

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria
per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

Realizzazione e calibrazione di un simulatore di pioggia in scala reale per l'abbattimento del particolato atmosferico



Relatore

Prof. Davide Poggi

Co-relatore

Ing. Roberto Bosio

Candidato

Marco Musumarra

Anno accademico 2020/2021

Sommario

Indice delle figure.....	5
Indice delle tabelle	9
Estratto	10
Abstract	11
1. INTRODUZIONE.....	12
1.1. Background	12
1.2. Scopo dello studio	12
1.3. Metodologia	13
2. CENNI DI TEORIA	14
2.1. Materiale particolato	14
2.1.1. Riferimenti normativa.....	17
2.2. Meccanismi di rimozione	19
2.2.1. Deposizione secca.....	19
2.2.2. Deposizione umida	24
2.2.2.1. Coefficiente di scavenging.....	27
2.2.2.2. Coefficiente di washout	29
2.3. Caratteristiche della pioggia.....	30
2.3.1. DSD (Drop Size Distribution).....	30
2.3.1.1. Parametrizzazione della DSD	30
2.3.2. Velocità terminali	32
2.3.3. Forma delle gocce.....	34
3. STATO DELL'ARTE.....	36
3.1. I simulatori di pioggia	36
3.2. Tecniche di misurazione.....	40
3.2.1. Metodo manuale	41
3.2.2. Metodo fotografico	43
3.2.3. Shadowgraph imaging	43
3.3. Disdrometri.....	45
3.4. Pluviometri.....	48
4. SET-UP SPERIMENTALE.....	50

4.1. Micro set-up	50
4.1.1. Descrizione delle prove	53
4.1.1.1. Concentrazione di aerosol.....	53
4.1.1.2. Shadowgraph.....	56
4.1.1.3. Campo di moto.....	59
4.2. Rainfall Simulator	61
4.2.1. Descrizione e scelte progettuali.....	61
4.3. Strumenti di misurazione della precipitazione	67
5. RISULTATI.....	68
5.1. Micro-setup	68
5.1.1. Curve di decadimento delle concentrazioni di aerosol.....	68
5.1.2. Forma delle gocce.....	73
5.1.3. Velocità delle gocce.....	78
5.1.4. Campi di moto	79
5.2. Disdrometro e pluviometro	81
6. CONCLUSIONI	84
6.1. Sviluppi futuri	85
BIBLIOGRAFIA.....	87

Indice delle figure

Figura 2.1. Range dimensionali dei principali materiali particolati.....	15
Figura 2.2. Esempio di concentrazione in numero e in volume (John et al.1990).....	16
Figura 2.3. Analogia elettrica per la deposizione secca di un gas (R. Sozzi 2003).	22
Figura 2.4. Velocità di sedimentazione e deposizione per il particolato (R. Sozzi 2003). .	23
Figura 2.5. Velocità di deposizione del particolato in funzione della granulometria (R. Sozzi 2003).....	23
Figura 2.6. Schema riassuntivo dei principali processi chimico-fisici che si verificano all'interno e al di sotto delle nubi.....	25
Figura 2.7. Campo di moto di una goccia in caduta.....	26
Figura 2.8. Rapporto di dilavamento in funzione del diametro delle gocce di pioggia e dell'intensità di precipitazione per il particolato(R. Sozzi 2003).....	27
Figura 2.9. Coefficiente di scavenging al variare del diametro delle gocce.	28
Figura 2.10. Distribuzioni dimensionali di gocce misurate (pallini pieni) confrontate con le curve di best fit esponenziale di Marshall-Palmer (linee continue) e altre distribuzioni (linee tratteggiate) (Marshall and Palmer 1948).	31
Figura 2.11. Rappresentazione schematica della distorsione delle gocce di pioggia dovuta alla pressione aerodinamica (Fraser 1997).....	35
Figura 3.1. Simulatore di gocciolamento (Laws 1941).....	37
Figura 3.2. Simulatore ad ugelli in pressione (Pall, Dickinson, Beals 1983).....	38
Figura 3.3. Simulatore ibrido (Carvalho et al. 2014).	39
Figura 3.4. Simulatore di precipitazioni indoor.	39
Figura 3.5. Vaschetta riempita con farina (a); Pellet di farina dopo l'essiccazione in forno	

(b) (Kathiravelu et al. 2016).....	42
Figura 3.6. Configurazione schematica della fotocamera sviluppata per la misurazione della velocità delle gocce (Mache 1904).....	43
Figura 3.7. Schema generico di un sistema di shadowgraph (Castrejón-García et al. 2011).	44
Figura 3.8. Schema di funzionamento dei disdrometri a impatto (Bagree 2012).	46
Figura 3.9. Disdrometro da impatto di Joss-Waldvogel.....	46
Figura 3.10. Schema del disdrometro ottico.	47
Figura 3.11. Configurazione video (a); Schema del processo di imaging (b) (Nešpor et al. 2000).....	48
Figura 4.1. Schema rappresentativo del micro set-up.	50
Figura 4.2. Esempio di goccia in caduta, formata da ago a sezione orizzontale 25G e da 13mm prima e dopo elaborazione.	52
Figura 4.3. Foto del target millimetrato per la calibrazione delle immagini.....	54
Figura 4.4. Esempio di polveri aerodisperse.	55
Figura 4.5. Esempio di individuazione delle particelle aerodisperse.....	55
Figura 4.6. Schema di funzionamento tecnica shadowgraph.	56
Figura 4.7. Frame della goccia in caduta.	57
Figura 4.8. Frame della goccia in caduta con maschera invertita.	58
Figura 4.9. Esempio di individuazione della goccia in caduta.....	58
Figura 4.10. Frame del campo di moto della goccia in caduta.....	60
Figura 4.11. Schema di funzionamento del sistema per la simulazione della pioggia.....	62

Figura 4.12. Sezione del serbatoio di carico.	63
Figura 4.13. Collettore con giunzioni in ottone.	64
Figura 4.14. Esempio di tubo pronto per l'installazione.	65
Figura 4.15. Rappresentazione del sistema per la simulazione della pioggia.	66
Figura 5.1. Curve di decadimento della polvere Dantec HGS10.	69
Figura 5.2. Curve di decadimento della polvere Dantec HGS10 con ventola.	70
Figura 5.3. Confronto curve di decadimento della polvere Dantec HGS10 con e senza ventola.	70
Figura 5.4. Curve di decadimento della polvere ISOFine A2.	71
Figura 5.5. Confronto curve di decadimento delle polveri Dantec HGS10 e ISOFine A2 .	72
Figura 5.6. Diametro equivalente delle gocce.	74
Figura 5.7. Forma della goccia.	75
Figura 5.8. Asse maggiore delle gocce.	75
Figura 5.9. Asse minore delle gocce.	76
Figura 5.10. Eccentricità delle gocce.	77
Figura 5.11. Velocità delle gocce e velocità limite teorica	78
Figura 5.12. Campo di moto della goccia in caduta attraverso il fumo.	79
Figura 5.13. Confronto intensità di precipitazione pluviometro e disdrometro di giorno 2/10/20.	81
Figura 5.14. Confronto cumulate giornaliere di intensità di precipitazione pluviometro e disdrometro di giorno 2/10/20.	82
Figura 5.15. Confronto cumulate annuali di intensità di precipitazione pluviometro e	

disdrometro da Agosto 2020 ad Agosto 2021..... 82

Indice delle tabelle

Tabella 2.1. Classificazione delle particelle.....	15
Tabella 2.2. Valori limite OMS di emissione di particolato in atmosfera.	18
Tabella 2.3. Valori limite D.lgs. 155/2010 di emissione di particolato in atmosfera.	18
Tabella 2.4. Coefficiente di scavenging per il particolato in caso di pioggia. Tali valori si riducono di un terzo in presenza di precipitazioni nevose.	28
Tabella 2.5. Equazioni della velocità terminale	32
Tabella 4.1. Diametro della goccia, velocità teorica ed effettivamente raggiunta dalla goccia e la sua velocità terminale (E. Corte “Realizzazione di un simulatore di pioggia di laboratorio in scala reale”).	51
Tabella 4.2. Specifiche tecniche FASTCAM NOVA S16 (Photron).....	57

Estratto

I simulatori di pioggia sono dei dispositivi sviluppati a scala di laboratorio per ricreare l'evento di precipitazione e i principali fenomeni ad esso connesso. Tra le varie applicazioni vi sono la simulazione dei processi di erosione del suolo, l'abbattimento delle polveri tramite deposizione umida, la stima del deflusso superficiale e del tasso di infiltrazione nel terreno. Tuttavia, al fine di simulare un evento di pioggia il più verosimile possibile si riscontrano diverse problematiche legate alla distribuzione, alla dimensione e al raggiungimento della velocità terminale delle gocce.

Questo lavoro di tesi è svolto nell'ambito della progettazione di un simulatore di pioggia sito nel laboratorio di idraulica del Politecnico di Torino, ed è finalizzato allo studio dell'abbattimento del particolato atmosferico tramite processi di deposizione umida.

Il set-up sperimentale è costituito da una camera di dimensioni 3.50 m x 4.00 m e altezza 10.70 m, alla sommità della quale è stato installato un piano di gocciolamento per la simulazione della pioggia.

A seguito della costruzione del simulatore, è stato necessario calibrarne il funzionamento; quindi, sono state condotte delle prove sperimentali a micro-scala, per la caratterizzazione della precipitazione, l'analisi delle concentrazioni di aerosol in dispersione e la valutazione del campo di moto.

La precipitazione è stata caratterizzata tramite il metodo "shadowgraph" in termini di forma, dimensione e velocità di caduta delle gocce; le distribuzioni dimensionali delle gocce sono state ricavate analizzando i dati di un disdrometro, sito al Politecnico di Torino.

La misura delle concentrazioni di aerosol disperso è stata, invece, finalizzata alla scelta della tipologia di aerosol ottimale da disperdere nel simulatore, in relazione al diverso tempo di abbattimento.

Il passo successivo è stato la valutazione dell'interazione tra le gocce d'acqua e le sostanze sospese attraverso l'osservazione del campo di moto delle gocce stesse.

Abstract

The rainfall simulators are devices developed on lab scale to recreate the precipitation event and the main phenomena connected to them.

Amongst the different applications there are the process simulation of the soil erosion, the dust abatement through wet deposition, the estimate of the surface runoff and the rate of the soil infiltration. However, to simulate a rain event more comparable to a natural one, a series of complications come up, connected to the distribution, the dimension and the reaching of the terminal velocity of the raindrops.

This thesis work has been done in the scope of projecting a rainfall simulator in the laboratory of hydraulics of the Turin Politecnico, and it aims to study the abatement of the atmospheric particulate matter thanks to the processes of wet deposition.

The rainfall simulators are made of a box with size of 3.50 m x 4.00 m and height 10.70 m, at the top of which has been installed a drip surface for the rainfall simulation. After the construction of the simulator, it was necessary to calibrate its functioning; so, experimental trials were conducted on a microscope, for the characterisation of the precipitation, the analysis of the suspended concentration of aerosol and the evaluation of the field of motion. The experimental set-up was characterized in terms of form by the “shadowgraphs” method, size and speedfall of the raindrops; the dimensional distribution of the drops has been obtained by analysing the data of a disdrometer, located at Turin Politecnico.

Concentration measurement of the suspended aerosol were made in order to choose the best kind of aerosol to disperse in the simulator, in relation to the different time of abatement.

The next step was the evaluation of the interaction between the raindrops and the suspended substances through the observation of the field of motion of the drops.

1. INTRODUZIONE

1.1. Background

I simulatori di pioggia sono dei dispositivi sviluppati per ricreare l'evento di precipitazione, in modo da studiarne gli effetti nelle varie applicazioni idrologiche. In un primo momento il loro utilizzo mirava allo studio dei fenomeni di erosione del suolo; negli ultimi anni l'uso di questi dispositivi è stato ulteriormente ampliato, includendo altre applicazioni come l'abbattimento del particolato atmosferico e il trasferimento dei sedimenti dovuto al deflusso meteorico.

I simulatori di pioggia permettono di generare un evento di precipitazione che sia controllato e adattabile alle specifiche richieste degli studi. Inoltre, sono in grado di ricreare situazioni estreme che nella realtà avvengono con bassissima frequenza, consentendo ad esempio lo studio delle variazioni geomorfologiche.

In questa tesi è stato realizzato e calibrato un simulatore di pioggia in scala reale che permette di approfondire gli studi dei fenomeni di abbattimento del particolato atmosferico dovuti a processi di deposizione umida.

1.2. Scopo dello studio

In letteratura sono presenti diversi studi che analizzano la realizzazione di un simulatore di pioggia ma, in funzione del loro scopo, riproducono fedelmente solo alcune proprietà della precipitazione.

L'obiettivo principale di questo lavoro è realizzare un simulatore di pioggia in grado di approfondire gli studi legati alla deposizione umida del particolato atmosferico. Quindi, l'evento riprodotto deve rispecchiare molte caratteristiche delle precipitazioni reali. Per lo studio dei fenomeni di abbattimento del particolato è necessario simulare un vasto range di intensità di precipitazione e per ognuna di queste la distribuzione dimensionale delle gocce deve essere realistica.

Un altro obiettivo è legato alla scelta del contaminante da disperdere all'interno della camera del simulatore di precipitazione; questo deve essere rappresentativo delle caratteristiche del particolato aerodisperso in atmosfera.

1.3. Metodologia

Per il raggiungimento degli obiettivi prefissati è prevista l'osservazione e la conseguente analisi dei fenomeni oggetto di studio attraverso l'utilizzo di diverse tecniche.

Per la scelta del seeding da disperdere all'interno della camera del simulatore di pioggia si è scelto di utilizzare la tecnica fotografica; questa permette di osservare le concentrazioni di particelle aerodisperse all'interno del box e monitorarle nel tempo.

Allo stesso modo è inoltre possibile osservare il campo di moto delle gocce in caduta e le interazioni che queste hanno con il contaminante aerodisperso.

Per lo studio delle caratteristiche dimensionali e della velocità delle gocce ricreate artificialmente si è scelto di utilizzare il metodo "shadowgraph" che, grazie al supporto di un sistema di trigger, permette l'acquisizione delle immagini delle gocce in caduta.

Il presente lavoro è articolato in sei diversi capitoli; nel primo vengono introdotti i concetti base sui simulatori di pioggia e come questi possono essere utilizzati per studiare i fenomeni di deposizione umida del particolato atmosferico.

Il secondo capitolo riporta le basi teoriche del particolato atmosferico, delle tecniche di rimozione dello stesso e delle principali caratteristiche della precipitazione.

Nel terzo capitolo vengono presentati i prototipi, presenti in letteratura, dei simulatori di pioggia; vengono inoltre mostrate le principali tecniche utilizzate per lo studio degli eventi di precipitazione.

Nel quarto capitolo vi è una descrizione dettagliata dei principali dispositivi utilizzati; una descrizione del micro set-up e delle prove effettuate, del simulatore di pioggia e degli strumenti adottati per la misurazione delle precipitazioni.

Il quinto capitolo riporta i risultati ottenuti tramite l'elaborazione dei dati ed i relativi commenti.

Infine, nel sesto capitolo vengono discusse le conclusioni del lavoro svolto e vengono proposti alcuni suggerimenti per possibili sviluppi futuri.

2. CENNI DI TEORIA

2.1. Materiale particolato

Il particolato atmosferico, spesso identificato con l'abbreviazione PM, è un insieme di particelle, solide e liquide, con una grande varietà di caratteristiche fisiche, chimiche, geometriche e morfologiche. Si tratta, dunque, di un inquinante molto diverso da tutti gli altri, presentandosi non come una specifica entità chimica, ma come una miscela di particelle dalle più svariate proprietà.

Una prima caratterizzazione del particolato può essere realizzata in relazione alla sua origine; infatti, questo presenta dimensioni, densità e caratteristiche chimiche molto differenti a seconda che la sorgente che lo ha originato sia di tipo naturale o antropico. La principale fonte antropica deriva dall'uso dei combustibili fossili; invece, le sorgenti di tipo naturale sono da individuare nelle eruzioni vulcaniche e nei processi di erosione del suolo.

Sempre in relazione al processo di formazione, il PM può essere classificato come primario, se viene originato da una sorgente che lo immette direttamente in atmosfera; viene, invece, detto secondario, nel caso in cui il processo di formazione si inneschi a partire dalla conversione di altri gas precursori, quali solfati SO_x , nitrati NO_x e ammoniaca NH_3 .

Oltre ai suddetti composti chimici, il particolato è costituito anche da specie cristalline, ossidi di alluminio e ferro, sali di origine carbonacea che predominano nel caso di sorgente naturale, e metalli pesanti, idrocarburi, tossine e composti clorurati se invece il PM è originato da processi di natura antropica.

Data l'eterogeneità delle sostanze chimiche che lo compongono, il metodo più comune per la classificazione del particolato tiene conto del diametro delle particelle. In particolare, si fa riferimento al diametro aerodinamico equivalente d_{eq} , definito come il diametro di una sfera di densità 1000 kg/m^3 e velocità di sedimentazione (v_{sed}) pari a quella che la stessa particella avrebbe considerando il fluido a riposo.

Il diametro equivalente non coincide con il diametro geometrico, in quanto è fortemente influenzato da parametri aerodinamici, quali l'attrito con l'aria, la spinta di galleggiamento, la superficie e il volume della particella.

In base alle dimensioni e alla natura delle particelle, si hanno le seguenti definizioni:

Tabella 2.1. Classificazione delle particelle

Polveri	Sospensione di particelle solide prodotte attraverso meccanismi di frammentazione del materiale, come schiacciamento o esplosione	$0.25 < d_{eq} < 500 \mu\text{m}$
Aerosol	Particelle solide o liquide in sospensione	$d_{eq} < 1 \mu\text{m}$
Nebbia	Particelle liquide disperse in prossimità del terreno che causano una riduzione di visibilità	$0.15 < d_{eq} < 15 \mu\text{m}$
Esalazioni	Particelle solide generate da processi di ossidazione o chimico/metallurgici	$d_{eq} < 1 \mu\text{m}$
Foschia	Dispersione di particelle d'acqua. Si distingue dalla nebbia per un minor addensamento delle particelle	$d_{eq} < 2 \mu\text{m}$
Fumo	Particelle solide originatesi da processi di combustione incompleta	$d_{eq} < 2 \mu\text{m}$
Sabbie	Particelle solide disperse	$d_{eq} > 0.5 \text{ mm}$

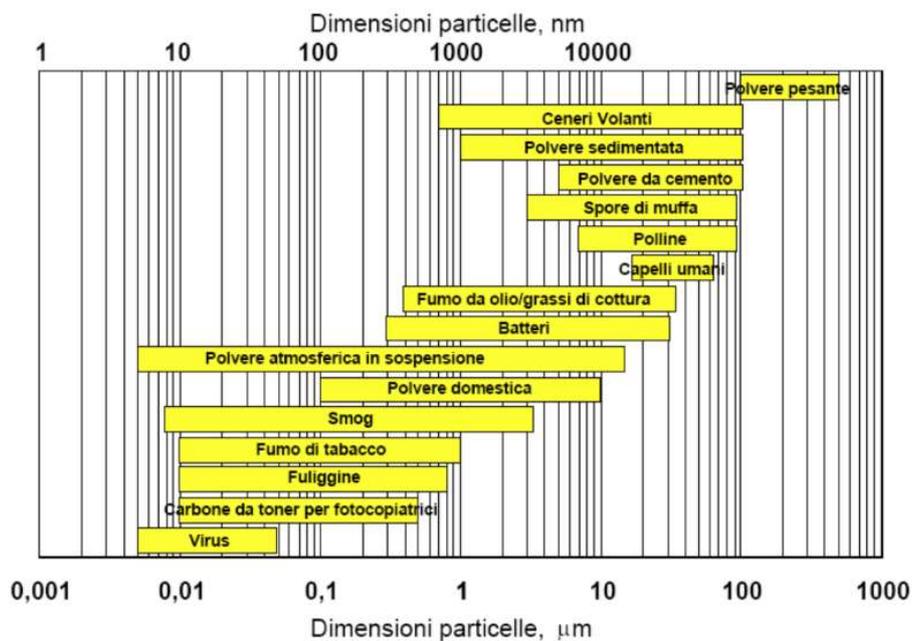


Figura 2.1. Range dimensionali dei principali materiali particolati.

Dalla Figura 2.1 si nota che il materiale particolato comprende particelle di dimensioni che

variano di diversi ordini di grandezza. Il D.lgs. 13 agosto 2010 n.155 e il sito dell'EPA (European Environment Agency) propongono la seguente classificazione del particolato atmosferico:

- TSP (Total Solid Particles): particelle con diametro aerodinamico inferiore a 100 μm ;
- PM_{10} : frazione di particolato che penetra all'interno di un dispositivo per il campionamento dimensionalmente selettivo ($d_{eq}=10 \mu\text{m}$) con un'efficienza del 50% (UNI EN 12341); comunemente associato a particelle grossolane (Coarse material).
- $\text{PM}_{2.5}$: frazione di particolato che penetra all'interno di un dispositivo per il campionamento dimensionalmente selettivo ($d_{eq}=2.5 \mu\text{m}$) con un'efficienza del 50% (UNI EN 14907); comunemente associato a particelle fini (Fine material).
- $\text{PM}_{0.1}$: materiale particolato con diametro aerodinamico medio fino a 0.1 μm ; comunemente associato a particelle ultrafini (UF material).

La conformazione del materiale particolato in aria è chiaramente descritta dal grafico seguente (Figura 2.2).

