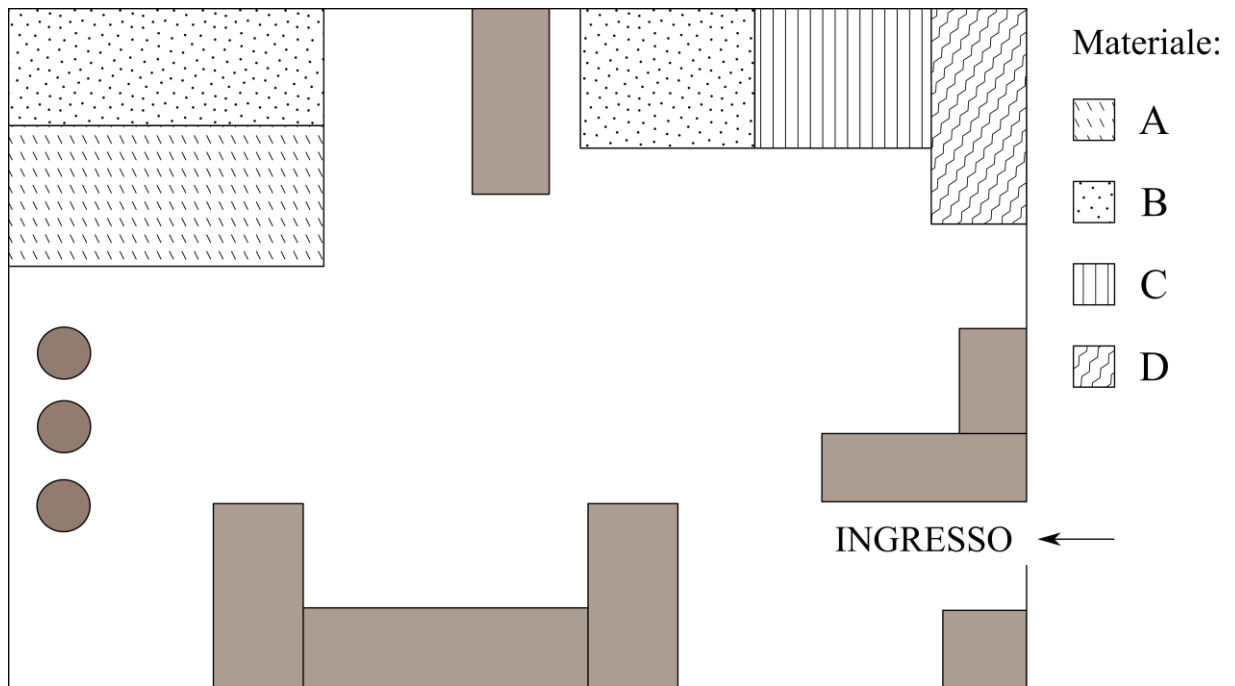
Come da obiettivo del progetto di Dottorato, la metodologia si fonda sull'integrazione della caratterizzazione fisico-chimica dei materiali con l'esecuzione di misure sperimentali e simulazioni numeriche computazionali. Il codice numerico sviluppato rappresenta in tal senso un esempio perfetto di tale integrazione, in quanto permette di stimare le emissioni di PM attraverso delle simulazioni numeriche che tengono in considerazione una grande quantità dei parametri che influenzano il fenomeno erosivo, descritti nel paragrafo 2.2.2. Tali parametri

possono essere definiti sia attraverso la caratterizzazione fisico-chimica dei materiali (i.e., distribuzione granulometrica degli aggregati, distribuzione granulometrica delle particelle elementari, massa volumica delle particelle ed energia di coesione delle particelle elementari), sia attraverso l'esecuzione di prove sperimentali volte a determinare la velocità d'attrito limite.

In un impianto industriale, tuttavia, si riscontra generalmente la presenza di una varietà di materiali granulari con caratteristiche fisico-chimiche differenti, che rispondono in modo diverso alle forze esercitate dal vento. Inoltre, è importante notare che anche un unico materiale può presentare proprietà variabili nel tempo e nello spazio, ad esempio a causa della formazione di croste superficiali o a variazioni locali del contenuto d'acqua.

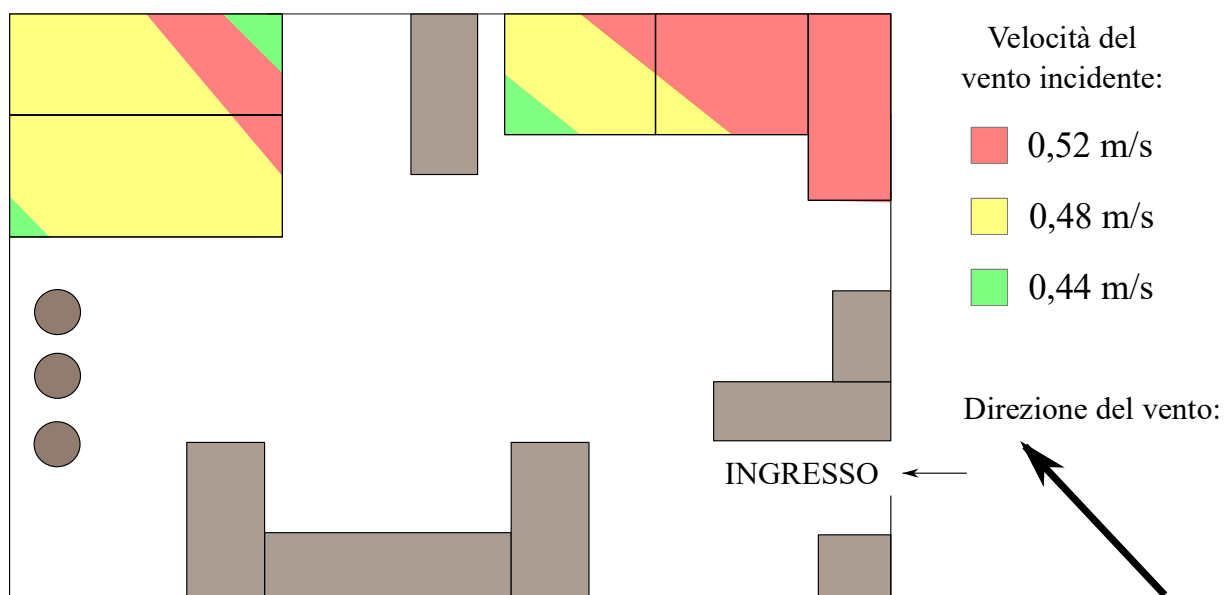
Il primo step della metodologia consiste, pertanto, nell'identificazione delle aree caratterizzate dalla presenza di un materiale granulare con proprietà fisico-chimiche omogenee (Figura 5.10). Per ciascuna di queste aree, è necessario determinare i parametri che costituiscono gli input del codice numerico (i.e., ASD, PSD, massa volumica ed energia di coesione delle particelle elementari e velocità d'attrito limite) mediante analisi di laboratorio e prove eseguite in apparecchiature sperimentali.

Per descrivere in modo più completo la variabilità spaziale e temporale delle superfici emittenti, la metodologia può essere integrata con tecnologie di telerilevamento aereo, in particolare mediante droni equipaggiati con sensori avanzati che permettono di rilevare la formazione di croste superficiali, la presenza di crepe, la variazione dell'umidità del materiale granulare e la copertura vegetale. Questi rilievi permettono di facilitare l'identificazione di aree con caratteristiche fisico-chimiche simili, consentendo di individuare la distribuzione spaziale di superfici con proprietà fisico-chimiche omogenee e di monitorarne l'evoluzione nel tempo.



**Figura 5.10.** Identificazione delle aree caratterizzate dalla presenza di un materiale granulare con proprietà fisico-chimiche omogenee.

Il secondo step riguarda la modellazione CFD, necessaria per descrivere la distribuzione spaziale della velocità del vento su scala locale all'interno dell'impianto minerario o metallurgico. La complessa geometria di tali siti industriali genera infatti un campo di velocità non omogeneo al loro interno. Le simulazioni CFD consentono di identificare le aree soggette a medesime condizioni di vento incidente (Figura 5.11), fornendo l'ultimo parametro di input per il codice numerico (i.e., velocità d'attrito  $u^*$ ).