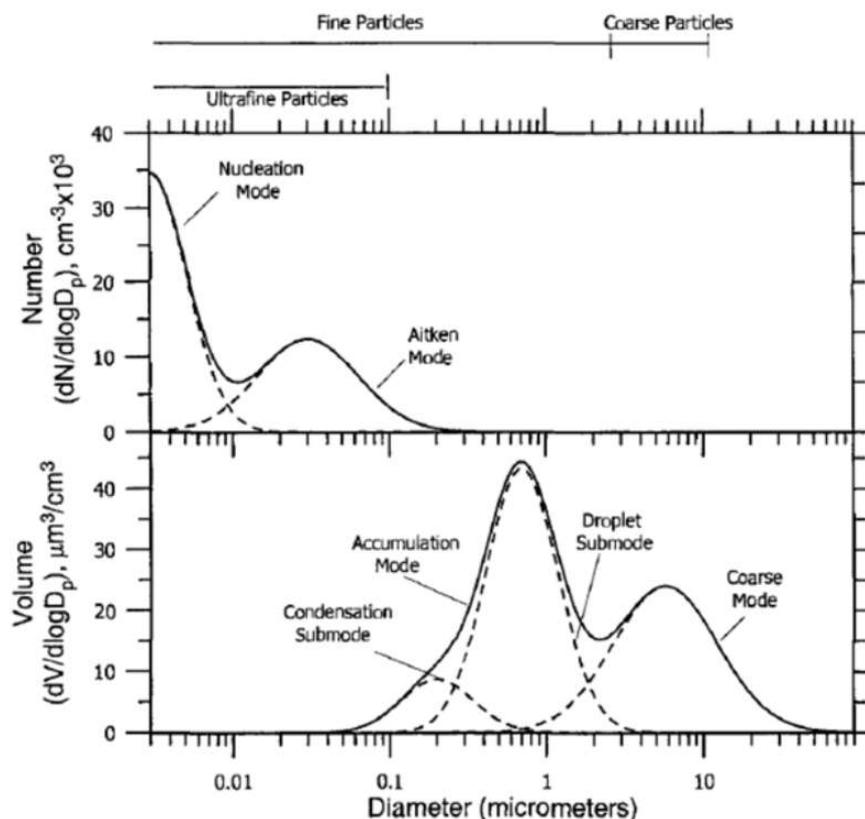


Figura 2.2. Esempio di concentrazione in numero e in volume (John et al.1990).

Il grafico è di tipo semi-logaritmico e l'andamento della curva è fortemente influenzato dalle

condizioni al contorno, quali numero e tipologia di sorgenti, fattori meteorologici e climatici e morfologia del sito. Facendo riferimento al diametro equivalente, e quindi assumendo costante la densità delle particelle, è possibile notare come la componente ultrafine che è praticamente trascurabile per la distribuzione in massa, risulta invece predominante se si considera il suo contributo per la distribuzione in numero.

Questo spiega come la dimensione delle particelle è inversamente correlata al tempo di permanenza delle stesse in atmosfera. In particolare, le particelle di dimensioni maggiori hanno un peso maggiore e tendono a sedimentare per gravità in minuti o al massimo ore; le particelle fini, invece, rimangono in sospensione per settimane, subendo processi diffusivi che possono trasportarle anche a chilometri di distanza dalla sorgente.

Il particolato, in relazione alle dimensioni delle particelle che lo compongono, può penetrare nei diversi livelli del sistema respiratorio attraverso inalazione, determinando malattie al sistema nervoso, cardiovascolare e riproduttivo, oltre che ovviamente a quello respiratorio. La presenza di inquinamento atmosferico inoltre è dannosa anche per flora, fauna, beni architettonici e paesaggistici.

Nel capitolo seguente, verranno trattati i principali riferimenti normativi in vigore, redatti allo scopo di ridurre le emissioni di sostanze nocive in atmosfera e incentivare le procedure di controllo della qualità dell'aria.

2.1.1. Riferimenti normativa

Il concetto base da cui partire è sicuramente la definizione di inquinamento dell'aria, che come riportano il DPR 203/1988, il DL 351/1999 e il DM 60/2002, può essere inteso come: “ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni pubblici e privati [...]”.

Il passo successivo è stato quello di quantificare il concetto astratto di inquinamento attraverso la definizione di metodi di misura della concentrazione di validità generale e di valori soglia per ogni sostanza classificata come inquinante. L'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) nel 2005 ha rilasciato delle linee guida allo scopo di tutelare la qualità

dell'aria e incentivare i governi verso una politica sempre più orientata alla salvaguardia dell'ambiente. Nel documento vengono elencati i principali inquinanti e le ripercussioni più o meno gravi che questi possono causare alla salute umana e all'ambiente; sono riportate inoltre delle analisi dei livelli attuali di inquinamento e le concentrazioni soglia massime ammissibili. Si riportano in tabella i valori limite relativi al particolato.

Tabella 2.2. Valori limite OMS di emissione di particolato in atmosfera.

Tipologia di particolato	Valori limite OMS	
	Limite media 24h [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Limite media annuale [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM₁₀	50	20
PM_{2.5}	25	10

Si prevede in un futuro prossimo di ridurre ulteriormente i valori limite sopra elencati.

Attualmente le normative vigenti regolamentano unicamente il PM₁₀ e il PM_{2.5}, mentre per le particelle di diametro inferiore (PM_{0.1}) non esistono ancora restrizioni di carattere legislativo, nonostante vari studi abbiano accertato una pericolosità rilevante.

La direttiva europea attualmente in vigore è la 2008/50/CE che impone agli stati membri il non superamento di valori soglia di concentrazione, definiti per tutte le principali sostanze inquinanti e che includono il particolato atmosferico. Tale direttiva è stata recepita in Italia nel 2010 con il D.lgs. 155/2010, all'interno del quale sono fissati i valori limite giornaliero e annuale al fine della tutela della salute umana, riportati nella tabella seguente.

Tabella 2.3. Valori limite D.lgs. 155/2010 di emissione di particolato in atmosfera.

Tipologia di particolato	Valori limite D.lgs. 155/2010		
	Limite media 24h [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Superamenti consentiti in un anno (riferiti alla media giornaliera)	Limite media annuale [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM₁₀	50	35	40
PM_{2.5}	25	-	-

Confrontando le due tabelle, si nota che la soglia di concentrazione annuale del PM₁₀ fissata nell'ambito della normativa nazionale è molto più alta del valore limite europeo. Peraltro, la

normativa italiana consente il superamento del valore limite giornaliero fino a un massimo di 35 volte all'anno. Elementi favorevoli introdotti dalla normativa sono anche l'incentivazione delle reti di monitoraggio e la diffusione dei sistemi di controllo della qualità dell'aria. .

2.2. Meccanismi di rimozione

In questo capitolo si analizzeranno i principali processi che portano alla rimozione del particolato dall'atmosfera. Tali processi, fortemente influenzati dalle condizioni climatiche e dalle dimensioni particellari, sono la deposizione secca e la deposizione umida.

La deposizione degli inquinanti al suolo è un meccanismo di autodepurazione dell'atmosfera per cui si genera un flusso verticale negativo di inquinante in corrispondenza dell'interfaccia suolo/aria con la conseguente riduzione della concentrazione di inquinante in atmosfera e un'alterazione della vegetazione e del suolo. Tale fenomeno viene notevolmente esaltato quando avviene in presenza di precipitazioni, che intercettano gli inquinanti accelerando il processo di deposizione; in questo caso si parla di deposizione umida.

2.2.1. Deposizione secca

La deposizione secca include tutti i processi che generano un flusso di inquinante non nullo negativo fino all'interfaccia aria-suolo, in assenza di acqua o precipitazioni. È un fenomeno che avviene costantemente e per questo risulta uno dei migliori processi di autodepurazione dell'atmosfera.

La deposizione secca è governata principalmente da tre fattori:

- Il livello di turbolenza dell'atmosfera, che genera un trasporto aerodinamico degli inquinanti verso l'interfaccia suolo-aria. Maggiore è il grado di turbolenza, più intenso sarà il trasporto di inquinante e quindi il processo di deposizione.
- Le proprietà chimico-fisiche degli inquinanti, che possono incrementare la componente di moto browniano attraverso il sotto-strato quasi laminare fino alla superficie. In particolare, è necessario distinguere tra inquinanti gassosi, per i quali assumono particolare rilevanza la solubilità e la reattività chimica, e il particolato solido per cui si fa riferimento alla densità e alla forma delle singole particelle.
- Le caratteristiche chimiche e geometriche della superficie. Superfici chimicamente non compatibili con l'inquinante gassoso che tende a depositarsi possono ostacolare l'assorbimento e l'adsorbimento; superfici eccessivamente lisce possono ostacolare la

sedimentazione delle particelle solide di inquinante. In generale, superfici naturali caratterizzate da copertura vegetale e caratteristiche molto variabili sono quelle che favoriscono maggiormente il processo di deposizione secca.

Il processo di deposizione si articola in tre step consecutivi, per comprendere i quali diventa fondamentale differenziare tra inquinanti gassosi e particolato solido:

1. Stadio aerodinamico. L'inquinante viene trasportato in atmosfera per effetto della sola turbolenza; questa fase non è influenzata dalle caratteristiche e dalla tipologia di inquinante; tuttavia, nel caso di particolato solido, assume rilevanza il processo di sedimentazione, attraverso cui la particella è soggetta da un lato alla forza di gravità che la spinge verso il basso, e dall'altro alla resistenza al moto determinata dall'attrito viscoso che nel caso di particolato solido diventa trascurabile, facendo prevalere la componente gravitazionale.

Questo è il motivo per il quale tendenzialmente le particelle più grandi tendono a sedimentare prima rispetto a quelle fini. Le considerazioni sulla velocità di sedimentazione saranno approfondite in seguito.

2. Stadio superficiale. Una volta in prossimità della superficie, l'inquinante diffonde entro il *quasi-laminar sublayer*, ovvero lo strato d'aria di circa 1 mm di spessore che sovrasta l'interfaccia aria-suolo. In questo caso, per gli inquinanti gassosi assume rilevanza il processo di diffusione molecolare; invece, per le particelle solide, sono fondamentali i movimenti browniani.

3. Stadio di trasferimento superficiale. Questa fase riguarda prevalentemente gli inquinanti di natura gassosa ed è fortemente influenzata dalla tipologia di inquinante, dalla natura del suolo e dal grado di compatibilità nell'interazione tra i due.

Partendo dalla definizione di deposizione come un flusso negativo di inquinante, si può calcolare la quantità di particolato che si deposita al suolo attraverso la seguente relazione:

$$F = -v_d \cdot C(z) \quad [\text{g/m}^2\text{s}]$$

Dove v_d è la velocità di deposizione [m/s] e $C(z)$ è la concentrazione di inquinante misurata ad un'altezza di riferimento [g/m³].

La velocità di deposizione che compare nella formula precedente racchiude tutti i parametri complessi, per cui è fondamentale analizzare quali fattori entrano in gioco nella definizione di questa grandezza.

La velocità di deposizione secca può essere stimata attraverso un'analogia elettrica, per cui

il trasporto dell'inquinante si può assumere governato da tre resistenze in serie e una in parallelo:

- La resistenza aerodinamica, r_a , che descrive l'effetto della turbolenza e tende a valori bassi durante il giorno e a valori più alti durante la notte, indipendentemente dal tipo di inquinante analizzato;
- La resistenza del quasi-laminar sublayer, r_b ; questa è direttamente correlata alle proprietà molecolari dell'inquinante e non varia;
- La resistenza di Canopy, r_c , dovuta all'interazione tra inquinante e superficie;
- La resistenza in parallelo virtuale data dal reciproco della velocità di sedimentazione v_s .

La velocità di sedimentazione gravitazionale è una componente fondamentale soprattutto per descrivere la deposizione secca di particelle grossolane. Essa è data da un equilibrio dinamico tra le forze verticali che agiscono sulla particella in caduta all'interno di un fluido in quiete:

$$m_p \frac{dv_s}{dt} = m_p g + F_{Drag}$$

In cui la forza di caduta della particella è data dalla somma tra la forza di gravità ($m_p g$) e la Forza di Drag che rappresenta l'azione della viscosità tra la superficie della particella e il fluido in cui questa è immersa (Formula xx).

$$F_{Drag} = \frac{3\pi\mu D_p}{C_c} v_s$$

Dove μ è la viscosità dinamica del fluido, D_p è il diametro della particella in caduta, C_c è lo *slip correction factor* che tiene conto dello scorrimento del fluido sulla superficie della particella.

Da questa equazione di equilibrio si ricava la velocità di sedimentazione tramite la legge di Stokes, valida per particelle di diametro inferiore a 50 μm :

$$v_s = \frac{D_p^2 \rho_p g C_c}{18\mu}$$

Dove ρ è la densità della particella.

In generale, r_a e r_b sono influenzate dall'azione del vento, dalla copertura vegetale del suolo e dalla stabilità atmosferica e tendenzialmente la loro somma è inversamente proporzionale all'intensità del vento e all'altezza della vegetazione. In condizioni di atmosfera stabile, la deposizione secca è dominata dalla resistenza aerodinamica.

La resistenza ha le dimensioni dell'inverso di una velocità, per cui imponendo le corrette

condizioni al contorno è possibile risalire al valore della velocità di deposizione secca per i gas e per il particolato solido.

Facendo riferimento a un inquinante di natura gassosa si può assumere che la v_s sia trascurabile per cui la velocità di deposizione secca per un gas è pari a:

$$v_d = \frac{1}{r_{tot}} = \frac{1}{r_a + r_b + r_c} \quad [\text{m/s}]$$

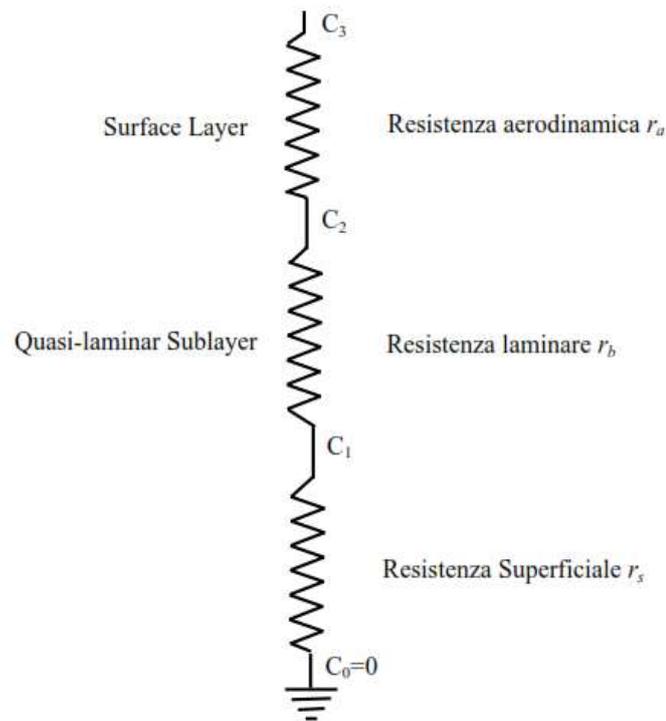


Figura 2.3. Analogia elettrica per la deposizione secca di un gas (R. Sozzi 2003).

Si evidenzia come un gas inerte, come il monossido di carbonio, presenta una v_d dell'ordine di 10^{-3} - 10^{-4} cm/s, mentre un gas più attivo dal punto di vista chimico e biologico raggiunge valori di v_d pari a 0.3-3 cm/s.

Nel caso di particolato solido, la dimensione e la densità influenzano maggiormente la deposizione e la r_c si considera trascurabile in quanto in questo caso si assume che le particelle aderiscano sulla superficie e non vi sia alcun contributo relativo allo stadio di trasferimento superficiale.

L'equazione per il calcolo della velocità di deposizione secca del particolato solido è la seguente:

$$v_d = \frac{1}{r_{tot}} = \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b v_s} + v_s \quad [\text{m/s}]$$

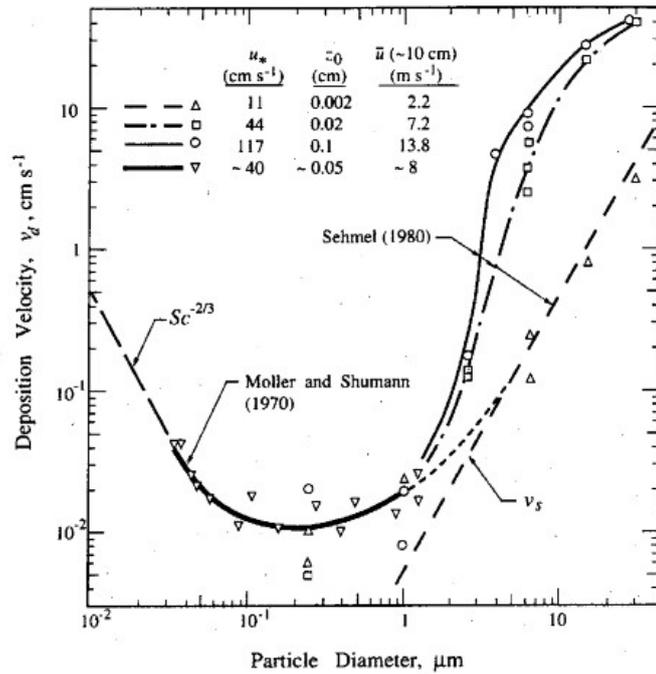


Figura 2.4. Velocità di sedimentazione e deposizione per il particolato (R. Sozzi 2003).

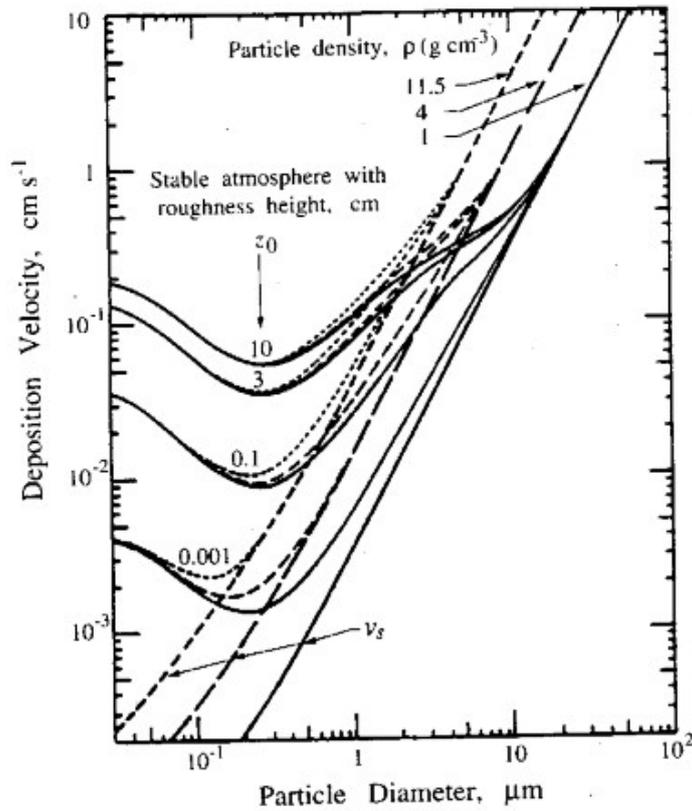


Figura 2.5. Velocità di deposizione del particolato in funzione della granulometria (R. Sozzi 2003).

Dalle *Figure 2.4 e 2.5*, si nota come la velocità di deposizione raggiunga un minimo in corrispondenza di particelle di dimensione tra 0.1 e 1 μm , in quanto queste vengono trasportate all'interno del substrato quasi laminare per effetto dei moti browniani, analogamente al comportamento dei gas. All'aumentare delle dimensioni delle particelle, il moto browniano rallenta fino ad annullarsi del tutto per particelle di diametro superiore a 0.05 μm .

Diversamente, particelle di diametro maggiore a 2 μm sono fortemente influenzate dalla gravità, in quanto la velocità di sedimentazione aumenta con il quadrato del diametro della particella.

Le particelle le cui dimensioni rientrano nell'intervallo 0.05 – 2 μm non sono molto soggette alla deposizione secca e costituiscono l'aerosol che tende ad accumularsi in atmosfera; queste vengono rimosse solitamente tramite processi di deposizione umida o attraverso la formazione della nebbia.

2.2.2. Deposizione umida

La deposizione umida indica tutti i processi di rimozione degli inquinanti dall'atmosfera che si verificano per effetto dell'interazione con l'acqua, sia essa in fase liquida o solida. Generalmente, il particolato viene intercettato dalle idrometeore atmosferiche, quali pioggia, neve, nebbia e nubi, e poi trasportato al suolo.

La deposizione umida, in via generale, può essere riassunta in tre fasi principali:

- il particolato presente in atmosfera viene intercettato e inglobato dalle gocce d'acqua;
- le particelle di inquinante vengono trasportate al suolo dalle idrometeore;
- l'inquinante entra a contatto con la superficie terrestre.

Nel caso di particelle gassose, il processo è direttamente legato al grado di solubilità in acqua delle stesse; nel caso di particelle solide, è fondamentale la probabilità di intercettamento tra la sostanza in sospensione e la goccia di pioggia.

I principali processi di deposizione umida sono:

- Il Rainout, in cui il dilavamento degli inquinati avviene direttamente all'interno delle nuvole che li hanno intercettati.
- Il Washout, nel quale il dilavamento avviene nella porzione di atmosfera compresa tra le nubi e il suolo ed è direttamente dovuto alla presenza di pioggia o neve.

Come per la deposizione secca, anche quella umida genera un flusso negativo non nullo di inquinanti verso la superficie terrestre; tuttavia, in questo caso, l'elemento fondamentale è la presenza di acqua meteorica che intercetta le particelle disperse in atmosfera.

Si sottolinea che il processo di deposizione umida, anche se è caratterizzato da una velocità di rimozione maggiore rispetto all'equivalente secco, risulta più complesso a causa della presenza della fase acquosa e delle trasformazioni fisiche e chimiche che si verificano all'interno e all'esterno delle nubi (*Figura 2.6*).

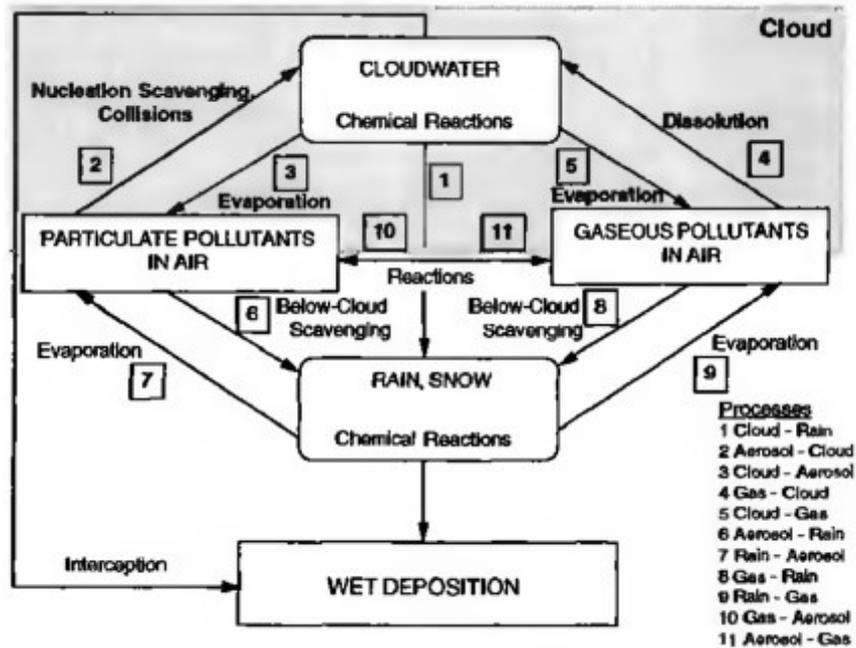


Figura 2.6. Schema riassuntivo dei principali processi chimico-fisici che si verificano all'interno e al di sotto delle nubi.