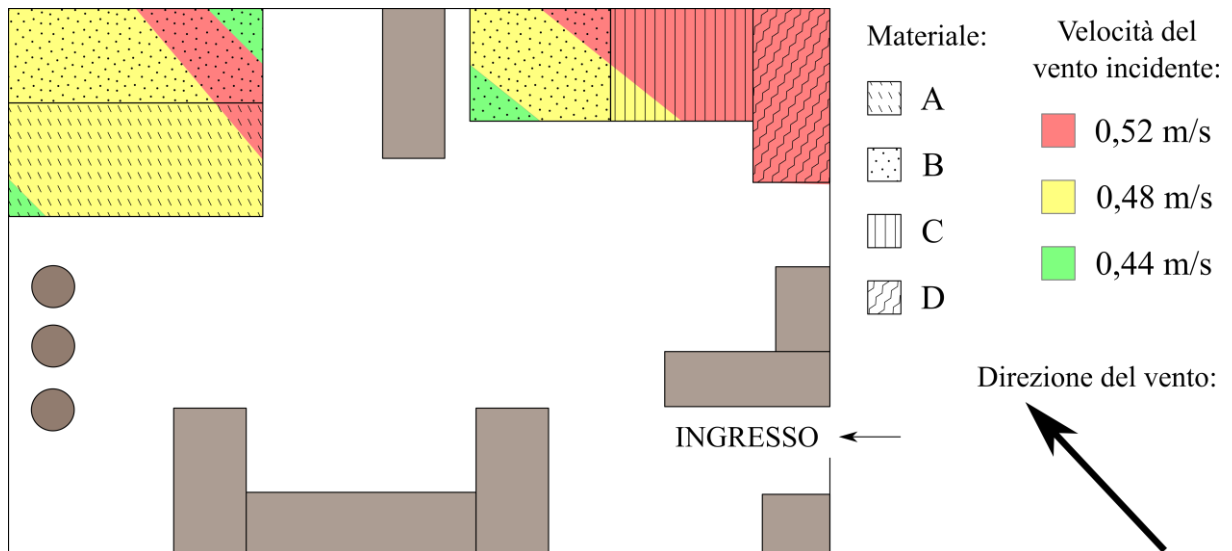


**Figura 5.11.** Identificazione della distribuzione spaziale della velocità del vento all'interno dell'impianto industriale.

La combinazione della distribuzione spaziale delle aree caratterizzate da materiali con caratteristiche fisico-chimiche omogenee e di quelle con medesime velocità del vento (Figura 5.12), consente, attraverso il codice numerico sviluppato, di stimare la distribuzione spaziale dei flussi verticali di polveri generati da un singolo evento erosivo. L'aggregazione dei singoli flussi permette infine di stimare l'emissione complessiva dell'intero sito industriale.

L'integrazione con un sistema GIS (*Geographic Information System*) consente inoltre di gestire e visualizzare i dati spaziali prodotti, generando mappe tematiche di rischio e supportando la pianificazione di interventi di mitigazione.

I benefici derivanti dalla metodologia integrata così definita sono molteplici. Tale approccio consente di descrivere in modo realistico le dinamiche di emissione in contesti ambientali diversi, tenendo conto delle peculiarità del sito industriale e della distribuzione spaziale dei materiali granulari. Inoltre, il codice numerico sviluppato incorpora un elevato numero di fattori che influenzano il fenomeno erosivo, offrendo una rappresentazione fisicamente coerente del comportamento emissivo delle superfici granulari e un utile strumento operativo per la gestione e la mitigazione delle emissioni.



*Figura 5.12. Integrazione della distribuzione spaziale delle aree caratterizzate da materiali con caratteristiche fisico-chimiche omogenee e di quelle con medesime velocità del vento.*

### 5.3 Limitazioni della Sperimentazione

Le attività di ricerca condotte hanno rivelato alcune limitazioni dello studio sperimentale, relative alla determinazione sperimentale delle velocità d'attrito limite dei materiali granulari e alla stima dell'emissione di PM determinata attraverso il codice numerico. Tali limitazioni saranno discusse in modo dettagliato nei paragrafi successivi.

#### 5.3.1 Limitazioni della Determinazione della Velocità d'Attrito Limite

L'analisi critica presentata nel paragrafo 5.1.4 ha messo in evidenza la difficoltà nella stima di una velocità d'attrito limite univoca per uno stesso materiale granulare determinata attraverso diverse metodologie. Ciascun approccio sperimentale è infatti soggetto a un proprio grado di incertezza, che rende complessa la determinazione precisa di tale parametro.

Inoltre, è emerso che le apparecchiature sperimentali impiegate possono individuare la velocità d'attrito limite associata non a un fenomeno di saltazione già sviluppato, ma al sollevamento diretto delle particelle più fini. Pertanto, se l'obiettivo risulta stimare la velocità d'attrito limite corrispondente all'innesco della saltazione, il valore dell' $u^*_t$  ottenuto sperimentalmente può rappresentare una sottostima di quello reale.

Poiché le emissioni generate dal sollevamento diretto risultano generalmente più contenute rispetto a quelle prodotte dalla saltazione (Loosmore & Hunt, 2000; Macpherson et

al., 2008; Sweeney & Mason, 2013), queste ultime risultano quelle più studiate. Di conseguenza, la maggior parte delle relazioni tra emissioni e velocità del vento riportate in letteratura si riferisce al fenomeno erosivo innescato dal fenomeno di saltazione. Ne consegue che, per stimare accuratamente le emissioni di PM, sia necessario distinguere i due meccanismi emissivi e sviluppare formulazioni in grado di rappresentarli entrambi, oppure determinare la  $u^*_t$  associata al solo fenomeno di saltazione. Quest'ultima opzione risulta più facilmente applicabile, ma richiede un'analisi più approfondita e necessita di maggiori approfondimenti da parte della comunità scientifica.

### 5.3.2 Limitazioni del Codice Numerico

I risultati riportati nel paragrafo 5.1.6.5 hanno evidenziato la correlazione non ottimale tra le emissioni misurate nella galleria del vento DICAAR e quelle stimate dal codice numerico. Oltre alle motivazioni già discusse nel paragrafo citato, tali discrepanze possono essere attribuite anche ad alcune limitazioni intrinseche del modello stesso. Queste limitazioni derivano principalmente dal fatto che il modello si basa su formulazioni empiriche tratte dalla letteratura scientifica, sviluppate per contesti specifici e non sempre generalizzabili.

In primo luogo, le equazioni utilizzate per descrivere il flusso di saltazione sono state sviluppate per condizioni di flusso completamente sviluppato e stazionario, nelle quali la disponibilità di materiale erodibile non costituisce un fattore limitante. Di conseguenza, tali espressioni risultano valide unicamente per superfici caratterizzate da un potenziale erodibile illimitato. Tuttavia, come dimostrato dalle prove sperimentali condotte nell'ambito di questo Dottorato e come riportato dall'EPA (U.S. EPA, 2006), i materiali stoccati negli impianti industriali sono assimilabili a materiali con un potenziale erodibile limitato. Inoltre, sebbene la letteratura indichi che le emissioni generate dal sollevamento diretto risultano in genere più contenute rispetto a quelle prodotte dalla saltazione (Loosmore & Hunt, 2000; Macpherson et al., 2008; Sweeney & Mason, 2013), l'adozione nel codice di un'equazione del flusso di saltazione comporta implicitamente l'esclusione del contributo dovuto al sollevamento diretto delle particelle. Tale scelta può determinare una sottostima, seppur di entità ridotta, delle emissioni simulate rispetto a quelle effettivamente osservabili in campo.

Un'ulteriore limitazione deriva dal criterio di rottura adottato nel codice numerico. Le formulazioni del *Damage Ratio* disponibili in letteratura sono infatti state sviluppate per materiali con specifiche caratteristiche fisico-chimiche e, pertanto, non risultano pienamente

rappresentative della vasta gamma di materiali granulari comunemente presenti negli *stockpiles*.

Infine, un'ultima limitazione significativa riguarda l'assenza nel modello del contributo del contenuto d'acqua sulla coesione dei materiali granulari. La presenza di acqua genera infatti forze interparticellari di diversa natura e intensità, che dipendono dalla composizione chimica del materiale granulare, dal suo contenuto d'acqua e dalla dimensione delle particelle presenti. Per semplificare la struttura e ridurre il costo computazionale del codice, tale contributo è stato trascurato, rendendo il modello applicabile unicamente a materiali asciutti. Questa semplificazione risulta tuttavia limitante per la maggior parte delle condizioni ambientali reali, poiché l'umidità del materiale tende a equilibrarsi con quella dell'aria circostante. La condizione di materiale completamente asciutto è pertanto riscontrabile solo in contesti climatici aridi, dove l'intenso irraggiamento solare favorisce l'essiccazione completa degli strati superficiali del deposito granulare.

## 5.4 Sviluppi Futuri

Il proseguimento della ricerca sarà orientato all'affinamento del codice, con l'obiettivo di ridurre le limitazioni individuate e discusse nel paragrafo 5.3.2. L'evoluzione del codice numerico consentirà di ampliare il campo di applicazione del codice sviluppato, rendendo le stime delle emissioni di polveri più affidabili e rappresentative di una gamma più ampia di condizioni ambientali.

Una prima linea di approfondimento riguarderà la definizione di un'espressione in grado di stimare in modo più realistico il flusso di saltazione che si sviluppa su superfici caratterizzate da un potenziale erodibile limitato. L'integrazione di tale formulazione nel codice permetterà di riprodurre emissioni più rappresentative della reale tipologia emissiva dei materiali granulari comunemente stoccati negli impianti industriali.

Parallelamente, sarà sviluppata una procedura per l'individuazione di un parametro rappresentativo della stabilità degli aggregati, da utilizzare come input in un nuovo criterio di rottura univoco e alternativo al *Damage Ratio*, che verrà introdotto all'interno del codice numerico. Tale parametro terrà conto in modo intrinseco delle specifiche proprietà fisico-chimiche dei materiali analizzati, consentendo di estendere l'applicabilità del modello a una gamma più ampia di materiali granulari. Questa implementazione permetterà inoltre di

descrivere con maggiore accuratezza l'influenza della coesione nel processo di generazione delle polveri dovuto agli impatti tra saltatori e aggregati presenti sulla superficie.