Durante la deposizione umida quindi la goccia cade attraverso l'atmosfera, intercetta l'inquinante sospeso in aria e lo ingloba. Quando ciò accade si può ipotizzare che la particella d'acqua percorra per unità di tempo una traiettoria pari ad un cilindro di volume $\frac{\pi D_d^2 U_t}{4}$.

Assumendo che il particolato abbia un diametro D_p , si verifica collisione quando il centro della particella è contenuto in un cilindro di diametro pari alla dimensione della goccia (D_d) più quella della particella (D_p).

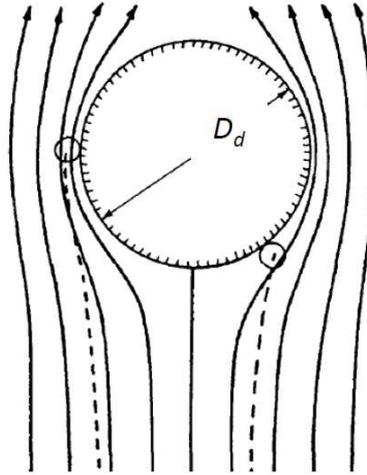


Figura 2.7. Campo di moto di una goccia in caduta.

Ovviamente sia la goccia d'acqua che la particella hanno una velocità di caduta; pertanto, se la dimensione della particella non è trascurabile rispetto a quella della goccia, si deve considerare la differenza di velocità tra le due sostanze e il "Volume di collisione" diventa:

$$\pi(D_d + D_p)^2 \frac{[U_t(D_d) - v_t(D_p)]}{4}$$

Nella realtà, le linee di flusso tendono a modificarsi in funzione dell'aerodinamica della goccia in caduta, per cui bisognerebbe tenere in considerazione questa alterazione del campo di moto nell'intorno della goccia.

2.2.2.1. Coefficiente di scavenging

Il flusso di gas e particelle al suolo F_{wet} può essere descritto tramite il prodotto tra il rapporto di dilavamento (Scavenging ratio) Λ e la concentrazione, integrando sulla verticale:

$$F_{wet}(x, y) = \int_0^{\infty} \Lambda \cdot C(x, y, z) \cdot dz$$

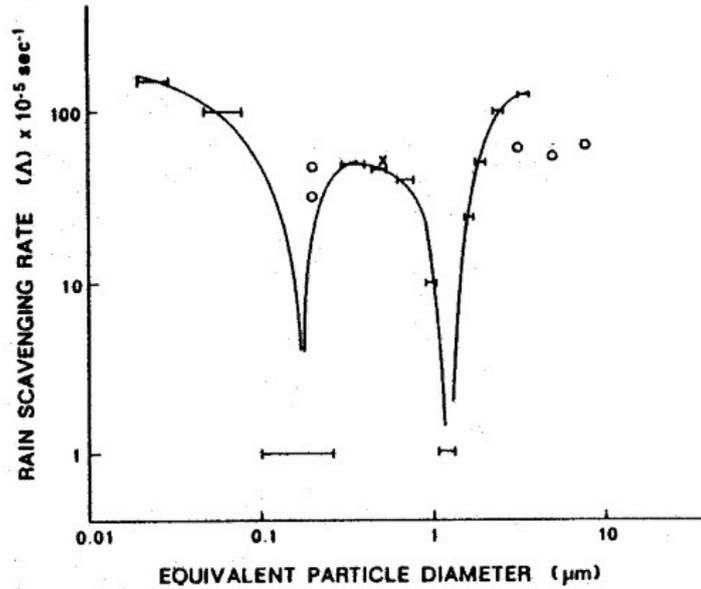


Figura 2.8. Rapporto di dilavamento in funzione del diametro delle gocce di pioggia e dell'intensità di precipitazione per il particolato (R. Sozzi 2003).

McMahon e Denison (1979) hanno individuato la seguente formula per la stima del rapporto di dilavamento:

$$\Lambda = \lambda \cdot J_0$$

dove J_0 è l'intensità di pioggia (mm/h) e λ è il coefficiente di Scavenging che dipende dal tipo di precipitazione (neve, pioggia) e dalle proprietà dell'inquinante (solubilità e reattività per sostanze gassose e granulometria per particolato solido). Si riportano in *Tabella 2.4.* i valori del coefficiente di Scavenging per il particolato.

Tabella 2.4. Coefficiente di scavenging per il particolato in caso di pioggia. Tali valori si riducono di un terzo in presenza di precipitazioni nevose.

Inquinante	λ [s mm/h]
SO ₂	1.0×10^{-4}
Particolato > 10 μ m	2.2×10^{-4}
Particolato fine	0.3×10^{-4}

Dal prodotto tra la probabilità di collisione della goccia con la particella e l'efficienza di inglobamento, descritta dal coefficiente di scavenging, si ricava l'efficienza totale del processo (Figura 2.9).

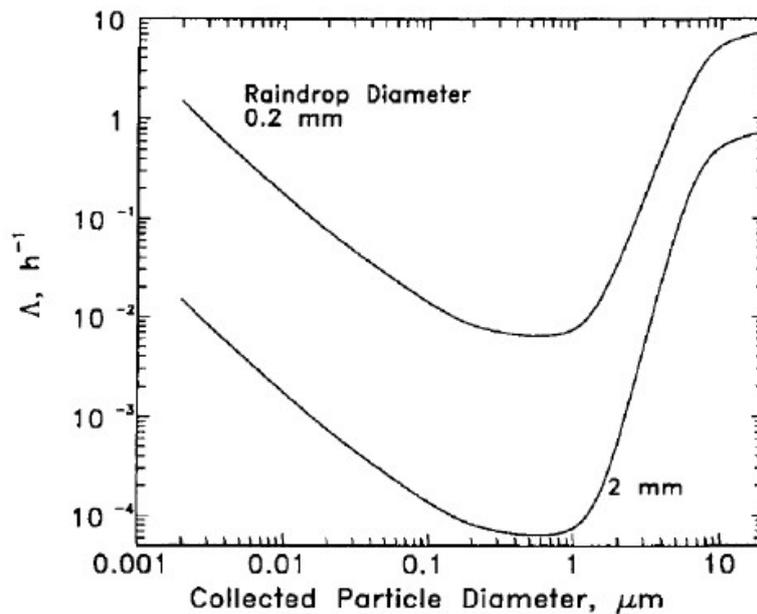


Figura 2.9. Coefficiente di scavenging al variare del diametro delle gocce.

La curva dell'efficienza ha un minimo in corrispondenza di particelle di dimensione compresa tra 0.1 e 1 μm . Il massimo dell'efficienza di rimozione per particelle di dimensioni maggiori è immediatamente intuibile che derivi dalla probabilità maggiore di essere intercettate dalle gocce d'acqua; invece, l'andamento crescente della curva per valori di diametro delle particelle inferiori a 0.1 μm , è dovuto al moto browniano la cui intensità aumenta notevolmente al diminuire della granulometria. La presenza del moto browniano, caotico e casuale, determina un aumento della probabilità di collisione con conseguente incremento dell'efficienza del processo di deposizione umida.

Inoltre, dall'immagine si nota che data una certa intensità di precipitazione, si ha un'efficienza maggiore per diametri delle gocce minori.

2.2.2.2. Coefficiente di washout

Il metodo del washout (valido anche per il rainout), invece, stima l'entità della deposizione umida tramite un equilibrio dinamico tra la quantità di inquinante trasferito nella fase liquida e quello che permane in fase gassosa. Il flusso di inquinante rimosso quindi sarà pari a:

$$F_w = -C_0 W_r J_0$$

Si definisce il rapporto di washout W_r come:

$$W_r = \frac{K_0}{C_0}$$

dove C_0 è la concentrazione di inquinante in aria e K_0 la concentrazione di inquinante in fase liquida.

È possibile quindi definire il valore di velocità di deposizione umida v_{wet} :

$$v_{wet} = W_r J_0$$

Si nota che generalmente questa è di almeno due ordini di grandezza maggiore rispetto alla velocità di deposizione secca.

Per i gas non reattivi, il rapporto di washout si assume pari all'inverso della costante di Henry, in quanto si raggiunge l'equilibrio tra la fase gassosa e la fase liquida.

2.3. Caratteristiche della pioggia

Le precipitazioni sono degli eventi atmosferici la cui formazione deriva dal meccanismo di raffreddamento delle masse d'aria umida che per effetto del gradiente di densità tendono a spostarsi verso l'alto. I fenomeni alla base della formazione della precipitazione sono principalmente la condensazione e la coalescenza, ovvero rispettivamente la transizione da vapore acqueo a acqua liquida e l'aggregazione delle gocce.

Le precipitazioni atmosferiche venivano generalmente misurate tramite pluviometri e pluviografi, strumenti captatori in grado di misurarne la quantità di pioggia che cade al suolo. La necessità di una caratterizzazione più completa delle precipitazioni ha portato all'adozione di misurazioni radar e disdrometri. Questi ultimi hanno la capacità di fornire informazioni dettagliate sull'evento di pioggia come la riflettività radar, l'energia cinetica ed informazioni discrete sulla dimensione e sulla velocità di caduta delle gocce.

Queste informazioni aggiuntive risultano fondamentali in diverse applicazioni, come lo studio dell'erosione del suolo o la determinazione dell'efficienza di scavenging dell'atmosfera da parte della pioggia.

2.3.1. DSD (Drop Size Distribution)

Le misurazioni della distribuzione delle dimensioni della goccia (DSD) hanno un'ampia gamma di applicazioni in idrologia, meteorologia e discipline correlate. Queste, rappresentano uno dei principali strumenti per la caratterizzazione della microstruttura della pioggia. La DSD è definita come la distribuzione del numero di gocce di pioggia in funzione della loro classe di diametro. Sono stati fatti numerosi studi riguardanti la forma analitica di questa distribuzione con l'obiettivo di parametrizzare la DSD.

2.3.1.1. Parametrizzazione della DSD

Il primo studio sulla parametrizzazione delle distribuzioni delle dimensioni delle gocce risale alla trattazione di Marshall e Palmer (1948). Dal confronto di diverse serie di dati, per la prima volta viene proposta una legge esponenziale in grado di fittare i dati: Questa formulazione viene espressa in funzione del diametro delle gocce D :

$$N_D = N_0 e^{-\Lambda D}$$

Dove N_0 rappresenta l'intercetta, ovvero il valore di N_D quando il diametro è uguale a zero, ed è uguale a 0.08 cm^{-4} . Invece Λ è il parametro di pendenza, ed è funzione dell'intensità di

precipitazione R:

$$\Lambda = 41R^{-0.21}$$

Dove Λ è misurato in cm^{-1} , mentre R è espresso in mm/h.

Tuttavia, tale funzione è in grado di fittare bene i dati solo per diametri maggiori di 1.5 mm.

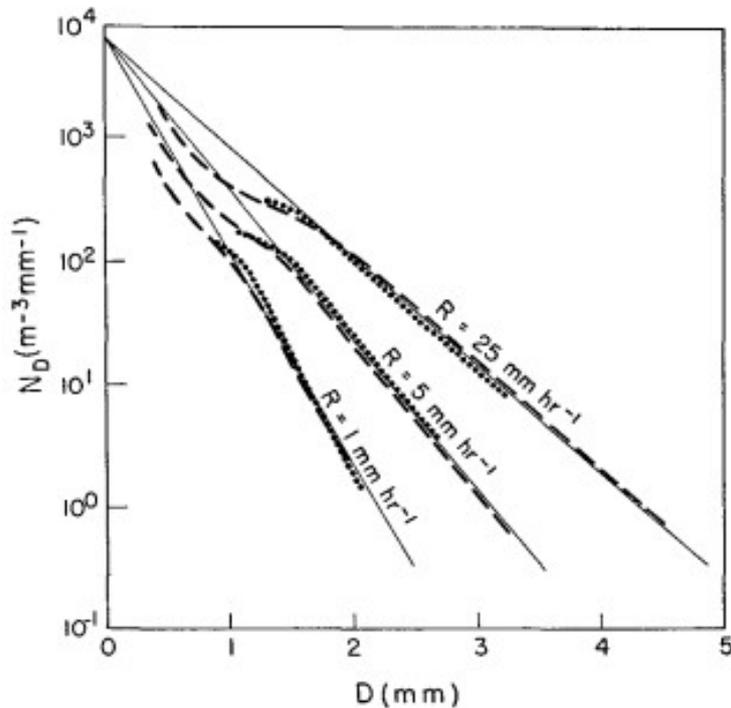


Figura 2.10. Distribuzioni dimensionali di gocce misurate (pallini pieni) confrontate con le curve di best fit esponenziale di Marshall-Palmer (linee continue) e altre distribuzioni (linee tratteggiate) (Marshall and Palmer 1948).

Successivamente, Ulbrich (1983) propose una funzione gamma in grado di fittare la DSD delle gocce:

$$N_D = N_0 D^m e^{-\Lambda D}$$

Dove m rappresenta il parametro di forma; questo può essere visto come una deviazione della distribuzione gamma dalla distribuzione esponenziale. Infatti, l'equazione di Ulbrich non è altro che la generalizzazione della formulazione di Marshall-Palmer.; quando il parametro di forma è uguale a zero, la DSD gamma converge con la DSD esponenziale.

I parametri positivi di m indicano la forma concava verso il basso dello spettro della goccia e viceversa.

2.3.2. Velocità terminali

La velocità d'impatto, o l'energia cinetica delle gocce, gioca un ruolo molto importante per molte applicazioni, come ad esempio l'erosione del suolo. Generalmente si assume che le gocce che caratterizzano un evento di precipitazione arrivino al suolo con la loro velocità terminale. Negli anni, sono stati molti gli studi con l'obiettivo di trovare una formulazione semplice in grado di descrivere la velocità terminale delle gocce di pioggia che cadono in atmosfera. Nonostante le molte campagne sperimentali condotte negli anni, ancora oggi non è possibile trovare una formulazione che permetta di determinare in modo univoco la velocità terminale; la problematica principale è legata alla variazione della forma della goccia in funzione del diametro.

In *Tabella 2.5* si riportano alcune equazioni derivanti dagli studi più noti.

Tabella 2.5. Equazioni della velocità terminale

Autore	Velocità terminale	Note
Best 1950	$U_t = 932e^{0.0405z} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{d}{1.77}\right)^{1.147}} \right\}$	$[U_t] = \text{cm s}^{-1}$ $0.3 \leq d \leq 6.0 \text{ mm}$ $Z = \text{altitudine [km]}$
Atlas et al. 1973	$U_t = 965 - 1030e^{-6d}$	$[U_t] = \text{cm s}^{-1}$ $0.6 \leq d \leq 5.8 \text{ mm}$ $[d] = \text{cm}$
Rogers 1989	$U_t = c_1 d$	$c_1 = 4000 \text{ s}^{-1}$ $0.08 \leq d \leq 1.5 \text{ mm}$
Rogers e Yau, 1989	$U_t = \frac{1}{18} \frac{d^2 g \rho_a}{\mu_a}$	$\mu_a = \text{viscosità dinamica}$ $\rho_a = \text{densità dell'aria}$ $d \leq 0.06 \text{ mm}$
Rogers e Yau, 1989	$U_t = c_2 \left(\frac{\rho_{a,0}}{\rho_a} \right)^{0.5} d^{0.5}$	$c_2 = 1500 \text{ cm}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ $\rho_{a,0} = 1.2 \text{ kg m}^3$ $1.2 \leq d \leq 4.0 \text{ mm}$
Lhermitte 1990	$U_t = 923 \left(\frac{\rho_{a,0}}{\rho_{a,z}} \right)^{0.5} [1 - e^{-(6.8d^2 - 4.88d)}]$	$[U_t] = \text{cm s}^{-1}$ $[d] = \text{cm}$

È possibile notare che queste formulazioni non hanno una validità generale, poiché tendono a stimare bene le velocità delle particelle solo per un dato range di diametri.

Variando il diametro cambia sicuramente il volume della goccia, ma con esso cambia anche la forma. Infatti, in generale, piccole gocce ($d < 0.05$ mm) sono di forma sferica ed il flusso attorno ad esse può essere considerato laminare. In questo caso, la velocità terminale si può ricavare dalla legge di Stokes uguagliando la forza di gravità e la forza di drag :

$$F_g = g \rho_w \pi d^3 / 6$$

$$F_d = 3 \pi d \mu U_t$$

$$U_t = \frac{\rho_w g d^2}{18 \mu}$$

Dove U_t è la velocità terminale di caduta, ρ_w è la densità dell'acqua, g l'accelerazione di gravità, d il diametro delle gocce e μ la viscosità dinamica dell'aria ($\mu = 1.81 \times 10^{-5}$ Pa s alla temperatura di 20°C).

Al contrario, le gocce con dimensione maggiore cadono più velocemente ed il flusso circostante può essere considerato turbolento.

Quindi la legge di Stokes in questo caso non è più valida ($d > 0.1$ mm), poiché la presenza di un campo di moto turbolento tende ad aumentare il contributo della frizione di un fattore:

$$C_t = 1 + 0.16 Re_p^{2/3}.$$

$$Re_p = \frac{\rho_a U_t d}{\mu}$$

Ciò rappresenta un grande problema per il calcolo della velocità terminale, poiché essa è contenuta nel numero di Reynolds; quindi, sono necessarie delle iterazioni per la determinazione della stessa.

Inoltre, le equazioni riportate, non tengono conto dell'altezza necessaria alle gocce per raggiungere la massima velocità.

Le trattazioni di Wang e Pruppacher (1977) dimostrano che le gocce di intermedia dimensione ($2.5 \text{ mm} < d < 5 \text{ mm}$) sono quelle che necessitano di altezze di caduta maggiore per raggiungere la loro velocità terminale. Inoltre, per gocce di forma sferica considerando un regime laminare è stato calcolato il tempo necessario per raggiungere la frazione β della sua velocità terminale:

$$\tau_{\beta} = -\tau_s \ln(1 - \beta)$$

Dove τ_s è la costante temporale che dà informazioni sull'abbattimento delle oscillazioni della goccia e è definito da:

$$\tau_s = \frac{2a^2 \rho_w}{9\mu}$$

Dove a è espresso in cm e μ è la viscosità dinamica dell'aria .

Infine, è stata ricavata la distanza necessaria per raggiungere la frazione β della velocità terminale della goccia:

$$z_{\beta} = -\tau U_t [\ln(1 - \beta) + \beta]$$

2.3.3. Forma delle gocce

Nel corso degli anni sono state fatti molti studi sperimentali sulla variazione della forma delle gocce durante la loro caduta. Beard e Chuang (1987) sostengono che, oltre le caratteristiche dimensionali, i fattori che influenzano la forma delle gocce sono la pressione aerodinamica ed idrostatica, la tensione superficiale, lo sforzo elettrico e la circolazione interna.

In una fase iniziale, le gocce tendono a formarsi con una struttura approssimativamente sferica, dovuta alla tensione superficiale dell'acqua; successivamente, durante la caduta, le gocce subiscono delle deformazioni che modificando la loro forma. L'entità della deformazione dipende fortemente dalla dimensione delle stesse; infatti, le gocce con diametri minori di 1 mm non subiscono grandi deformazioni poiché la tensione superficiale è abbastanza forte da mantenere la forma. Invece, per quelle più grandi, la differenza di pressione aerodinamica attorno alla goccia causa una variazione della forma durante la caduta. Nello specifico si avrà una diminuzione dell'asse verticale ed un aumento dell'asse orizzontale (McDonald 1954, Beard et al 1991), come mostrato in *Figura 2.11*.

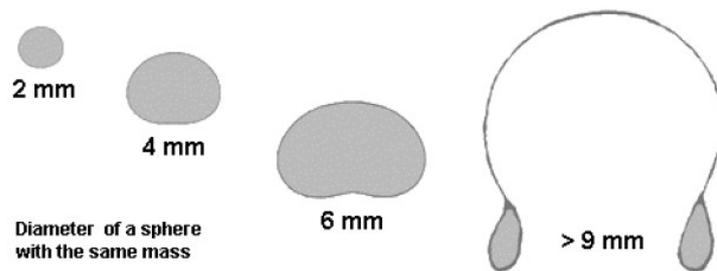


Figura 2.11. Rappresentazione schematica della distorsione delle gocce di pioggia dovuta alla pressione aerodinamica (Fraser 1997).

Si nota che le gocce con diametri maggiori di circa 9 mm tendono a diventare instabili durante la caduta, fino a scindersi in due.

In particolare, le gocce di dimensioni maggiori di 1 mm possono avere diverse forme; ciò è principalmente dovuto alle oscillazioni che esse subiscono. Facendo riferimento alle osservazioni di eventi atmosferici reali, le oscillazioni sono principalmente dovute all'azione del vento, che provoca turbolenza e sforzi di taglio (Tokay e Beard), e alla collisione con altre gocce (Johnson e Beard). Invece, se le osservazioni della forma delle gocce vengono fatte in un ambiente controllato è possibile controllare o limitare questi fenomeni. In questo caso, avremo comunque delle oscillazioni dovute alla formazione artificiale della goccia che però interessano solo la fase iniziale di caduta della goccia poiché vengono poi smorzate dalla dissipazione viscosa.

Facendo riferimento alle campagne sperimentali di Chowdhury et al. (2016), è possibile individuare una zona di caduta, superata la quale la goccia raggiunge la sua velocità terminale e la sua forma di equilibrio.

3. STATO DELL'ARTE

3.1. I simulatori di pioggia

I simulatori di pioggia sono dei dispositivi sviluppati per ricreare l'evento di precipitazione, in modo da studiarne gli effetti nelle varie applicazioni idrologiche. Inizialmente, il loro utilizzo mirava allo studio dei fenomeni di erosione del suolo; infatti, attraverso queste simulazioni è possibile determinare molte caratteristiche del terreno, come il deflusso superficiale ed il tasso di infiltrazione. L'uso di questi dispositivi è stato ulteriormente ampliato negli ultimi anni, includendo anche lo studio dell'abbattimento del particolato atmosferico e il trasferimento dei sedimenti dovuto al deflusso meteorico.

I simulatori di pioggia permettono di generare un evento di precipitazione che sia controllato e adattabile alle specifiche richieste degli studi; infatti, sono in grado di riprodurre delle intensità di precipitazione che vanno dai 2 mm/h fino a circa 150 mm/h.

In questo modo, è possibile simulare diverse situazioni anche raramente riscontrabili nella realtà, come gli eventi naturali di precipitazione molto intensa; ciò permette, ad esempio, lo studio delle variazioni geomorfologiche connesse a tali eventi estremi.

I simulatori di pioggia possono essere classificati in tre categorie:

- **Simulatore di gocciolamento:** dispositivo noto anche con il nome di “gocciolatore”, che sfrutta aghi ipodermici o tubi graduati per produrre gocce con velocità iniziale pari a zero. A causa della ridotta velocità di impatto delle gocce, prende anche il nome di simulatore non pressurizzato. Inoltre, al variare dei diametri dei fori nei tubi e dell'altezza a cui viene installato variano rispettivamente il diametro della goccia e l'energia cinetica. Questo dispositivo permette di ricreare delle gocce con diametro compreso tra 3 e 6 mm, caratterizzate da velocità iniziale molto bassa. Lo svantaggio principale è che necessita di un'altezza maggiore di 10 m affinché le gocce impattino con la loro velocità terminale caratteristica. Un altro vincolo è legato al fatto che esso produce delle gocce con lo stesso diametro, a meno che non si alternino tubi con fori di apertura variabile o aghi ipodermici di diverse dimensioni.

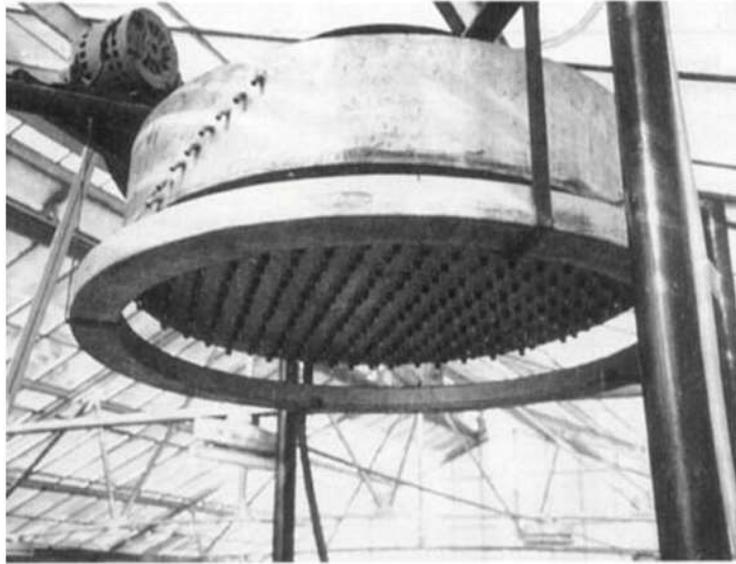


Figura 3.1. Simulatore di gocciolamento (Laws 1941).

- Simulatore pressurizzato: dispositivo che permette di ricreare un evento di precipitazione caratterizzato da gocce di diametro differente. Le gocce vengono rilasciate ad una velocità diversa da zero e riescono a raggiungere una velocità terminale simile a quella teorica, anche se il simulatore non viene disposto ad altezze molto elevate. Meyer e McCune hanno sviluppato un esempio di questo tipo di simulatore e, dopo aver testato diverse tipologie di ugelli, hanno individuato l'ugello 80.100-vejet come il migliore, anche se questo non permette di simulare le caratteristiche di energia della pioggia. Nonostante ciò, i simulatori pressurizzati offrono diversi vantaggi rispetto ai simulatori di gocciolamento in quanto possono essere utilizzati sul campo essendo meno ingombranti; inoltre, consentono di raggiungere la velocità terminale delle gocce senza che sia necessario installarli ad altezze troppo elevate e riproducono un range di intensità di precipitazione maggiore.

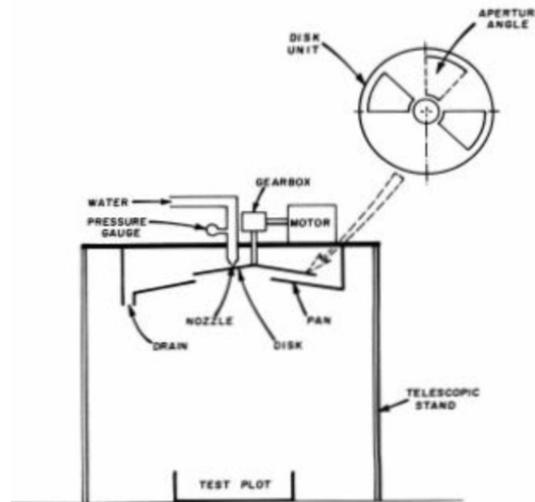


Figura 3.2. Simulatore ad ugelli in pressione (Pall, Dickinson, Beals 1983).

- Simulatori ibridi: dispositivi che utilizzano insieme i principi della simulazione pressurizzata e del gocciolamento. I simulatori ibridi furono testati per coniugare i vantaggi dei due simulatori visti prima. Il primo a utilizzare questo nuovo dispositivo fu Egodawatta, il cui intento era quello di ridurre l'impatto dell'energia cinetica della pioggia. I risultati del suo studio indicavano che era possibile ridurre l'energia cinetica a scapito dell'uniformità della pioggia. Successivamente, altri studiosi cercarono di risolvere i problemi legati a questo dispositivo variando gli ugelli e i tipi di rete. Il simulatore ibrido è il dispositivo più adatto per lo studio dei fenomeni di erosione del suolo.

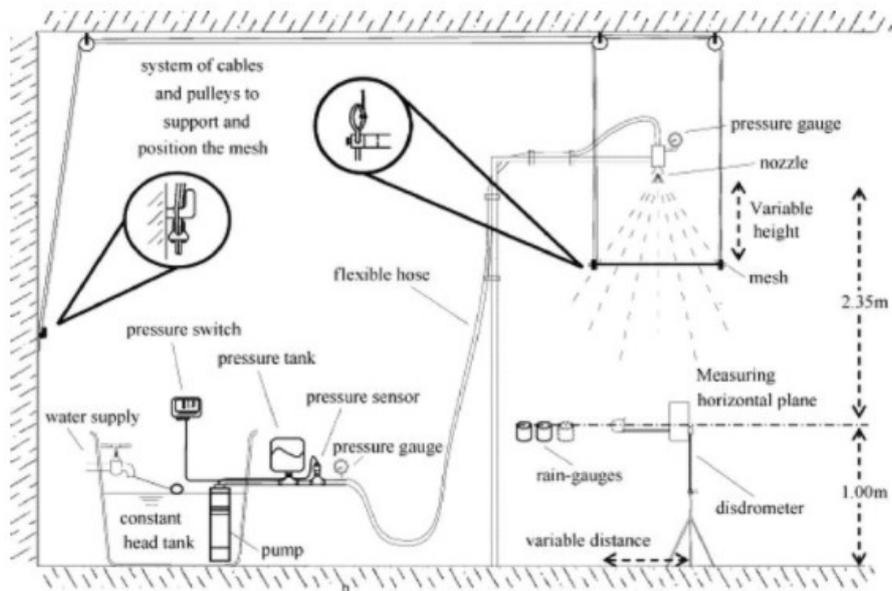


Figura 3.3. Simulatore ibrido (Carvalho et al. 2014).

Un'altra classificazione dei simulatori di pioggia può essere fatta in funzione della loro trasportabilità. Si distingue tra:

- Simulatore di pioggia indoor: dispositivo che prende anche il nome di modello in scala di laboratorio. Questo simulatore permette di modellare al meglio le precipitazioni poiché è situato in un ambiente controllato e non soggetto agli agenti atmosferici.

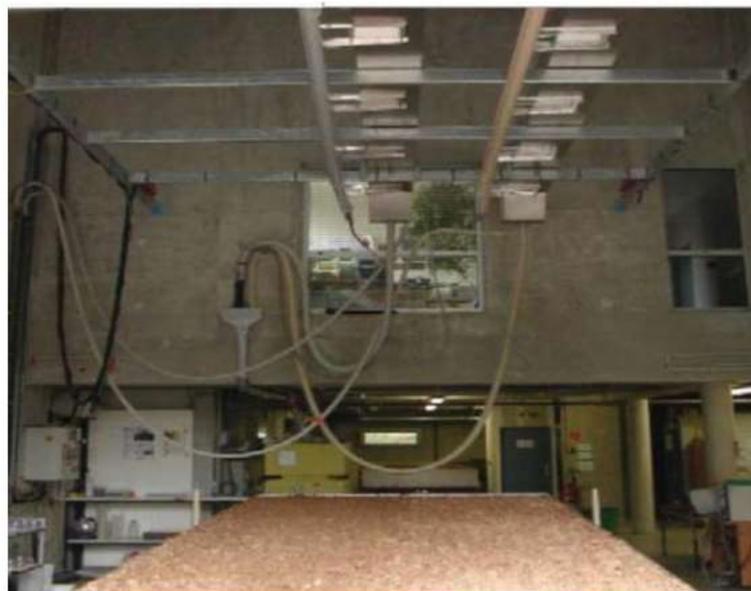


Figura 3.4. Simulatore di precipitazioni indoor.

- Simulatore di pioggia outdoor: I principali vantaggi di questo genere di dispositivo è che può essere utilizzato per lo studio dei parametri di campo necessari per la modellazione idrologica su qualsiasi tipo di suolo, anche coperto da vegetazione. Può essere portatile o meno in funzione dello scopo previsto. Sono stati progettati e realizzati diversi prototipi che hanno offerto delle buone prestazioni. Ad esempio, il prototipo costruito da Battany M, Grismer M., ha restituito una dimensione costante del diametro della goccia di 2.58 mm con intensità di precipitazione variabili da 20 a 90 mm/h. La problematica principale riscontrata negli studi fatti è legata alle interazioni con i fenomeni di precipitazione naturali che hanno portato allo smantellamento degli impianti prima del termine della campagna sperimentale.

3.2. Tecniche di misurazione

Nell'ultimo secolo sono molti gli studi che descrivono le diverse tecniche di misurazione delle gocce di pioggia e con l'evoluzione della tecnologia, anche le tecniche di misurazione sono migliorate negli anni. Inizialmente, venivano utilizzati metodi di misurazione manuali per apprezzare le caratteristiche delle gocce di pioggia, mentre solo recentemente il miglioramento della tecnologia ha permesso di utilizzare tecniche di misurazione ottica. L'obiettivo è quello di caratterizzare la microstruttura della pioggia attraverso la definizione di dimensione, forma, velocità, energia cinetica e DSD delle gocce.

Per ottenere questo risultato, oggi vengono utilizzati i disdrometri e le misurazioni laser, che sfruttano metodi di misurazione automatizzati per determinare le principali caratteristiche della pioggia. Queste, risultano fondamentali ai fini della gestione delle acque piovane e per la comprensione dei fenomeni di abbattimento degli inquinanti presenti in atmosfera.

Nella scelta dello strumento da utilizzare è necessario valutare con che precisione questo determina:

- la dimensione della goccia. La misura deve coprire un ampio range dimensionale, in quanto i diametri delle gocce che caratterizzano un evento di precipitazione possono variare da 0.2 mm fino a 10 mm.
- Il numero delle gocce. Questa, associata alla dimensione, permette di determinare la DSD delle gocce durante l'evento di precipitazione.
- La velocità delle gocce: aspetto fondamentale per la determinazione dell'energia cinetica. Questa misurazione permette di effettuare una pulizia dei dati grezzi ottenuti dallo strumento; infatti, in funzione della dimensione della goccia ci si aspettano delle velocità

terminali simili a quelle teoriche trovate in letteratura. Uno scostamento dalle velocità terminali teoriche può lasciare presagire che le gocce rilevate siano dovute a situazioni anomale.

- L'intensità di precipitazione: caratteristica essenziale per lo studio di fenomeni idrologici, questa rappresenta il punto di partenza per il confronto tra dati ottenuti da diversi strumenti di monitoraggio.

Un aspetto essenziale per riuscire a cogliere istante per istante le caratteristiche dell'evento temporalesco sono le misurazioni in continuo. I nuovi dispositivi sono in grado di acquisire i dati con tempi di integrazione molto piccoli, in modo da condurre delle analisi più approfondite sulle variazioni delle caratteristiche delle precipitazioni.

3.2.1. Metodo manuale

A partire dai primi anni del '900 sono stati effettuati i primi studi riguardanti la caratterizzazione della microstruttura della pioggia; questi si focalizzavano sulla determinazione solo della velocità e della dimensione delle gocce. Il metodo manuale rappresenta il punto di partenza dell'evoluzione delle tecniche di misurazione delle gocce di pioggia.

I principali metodi che sfruttano una misurazione manuale sono:

- Metodo delle macchie:

Questa tecnica, descritta per la prima volta da Lowe, prevede l'uso di carta trattata chimicamente in modo che le gocce, per un breve periodo, possano atterrare su di esso lasciandone l'impronta. Permette di ricavare esclusivamente una misura della dimensione. Diversi studi (Marshall e Palmer) hanno provato a migliorare l'accuratezza di questo metodo testando varie tipologie di carta assorbente. Una grande limitazione di questo metodo, nel caso di campionamenti prolungati nel tempo, è dovuta alla sovrapposizione delle macchie. Gli ultimi sviluppi di questa tecnica sono attribuiti agli studiosi Bowen e Davison (1951) e consistono nel miglioramento del metodo di colorazione della carta assorbente. Venne per la prima volta utilizzata una tecnica semiautomatica che permetteva una registrazione in continuo. I diametri registrati sono stati classificati in cinque range, in modo da ricavare la DSD delle gocce. Nonostante gli sviluppi significativi nella caratterizzazione delle gocce, si è poi scoperto che aspetti legati alla velocità terminale e al mantenimento della temperatura della carta

influenzavano le dimensioni delle macchie.

- Metodo del pellet di farina:

Tecnica sviluppata per la prima volta da Bentley (1904), basata su un principio di funzionamento molto simile al metodo delle macchie. In questo caso, al posto del foglio di carta assorbente viene utilizzata una vaschetta piena di farina. Dopo l'acquisizione dei campioni, la vaschetta viene essiccata in forno per ottenere i pellet di farina. Una limitazione di questo metodo è dovuta alla compattazione della farina che influenza la dimensione del pellet. Infatti, per ovviare a questo problema è necessario un grande numero di acquisizione di campioni, in modo da scartare le misurazioni anomale. Inoltre, è necessario restringere la superficie di prova alla zona centrale della vaschetta al fine di evitare l'acquisizione di gocce dovute ad eventuali schizzi.

La durata del test è solitamente molto breve (1 – 2 secondi) per evitare doppi conteggi delle gocce. I principali progressi di questo metodo sono dovuti a Arnaez et al. (2007) e consistono nello sviluppo di un'analisi digitale delle fotografie per il calcolo della distribuzione dimensionale delle gocce.

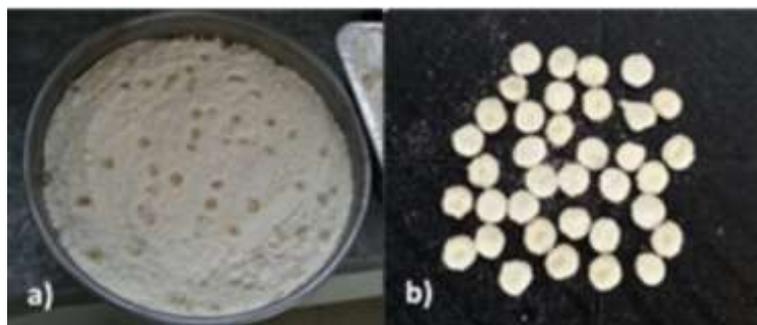


Figura 3.5. Vaschetta riempita con farina (a); Pellet di farina dopo l'essiccazione in forno (b) (Kathiravelu et al. 2016).

- Metodo di immersione in olio:

Tecnica sviluppata da Fuchs e Petrjanoff (1937) che prevede la raccolta di gocce all'interno di un recipiente riempito con olio. Sfruttando la bassa viscosità e le caratteristiche idrofobiche del fluido, è possibile il conteggio e la misurazione della dimensione delle gocce con il supporto di microscopi o sfruttando le tecniche fotografiche.

Sono state testate diverse tipologie di fluidi per ottenere risultati più accurati; gli ultimi sviluppi di questo metodo sono attribuiti a Courshee e Byass (1953), i quali hanno

scoperto che l'utilizzo di due diverse tipologie di oli con diversa densità favorisca la misurazione della forma delle gocce.

3.2.2. Metodo fotografico

Il metodo fotografico rappresenta uno strumento fondamentale, ancora oggi utilizzato, per la misurazione della dimensione e della velocità delle gocce. Mache nel 1904 introdusse questa tecnica, e da allora ha subito notevoli miglioramenti. La prima campagna sperimentale per la misurazione dimensionale delle gocce tramite tecnica fotografica fu condotta da Laws nel 1941. Venne utilizzata una fotocamera fissa montata dietro un disco rotante azionato da un motore sincrono. (Figura 3.6).

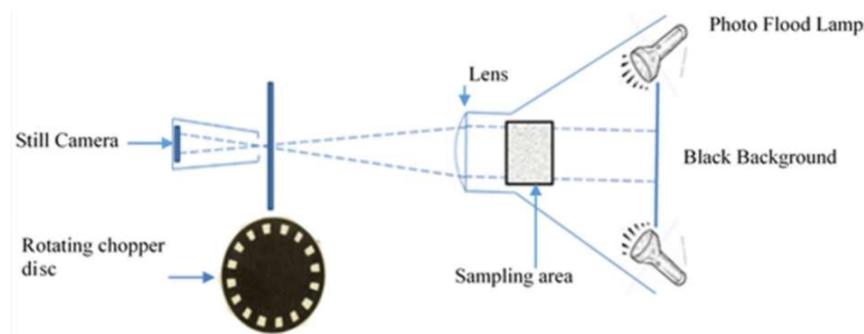


Figura 3.6. Configurazione schematica della fotocamera sviluppata per la misurazione della velocità delle gocce (Mache 1904).

Il metodo fotografico permette misurazioni accurate della velocità terminale, della dimensione e della forma delle gocce dopo una post-elaborazione dei dati ottenuti, ma la sua applicazione è fortemente limitata dalle condizioni al contorno.

Le tecniche fotografiche sono influenzate negativamente dall'infiltrazione di luce che ne limita il suo utilizzo; inoltre, anche le condizioni ambientali, come il vento, possono causare degli errori di misurazione.

3.2.3. Shadowgraph imaging

La tecnica shadowgraph rientra nella famiglia dei metodi ottici e viene spesso utilizzata per lo studio delle particelle gassose e liquide in moto. Questa tecnica si distingue dalle altre poiché risulta molto potente e poco costosa. Inizialmente, veniva utilizzata per uno studio esclusivamente qualitativo della dinamica dei fluidi; oggi è possibile utilizzarla anche per analisi di natura quantitativa di molti fenomeni.

Il principio di funzionamento di questa tecnica sfrutta la differenza del valore dell'indice di rifrazione tra un corpo, oggetto di studio, e ciò che lo circonda. Per aumentare la qualità dei

dati acquisiti si utilizza la retroilluminazione, ovvero si pone dietro il corpo che si vuole osservare una fonte luminosa (Figura 3.7)

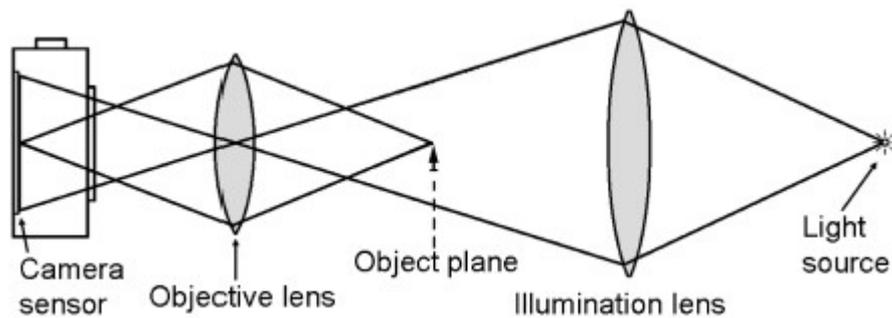


Figura 3.7. Schema generico di un sistema di shadowgraph (Castrejón-García et al. 2011).

In questo modo, si ottiene distingue nettamente l'oggetto dallo sfondo poiché la luce che non interagisce con l'oggetto produce uno sfondo bianco, mentre quella rifratta dall'oggetto si disperde e lo fa apparire scuro. Di conseguenza, è opportuno utilizzare questa tecnica quando vi è una grande differenza di indici di rifrazione tra l'oggetto da osservare ed il fluido in cui è immerso, ad esempio acqua e aria.

Nella maggior parte dei casi, un sistema di shadowgraph può essere diviso in due componenti principali: una fonte di illuminazione e le apparecchiature per la registrazione delle immagini.

La disposizione e la tipologia della fonte di illuminazione è molto importante; infatti, l'obiettivo principale è ottenere un'immagine con lo sfondo che sia il più omogeneo possibile. Affinché sia raggiunta questa situazione ideale, è necessario disporre la fonte luminosa parallelamente al piano di cattura. Spesso per evitare lo sfarfallio della luce, che porterebbe all'acquisizione di immagini buie, viene utilizzato un alimentatore a corrente continua.

Anche la corretta disposizione e la configurazione delle apparecchiature per la registrazione delle immagini sono degli aspetti fondamentali.

Non esiste una configurazione ideale della camera per tutte le acquisizioni, ma devono essere trovati dei compromessi tra le variabili in gioco (sensibilità del sensore, tempo di scatto, profondità di campo etc.) in modo che l'immagine sia adatta allo scopo.

Nonostante questa tecnica risulti molto potente e poco invasiva, è spesso influenzata da errori di misura principalmente collegati alla profondità di campo. Nonostante ci sia un solo

piano a fuoco, si definisce profondità di campo quella regione in cui gli oggetti dell'immagine appaiono ancora sufficientemente nitidi e focalizzati. Quando l'oggetto di studio non ricade al di fuori della suddetta regione, si ottiene una sovrastima del diametro delle gocce non a fuoco.