Un ulteriore sviluppo riguarderà l'introduzione di nuove semplificazioni finalizzate alla riduzione del costo computazionale del codice. Sebbene la limitazione del numero di saltatori a 1000 abbia già consentito di contenere significativamente i tempi di calcolo senza compromettere la stima di un'emissione media rappresentativa, le simulazioni numeriche condotte nel presente studio hanno richiesto tempi di esecuzione fino a 10 ore. Sarà pertanto necessario individuare e implementare ulteriori strategie di semplificazione, valutandone attentamente sia l'efficacia nella riduzione dei tempi di simulazione sia l'impatto sull'accuratezza della stima dell'emissione media.

Infine, verrà approfondito l'effetto della presenza di acqua sul processo emissivo, valutando la capacità del modello di stimare le emissioni di polveri anche per materiali caratterizzati da un contenuto d'acqua superiore a 0%. A tal fine, saranno inizialmente considerate alcune formulazioni generali già proposte in letteratura (e.g., l'equazione (2.8) di Fécan et al (1999)); qualora tali formulazioni non risultassero sufficientemente affidabili, si procederà allo sviluppo di nuove relazioni empiriche, calibrate per rappresentare in modo più realistico l'influenza del contenuto d'acqua sul comportamento emissivo dei materiali granulari.

## 6 Conclusioni

Le superfici granulari esposte all'azione del vento, come i bacini sterili o le aree di stoccaggio degli impianti industriali (minerari, mineralurgici e metallurgici), rappresentano potenziali sorgenti di particolato solido (PM). Le emissioni di PM da sorgenti diffuse possono rappresentare una criticità ambientale rilevante, in relazione all'estensione areale delle sorgenti, alla difficoltà di confinamento, alle caratteristiche aerodinamiche e alla composizione mineralogica del materiale erodibile esposto all'azione del vento. Il particolato fine, in particolare, può essere trasportato a distanze significative dalla sorgente di emissione e contribuire all'impatto atmosferico su vaste estensioni territoriali.

La quantificazione di questo fenomeno è fondamentale sia per la definizione di efficaci strategie di gestione e mitigazione delle emissioni alla fonte sia per la valutazione previsionale dell'impatto ai recettori, basata sull'implementazione di modelli di trasporto e dispersione delle polveri in atmosfera. A tal fine, è necessario disporre di strumenti in grado di rappresentare in modo realistico il comportamento dei materiali che compongono le sorgenti emissive e le condizioni ambientali al contorno.

Il progetto di Dottorato ha come obiettivo la definizione di una metodologia integrata per la stima delle emissioni di PM da superfici granulari soggette all'erosione eolica, con specifico riferimento alle aree di abbancamento degli impianti minerari e metallurgici.

La ricerca è stata sviluppata attraverso analisi di laboratorio, test di emissione eseguiti con l'impiego di apparecchiature sperimentali (galleria del vento DICAAR e PI-SWERL) e software di simulazione numerica (ANSYS Fluent e MATLAB).

In particolare, la tesi descrive le fasi di progettazione, sviluppo e validazione della nuova galleria del vento ambientale (EWT) costruita nei laboratori del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura (DICAAR), dell'Università degli Studi di Cagliari, nonché le procedure per la costruzione e la validazione del modello CFD della galleria del vento. La galleria del vento è stata progettata in modo da riprodurre i profili di velocità del vento che si sviluppano su superfici piane ed estese, di materiali granulari eterogenei. La validazione, effettuata tramite il confronto tra i profili di vento misurati e quelli di progetto, ha dimostrato che la galleria del vento è in grado di riprodurre accuratamente lo Strato Limite Atmosferico (SLA) desiderato.

Anche la validazione del modello CFD della galleria del vento DICAAR, condotta attraverso il confronto tra i dati simulati e i profili di progetto, ha confermato la capacità del modello di riprodurre in modo soddisfacente lo SLA desiderato. Le simulazioni CFD, in particolare, hanno permesso di analizzare il campo del vento in ogni punto interno alla galleria del vento, in particolare vicino al tetto e lungo la sezione di sviluppo del flusso, fornendo informazioni aggiuntive rispetto a quelle sperimentali. Il modello CFD rappresenta un importante strumento integrativo e di supporto per valutare l'effetto delle regolazioni della configurazione della EWT sulla generazione dei profili del vento.

Parte dell'attività di ricerca è stata dedicata all'applicazione di metodologie sperimentali finalizzate alla stima della velocità d'attrito limite ( $u^*$ ). I risultati ottenuti sui diversi campioni di materiale granulare oggetto di studio hanno consentito lo sviluppo di un'analisi comparativa tra le suddette metodologie. L'implementazione della procedura EPA, basata sulla correlazione empirica tra la distribuzione granulometrica e l' $u^*$ , ha prodotto valori costantemente superiori rispetto a quelli ottenuti con i test effettuati con la galleria del vento e con il PI-SWERL. Tale discrepanza può essere spiegata principalmente dal fatto che la metodologia EPA si riferisce a un fenomeno di saltazione già sviluppato, mentre le strumentazioni EWT e PI-SWERL rilevano l'effettivo inizio delle emissioni di PM, comprese le condizioni in cui la saltazione è incipiente o si verifica un sollevamento diretto delle particelle più fini. I risultati dei test sperimentali hanno inoltre evidenziato la necessità di integrare la procedura EPA con un ulteriore vaglio a maglia più fine, non previsto nella procedura originaria, per rappresentare con maggiore precisione la frazione granulometrica relativa agli aggregati di dimensioni più ridotte.

I test effettuati con il PI-SWERL hanno fornito valori di velocità d'attrito limite coerenti con i risultati della galleria del vento DICAAR. Infatti, la correlazione tra i due metodi sperimentali si è rivelata soddisfacente, con discrepanze che raramente superano 0,10 m/s. Lo studio ha inoltre dimostrato che le metodologie basate sull'uso degli apparati sperimentali forniscono stime della velocità di attrito limite più affidabili per ciascun materiale. Sia la galleria del vento sia il PI-SWERL consentono infatti di adattare le procedure alle caratteristiche emissive dei materiali oggetto di studio. Il PI-SWERL offre alcuni vantaggi dal punto di vista operativo, tra cui la facilità di trasporto dello strumento e un design integrato che consente l'acquisizione sincronizzata dei dati sperimentali, mentre la galleria del vento, grazie alla sua capacità di simulare in modo più accurato il fenomeno erosivo, consente un'analisi più completa del comportamento emissivo, risultando uno strumento indispensabile per studi più approfonditi.

La stima del potenziale emissivo dei campioni granulari oggetto di studio è stata effettuata attraverso test di emissione eseguiti in galleria del vento. Oltre che attraverso le prove sperimentali, il potenziale emissivo di una selezione di materiali essiccati è stato valutato anche attraverso l'applicazione di un codice numerico basato su un modello fisico-matematico sviluppato da Dentoni et al. (2022), che riproduce i fenomeni di saltazione, impatto e rilascio di particolato fine in atmosfera. Il codice implementa le principali leggi fisiche che regolano il trasporto delle particelle e calcola l'emissione di PM in funzione della velocità di attrito, assumendo un flusso di saltazione stazionario (flusso costante dei saltatori  $Q$ ), superfici a potenziale erodibile illimitato e contenuto d'acqua nullo. I dati di input del codice derivano dalle proprietà fisico-chimiche dei materiali e dalle velocità d'attrito limite determinate sperimentalmente.

Le simulazioni effettuate col codice numerico hanno restituito valori di emissione di PM<sub>10</sub> da bassi a moderati (0,001–0,5 mg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), discostandosi di uno o due ordini di grandezza rispetto ai risultati sperimentali ottenuti in galleria del vento, in relazione alla formulazione del *Damage Ratio* (DR) adottata. Nonostante la significatività di tali differenze, il confronto ha evidenziato una coerenza qualitativa tra modello numerico e sperimentazione, con la galena PN che mostra, in entrambi i casi, una maggiore emissività alle velocità d'attrito più elevate rispetto alla blenda RD.

Le attività sperimentali condotte hanno permesso di approfondire la comprensione dei processi fisici che governano l'emissione di particolato da superfici granulari esposte all'azione del vento, fornendo le basi conoscitive per la definizione di una metodologia integrata per la stima delle emissioni di PM. La metodologia proposta è stata concepita per rappresentare in modo fisicamente coerente la distribuzione spaziale delle emissioni, adattandosi alle caratteristiche morfologiche e operative del sito industriale analizzato. Essa è fondata sull'interazione tra tre componenti principali:

- (i) l'identificazione delle aree caratterizzate dalla presenza di materiali granulari con proprietà fisico-chimiche omogenee e la caratterizzazione fisico-chimica di questi materiali;
- (ii) l'acquisizione sperimentale della velocità di attrito limite dei materiali granulari individuati (i.e. innesco del fenomeno erosivo), tramite test eseguiti in galleria del vento (EWT) o con strumentazione PI-SWERL;

- (iii) la modellazione CFD del sito industriale di interesse, finalizzata alla simulazione della distribuzione spaziale della velocità del vento.

L'elemento centrale della metodologia è rappresentato dal modello fisico-matematico che simula il processo emissivo, utilizzando come dati di input i risultati provenienti dalle fasi sperimentali di caratterizzazione dei materiali integrandoli con le simulazioni CFD del campo di vento del sito industriale, per restituire una rappresentazione fisicamente coerente delle emissioni generate dall'azione eolica.

La metodologia integrata proposta combina dati sperimentali e simulazioni numeriche, e costituisce uno strumento flessibile per la valutazione delle emissioni, adattandosi agevolmente a differenti tipologie di materiale e condizioni ambientali. Essa rappresenta dunque un passo significativo verso la costruzione di modelli predittivi più realistici.

Permangono tuttavia alcune limitazioni: il modello numerico implementa relazioni empiriche sviluppate per superfici a potenziale erodibile illimitato, sebbene le attività sperimentali abbiano evidenziato come i materiali studiati presentino un potenziale erodibile limitato. Inoltre, esso si basa su un'ipotesi di contenuto d'acqua nullo e presenta un costo computazionale ancora significativo, che potrà essere ulteriormente ridotto attraverso l'introduzione di nuove semplificazioni strutturali e algoritmiche, da valutare in termini di impatto sulla rappresentatività delle emissioni simulate.

Gli sviluppi futuri del lavoro dovranno concentrarsi sulla formulazione di nuove relazioni per il flusso di saltazione su superfici a potenziale erodibile limitato, sull'introduzione di un criterio di rottura univoco basato su parametri intrinseci di coesione del materiale, in alternativa al *Damage Ratio*, e sulla considerazione esplicita dell'effetto del contenuto d'acqua sull'emissione. Tali perfezionamenti consentiranno di migliorare l'affidabilità del modello numerico e di estenderne l'applicabilità a una gamma più ampia di condizioni ambientali.

Nel suo complesso, il lavoro fornisce un contributo al miglioramento delle metodologie di stima delle emissioni da sorgenti diffuse e rappresenta un passo verso l'integrazione di strumenti sperimentali e modellistici nei protocolli di gestione ambientale delle aree minerarie.

# Appendice

## Codice numerico utilizzato per il calcolo delle emissioni.

Si noti che, per le simulazioni, veniva disattivato di volta in volta il *DR* non utilizzato. Per le simulazioni riguardanti il  $PM_{2,5}$ , nella sezione dei diametri equivalenti veniva modificato il valore relativo al  $PM_{10}$  (da 10 a 2.5 all'interno della formula del *Deq10*).

```
%% Input data

Materiale = input ('Indicare il tipo di materiale (inserire 1 per la galena, 2 per
la blenda, 3 per altro):');
if Materiale==1 % Galena
    Density = 7.597;
    SurfEnergy = 0.32;
elseif Materiale==2 % Blenda
    Density = 4.088;
    SurfEnergy = 0.51;
elseif Materiale==3 % Altro materiale
    Density = input ('Indicare il valore della densità del materiale [g/cm^3]: ');
    SurfEnergy = input ('Indicare il valore dell'energia di superficie: del
materiale [J/m^2]: ');
else
    disp ('Numero non valido! Tipo di materiale non inserito!')
end

BulkDensity = 0.65*Density; %% densità apparente aggregato

% Conversione unità di misura
Density = Density*1000000; % da [g/cm^3] a [g/m^3]
BulkDensity = BulkDensity*1000000; % da [g/cm^3] a [g/m^3]

%% Distribuzioni granulometriche
% crea una matrice per le distribuzioni granulometriche in cui:
% in colonna 1 c'è il limite inferiore della distribuzione
% in colonna 2 c'è il limite superiore della distribuzione
% in colonna 3 c'è la percentuale ricadente tra i due limiti
% in colonna 4 c'è il numero medio delle particelle o aggregati ricadenti in un
grammo di materiale
% in colonna 5 c'è il numero medio delle particelle o aggregati ricadenti nella
classe granulometrica del materiale in esame (ipotesi di 100 g di materiale)
% in colonna 6 c'è la frazione cumulata del numero di particelle o aggregati

% legge i dati dei file excel xlsread('nome_file','foglio')
[numA] = xlsread('Size distribution');

ks=0;
ka=0;
kp=0;

for i=1:max(length(numA(1,:)),length(numA(5,:)))-1
    if isnan(numA(2,i))==0 && numA(2,i)~=0 % distribuzione aggregati
        ka=ka+1;
    end
end
```

```

        N1g = 1 / (BulkDensity * (4/3) * pi *
(((numA(1,i)+numA(1,i+1))/2)*0.000001/2)^3);
        Nc = N1g * numA(2,i);
        AggregateSD(ka,:) = [numA(1,i) numA(1,i+1) numA(2,i) N1g Nc 0];
    end
    if isnan(numA(6,i))==0 && numA(6,i)~=0    % distribuzione particelle
        kp=kp+1;
        N1g = 1 / (Density * (4/3) * pi *
(((numA(5,i)+numA(5,i+1))/2)*0.000001/2)^3);
        Nc = N1g * numA(6,i);
        ParticleSD(kp,:) = [numA(5,i) numA(5,i+1) numA(6,i) N1g Nc 0];
    end
end

% distribuzione aggregati
for i=1:length(AggregateSD(:,5))
    Pn = AggregateSD(i,5)/sum(AggregateSD(:,5));
    if i==1
        AggregateSD(i,6)= Pn;
    elseif i > 1
        AggregateSD(i,6)= AggregateSD(i-1,6) + Pn;
    end
end

% distribuzione aggregati
for i=1:length(ParticleSD(:,5))
    Pn = ParticleSD(i,5)/sum(ParticleSD(:,5));
    if i==1
        ParticleSD(i,6)= Pn;
    elseif i > 1
        ParticleSD(i,6)= ParticleSD(i-1,6) + Pn;
    end
end

% Calcolo flusso di saltazione [g*m^2/s]
Ustar = input ('Indicare il valore della velocità di attrito del vento u*: ');
Ustart = input ('Indicare il valore della velocità di attrito limite u*t: ');

if Ustar > Ustart % condizione necessaria affinché si inneschi il fenomeno erosivo
    Q=2.61*(Ustar^3*1225/9.81)*(1-Ustart/Ustar)*(1+Ustart/Ustar)^2;
else
    Q=0;
end

%% Diametri equivalenti
Deq10 = 10/sqrt(Density/1000000); % diametro aerodinamico PM10
Deq70 = (2650000/BulkDensity)*70; % limite inferiore saltatori
Deq500 = (2650000/BulkDensity)*500; % limite superiore saltatori

% Limiti granulometrici dei saltatori

roa = 1225;

% Deq70
Ustarft = 0.111 * sqrt(((BulkDensity-
roa)/roa)*9.81*0.000001*Deq70+(0.000165/(0.001*roa*0.000001*Deq70)));

while Ustarft > Ustar
    Deq70 = floor(Deq70) + 1;
end

```

```

    Ustarft = 0.111 * sqrt(((BulkDensity-
roa)/roa)*9.81*0.000001*Deq70+(0.000165/(0.001*roa*0.000001*Deq70)));
end

LimInf = Deq70;

% Deq500
Ustarft = 0.111 * sqrt(((BulkDensity-
roa)/roa)*9.81*0.000001*Deq500+(0.000165/(0.001*roa*0.000001*Deq500)));

while Ustarft > Ustar
    Deq500 = ceil(Deq500) - 1;
    Ustarft = 0.111 * sqrt(((BulkDensity-
roa)/roa)*9.81*0.000001*Deq500+(0.000165/(0.001*roa*0.000001*Deq500)));
end

LimSup = Deq500;

%% Composizione granulometria saltatori
colASD = 1;
rigaASD = 1;

while LimInf < AggregateSD(rigaASD,colASD)
    rigaASD = rigaASD + 1;
end

% Creazione colonne 1,2,3 e 4
rigaSSD = 1;
while AggregateSD(rigaASD,1) < LimSup
    if rigaSSD == 1
        SaltatorSD(rigaSSD,1) = LimInf;
        SaltatorSD(rigaSSD,2) = AggregateSD(rigaASD,2);
        SaltatorSD(rigaSSD,3) = -AggregateSD(rigaASD,3)*(AggregateSD(rigaASD,2)-
LimInf)/(AggregateSD(rigaASD,1)-AggregateSD(rigaASD,2));
        SaltatorSD(rigaSSD,4) = 1 / (BulkDensity * (4/3) * pi *
(((SaltatorSD(rigaSSD,1)+SaltatorSD(rigaSSD,2))/2)*0.000001/2)^3);
    else
        SaltatorSD(rigaSSD,1) = AggregateSD(rigaASD,1);
        SaltatorSD(rigaSSD,2) = AggregateSD(rigaASD,2);
        SaltatorSD(rigaSSD,3) = AggregateSD(rigaASD,3);
        SaltatorSD(rigaSSD,4) = AggregateSD(rigaASD,4);
    end

    rigaASD = rigaASD + 1;
    rigaSSD = rigaSSD + 1;
end

rigaASD = rigaASD - 1;

% modifica ultima riga (col. 2, 3 e 4)
SaltatorSD(end,2) = LimSup;
SaltatorSD(end,3) = AggregateSD(rigaASD,3)*(LimSup-
AggregateSD(rigaASD,1))/(AggregateSD(rigaASD,2)-AggregateSD(rigaASD,1));
SaltatorSD(end,4) = 1 / (BulkDensity * (4/3) * pi *
(((SaltatorSD(end,1)+SaltatorSD(end,2))/2)*0.000001/2)^3);

% modifica colonna 3 e creazione colonna 5 tutte le righe
SumS = sum(SaltatorSD(:,3));
for rigaSSD = 1:length(SaltatorSD(:,1))