Le immagini acquisite spesso necessitano di una fase di calibrazione, nella quale si effettua una regolazione del contrasto o della luminosità per semplificare la successiva fase di analisi ed estrazione dei risultati. Per quest'ultima fase, è possibile ricorrere all'utilizzo di svariati software di calcolo, come MatLab, Visual C etc., che permettono di individuare l'oggetto di studio ed estrarre informazioni relative alla dimensione, alla posizione e alla forma. Infine, utilizzando diversi frame della stessa goccia è possibile determinare la sua velocità di caduta.

3.3. Disdrometri

I disdrometri sono degli strumenti meteorologici che permettono di studiare le caratteristiche delle gocce di pioggia attraverso una misurazione automatizzata. Questo metodo di misurazione rappresenta una svolta nello studio della caratterizzazione della pioggia, poiché permette di monitorare in continuo gli eventi atmosferici.

I disdrometri consentono l'acquisizione delle misure accurate della microstruttura della goccia, restituendo il diametro, la velocità di caduta, l'energia cinetica e altri parametri fondamentali come la distribuzione dei diametri della goccia di pioggia.

In commercio esistono diverse tipologie di disdrometri che sfruttano principi di funzionamento diversi; questi possono essere classificati in:

- **Disdrometri d'impatto**

I disdrometri d'impatto sfruttano l'impatto delle gocce per la determinazione dei parametri che descrivono l'evento di precipitazione. Alcuni di essi, mirano alla stima diretta dell'energia cinetica per lo studio di fenomeni di erosione del suolo; infatti, l'energia cinetica è un parametro indicativo della capacità delle gocce d'acqua di spostare le particelle e quindi dare vita a fenomeni di erosione del terreno.

I disdrometri d'impatto possono essere divisi in due categorie:

- Acustici, che permettono di ricavare l'energia cinetica caratteristica dell'evento tramite la conversione di un segnale elettrico; quest'ultimo, viene generato e registrato tramite un sensore piezoelettrico quando si ha l'impatto della goccia. Nonostante le modifiche apportate negli anni, questi dispositivi risultano limitati poiché non è possibile ottenere una risposta acustica uniforme su tutto il diaframma. Un'altra grande problematica di

questi strumenti è legata alle misurazioni durante i temporali con alta intensità di precipitazione, poiché il rumore di fondo non permette di ottenere dei dati affidabili.

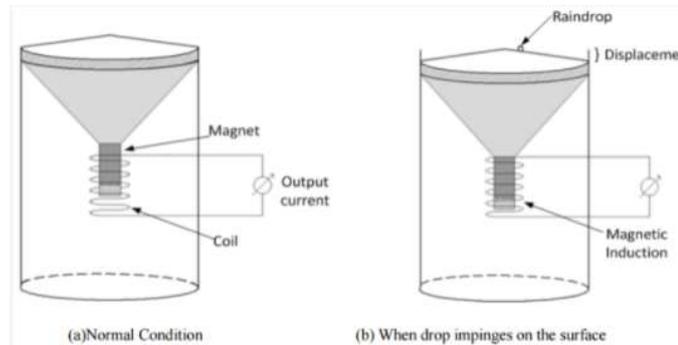


Figura 3.8. Schema di funzionamento dei disdrometri a impatto (Bagree 2012).

- A spostamento: sfruttano l'impatto delle gocce di pioggia per stimare la loro dimensione. Questo avviene tramite un trasferimento per induzione magnetica dell'energia d'impatto che viene convertita in impulso elettrico per poi ricavare la dimensione della goccia.

Per migliorare la stima della dimensione sono stati sperimentati diversi metodi per il trasferimento dell'energia d'impatto, come l'utilizzo di molle elastiche (Bagree, 2012) o di trasduttori di pressione, ma i risultati ottenuti non sono del tutto soddisfacenti.

La soluzione migliore è rappresentata dal disdrometro commerciale di Joss-Waldvogel (*Figura 3.9*) che prevede l'aggiunta di un convertitore digitale. Nonostante ciò, rimangono delle limitazioni nel conteggio accurato del numero e della forma delle gocce, della velocità di caduta e dell'intensità di precipitazione.

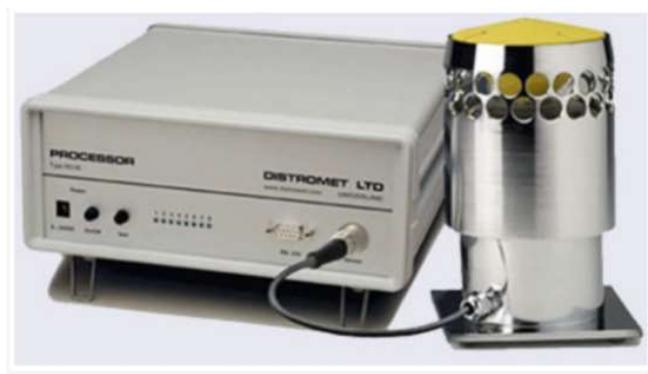


Figura 3.9. Disdrometro da impatto di Joss-Waldvogel.

- Disdrometri ottici:

I disdrometri ottici, al contrario di quelli a impatto, sfruttano tecniche di misurazione non intrusive, che quindi non vanno ad influenzare il comportamento delle gocce nella fase di misurazione. Questi dispositivi hanno risolto la maggior parte delle problematiche legate alla rottura delle gocce e alla formazione degli schizzi.

Le principali tecnologie ottiche sono:

- Diffusione ottica: tecnica che sfrutta un fascio di luce che arriva al ricevitore, dove vengono poi acquisite le misure elettriche. Quando le gocce attraversano il fascio di luce ne provocano la dispersione, proporzionalmente al loro diametro. Il ricevitore converte l'attenuazione della luce dovuta al passaggio delle gocce in impulsi elettrici, attraverso i quali viene infine ricavata una misurazione della velocità di caduta (*Figura 3.10*). È inoltre possibile calcolare l'intensità di precipitazione tramite integrazione sul volume di particelle rilevate. Uno dei principali errori di misura di questo strumento è legato alla sovrastima del volume precipitato dovuto alle gocce coincidenti che vengono considerate come un'unica goccia più grande. Questa tipologia di dispositivi è generalmente limitata alla misurazione di gocce di grandi dimensioni.

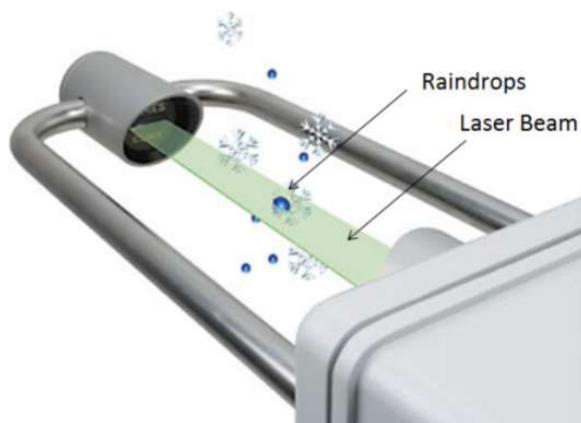


Figura 3.10. Schema del disdrometro ottico.

- Imaging ottico: le tecniche più recenti suggeriscono l'utilizzo di due videocamere che permettono di rilevare due esposizioni della goccia nello stesso fotogramma. Dall'analisi delle immagini acquisite è possibile ottenere la dimensione, la forma, l'inclinazione, la velocità di caduta e la velocità orizzontale di ogni singola goccia. Questa tecnica permette inoltre di misurare accuratamente l'intensità di precipitazione e la DSD delle gocce.

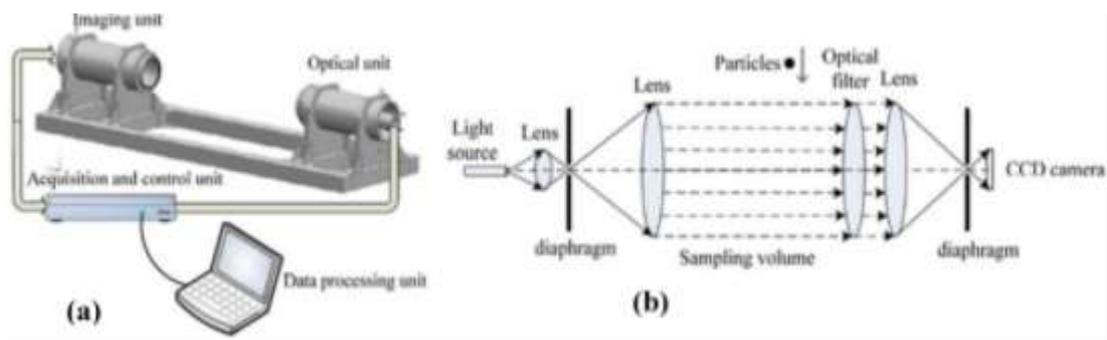


Figura 3.11. Configurazione video (a); Schema del processo di imaging (b) (Nešpor et al. 2000).

3.4. Pluviometri

Il pluviometro è il dispositivo in assoluto più semplice ed efficace in grado di misurare la quantità di pioggia che cade al suolo. La sua origine risale al XV secolo ed era costituito da un recipiente tarato nel quale era possibile leggere il livello raggiunto dall'acqua precipitata. Fino a 20 anni fa non era possibile indagare l'evoluzione dell'intensità di precipitazione nel tempo, poiché era richiesta una lettura manuale e lo svuotamento giornaliero del contenitore. Negli anni questo strumento ha subito numerose modifiche, in modo da rendere la lettura automatizzata e ridurre l'influenza da errori, ma il principio di funzionamento rimane lo stesso. I primi sistemi di registrazione dei dati sfruttavano l'utilizzo di un pennino che una volta raggiunto un volume standard, tipicamente di 0.2 mm, segnava un trattino su un rullo di carta che ruotava. Oggi, quasi tutti i pluviometri possiedono un sistema di registrazione automatico che consente di inviare i dati rilevati tramite rete telefonica ad un database centrale.

L'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) classifica le tipologie di pluviometri in 3 categorie: a sifone, a bascula ed a peso.

I primi due sono in grado di effettuare le misurazioni solo della pioggia, mentre il pluviometro a peso è adatto a tutti le tipologie di idrometeore. Il pluviometro a sifone è costituito da un contenitore all'interno del quale viene accumulata la pioggia; tramite l'utilizzo di un galleggiante è possibile determinare la quantità di pioggia caduta nel tempo. I pluviometri a bascula sono sicuramente la tipologia più utilizzata; sfruttano due contenitori che in funzione del peso raggiunto si svuotano ruotando attorno ad un perno. Solitamente il capovolgimento avviene una volta raggiunto un peso equivalente a 0.2 mm di pioggia; ad ogni svuotamento viene inviato un impulso elettrico all'unità di acquisizione così da

permettere una stima della quantità di pioggia caduta nel tempo.

Infine, il pluviometro a peso misura la quantità di pioggia caduta all'interno del contenitore sfruttando la differenza di peso con la quantità contenuta in precedenza.

4. SET-UP SPERIMENTALE

4.1. Micro set-up

Per la realizzazione di un simulatore di pioggia in scala reale, risulta di fondamentale importanza prevedere uno step intermedio nel quale testare agevolmente i principali descrittori del sistema. Questa fase prevede quindi la costruzione di un set-up in piccola scala (*Figura 4.1*) dove poter riprodurre ed analizzare la dimensione, la forma, la velocità di caduta delle gocce e gli aspetti legati alla dispersione dei contaminanti. Gli elementi principali che lo caratterizzano sono: il box, le fonti di illuminazione, l'ago per la formazione della goccia e le macchine da presa.

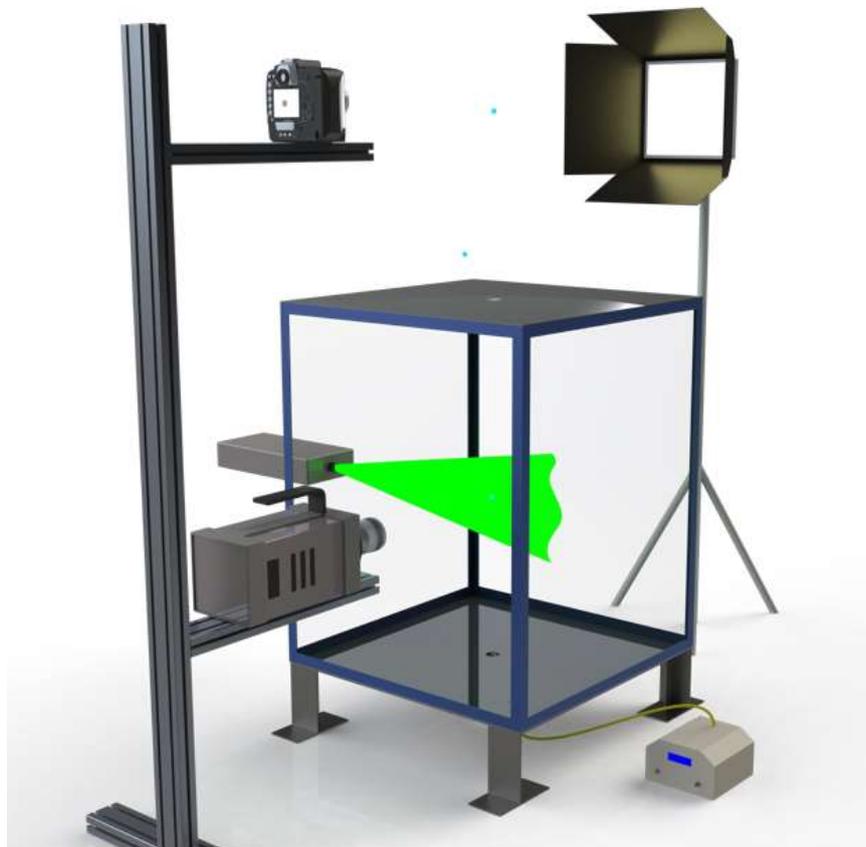


Figura 4.1. Schema rappresentativo del micro set-up.

Il box, di dimensioni $0.5 \times 0.5 \times 1$ m, è stato realizzato con dei pannelli in vetro; questi, rappresentano un elemento imprescindibile in quanto è necessario isolare l'ambiente di prova da quello esterno e allo stesso tempo permettere l'acquisizione di immagini tramite macchine da presa. La problematica principale per l'acquisizione delle immagini è legata alle piccolissime dimensioni degli elementi da indentificare. Per risolvere questo problema

sono state utilizzate delle camere fotografiche molto potenti affiancate da fonti di illuminazione esterna che consentono di migliorare la qualità degli scatti. In funzione della tecnica fotografica adottata sono state utilizzate diverse fonti di illuminazione: un laser per l'osservazione dei contaminanti dispersi e del campo di moto della goccia, e una lampada al LED per investigare le caratteristiche delle gocce tramite tecnica shadowgraph.

La formazione delle gocce è stata realizzata con un ago a sezione orizzontale da 25G, di lunghezza 13 mm; invece, nel simulatore di pioggia sono stati installati degli aghi ipodermici a sezione obliqua da 25G di lunghezza 40 mm. La scelta risulta obbligata poiché gli aghi a sezione orizzontale consentono più facilmente di prevedere la zona di caduta della goccia, aspetto fondamentale per acquisirne le immagini.

In fase preventiva alla realizzazione delle prove è stato verificato che le gocce formate da queste due diverse tipologie di aghi fossero di dimensioni confrontabili. Per effettuare tale confronto, sono state prese in considerazione le caratteristiche dimensionali delle gocce realizzate con l'ago ipodermico a sezione obliqua provenienti da precedenti studi (E. Corte *“Realizzazione di un simulatore di pioggia di laboratorio in scala reale”*).

Tabella 4.1. Diametro della goccia, velocità teorica ed effettivamente raggiunta dalla goccia e la sua velocità terminale (E. Corte “Realizzazione di un simulatore di pioggia di laboratorio in scala reale”).

d_{eq}	U teorica	U reale	U_t
[mm]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,40	7,29	7,36	7,37

Dalla *Tabella 4.1* si evince che il diametro equivalente medio delle gocce realizzate con ago ipodermico da 25G di lunghezza 40 mm è uguale a 2.40 mm. È utile sottolineare che tale misura non dipenda dall'altezza e dalla velocità di caduta, poiché rappresenta il diametro che avrebbe una sfera caratterizzata dallo stesso volume della goccia.

Allo stesso modo è stato calcolato il diametro equivalente delle gocce realizzate con l'ago a sezione orizzontale da 25G e lunghezza 13mm; per farlo è stato utilizzato lo stesso set-up sperimentale in modo da non falsare il confronto.

In *Figura 4.2* viene riportata una immagine della goccia in caduta che ha permesso di calcolarne il diametro equivalente.



Figura 4.2. Esempio di goccia in caduta, formata da ago a sezione orizzontale 25G e da 13mm prima e dopo elaborazione.

Dall'analisi delle immagini ottenute durante la campagna sperimentale è stato stimato un diametro equivalente medio di 2.397 mm. Questo ci permette di affermare che le caratteristiche dimensionali delle gocce ottenute dai diversi aghi testati sono molto simili.

4.1.1. Descrizione delle prove

4.1.1.1. Concentrazione di aerosol

Una fase consistente del lavoro di calibrazione del simulatore di pioggia riguarda la dispersione degli aerosol. L'obiettivo principale è scegliere la tipologia di aerosol in grado di simulare al meglio le condizioni di inquinamento atmosferico e che allo stesso tempo sia facile da analizzare tramite tecnica fotografica. Il primo aspetto è principalmente legato alla granulometria ed alle caratteristiche chimico-fisiche del materiale, mentre il secondo alla capacità del seeding di rifrangere la luce. Tra le varie tipologie di aerosol disponibili sul mercato sono state selezionate due polveri aventi diverse caratteristiche: Dantec HGS10 e ISOFine A2. Le prime sono polveri mono-disperse impiegate come seeding per applicazioni PIV (Particle Image Velocimetry), caratterizzate da sferette di vetro dal diametro medio di 10 μm . La loro granulometria grossolana comporta un tempo di sospensione non molto elevato ma, dall'altra parte, una buona capacità di rifrangere la luce. Essendo tutte particelle dimensionalmente simili non rappresentano al meglio le condizioni reali di inquinamento atmosferico, poiché il particolato è generalmente poli-disperso.

Le ISOFine sono polveri spesso utilizzate per testare le prestazioni dei sistemi di filtrazione. Sono caratterizzate da particelle con una distribuzione di diametri molto ampia: da circa 1 micron fino a 120 μm . L'ampio range dimensionale permette di simulare al meglio il comportamento del particolato atmosferico. Circa l'80% della massa delle particelle è caratterizzata da diametri minori di 40 μm ; quindi, durante la fase di dispersione, le particelle più grosse sedimentano abbastanza velocemente, mentre quelle più piccole, grazie ai moti convettivi, rimangono in sospensione per più tempo.

Per acquisire le immagini delle polveri in sospensione è stata utilizzata una Nikon D810, sulla quale è stato montato un obiettivo Nikon 24 – 120mm. All'inizio di ogni serie di prove, la camera viene installata su un treppiedi in modo da mantenere fissa l'inquadratura; successivamente viene acquisita un'immagine del target millimetrato (*Figura 4.3*), attraverso cui, nella fase di analisi è possibile operare la conversione da pixel a mm.



Figura 4.3. Foto del target millimetrato per la calibrazione delle immagini.

La configurazione della camera non è uguale per tutte le prove, poiché al variare della tipologia di aerosol è necessario trovare un compromesso tra le variabili in gioco, in modo da avere un'immagine nitida e facile da analizzare. Per l'acquisizione delle immagini, la Nikon è stata comandata in remoto per mezzo del software Camera Control PRO 2, permettendo l'acquisizione delle immagini con un intervallo di tempo costante evitando di interagire direttamente sullo strumento e rischiare così di falsare la prova.

Come già detto, la fonte di illuminazione utilizzata per queste prove è un laser. Per ottenere delle immagini nitide delle particelle, è necessario che il fascio di luce sia sul piano di messa a fuoco della camera. Questa condizione non è semplice da raggiungere, poiché presuppone una grande precisione nella disposizione della strumentazione. Inoltre, una volta trovata tale configurazione, basterebbe uno spostamento di qualche millimetro del laser o della camera per uscire dal piano di messa a fuoco e quindi ottenere delle immagini buie.

Per una buona riuscita delle prove, il set-up sperimentale è stato coperto da teli oscuranti; questo rappresenta un ulteriore accorgimento atto a ridurre al minimo i riflessi presenti nelle immagini acquisite.

L'iniezione del particolato all'interno del box rappresenta una fase critica della prova; infatti, l'obiettivo è quello di avere una dispersione uniforme dell'inquinante, in modo che l'immagine acquisita risulti significativa della situazione presente all'interno della camera. Per ottenere questa condizione l'aerosol è stato iniettato all'interno della camera sfruttando

un compressore. L'inflazione ad aria compressa rappresenta una buona soluzione al problema, anche se è necessario tener conto che nei primi momenti successivi all'iniezione, non si ha una condizione rappresentativa della realtà. Infatti, si ha un moto caotico delle particelle ancora influenzate dalla pressione iniziale imposta e solo dopo qualche secondo si raggiunge una condizione ottimale che consente di iniziare l'acquisizione delle immagini (Figura 4.4).

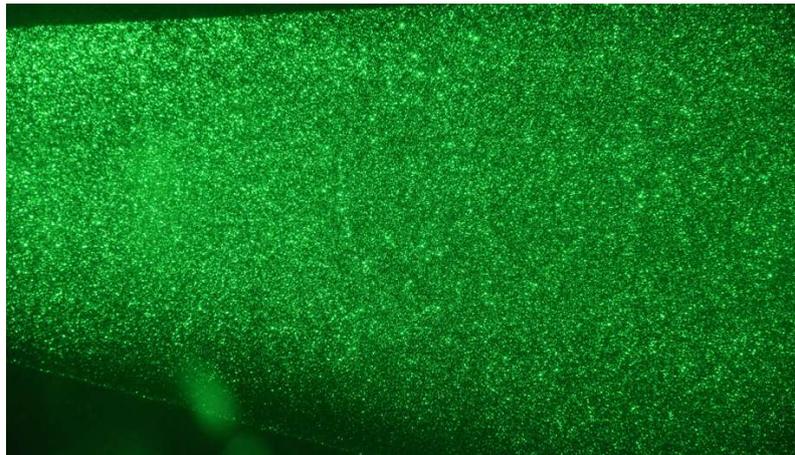


Figura 4.4. Esempio di polveri aerodisperse.