```

```

    SaltatorSD(rigaSSD,3) = 100*SaltatorSD(rigaSSD,3)/SumS;
    SaltatorSD(rigaSSD,5) = SaltatorSD(rigaSSD,4) * SaltatorSD(rigaSSD,3);
end

% Creazione colonna 6
Pn = SaltatorSD(rigaSSD,5)/sum(SaltatorSD(:,5));
for rigaSSD = 1:length(SaltatorSD(:,1))
    Pn = SaltatorSD(rigaSSD,5)/sum(SaltatorSD(:,5));
    if rigaSSD==1
        SaltatorSD(rigaSSD,6)= Pn;
    elseif rigaSSD > 1
        SaltatorSD(rigaSSD,6)= SaltatorSD(rigaSSD-1,6) + Pn;
    end
end

%% calcolo iterativo per la simulazione di un impatto. Simulazione di 1000 impatti
e calcolo del peso dei saltatori. Rapportando il peso dei 1000 saltatori per il
peso totale dei saltatori del flusso si ottiene l'emissione per m^2/s.

Wtotsalt=0; % peso totale degli aggregati saltatori
WPM10salt=0; % peso PM10 emesso dai saltatori dopo gli impatti
WPM10aggr=0; % peso PM10 emesso dagli aggregati in superficie dopo gli impatti
matDR = [];

for nsalt=1:1000
    %% estrazione casuale di un diametro del saltatore
    ClassDim = rand; % numero casuale tra 0 e 1 (distribuzione uniforme)

    % individuazione della classe granulometrica
    ks=1;
    while SaltatorSD(ks,6) < ClassDim
        ks=ks+1;
    end
    SaltatorDmin = SaltatorSD (ks,1);
    SaltatorDmax = SaltatorSD (ks,2);

    % generazione di una dimensione casuale tra la classe granulometrica
individuata
    Saltator = SaltatorDmin + (SaltatorDmax-SaltatorDmin)*rand;

    % calcolo del peso del saltatore [g]
    W1salt = BulkDensity * (4/3) * pi * (Saltator*0.000001/2)^3;

    % calcolo del peso totale dei saltatori, necessario per il ciclo while e/o
calcolare l'emissione
    Wtotsalt = Wtotsalt + W1salt;

%% generazione delle particelle elementari contenute all'interno del saltatore e
suddivisione delle stesse in quelle che generano PM10 e non
    Wparticles = 0; % peso totale delle particelle dentro il saltatore
    ParticlesSalt = [];

    while Wparticles < W1salt

        ClassDim = rand; % numero casuale tra 0 e 1 (distribuzione uniforme)

        % individuazione della classe granulometrica
        kp=1;
        while ParticleSD(kp,6) < ClassDim

```

```

        kp=kp+1;
    end
    ParticleDmin = ParticleSD (kp,1);
    ParticleDmax = ParticleSD (kp,2);

    % generazione di una dimensione casuale tra la classe granulometrica
    individuata
    Particle = ParticleDmin + (ParticleDmax-ParticleDmin)*rand;

    % generazione di vettore con tutte le dimensioni estratte, per il calcolo
    di un lavoro di coesione medio
    ParticlesSalt = [ParticlesSalt Particle];

    % calcolo peso della singola particella estratta [g]
    Wlparticle = Density * (4/3) * pi * (Particle*0.00001/2)^3;

    % calcolo del peso totale delle particelle, necessario per il ciclo while
    Wparticles = Wparticles + Wlparticle;
end

%riempie il saltatore se non ha selezionato nessuna particella elementare
if isempty(ParticlesSalt) == 1
    ParticleSalt = Saltator;
end

%% Calcolo Damage Ratio Saltatore
beta = 0.00015;
geff = 9.81 + 6*beta/(pi*(BulkDensity/1000)*(0.00001 * Saltator)^2);
a = 0.02;
B = 0.96;
gamma = 1;
meanVimp = (1-B)*sqrt(geff*0.00001 * Saltator)/(2*a) - 1/(2*gamma) +
sqrt(1/(4*gamma^2)+(((1-B)/2*a)^2)*geff*0.00001 *
Saltator+(1+B)*sqrt(geff*0.00001 * Saltator)/(2*a*gamma));
Vimp = exprnd(meanVimp);

%Thornton et al.
V0 = 0.17 * (2*SurfEnergy)^(1.5);
DR = 0.35 * log(Vimp/V0);

if DR>0.8 && DR<1.2
    DR=0.8+(DR-0.8)/2;
elseif DR>=1.2
    DR=1;
elseif DR>-0.2 && DR<0.2
    DR=0.2-(0.2-DR)/2;
elseif DR<=-0.2
    DR=0;
end

% Deng e Davé
Weber = (0.001*Density*0.00001*mean(ParticlesSalt)*Vimp^2)/(2*SurfEnergy);
alfa = 0.82 - 0.06 * Weber;
B = 0.78 + 2.12 * exp(-Weber);
Df = 3;
DR = B*(Weber/(Df^2))^alfa;

matDR = [matDR DR];

```

```

%% Calcolo PM10 generato dal saltatore
W1salt = DR*W1salt;

for i=1:DR*length(ParticlesSalt)
    if ParticlesSalt(i)<Deq10
        WPM10salt = WPM10salt +
Density*(4/3)*pi*(ParticlesSalt(i)*0.000001/2)^3;
    end
end

%% estrazione di un diametro dell'aggregato su cui urta il saltatore

ClassDim = rand; % numero casuale tra 0 e 1 (distribuzione uniforme)

% individuazione della classe granulometrica
ka=1;
while AggregateSD(ka,6) < ClassDim
    ka=ka+1;
end
AggregateDmin = AggregateSD (ka,1);
AggregateDmax = AggregateSD (ka,2);

% generazione di una dimensione casuale tra la classe granulometrica
individuata
Aggregate = AggregateDmin + (AggregateDmax-AggregateDmin)*rand;

% riduce la dimensione dell'aggregato se quest'ultimo è eccessivamente grande
if Aggregate > 2 * Saltator
    Aggregate = 2 * Saltator;
end

% calcolo del peso dell'aggregato [g]
Waggrbed = BulkDensity * (4/3) * pi * (Aggregate*0.000001/2)^3;

%% generazione delle particelle elementari contenute all'interno dell'aggregato e
suddivisione delle stesse in quelle che generano PM10 e non
Wparticles = 0; % peso totale delle particelle dentro l'aggregato
ParticlesBed = [];
Waggrbed = Waggrbed*DR;

while Wparticles < Waggrbed

    ClassDim = rand; % numero casuale tra 0 e 1 (distribuzione uniforme)

    % individuazione della classe granulometrica
    kp=1;
    while ParticleSD(kp,6) < ClassDim
        kp=kp+1;
    end
    ParticleDmin = ParticleSD (kp,1);
    ParticleDmax = ParticleSD (kp,2);

    % generazione di una dimensione casuale tra la classe granulometrica
individuata
    Particle = ParticleDmin + (ParticleDmax-ParticleDmin)*rand;

    % generazione di vettore con tutte le dimensioni estratte, per il
% calcolo di un lavoro di coesione medio
    ParticlesBed = [ParticlesBed Particle];
end

```

```

    % calcolo peso della singola particella estratta [g]
    W1particle = Density * (4/3) * pi * (Particle*0.000001/2)^3;
end
    % calcolo del peso totale delle particelle, necessario per il ciclo while
    Wparticles = Wparticles + W1particle;

%% Calcolo PM10 generato dall'aggregato
    for i=1:length(ParticlesBed)
        if ParticlesBed(i)<Deq10
            WPM10aggr = WPM10aggr +
                Density*(4/3)*pi*(ParticlesBed(i)*0.000001/2)^3;
        end
    end
end

%% Lunghezza media e altezza massima del salto dei saltatori
zmaxJump = 0.03;
ymeanJump = 0.30;

%% Trasformazione da Qsalt a E/(m^2*s)
k = Q/Wtotsalt;
MediaDR = mean(matDR);
fprintf('\nDamage Ratio medio: %f\n', MediaDR)

E = k*(WPM10salt+WPM10aggr)*zmaxJump/ymeanJump;
fprintf('\nEmissione: %f\n\n', E)

```

## Bibliografija

- Abdulrahim, A., Elfarra, M., & Uzol, O. (2019). A Numerical Assessment of Atmospheric Boundary Layer Simulation Inside Two Different Boundary Layer Wind Tunnels. *Proceedings of the 10th Ankara International Aerospace Conference*, 10–12.
- Abubaker, A., Kostić, I., Kostić, O., & Stefanović. (2018). CFD Modeling of Atmospheric Boundary Layer Simulations in Wind Tunnels. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 25(6). <https://doi.org/10.17559/TV-20161125134410>
- Alfaro, S. C., Gaudichet, A., Gomes, L., & Maillé, M. (1997). Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D10), 11239–11249. <https://doi.org/10.1029/97JD00403>
- Alfaro, S. C., Gaudichet, A., Gomes, L., & Maillé, M. (1998). Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle sizes and binding energies. *Geophysical Research Letters*, 25(7), 991–994. <https://doi.org/10.1029/98GL00502>
- Alfaro, S. C., & Gomes, L. (2001). Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distributions in source areas. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D16), 18075–18084. <https://doi.org/10.1029/2000JD900339>
- Alfaro, S. C., Rajot, J. L., & Nickling, W. (2004). Estimation of PM20 emissions by wind erosion: Main sources of uncertainties. *Geomorphology*, 59(1–4), 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.09.006>
- Al-Nehari, H. A., Abdel-Rahman, A. K., Nassib, A. E.-M., & Shafey, H. M. (2010). DESIGN AND CONSTRUCTION OF A WIND TUNNEL FOR ENVIRONMENTAL FLOW

- STUDIES. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 38(1), 177–193.  
<https://doi.org/10.21608/jesaun.2010.123800>
- Anderson, R. S., & Haff, P. K. (1988). Simulation of Eolian Saltation. *Science*, 241(4867), 820–823. <https://doi.org/10.1126/science.241.4867.820>
- Anderson, R. S., & Haff, P. K. (1991). Wind modification and bed response during saltation of sand in air. In O. E. Barndorff-Nielsen & B. B. Willetts (A c. Di), *Aeolian Grain Transport I* (Vol. 1, pp. 21–51). Springer Vienna. [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6706-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6706-9_2)
- Andreotti, B., Claudin, P., & Pouliquen, O. (2010). Measurements of the aeolian sand transport saturation length. *Geomorphology*, 123(3–4), 343–348.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.08.002>
- AS. (2016). *AS 1289.2.1.1-2005 Rec:2016*. Standards Australia.
- ASTM. (2023). *Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0854-23>
- ASTM. (2025). *Test Methods for Chemical Analysis of Gypsum and Gypsum Products (Metric)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0471M-25>
- Avecilla, F., Panebianco, J. E., & Buschiazzo, D. E. (2016). A wind-tunnel study on saltation and PM 10 emission from agricultural soils. *Aeolian Research*, 22, 73–83.  
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.06.003>
- Bagnold, R. A. (1937). The Transport of Sand by Wind. *The Geographical Journal*, 89(5), 409–438. <https://doi.org/10.2307/1786411>
- Bagnold, R. A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Springer Netherlands.  
<https://doi.org/10.1007/978-94-009-5682-7>

- Bass, J. D. (2013). Elasticity of Minerals, Glasses, and Melts. In T. J. Ahrens (A c. Di), *AGU Reference Shelf* (pp. 45–63). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/RF002p0045>
- Butterfield, G. R. (1991). Grain transport rates in steady and unsteady turbulent airflows. In O. E. Barndorff-Nielsen & B. B. Willetts (A c. Di), *Aeolian Grain Transport I* (Vol. 1, pp. 97–122). Springer Vienna. [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6706-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6706-9_6)
- Castellanos, A. (2005). The relationship between attractive interparticle forces and bulk behaviour in dry and uncharged fine powders. *Advances in Physics*, 54(4), 263–376. <https://doi.org/10.1080/17461390500402657>
- Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 143, 105974. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>
- Chen, Z., Wei, C., Chen, Z., Wang, S., & Tang, L. (2022). Numerical Simulation of Atmospheric Boundary Layer Turbulence in a Wind Tunnel Based on a Hybrid Method. *Atmosphere*, 13(12), 2044. <https://doi.org/10.3390/atmos13122044>
- Chepil, W. S. (1945). DYNAMICS OF WIND EROSION: II. INITIATION OF SOIL MOVEMENT. *Soil Science*, 60(5), 397. <https://doi.org/10.1097/00010694-194511000-00005>
- Chepil, W. S. (1956). Influence of Moisture on Erodibility of Soil by Wind. *Soil Science Society of America Journal*, 20(2), 288–292. <https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000020033x>
- Cornelis, W. M., & Gabriels, D. (2003). A simple low-cost sand catcher for wind-tunnel simulations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(9), 1033–1041. <https://doi.org/10.1002/esp.1023>

- Cornelis, W. M., Gabriels, D., & Hartmann, R. (2004). A parameterisation for the threshold shear velocity to initiate deflation of dry and wet sediment. *Geomorphology*, *59*(1–4), 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.09.004>
- Cowherd, C., Muleski, G. E., & Kinsey, G. S. (1988). *Control of Open Fugitive Dust Sources*. Research Triangle Park, NC.
- Creyssels, M., Dupont, P., El Moctar, A. O., Valance, A., Cantat, I., Jenkins, J. T., Pasini, J. M., & Rasmussen, K. R. (2009). Saltating particles in a turbulent boundary layer: Experiment and theory. *Journal of Fluid Mechanics*, *625*, 47–74. <https://doi.org/10.1017/S0022112008005491>
- Davenport, A. G. (1963). *The relationship of wind structure to wind loading*. <https://www.aivc.org/resource/relationship-wind-structure-wind-loading>
- Deng, X., & Davé, R. N. (2017). Breakage of fractal agglomerates. *Chemical Engineering Science*, *161*, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.12.018>
- Dentoni, V., Grosso, B., Massacci, G., & Pinna, F. (2020). Validation of a wind erosion model for tailings basins: Wind tunnel design and atmospheric boundary layer simulation. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *34*(8), 562–572. <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1678226>
- Dentoni, V., Grosso, B., & Pinna, F. (2021). Experimental Evaluation of PM Emission from Red Mud Basins Exposed to Wind Erosion. *Minerals*, *11*(4), 405. <https://doi.org/10.3390/min11040405>
- Dentoni, V., Grosso, B., Pinna, F., Lai, A., & Bouarour, O. (2022). Emission of Fine Dust from Open Storage of Industrial Materials Exposed to Wind Erosion. *Atmosphere*, *13*(2), 320. <https://doi.org/10.3390/atmos13020320>

- Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G., & Speizer, F. E. (1993). An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *New England Journal of Medicine*, 329(24), 1753–1759. <https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>
- Dong, Z., Wang, H., Liu, X., & Wang, X. (2004). A wind tunnel investigation of the influences of fetch length on the flux profile of a sand cloud blowing over a gravel surface. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(13), 1613–1626. <https://doi.org/10.1002/esp.1116>
- Duan, S., Cheng, N., & Xie, L. (2013). A new statistical model for threshold friction velocity of sand particle motion. *CATENA*, 104, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.009>
- Durán, O., Claudin, P., & Andreotti, B. (2011). On aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws. *Aeolian Research*, 3(3), 243–270. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.07.006>
- Engelbrecht, J. P., & Derbyshire, E. (2010). Airborne Mineral Dust. *Elements*, 6(4), 241–246. <https://doi.org/10.2113/gselements.6.4.241>
- Etyemezian, V., Gillies, J. A., Shinoda, M., Nikolich, G., King, J., & Bardis, A. R. (2014). Accounting for surface roughness on measurements conducted with PI-SWERL: Evaluation of a subjective visual approach and a photogrammetric technique. *Aeolian Research*, 13, 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.03.002>
- Etyemezian, V., Nikolich, G., Ahonen, S., Pitchford, M., Sweeney, M., Purcell, R., Gillies, J., & Kuhns, H. (2007). The Portable In Situ Wind Erosion Laboratory (PI-SWERL): A new method to measure PM10 windblown dust properties and potential for emissions.

*Atmospheric Environment*, 41(18), 3789–3796.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.01.018>

Etyemezian, V., Nikolich, G., Nickling, W., King, J. S., & Gillies, J. A. (2017). Analysis of an optical gate device for measuring aeolian sand movement. *Aeolian Research*, 24, 65–79. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.11.005>

European Commission. (2006). *Reference Document on Best Available Techniques on Emissions from Storage*. European Commission: Brussels, Belgium; Luxembourg City, Luxembourg.

European Commission. (2023). *European Critical Raw Materials Act*. European Commission: Brussels, Belgium; Luxembourg City, Luxembourg. [https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act\\_en](https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en)

European Environment Agency. (2022). *Europe's air quality status 2021*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/488115>

European Environment Agency. (2024). *Europe's air quality status 2024*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/5970>

European Union. (2008). *DIRECTIVE 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe*.

European Union. (2024). *DIRECTIVE 2024/2881 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe*.