Prima di procedere con la fase di analisi è stata utilizzata l'immagine del target millimetrato per effettuare la conversione da pixel in centimetri; questo procedimento ha permesso di ritagliare per tutte le immagini solo un riquadro di 5 cm x 5 cm che non fosse influenzato da riflessi o anomalie in modo da non falsare i risultati ottenuti. Per la fase di elaborazione e analisi delle immagini è stato utilizzato il software MatLab, in grado, grazie alle sue funzioni, di individuare le particelle presenti (Figura 4.5). Questo risulta fondamentale per monitorare l'andamento delle concentrazioni di materiale aerodisperso all'interno del box.

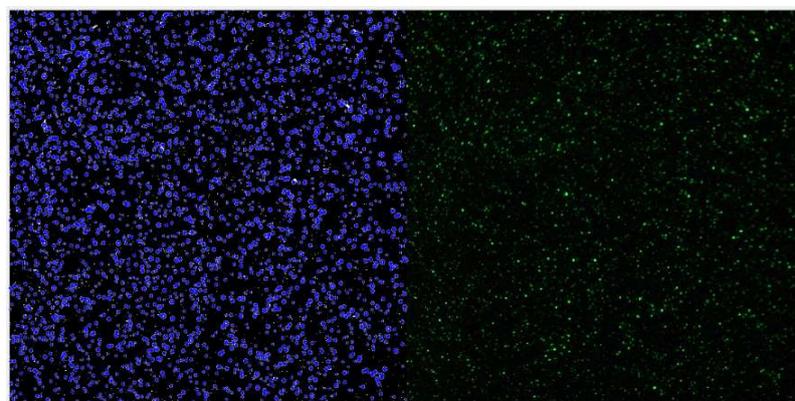


Figura 4.5. Esempio di individuazione delle particelle aerodisperse.

4.1.1.2. Shadowgraph

Nella campagna sperimentale è stata utilizzata la tecnica shadowgraph per la determinazione dei principali parametri della goccia: dimensione, forma e velocità di caduta.

Questo metodo sfrutta la differenza del valore dell'indice di rifrazione tra un corpo, oggetto di studio, e ciò che lo circonda; quindi, si presta perfettamente alla caratterizzazione delle gocce che cadono, in quanto vi è una grande differenza di indice di rifrazione tra acqua e aria.

Le principali componenti per effettuare le prove sfruttando la tecnica shadowgraph sono: una sorgente di illuminazione e una fotocamera ad alta risoluzione (*Figura 4.6*)

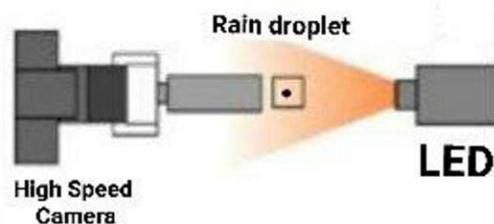


Figura 4.6. Schema di funzionamento tecnica shadowgraph.

La sorgente di illuminazione risulta fondamentale perché, come trattato nel *Paragrafo 3.2.3*, questa tecnica sfrutta la retroilluminazione in modo da evidenziare il contorno del corpo oggetto di studio su uno sfondo bianco. Per ottenere questa condizione è stato utilizzato un faro al LED collegato ad un alimentatore a corrente continua. Quest'ultimo risulta fondamentale per una buona riuscita delle prove poiché permette di prevenire i cali di tensione e quindi l'effetto di sfarfallio della luce.

L'apparecchiatura fotografica utilizzata per queste prove risulta molto più complessa di quella utilizzata nel caso di dispersione di contaminanti. Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata l'High Speed Camera, modello FASTCAM NOVA S16 (Photron), una videocamera molto potente in grado di acquisire 16000 fotogrammi al secondo; ciò risulta fondamentale per lo studio dei corpi ad alta velocità.

Le specifiche tecniche sono riportate in *Tabella 4.2*.

Tabella 4.2. Specifiche tecniche FASTCAM NOVA S16 (Photron).

Tipo di sensore	Proprietary Design Advanced CMOS
Massima risoluzione	1024 x 1024 pixels
Dimensione sensore/ diagonale	20.48 x 20.48mm / 28.96mm
Dimensione pixel	20 μ m x 20 μ m
Massima velocità di cattura	1,100,000fps (128 x 16 pixels)

Per la formazione delle gocce è stato utilizzato un ago G25 a sezione orizzontale di lunghezza 13 mm disposto ad un'altezza di circa 10 m. La scelta di utilizzare un ago a sezione orizzontale è dovuta alla necessità di far cadere la goccia all'interno del foro circolare di diametro 4 cm posto sulla sommità del box.

L'altezza di caduta determina che le gocce raggiungano velocità caratteristiche di circa 7 m/s; ciò non permette di acquisire manualmente le immagini, infatti, è stato pensato un sistema automatico per la cattura dei frame delle gocce. All'interno del box è stato installato un sistema in grado di segnalare il passaggio delle gocce e quindi permetterne la registrazione. La goccia quando cade impatta su una linguetta e tramite l'utilizzo di un microfono vengono registrate le variazioni di suono. Una scheda NI-UBS6353 rileva i picchi, dovuti al passaggio di una goccia, e manda un segnale TTL alla camera avviando la registrazione.

Quest'ultima è dotata di una memoria interna, per cui è in grado di tenere in buffer 5 secondi di video e quindi catturare i frame della goccia in caduta (*Figura 4.7*).

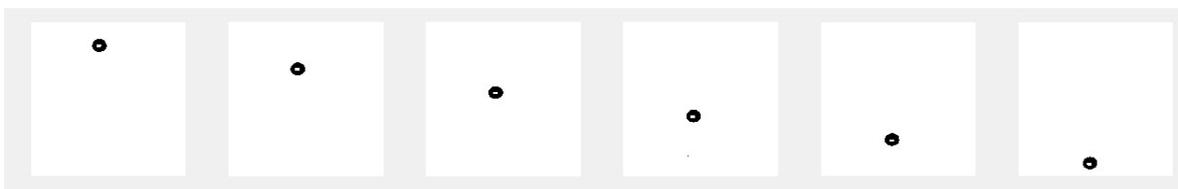


Figura 4.7. Frame della goccia in caduta.

Nella fase di analisi delle immagini, per ottenere i parametri descrittivi della goccia, è necessario rimuovere eventuali cluster, ovvero il rumore presente nello sfondo. Per farlo, risulta opportuno effettuare una binarizzazione dell'immagine ed invertire la maschera; in questo modo otterremo uno sfondo nero con la goccia chiara, come mostrato in *Figura 4.8*.

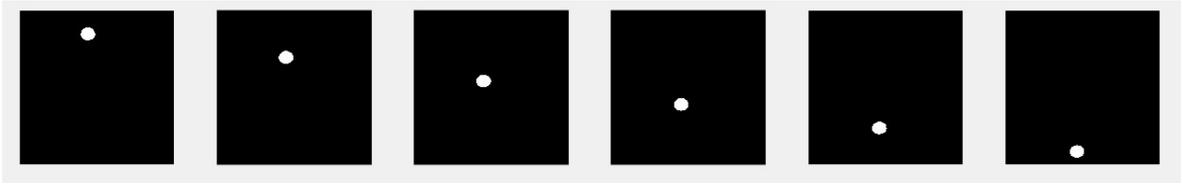


Figura 4.8. Frame della goccia in caduta con maschera invertita.

La fase successiva dell'elaborazione prevede il riconoscimento della goccia (*Figura 4.9*); per farlo esistono diverse funzioni in grado di determinare molte proprietà dell'oggetto, come il diametro equivalente, la posizione del baricentro e la forma.



Figura 4.9. Esempio di individuazione della goccia in caduta.

Una volta determinata la posizione del baricentro nei vari fotogrammi, è possibile calcolare la velocità di caduta della goccia.

4.1.1.3. Campo di moto

Per studiare al meglio le interazioni tra il particolato aerodisperso e l'evento di precipitazione è di fondamentale importanza l'osservazione del campo di moto della goccia che attraversa il contaminante in sospensione. Questa fase risulta inoltre molto importante per la calibrazione del simulatore di pioggia; infatti, attraverso l'osservazione del fenomeno in micro-scala, è possibile comprendere al meglio ciò che avviene in scala reale.

Il sistema per lo studio del campo di moto è molto simile a quelli utilizzati nelle precedenti prove. In questo caso, la superficie superiore del box in vetro è stata sostituita con una forata, come per le prove con il metodo shadowgraph; il foro di 4 cm di diametro è fondamentale per permettere il passaggio della goccia e allo stesso tempo consente una fuga molto piccola di aerosol. Per questo motivo, la prova può essere effettuata in un tempo limitato, ovvero finché la concentrazione di contaminante aerodisperso risulti sufficiente per l'osservazione delle interazioni tra le gocce ed il particolato.

Anche in questo caso per aumentare il contrasto dell'immagine è stata utilizzata come fonte di luminosità il laser, mentre per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata l'High Speed Camera, in grado di catturare diversi fotogrammi della goccia in caduta.

Al contrario di quanto visto nel paragrafo precedente, l'ago è stato installato ad un'altezza di 0.75 m. Questo risulta limitante poiché non viene raggiunta la velocità terminale delle gocce, ma è una costrizione che deriva da vincoli legati alla camera e alla sorgente luminosa; infatti, aumentando l'altezza di generazione della goccia, si raggiungerebbero velocità più elevate e ciò comporterebbe una difficoltà nell'acquisizione delle immagini. Nel caso in cui la goccia cada da un'altezza di 10 m, si raggiungerebbero velocità dell'ordine dei 7.5 m/s; l'HSC ha un tempo di scatto di 1/16000 di secondo, durante il quale l'oggetto compie uno spostamento di circa 0.5 mm. Ciò comporta la creazione di un effetto scia che non permette di individuare la particella.

Un'altra problematica riscontrata è legata all'aerosol da disperdere. Le polveri, essendo costituite da particelle solide, tendono a sedimentare abbastanza velocemente; inoltre, la loro capacità di rifrangere la luce non è sufficiente per osservare il loro moto. Per questo motivo, si è scelto di utilizzare il fumo come inquinante da disperdere in aria; ciò permette di risolvere le suddette limitazioni in quanto esso rimane in sospensione per più tempo poiché è costituito da goccioline d'olio caldo ad alta temperatura che sono soggette ai moti convettivi, e ha un indice di rifrazione più alto.

Per risolvere questo problema bisognerebbe aumentare la potenza del raggio laser, in modo da poter osservare al meglio sia la goccia in caduta che le particelle di aerosol.

In questo modo è possibile osservare il moto della goccia e delle particelle che la circondano (*Figura 4.10*)

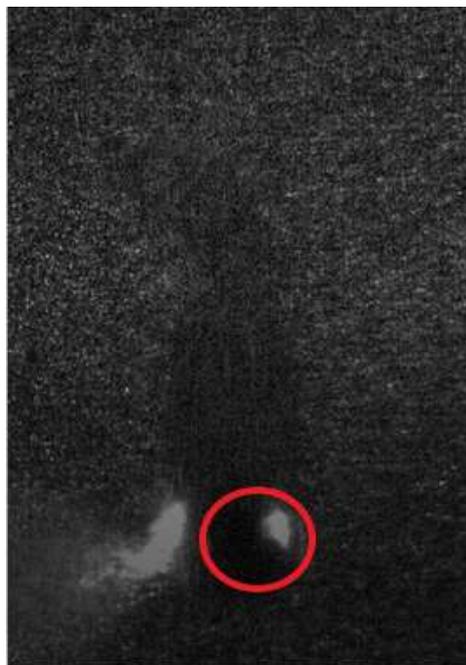


Figura 4.10. Frame del campo di moto della goccia in caduta.

Tuttavia, le condizioni ricreate non sono rappresentative di ciò che avviene nella realtà, in quanto le caratteristiche del fumo sono molto diverse da quelle del particolato atmosferico. Con alcuni accorgimenti, come l'implementazione del fascio luminoso, sarà possibile in futuro condurre delle prove più rappresentative.

4.2. Rainfall Simulator

4.2.1. Descrizione e scelte progettuali

La realizzazione di un simulatore di pioggia in grado di simulare al meglio gli eventi di precipitazione naturali non è una sfida semplice poiché è necessario tener conto di diverse problematiche. Una fase preliminare alla progettazione del prototipo è la valutazione delle numerose proposte trovate in letteratura che riguardano l'utilizzo dei simulatori di pioggia. In queste trattazioni vengono descritte le scelte progettuali adottate ed i risultati ottenuti in termini di caratteristiche della pioggia simulata. Tra le varie soluzioni proposte, sono state prese in considerazione quelle che permettessero di realizzare un sistema in grado di approfondire le problematiche legate alla deposizione umida del particolato atmosferico. Nella progettazione e realizzazione di un prototipo è fondamentale adottare delle scelte progettuali finalizzate al raggiungimento di un preciso scopo, poiché non esistono delle soluzioni che hanno una validità assoluta.

Gli aspetti di cui si è tenuto conto per studiare al meglio l'abbattimento del particolato atmosferico sono: il raggiungimento della velocità terminale delle gocce, l'ottenimento di una distribuzione rappresentativa e una corretta DSD delle gocce.

La prima scelta in fase preliminare riguarda la tipologia di formatore di gocce che permettesse di ottenere le caratteristiche volute. Le principali alternative trovate in letteratura sono il simulatore ad ugelli e quello ad aghi ipodermici.

L'utilizzo degli ugelli permette il raggiungimento della velocità terminale delle gocce da altezze minori, mentre se vengono utilizzati gli aghi è necessario installare il piano di gocciolamento ad un'altezza maggiore per raggiungere le stesse condizioni. Uno dei principali motivi che ha portato alla scelta del simulatore ad aghi ipodermici è legato ad una grande limitazione del sistema ad ugelli; infatti, all'aumentare della pressione imposta si ottiene un aumento significativo dell'intensità di precipitazione ma una diminuzione del diametro delle gocce, il che non risulta rappresentativo di una situazione reale.

Uno dei principali problemi nell'utilizzo degli aghi ipodermici, come già detto, è legato al raggiungimento delle velocità terminali delle gocce. Infatti, come descritto nella trattazione di Regmi e Thomson (2000), nel caso di gocce con diametri equivalenti minori di 4.3 mm, per il raggiungimento del 95% della loro velocità limite, è necessaria un'altezza del piano di gocciolamento di almeno 14 m dal suolo. Nel caso in esame, le dimensioni del laboratorio del Politecnico hanno consentito di installare gli aghi ad un'altezza di 10.4 m. In questo modo,

è stato stimato che si raggiunga il 95% della velocità limite solo per gocce con diametro equivalente minore di 3.9 mm. Questo risultato va visto come un valore indicativo in quanto sono state fatte diverse approssimazioni; nonostante ciò, è possibile affermare che l'altezza del prototipo è sufficiente per l'applicazione da studiare.

Al fine di semplificare la fase descrittiva del sistema di simulazione di pioggia, in *Figura 4.11* viene riportato lo schema generale di funzionamento.

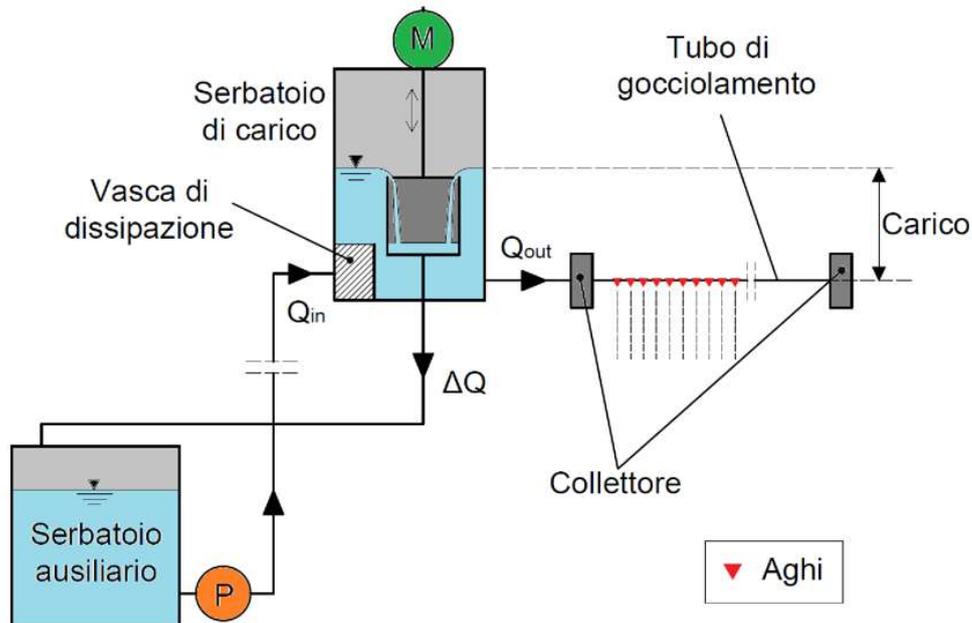


Figura 4.11. Schema di funzionamento del sistema per la simulazione della pioggia.

I principali componenti che caratterizzano il sistema sono:

- il serbatoio di carico;
- il sistema di gocciolamento;
- il serbatoio ausiliario.

Il serbatoio di carico, di dimensioni 0.80 m x 0.90 m x 1.00 m (*Figura 4.12*), rappresenta un elemento fondamentale del sistema di simulazione della pioggia, in quanto permette di regolare l'intensità di precipitazione della prova. È stato progettato in modo da poter garantire un carico costante durante tutta la durata della prova.

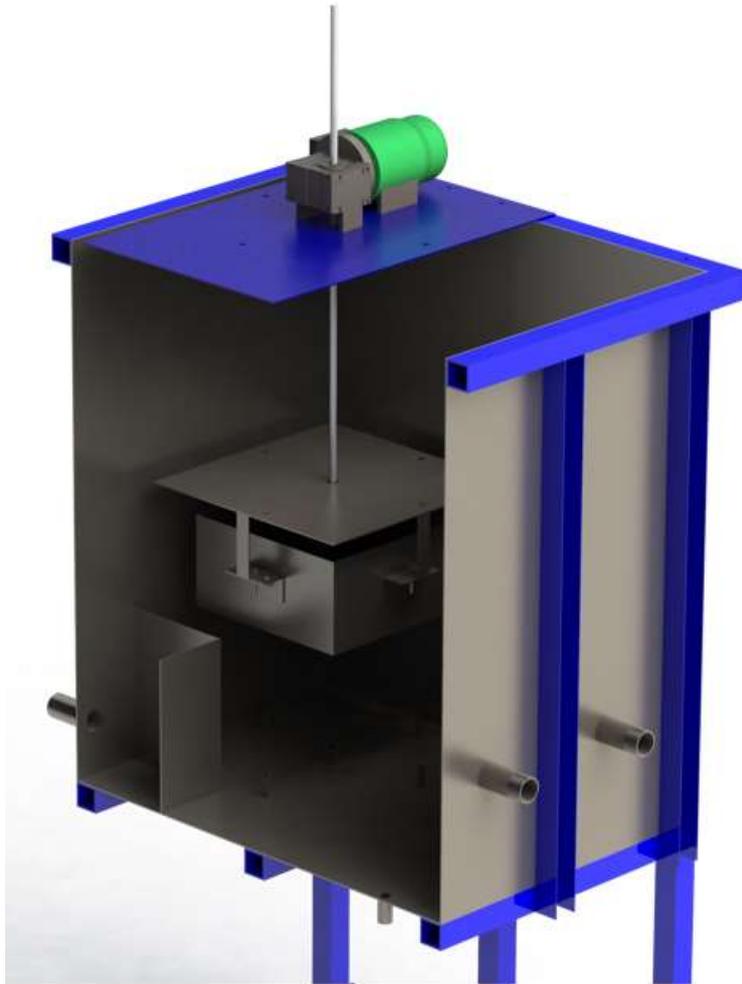


Figura 4.12. Sezione del serbatoio di carico.

Il sistema è costituito da un serbatoio in acciaio inox, al cui interno è installato uno sfioratore a pianta quadrata, agganciato ad un supporto in metallo. Attraverso un sistema di sollevamento a vite senza fine che sfrutta l'azione di un motore passo-passo, il supporto viene manovrato lungo l'asse verticale, variando il livello di pelo libero del serbatoio.

Per il funzionamento di questo sistema è necessario che, durante la prova, il carico all'interno del serbatoio rimanga costante; per cui viene utilizzata una pompa di alimentazione che rifornisce il serbatoio con una portata maggiore di quella esattamente necessaria. Secondo le stime fatte, la massima portata richiesta dal simulatore è di circa 40 l/min; quindi, è stata acquistata una pompa in grado di fornire una portata di 60 l/min.

La portata in eccesso viene sfiorata e inviata, tramite un tubo di scarico, ai serbatoi ausiliari presenti a valle, per poi essere ricircolata all'interno del sistema. Sono stati predisposti due serbatoi ausiliari di volume 1 m³.

La portata in uscita dal serbatoio di carico viene convogliata all'interno del sistema di gocciolamento che è costituito da due collettori, le tubazioni e gli aghi.

I collettori sono delle strutture in acciaio inox a sezione rettangolare di 10 cm x 20 cm e lunghezza di 3.90 m, che sono state forate in modo da ospitare le tubazioni.



Figura 4.13. Collettore con giunzioni in ottone.

Come è possibile osservare in *Figura 4.13*, nei collettori sono state inserite delle guarnizioni di gomma per evitare la fuoriuscita di acqua e delle giunzioni in ottone per permettere l'installazione delle tubazioni. All'estremità è presente una bocca di sfiato che permette la fuoriuscita di aria; la presenza di quest'ultima, risulterebbe catastrofica per la riuscita della prova, in quanto comporterebbe una perdita di pressione.

Al termine del montaggio, i due collettori sono stati installati sulla sommità della torre, leggermente inclinati (0.5%) così da poter permettere la fuoriuscita dell'aria.

La presenza di tre misuratori di pressione, installati nel collettore di mandata, permette di monitorare il carico imposto dal serbatoio di monte e quindi intervenire nel caso in cui ci siano delle perdite.

Le tubazioni in polietilene sono state opportunamente forate in modo da poter ospitare gli aghi ipodermici; la fase di preparazione dei tubi è stata molto lunga poiché è stato necessario maschiare tutti i fori, avvitare i supporti per aghi opportunamente sigillati con del teflon in modo da evitare perdite, e infine installare gli aghi veri e propri (Figura 4.14).



Figura 4.14. Esempio di tubo pronto per l'installazione.

Per garantire una distribuzione ottimale delle gocce, i 141 tubi sono stati installati su tre diversi livelli e gli aghi disposti ad una distanza di 2.5 cm, per un totale complessivo di 17061 aghi; questa configurazione permette non solo di avere una precipitazione molto fitta ma anche di raggiungere intensità di precipitazione adeguate.

La scelta della tipologia di aghi da installare nel sistema non è stata semplice, in passato sono state effettuate delle campagne sperimentali con l'obiettivo di indagare quale fosse l'ago ipodermico in grado di simulare al meglio l'evento di precipitazione. Gli aghi rappresentano forse l'elemento più delicato del sistema, poiché potrebbero facilmente otturarsi a causa della presenza di calcare. Per evitare questa condizione, si è pensato di alimentare il sistema con

la Milli-Q water; questa è un'acqua purificata e deionizzata da un sistema di depurazione. La torre del simulatore (Figura 4.15), una volta completata, verrà chiusa con dei pannelli coibentati di spessore 60 mm a finitura liscia per evitare zone di accumulo dell'acqua.

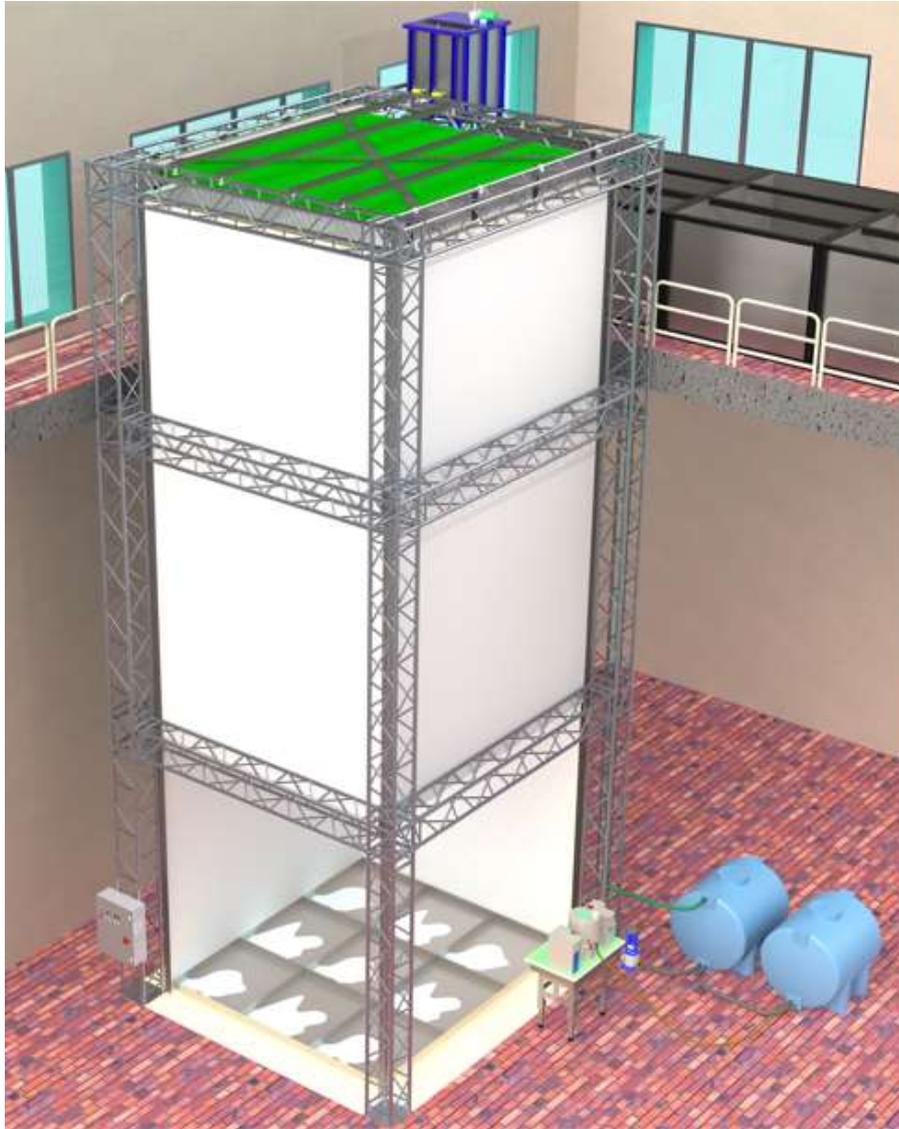


Figura 4.15. Rappresentazione del sistema per la simulazione della pioggia.

4.3. Strumenti di misurazione della precipitazione

Una volta terminata la realizzazione del simulatore di pioggia, è necessario calibrarne il funzionamento in modo da ottenere delle precipitazioni che siano il più simili possibile a quelle reali. A tal fine, è stato installato un disdrometro sul tetto del Laboratorio di Idraulica che nell'ultimo anno ha registrato i dati di precipitazione. L'obiettivo è quello di implementare il sistema in modo tale da ottenere delle distribuzioni di diametri delle gocce paragonabili a quelle registrate.

Il disdrometro utilizzato per il monitoraggio dei dati di precipitazione è un OTT Parsivel 2. Il Particle Size Velocity (Parsivel) è un disdrometro laser-ottico che misura in continuo le velocità di caduta e le dimensioni delle idrometeorie e le cataloga in una delle 32 classi di velocità e dimensione. Questi dati vengono poi registrati all'interno di uno spettro che dà informazioni sul numero di particelle caratterizzate da una determinata classe di diametro e velocità. In questo modo, per ogni classe di intensità di precipitazione è possibile risalire alle caratteristiche dimensionali delle gocce.

Il disdrometro è uno strumento nato per caratterizzare la microstruttura della precipitazione, in quanto dà delle informazioni che non si possono ottenere da altri strumenti di misurazione della precipitazione. Un dato molto interessante che esso restituisce è quello dell'intensità di precipitazione; questa può essere fornita anche da un semplice pluviometro, però il disdrometro permette di ottenere una misura più puntuale e in continuo. Nonostante ciò, non sempre questi dati ottenuti possono essere ritenuti validi. Al fine di validare i dati di intensità di precipitazione restituiti dall'OTT Parsivel 2 è stata installata un pluviometro OTT Pluvio, i cui dati, seppur non puntuali, sono sicuramente più affidabili.

5. RISULTATI

5.1. Micro-setup

Nei successivi paragrafi verranno trattati i risultati delle prove effettuate sul micro set-up costruito per la simulazione delle principali caratteristiche delle gocce di pioggia. Come sottolineato nel *Paragrafo 4.1* questa rappresenta una fase fondamentale al fine di calibrare il funzionamento del simulatore di pioggia in scala reale realizzato nel laboratorio di Idraulica del Politecnico di Torino. Il micro set-up è stato modificato cambiando la fonte di illuminazione e l'apparecchiatura per l'acquisizione delle immagini, in modo da poter condurre al meglio le diverse prove.

I risultati che vengono riportati in questo capitolo rappresentano il punto di partenza per gli sviluppi futuri del lavoro. Infatti, una volta che il simulatore di precipitazione sarà completato, sarà possibile monitorare il funzionamento sulla base di quanto osservato in micro-scala.

5.1.1. Curve di decadimento delle concentrazioni di aerosol

Per monitorare la concentrazione di aerosol disperso sono state realizzate più prove, i cui risultati sono stati poi mediati. È importante sottolineare che i risultati che verranno riportati possono essere affetti da errori; infatti, spesso le particelle sono così piccole che le funzioni utilizzate non sono in grado di individuarle correttamente. Nonostante ciò, questi consentono comunque la comprensione di alcuni comportamenti inaspettati.

Inoltre, per rendere significativa l'analisi, i dati sono stati normalizzati, ovvero il numero di particelle conteggiate è stato rapportato al numero di particelle individuate all'inizio della prova. In questo modo, analizzando le immagini acquisite per ogni prova, è possibile determinare la percentuale di particelle rimaste in sospensione nel tempo.

- Dantec HGS10:

Inizialmente sono state effettuate due prove, di cui si riporta l'andamento della percentuale di particelle in sospensione nel tempo (*Figura 5.1*).

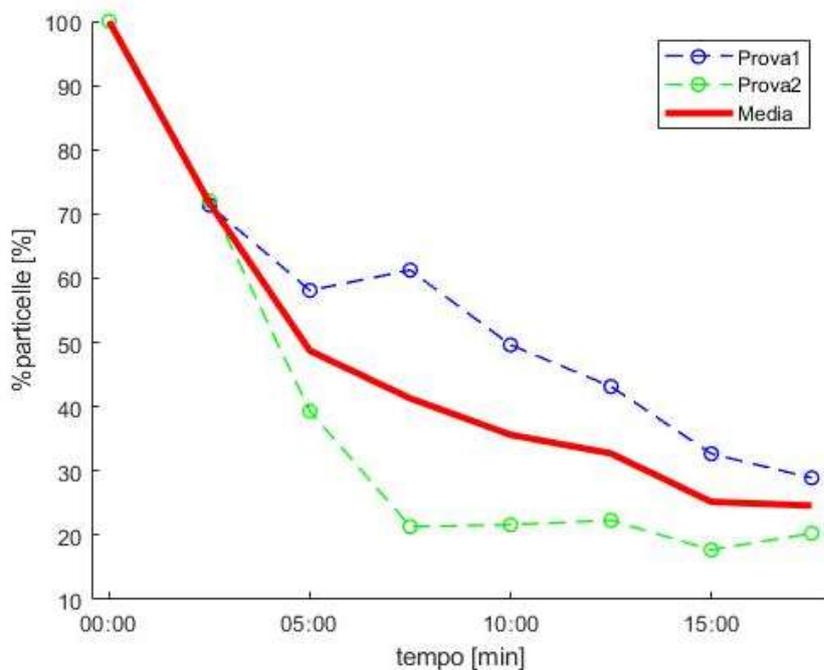


Figura 5.1. Curve di decadimento della polvere Dantec HGS10.

Dalla figura si nota che per entrambe le prove si ha una decrescita repentina della concentrazione di particolato nel tempo dovuta alla sedimentazione delle particelle; nella prova 2, questo trend è più marcato che nella prova 1.

Lo scopo è quello di trovare un materiale che riesca a mantenersi in sospensione per un tempo sufficiente, in modo da poter simulare l'interazione con l'evento di precipitazione. Per aumentare il tempo di sospensione del materiale, si è pensato di ripetere la prova con lo stesso materiale implementando nel set-up una ventola.

In figura sono riportati i risultati delle tre prove con la ventola.

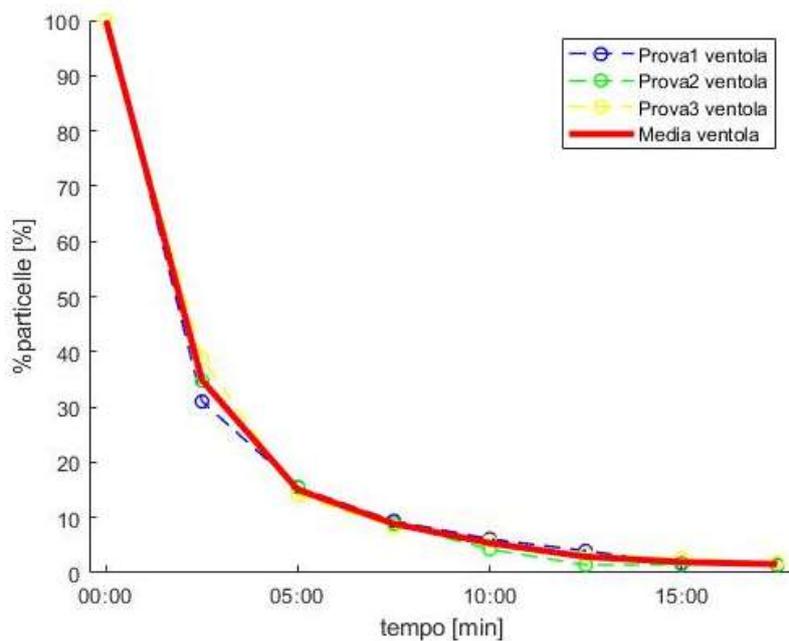


Figura 5.2. Curve di decadimento della polvere Dantec HGS10 con ventola.

Dalla figura precedente, è possibile osservare che il decadimento delle concentrazioni di particolato nelle tre prove ha un andamento molto simile. Al fine di confrontare le due condizioni, viene ripotato in Figura 5.3 il confronto tra le due serie di prove.

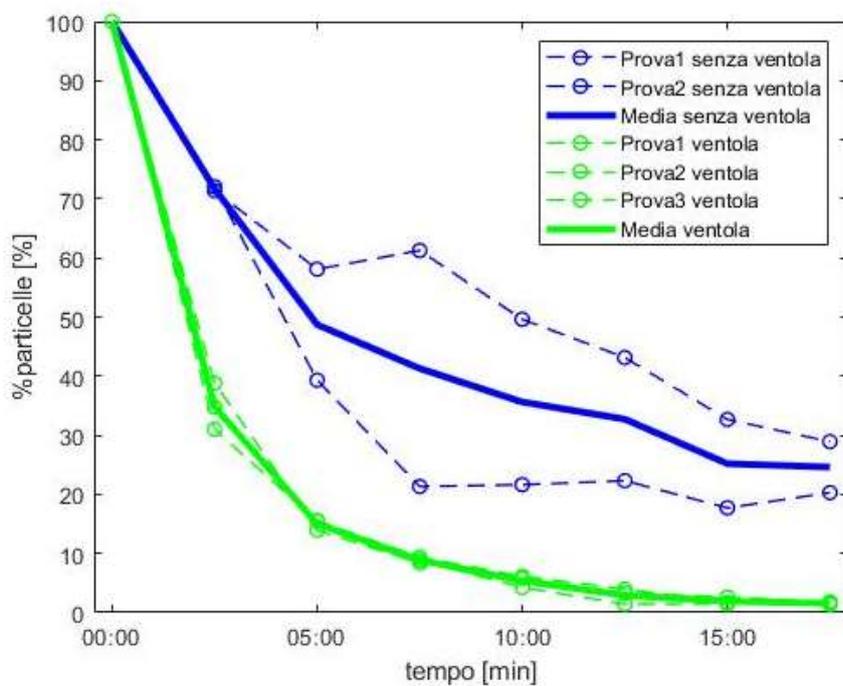


Figura 5.3. Confronto curve di decadimento della polvere Dantec HGS10 con e senza ventola.

Dal confronto si nota che il decadimento delle concentrazioni di particolato con l'utilizzo della ventola è più veloce rispetto al caso senza ventola. Questa rappresenta una situazione anomala, poiché si era pensato all'utilizzo di questo dispositivo per aumentare il tempo di sospensione delle particelle.

I principali contributi che portano alla riduzione del numero di particelle in sospensione all'interno del box sono legati alla sedimentazione ed ai fenomeni di adesione alle pareti di vetro.

La riduzione repentina della concentrazione di particolato può essere dovuta al moto caotico delle particelle indotto dall'azione della ventola; ciò comporta una maggiore adesione alle pareti rispetto al caso visto in precedenza.

Per questo motivo, per le polveri ISOFine A2, non sono state effettuate le prove con la ventola.

- ISOFine A2

In questo caso sono state effettuate tre prove, i cui risultati sono riportati di seguito (*Figura 5.4*).

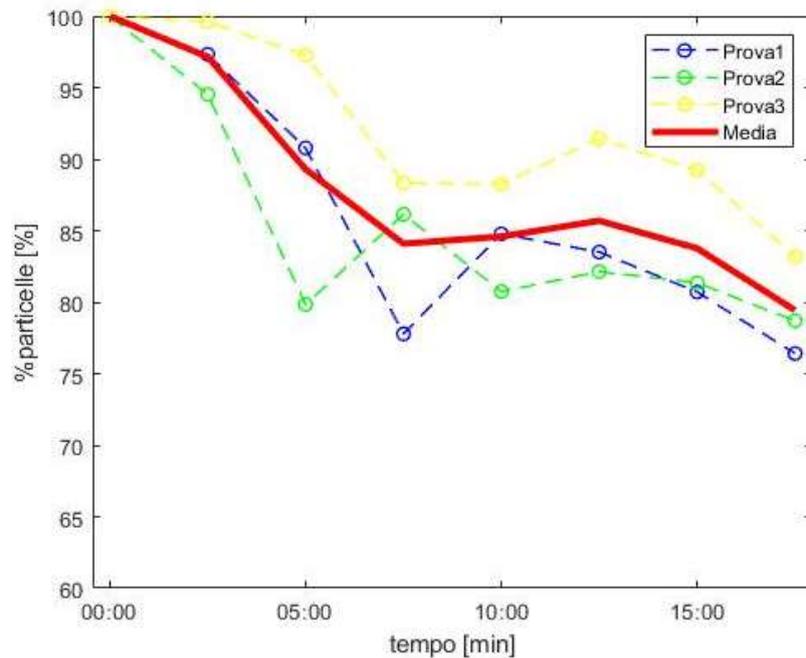


Figura 5.4. Curve di decadimento della polvere ISOFine A2.

È possibile notare che in questo caso abbiamo una decrescita iniziale della concentrazione di particolato dovuta alla sedimentazione delle particelle più grossolane, dopo di che si

raggiunge una sorta di stabilità poiché le particelle più piccole rimangono in sospensione. I diversi valori ottenuti nelle tre prove dipendono sicuramente dalla quantità di materiale che è stato iniettato all'interno della camera; infatti, nella terza prova si vede che la percentuale di particelle rimaste in sospensione è maggiore rispetto alle altre due.

Questo è sicuramente dovuto al fatto che nell'ultima prova vi sia un contributo delle particelle più piccole iniettate nelle prove precedenti.

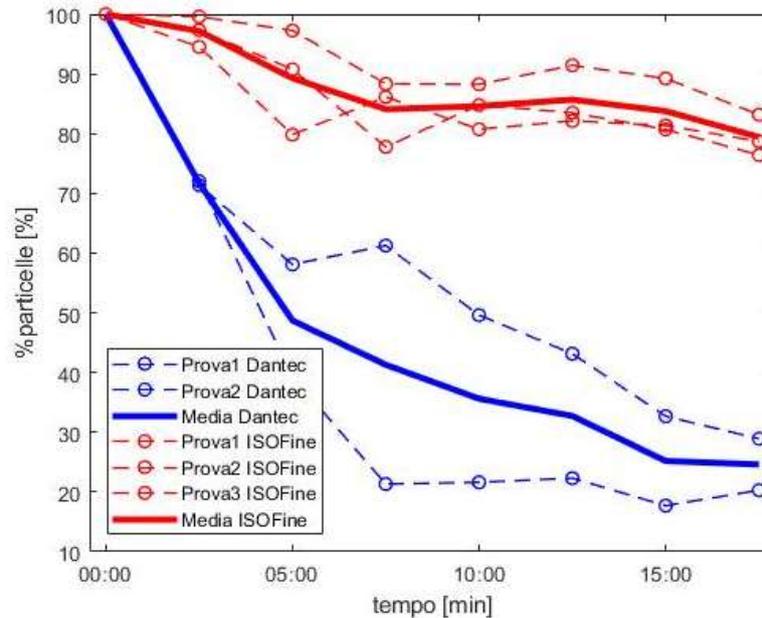


Figura 5.5. Confronto curve di decadimento delle polveri Dantec HGS10 e ISOFine A2 .

Dal confronto tra le due tipologie di polveri (Figura 5.5) è evidente che le particelle di ISOFine rimangono in sospensione per molto più tempo; infatti, dopo circa 20 minuti dall'inizio della prova solo il 20% delle particelle si sono depositate. Al contrario, la percentuale di polveri Dantec depositate nello stesso intervallo di tempo è pari a circa l'80%. Nonostante le ISOFine abbiano un tempo di sospensione sufficiente per effettuare le prove del campo di moto, hanno una capacità di rifrangere la luce non sufficiente per permetterne una buona osservazione tramite tecnica fotografica con la strumentazione attualmente in possesso. Il problema potrebbe essere risolto aumentando l'intensità della fonte luminosa; in questo modo sarebbe possibile osservare il campo di moto delle gocce utilizzando questa tipologia di polveri.

5.1.2. Forma delle gocce

Sfruttando il set-up sperimentale descritto nel *Paragrafo 4.1.1.2* sono state acquisite le immagini di 25 gocce. Queste, hanno subito due diverse fasi di selezione per arrivare alla vera e propria fase di analisi, poiché non tutte le acquisizioni prese risultavano adatte allo scopo.

Nella prima fase di screening è stato fatto un controllo manuale basato sulla forma delle gocce e sulla loro velocità di caduta; infatti, da questi due fattori si possono già da subito individuare delle anomalie. La deformazione accentuata o la bassa velocità della goccia sono comportamenti che lasciano pensare che ci sia stata una interazione con altri corpi. Una prima stima qualitativa della velocità di caduta può essere fatta osservando il numero di fotogrammi acquisiti: se una prova presenta un numero di immagini troppo elevato è sintomo di una velocità esageratamente bassa.

In questa fase di screening sono state scartate 5 prove, le restanti 20 sono state sottoposte alla seconda fase di selezione. Questa riguarda più da vicino le problematiche inerenti alla tecnica fotografica; infatti, se la traiettoria di caduta della goccia non è perfettamente perpendicolare al piano si ha una parziale uscita dalla zona di messa a fuoco. Come già visto in precedenza, una goccia non perfettamente a fuoco può apparire più grande di quanto lo è realmente. Avendo a disposizione le acquisizioni di più frame della stessa goccia, è stato possibile, tramite il software MatLab, scartare le prove dove vi fosse più di un pixel di differenza tra i diametri equivalenti delle diverse immagini.

Attraverso il controllo minuzioso delle prove acquisite e una mediazione dei dati ottenuti dai diversi frame della stessa goccia, è stato possibile ottenere dei risultati che siano significativi.

Per caratterizzare la forma delle gocce sono stati calcolati i seguenti parametri:

- Diametro equivalente

Diametro che avrebbe un oggetto di sezione circolare con la stessa area dell'oggetto

individuato. Viene calcolato con l'equazione $\sqrt{\frac{4 \text{ Area}}{\pi}}$.