Fécan, F., Marticorena, B., & Bergametti, G. (1999). Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-

- arid areas. *Annales Geophysicae*, 17(1), 149–157. <https://doi.org/10.1007/s00585-999-0149-7>
- Fletcher, B. (1976a). The erosion of dust by an airflow. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 9(6), 913–924. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/9/6/005>
- Fletcher, B. (1976b). The incipient motion of granular materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 9(17), 2471–2478. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/9/17/007>
- Gillette, D. A. (1974). On the production of soil wind erosion aerosols having the potential for long range transport. *Journal de Recherches Atmospheriques*, 8, 735–744.
- Gillette, D. A. (1977). Fine Particulate Emissions Due to Wind Erosion. *Transactions of the ASAE*, 20(5), 0890–0897. <https://doi.org/10.13031/2013.35670>
- Gillette, D. A. (1979). *Environmental factors affecting dust emission by wind erosion* (C Morales). New York: Wiley.
- Gillette, D. A., Adams, J., Endo, A., Smith, D., & Kihl, R. (1980). Threshold velocities for input of soil particles into the air by desert soils. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 85(C10), 5621–5630. <https://doi.org/10.1029/JC085iC10p05621>
- Gillette, D. A., Blifford, I. H., & Fryrear, D. W. (1974). The influence of wind velocity on the size distributions of aerosols generated by the wind erosion of soils. *Journal of Geophysical Research*, 79(27), 4068–4075. <https://doi.org/10.1029/JC079i027p04068>
- Gillette, D. A., & Walker, T. R. (1977). Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of West Texas. *Soil Science*, 123(2), 97–110.
- Gomes, L., Rajot, J. L., Alfaro, S. C., & Gaudichet, A. (2003). Validation of a dust production model from measurements performed in semi-arid agricultural areas of Spain and Niger. *CATENA*, 52(3–4), 257–271. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00017-1)

- Gozzi, F., Della Ventura, G., Marcelli, A., & Lucci, F. (2017). Current Status of Particulate Matter Pollution in Europe and Future Perspectives: A Review. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(6), 1901–1909.
- Greeley, R., Balme, M. R., Iversen, J. D., Metzger, S., Mickelson, R., Phoreman, J., & White, B. (2003). Martian dust devils: Laboratory simulations of particle threshold. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E5), 2002JE001987. <https://doi.org/10.1029/2002JE001987>
- Greeley, R., & Iversen, J. D. (1985). *Wind as a Geological Process: On Earth, Mars, Venus and Titan* (1<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511573071>
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of Soil Physics*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-03109-2>
- Hlevca, D., & Degeratu, M. (2020). Atmospheric boundary layer modeling in a short wind tunnel. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 79, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.10.003>
- Ho, T. D., Valance, A., Dupont, P., & Ould El Moctar, A. (2011). Scaling Laws in Aeolian Sand Transport. *Physical Review Letters*, 106(9), 094501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.094501>
- Ho, T. D., Valance, A., Dupont, P., & Ould El Moctar, A. (2014). Aeolian sand transport: Length and height distributions of saltation trajectories. *Aeolian Research*, 12, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.11.004>
- Hosseini Anvari, M., Liu, Q., Xu, Z., & Choi, P. (2017). Line tensions of galena (001) and sphalerite (110) surfaces: A molecular dynamics study. *Journal of Molecular Liquids*, 248, 634–642. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.037>

- Irwin, H. P. A. H. (1981). The design of spires for wind simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(3), 361–366. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(81\)90058-1](https://doi.org/10.1016/0167-6105(81)90058-1)
- ISO. (2024). *ISO 12103-1. Arizona test dust*.
- ISPRA. (2014). *I rifiuti da attività estrattiva alla luce della direttiva 2006/21/CE (DLgs 30 maggio 2008 n.117)*.
- Iversen, J. D., Pollack, J. B., Greeley, R., & White, B. R. (1976). Saltation threshold on Mars: The effect of interparticle force, surface roughness, and low atmospheric density. *Icarus*, 29(3), 381–393. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(76\)90140-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(76)90140-8)
- Iversen, J. D., & White, B. R. (1982). Saltation threshold on Earth, Mars and Venus. *Sedimentology*, 29(1), 111–119. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1982.tb01713.x>
- Jackson, D. W. T., & McCloskey, J. (1997). Preliminary results from a field investigation of aeolian sand transport using high resolution wind and transport measurements. *Geophysical Research Letters*, 24(2), 163–166. <https://doi.org/10.1029/96GL03967>
- Jia, Q., Al-Ansari, N., & Knutsson, S. (2014). Modeling of Wind Erosion of the Aitik Tailings Dam Using SWEEP Model. *Engineering*, 06(07), 355–364. <https://doi.org/10.4236/eng.2014.67038>
- Kafui, K. D., & Thornton, C. (2000). Numerical simulations of impact breakage of a spherical crystalline agglomerate. *Powder Technology*, 109(1–3), 113–132. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00231-4](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00231-4)
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., & Wiese, A. (A c. Di). (2007). *Renewable Energy*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-70949-5>

- Kawamura, R. (1951). *Study of sand movement by wind* (Translated (1965) as University of California Hydraulics Engineering Laboratory Report HEL 2–8 Berkeley).
- Kok, J. F. (2010). An improved parameterization of wind-blown sand flux on Mars that includes the effect of hysteresis. *Geophysical Research Letters*, *37*(12), 2010GL043646. <https://doi.org/10.1029/2010GL043646>
- Kok, J. F. (2011). A scaling theory for the size distribution of emitted dust aerosols suggests climate models underestimate the size of the global dust cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(3), 1016–1021. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014798108>
- Kok, J. F., Parteli, E. J. R., Michaels, T. I., & Karam, D. B. (2012). The physics of wind-blown sand and dust. *Reports on Progress in Physics*, *75*(10), 106901. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901>
- Kok, J. F., & Renno, N. O. (2006). Enhancement of the emission of mineral dust aerosols by electric forces. *Geophysical Research Letters*, *33*(19), 2006GL026284. <https://doi.org/10.1029/2006GL026284>
- Kon, L. C., Durucan, S., & Korre, A. (2007). The development and application of a wind erosion model for the assessment of fugitive dust emissions from mine tailings dumps. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, *21*(3), 198–218. <https://doi.org/10.1080/17480930701365547>
- Kun, F., & Herrmann, H. J. (1999). Transition from damage to fragmentation in collision of solids. *Physical Review E*, *59*(3), 2623–2632. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.59.2623>
- Lai, A., Grosso, B., Kuhn, N. J., Pinna, F., Fister, W., Sogos, G., & Dentoni, V. (2025). Assessment of Threshold Wind Velocities of Industrial Granular Materials: A

- Comparative Evaluation of Experimental Methods. *Atmosphere*, 16(12), 1360.  
<https://doi.org/10.3390/atmos16121360>
- Lettau, K., & Lettau, H. H. (1978). *Experimental and micro-meteorological field studies of dune migration: Vol. Exploring the World's Driest Climate (IES Report, 101, 110–147)*. ed H H Lettau and K Lettau (Madison, WI: University of Wisconsin-Madison, Institute for Environmental Studies).
- Li, H., Tatarko, J., Kucharski, M., & Dong, Z. (2015). PM2.5 and PM10 emissions from agricultural soils by wind erosion. *Aeolian Research*, 19, 171–182.  
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.02.003>
- Liu, B., Wang, Z., Niu, B., & Qu, J. (2021). Large scale sand saltation over hard surface: A controlled experiment in still air. *Journal of Arid Land*, 13(6), 599–611.  
<https://doi.org/10.1007/s40333-021-0104-3>
- Loosmore, G. A., & Hunt, J. R. (2000). Dust resuspension without saltation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D16), 20663–20671.  
<https://doi.org/10.1029/2000JD900271>
- Ma, G. S., & Zheng, X. J. (2011). The fluctuation property of blown sand particles and the wind-sand flow evolution studied by numerical method. *The European Physical Journal E*, 34(5), 54. <https://doi.org/10.1140/epje/i2011-11054-3>
- Macpherson, T., Nickling, W. G., Gillies, J. A., & Etyemezian, V. (2008). Dust emissions from undisturbed and disturbed supply-limited desert surfaces. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2), 2007JF000800.  
<https://doi.org/10.1029/2007JF000800>
- Mathew, J., Bahr, C., Carroll, B., Sheplak, M., & Cattafesta, L. (2005). *Design, Fabrication, and Characterization of an Anechoic Wind Tunnel Facility*.

- McEwan, I. K., & Willetts, B. B. (1991). Numerical model of the saltation cloud. In O. E. Barndorff-Nielsen & B. B. Willetts (A c. Di), *Aeolian Grain Transport 1* (Vol. 1, pp. 53–66). Springer Vienna. [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6706-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6706-9_3)
- McEwan, I. K., & Willetts, B. B. (1993). Adaptation of the near-surface wind to the development of sand transport. *Journal of Fluid Mechanics*, 252, 99–115. <https://doi.org/10.1017/S0022112093003684>
- McKenna Neuman, C., Boulton, J. W., & Sanderson, S. (2009). Wind tunnel simulation of environmental controls on fugitive dust emissions from mine tailings. *Atmospheric Environment*, 43(3), 520–529. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.011>
- McKenna-Neuman, C., & Nickling, W. G. (1989). A THEORETICAL AND WIND TUNNEL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CAPILLARY WATER ON THE ENTRAINMENT OF SEDIMENT BY WIND. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(1), 79–96. <https://doi.org/10.4141/cjss89-008>
- Mehta, R. D., & Bradshaw, P. (1979). Design rules for small low speed wind tunnels. *The Aeronautical Journal*, 83(827), 443–453. <https://doi.org/10.1017/S0001924000031985>
- Namikas, S. L. (2003). Field measurement and numerical modelling of aeolian mass flux distributions on a sandy beach. *Sedimentology*, 50(2), 303–326. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00556.x>
- Nickling, W. G., & Ecclestone, M. (1981). The effects of soluble salts on the threshold shear velocity of fine sand. *Sedimentology*, 28(4), 505–510. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1981.tb01698.x>
- Nickling, W. G., & Gillies, J. A. (1993). Dust emission and transport in Mali, West Africa. *Sedimentology*, 40(5), 859–868. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1993.tb01365.x>

- Nickling, W. G., & McKenna Neuman, C. M. (2009). Aeolian Sediment Transport. In A. J. Parsons & A. D. Abrahams (A c. Di), *Geomorphology of Desert Environments* (pp. 517–555). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9_17)
- Nickling, W. G., McTainsh, G. H., & Leys, J. F. (1999). Dust emissions from the Channel Country of western Queensland, Australia. *Z. Geomorphol. Suppl. Bd.*, *116*, 1–17.
- Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., & Ciapponi, A. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, *142*, 105876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>
- Owen, P. R. (1964). Saltation of uniform grains in air. *Journal of Fluid Mechanics*, *20*(2), 225–242. <https://doi.org/10.1017/S0022112064001173>
- Panebianco, J. E., Mendez, M. J., & Buschiazzo, D. E. (2016). PM10 Emission, Sandblasting Efficiency and Vertical Entrainment During Successive Wind-Erosion Events: A Wind-Tunnel Approach. *Boundary-Layer Meteorology*, *161*(2), 335–353. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0172-7>
- Pi, H., Webb, N. P., Huggins, D. R., & Li, S. (2023). Effects of secondary soil aggregates on threshold friction velocity and wind erosion. *Land Degradation & Development*, *34*(1), 16–27. <https://doi.org/10.1002/ldr.4440>
- Pinna, F. (2021). *Emissioni di particolato da bacini sterili esposti all'erosione eolica* [PhD Thesis]. University of Cagliari.
- Pinna, F., Grosso, B., Lai, A., Bouarour, O., Armas, C., Serici, M., & Dentoni, V. (2024). Design, Validation and CFD Modeling of an Environmental Wind Tunnel. *Atmosphere*, *15*(1), 77. <https://doi.org/10.3390/atmos15010077>

- Piras, L. (2011). *Emissione e dispersione in atmosfera di polveri derivanti da sorgenti diffuse nelle attività estrattive e di ripristino ambientale* [PhD Thesis]. University of Cagliari.
- Rasmussen, K. R., & Sørensen, M. (2008). Vertical variation of particle speed and flux density in aeolian saltation: Measurement and modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2), 2007JF000774. <https://doi.org/10.1029/2007JF000774>
- Raupach, M. R. (1991). Saltation layers, vegetation canopies and roughness lengths. In O. E. Barndorff-Nielsen & B. B. Willetts (A c. Di), *Aeolian Grain Transport 1* (Vol. 1, pp. 83–96). Springer Vienna. [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6706-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6706-9_5)
- Raupach, M. R., Gillette, D. A., & Leys, J. F. (1993). The effect of roughness elements on wind erosion threshold. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D2), 3023–3029. <https://doi.org/10.1029/92JD01922>
- Ravi, S., Zobeck, T. M., Over, T. M., Okin, G. S., & D’Odorico, P. (2006). On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion. *Sedimentology*, 53(3), 597–609. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00775.x>
- Roney, J. A., & White, B. R. (2006). Estimating fugitive dust emission rates using an environmental boundary layer wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 40(40), 7668–7685. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.015>
- Sanderson, R. S., McKenna Neuman, C., & Boulton, J. W. (2014). Windblown fugitive dust emissions from smelter slag. *Aeolian Research*, 13, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.02.005>
- Sauermann, G., Kroy, K., & Herrmann, H. J. (2001). Continuum saltation model for sand dunes. *Physical Review E*, 64(3), 031305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.031305>

- Shao, Y. (A. c. Di). (2008). *Physics and Modelling of Wind Erosion* (Vol. 37). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8895-7>
- Shao, Y., & Klose, M. (2016). A note on the stochastic nature of particle cohesive force and implications to threshold friction velocity for aerodynamic dust entrainment. *Aeolian Research*, 22, 123–125. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.08.004>
- Shao, Y., & Lu, H. (2000). A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D17), 22437–22443. <https://doi.org/10.1029/2000JD900304>
- Shao, Y., Mctainsh, G., Leys, J., & Raupach, M. (1993). Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurement. *Soil Research*, 31(4), 519. <https://doi.org/10.1071/SR9930519>
- Shao, Y., Raupach, M., & Leys, J. (1996). A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Soil Research*, 34(3), 309. <https://doi.org/10.1071/SR9960309>
- Shao, Y., & Raupach, M. R. (1992). The overshoot and equilibration of saltation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D18), 20559–20564. <https://doi.org/10.1029/92JD02011>
- Shao, Y., Raupach, M. R., & Findlater, P. A. (1993). Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D7), 12719–12726. <https://doi.org/10.1029/93JD00396>
- Sharratt, B. S., & Vaddella, V. (2014). Threshold friction velocity of crusted windblown soils in the Columbia Plateau. *Aeolian Research*, 15, 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.08.002>

- Sharratt, B. S., Vaddella, V. K., & Feng, G. (2013). Threshold friction velocity influenced by wetness of soils within the Columbia Plateau. *Aeolian Research*, 9, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.01.002>
- Sherman, D. J., Jackson, D. W. T., Namikas, S. L., & Wang, J. (1998). Wind-blown sand on beaches: An evaluation of models. *Geomorphology*, 22(2), 113–133. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00062-7)
- Snyder, W. H. (1979). *The EPA Meteorological Wind Tunnel: Its Design, Construction and Operating Characteristics*. Research Triangle Park, NC.
- Sørensen, M. (2004). On the rate of aeolian sand transport. *Geomorphology*, 59(1–4), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.09.005>
- Stout, J. E., & Zobeck, T. M. (1997). Intermittent saltation. *Sedimentology*, 44(5), 959–970. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1997.d01-55.x>
- Stull, R. B. (1988). Mean Boundary Layer Characteristics. In R. B. Stull (A c. Di), *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* (pp. 1–27). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8_1)
- Sweeney, M. R. (2022). Dust Emission Processes. In *Treatise on Geomorphology* (pp. 235–258). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00015-8>
- Sweeney, M. R., & Mason, J. A. (2013). Mechanisms of dust emission from Pleistocene loess deposits, Nebraska, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1460–1471. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20101>
- Thornton, C., Yin, K. K., & Adams, M. J. (1996). Numerical simulation of the impact fracture and fragmentation of agglomerates. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29(2), 424–435. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/29/2/021>

- Tromans, D., & Meech, J. A. (2002). Fracture toughness and surface energies of minerals: Theoretical estimates for oxides, sulphides, silicates and halides. *Minerals Engineering*, 15(12), 1027–1041. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00213-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00213-3)
- Ungar, J. E., & Haff, P. K. (1987). Steady state saltation in air. *Sedimentology*, 34(2), 289–299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1987.tb00778.x>
- U.S. EPA. (1995a). *AP-42, CH 13.2: Fugitive Dust Sources*.
- U.S. EPA. (1995b). *AP-42 Vol. I Introduction*.
- U.S. EPA. (1998). *Office of Air Quality Planning and Standards National Air Pollutant Emission Trends Procedures Document, 1900–1996 Projections 1999–2010*. U.S. EPA: Research Triangle Park NC, USA.
- U.S. EPA. (2006). *AP-42, CH 13.2.5: Industrial Wind Erosion*.
- U.S. EPA. (2016a). *Particulate Matter (PM) Air Quality Standards*. <https://www.epa.gov/naaqs/particulate-matter-pm-air-quality-standards>
- U.S. EPA. (2016b). *Particulate Matter (PM) Basics*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- U.S. EPA. (2018). *Report on the Environment (ROE): Particulate Matter emissions*.
- U.S. EPA. (2020, ottobre 1). *AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 13: Miscellaneous Sources [Data and Tools]*. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-13-miscellaneous-0>
- Valance, A., Rasmussen, K. R., Ould El Moctar, A., & Dupont, P. (2015). The physics of Aeolian sand transport. *Comptes Rendus. Physique*, 16(1), 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.01.006>

- Van Leeuwen, C. C. E., Fister, W., Vos, H. C., Cammeraat, L. H., & Kuhn, N. J. (2021). A cross-comparison of threshold friction velocities for PM10 emissions between a traditional portable straight-line wind tunnel and PI-SWERL. *Aeolian Research*, *49*, 100661. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100661>
- Von Karman, T. (1931). *Mechanical similitude and turbulence* (No. 611).
- Wang, R., Li, Q., Zhou, N., Chang, C., Guo, Z., & Li, J. (2019). Effect of wind speed on aggregate size distribution of windblown sediment. *Aeolian Research*, *36*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.10.001>
- White, B. R. (1979). Soil transport by winds on Mars. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *84*(B9), 4643–4651. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04643>
- WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- WRAP. (2006). *WRAP Fugitive Dust Handbook*.
- Wu, W., Yan, P., Wang, Y., Dong, M., Meng, X., & Ji, X. (2018). Wind tunnel experiments on dust emissions from different landform types. *Journal of Arid Land*, *10*(4), 548–560. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0100-4>
- Yeo, D., & Shi, L. (2018). Computational versus Wind Tunnel Simulation of Atmospheric Boundary Layer Flow for Structural Engineering Applications. *Wind Engineering for Natural Hazards*, 169–191. <https://doi.org/10.1061/9780784415153.ch09>
- Zimon, A. D. (1982). *Adhesion of Dust and Powder*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8576-3>

Zingg, A. W. (1953). Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material. *Proc. 5th Hydraulic Conf.*, 111–135.