In *Figura 5.6* vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove che hanno superato la selezione:

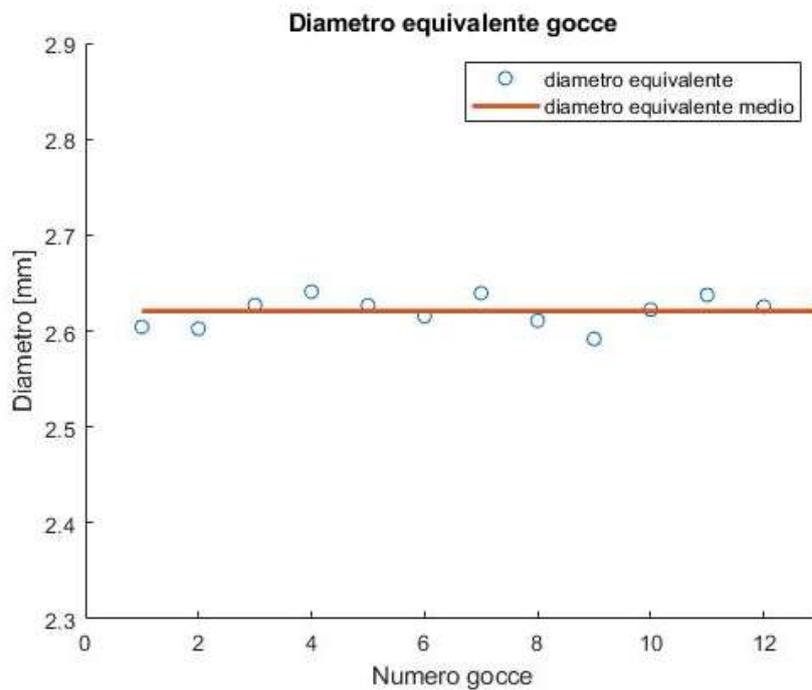


Figura 5.6. Diametro equivalente delle gocce.

Dal grafico sopra è evidente che tutti i diametri calcolati abbiano valori molto simili, ciò lascia presagire una buona riuscita della prova. Inoltre, si nota che il diametro equivalente ottenuto dalla mediazione di tutte le prove risulta uguale a 2.62 mm.

Tale valore risulta maggiore rispetto al risultato atteso (*Paragrafo 4.1*); ciò è sicuramente dovuto alle prestazioni risolutive della High Speed Camera, che sono inferiori rispetto alla camera Nikon D810 .

- Asse maggiore ed asse minore

La forma delle gocce al momento della loro formazione è assimilabile ad una sfera ma durante la caduta subisce delle deformazioni. La forma assunta dalla goccia dipende da diversi fattori, tra cui la dimensione della stessa. Come abbiamo visto, i diametri caratteristici delle gocce oggetto di studio sono dell'ordine dei 2.6 mm. L'obiettivo è quello di determinare la forma generica che la goccia tende ad assumere.

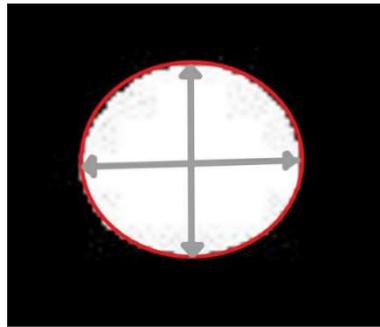


Figura 5.7. Forma della goccia.

Come si vede dalla *Figura 5.7*, la sezione della goccia in caduta può essere approssimata ad una sorta di ellisse; quindi, risulta opportuno determinare le dimensioni dell'asse maggiore e minore. Nelle *Figure 5.8* e *5.9* sono riportati i valori di asse maggiore e minore delle diverse gocce.

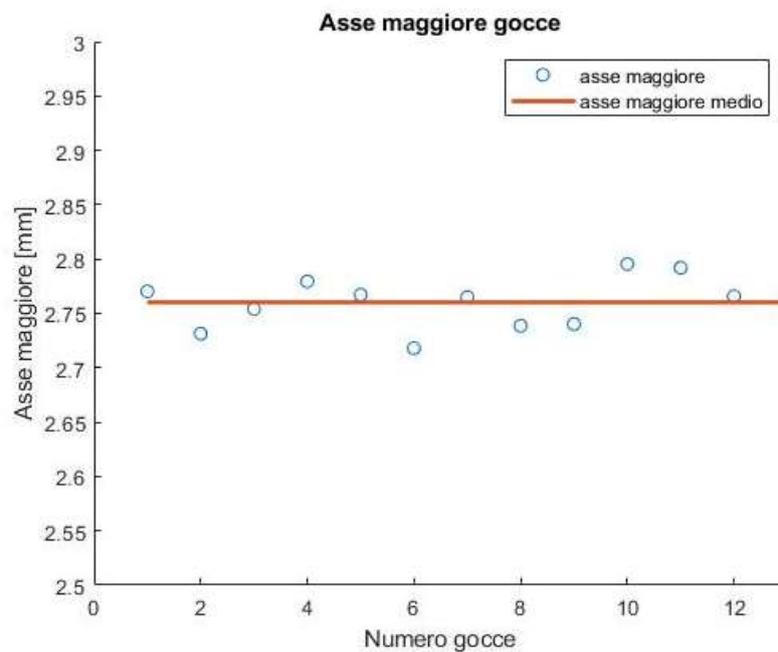


Figura 5.8. Asse maggiore delle gocce.

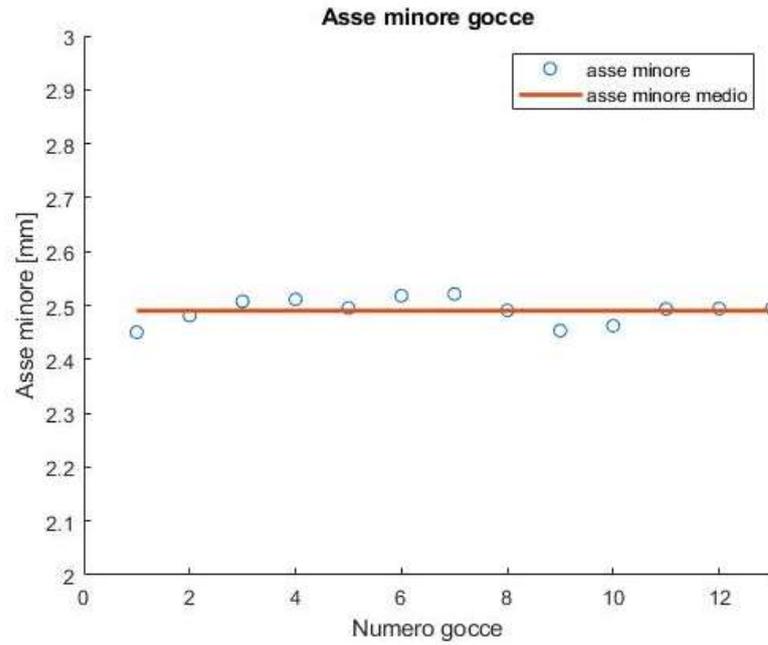


Figura 5.9. Asse minore delle gocce.

Anche in questo caso i risultati ottenuti sono assimilabili tra di loro, ciò dimostra che le varie gocce osservate hanno una forma molto simile.

Dal confronto dei due valori medi ottenuti, si nota che vi è uno scostamento di circa 0.25 mm; quindi, non è corretto approssimare le gocce a delle sfere ma risulta interessante studiare quanto le due forme si discostino.

- Eccentricità

La forma tipica delle gocce osservate risulta schiacciata rispetto ai suoi assi. Si definisce eccentricità il rapporto tra la semidistanza tra i due fuochi dell'ellisse e la lunghezza dell'asse maggiore. Nel caso in esame, non avendo tutti i dati disponibili per effettuare questo calcolo, è stata utilizzata la seguente equazione:

$$e = 1 - \frac{D_{min}}{D_{max}}$$

Dove D_{max} e D_{min} rappresentano rispettivamente l'asse maggiore e l'asse minore dell'ellisse.

I risultati ottenuti per le diverse prove sono riportati in *Figura 5.10*.

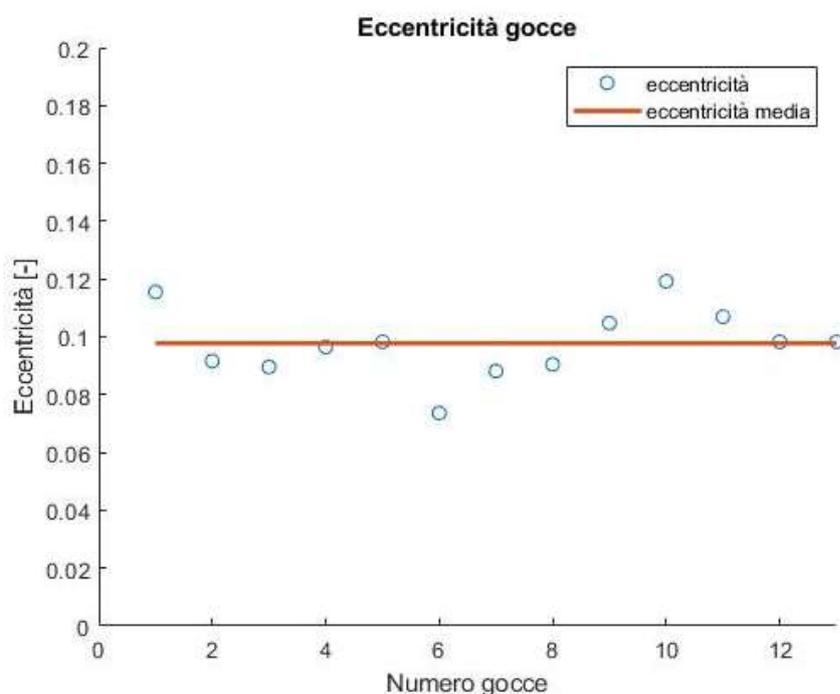


Figura 5.10. Eccentricità delle gocce.

Il valore medio dell'eccentricità risulta minore di 0.1; per cui, gocce caratterizzate da diametri equivalenti di circa 2.6 mm hanno una forma assimilabile a quella di una sfera.

5.1.3. Velocità delle gocce

Come visto nei paragrafi precedenti, la velocità delle gocce in caduta dipende da diversi fattori; tuttavia, se si considera un ambiente controllato senza eccessivi disturbi, l'aspetto predominante è legato alla dimensione della goccia.

L'obiettivo è determinare le velocità di caduta delle gocce nelle varie prove e poi confrontarle con quella terminale trovata in letteratura (Atlas 1973).

Anche in questo caso non tutte le prove sono state analizzate, ma è stata fatta una selezione con gli stessi criteri utilizzati per la forma delle gocce (vd. *Paragrafo 5.1.2*).

Sono stati analizzati due fotogrammi per ogni prova, per i quali è stata calcolata la distanza percorsa dalla goccia e, noto il tempo intercorso tra le due acquisizioni, è stato possibile calcolare la velocità della goccia.

Per completezza in *Figura 5.11* vengono riportate le velocità calcolate, la loro media e la velocità terminale teorica.

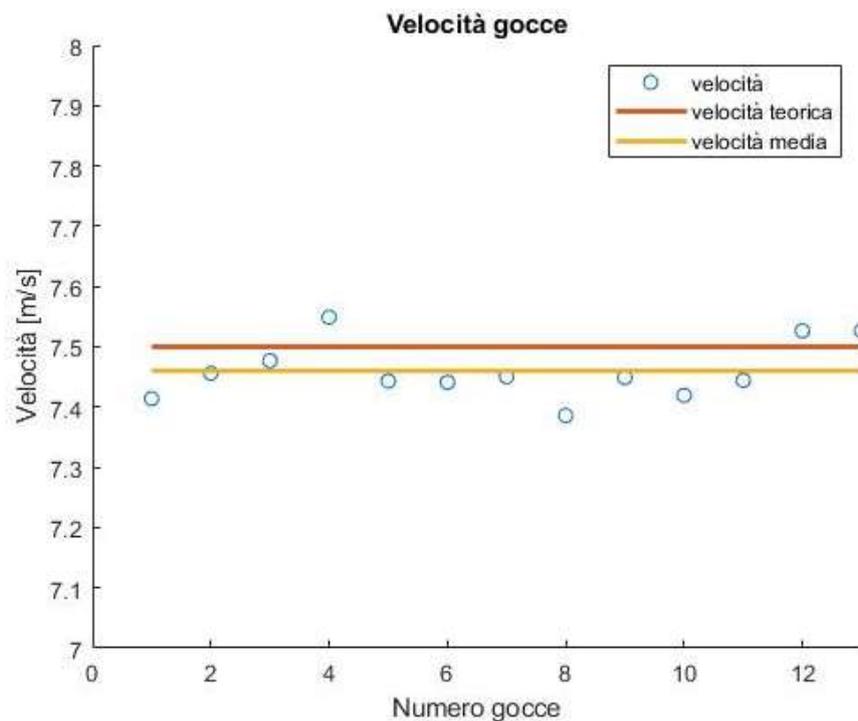


Figura 5.11. Velocità delle gocce e velocità limite teorica .

Le gocce con diametri equivalenti di 2.6 mm hanno una velocità limite teorica di 7.51 m/s; del grafico si nota che la velocità media ottenuta è pari a 7.46 m/s.

Le prove sono state effettuate disponendo l'ago ipodermico ad una distanza di circa 9.5 m dal punto di misurazione; quindi, ci si aspetta che venga raggiunto almeno il 95% della

velocità limite teorica. Nelle prove effettuate si ottengono velocità che in media raggiungono il 99.3 % della velocità terminale teorica. Questo risultato lascia pensare che l'altezza del piano di gocciolamento del simulatore di pioggia (10.4 m da terra) sia sufficiente per raggiungere delle velocità che siano significative ai fini della simulazione del fenomeno di deposizione umida del particolato atmosferico.

5.1.4. Campi di moto

L'osservazione del campo di moto della goccia è stata realizzata attraverso delle prove condotte con del fumo disperso e delle gocce rilasciate da un'altezza di 0.75 m. Queste condizioni non sono rappresentative di quelle che verranno ricreate all'interno della camera del pioggiatore, ma rappresentano il punto di partenza di tale studio.

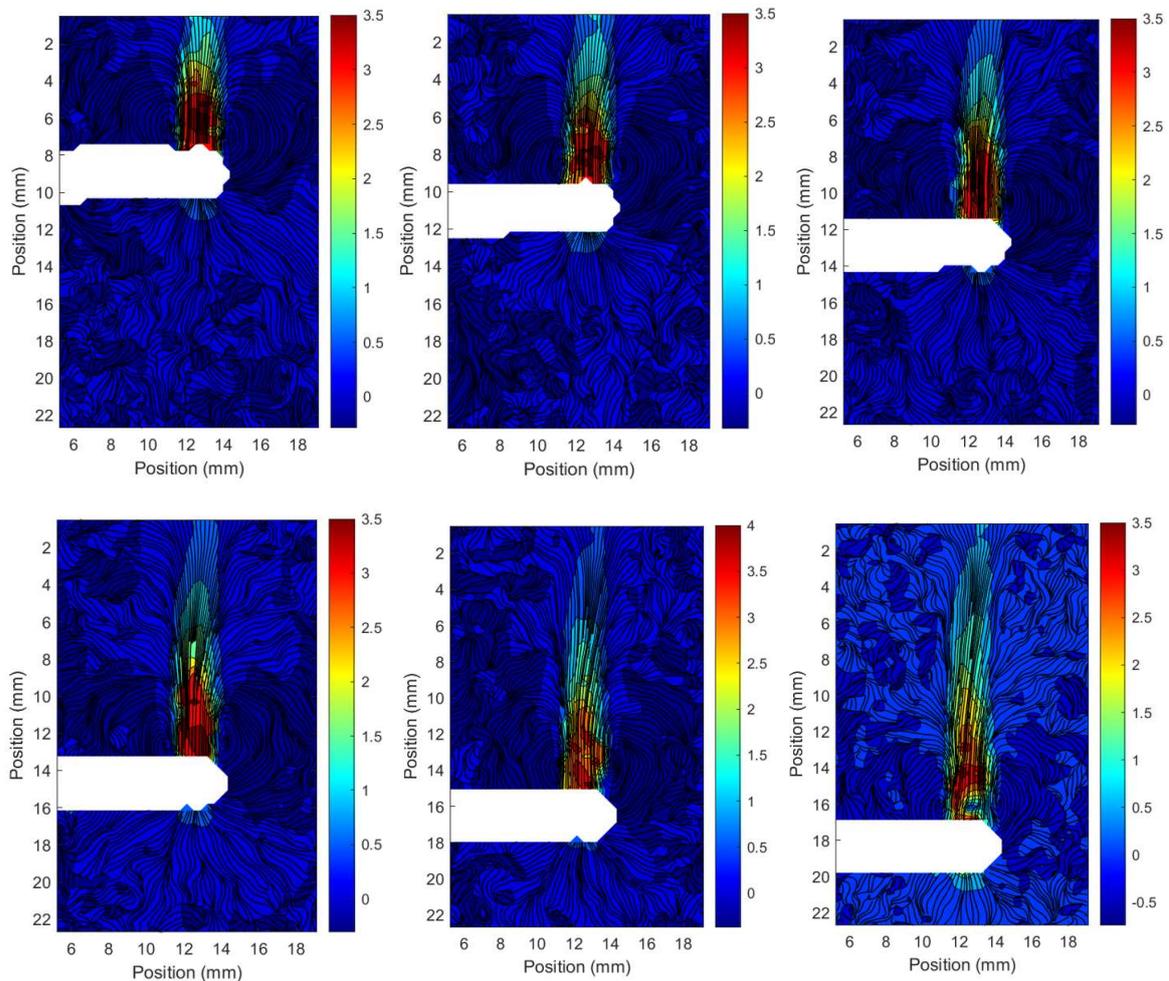


Figura 5.12. Campo di moto della goccia in caduta attraverso il fumo.

In *Figura 5.12* sono rappresentati diversi frame della goccia in caduta, i cui valori di velocità

in m/s sono riportati nella barra colorata a destra dell'immagine. Si nota che il movimento delle particelle di fumo è influenzato dal passaggio della goccia d'acqua; infatti, le velocità maggiori si registrano nelle zone circostanti il corpo in caduta.

È interessante attenzionare i fenomeni di scia che si vengono a creare. Nell'intorno della goccia in caduta, si formano dei vortici, non visibili ad occhio nudo; questi, per effetto della bassa velocità di caduta, dovuta al fatto che la goccia cade da un'altezza ridotta (0.75 m), non riescono a distaccarsi dalla scia.

Ipotizzando altezze di caduta maggiori e quindi velocità superiori a quelle osservate, si potrebbe verificare il distacco di tali vortici che tendono a salire verso l'alto inglobando in questo moto sempre più particelle aerodisperse. In questo modo, si avrebbe la formazione di punti di aggregazione in cui le particelle clusterizzano per poi depositarsi al suolo.

Sarebbe interessante approfondire ulteriormente questo fenomeno in studi futuri, in quanto potrebbe spiegare come mai l'efficienza di abbattimento della deposizione umida risulti maggiore di quella dovuta al solo effetto di scavenging.

5.2. Disdrometro e pluviometro

Come visto nel *Paragrafo 4.3*, risulta importante confrontare i dati di precipitazione ottenuti dai due dispositivi in modo da potere validarli. Per effettuare il confronto, risulta utile studiare un evento di precipitazione in modo da analizzare analogie e differenze tra i dati acquisiti.

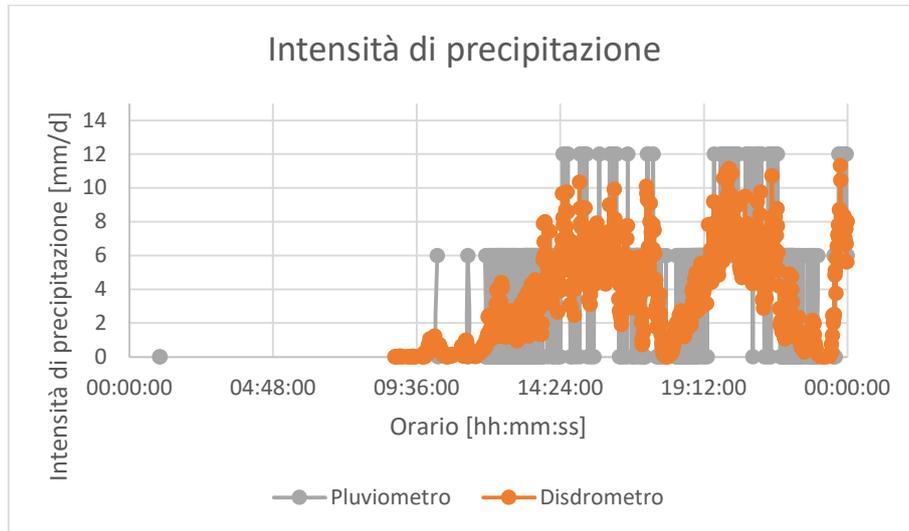


Figura 5.13. Confronto intensità di precipitazione pluviometro e disdrometro di giorno 2/10/20.

In *Figura 5.13* viene riportata l'intensità di precipitazione misurata dai due strumenti nel giorno 2/10/20. Si osserva come i picchi si trovino più o meno nelle stesse posizioni, ma la grande differenza è che il disdrometro permette di avere una risoluzione molto più ampia rispetto al pluviometro.

In *Figura 5.14*, viene riportato il confronto tra le cumulate giornaliere di intensità di precipitazione ottenute con i due strumenti.

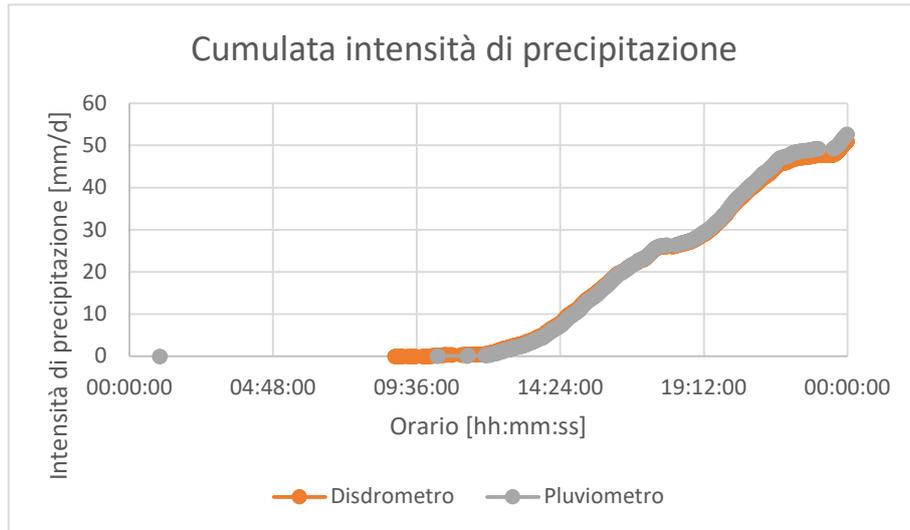


Figura 5.14. Confronto cumulate giornaliere di intensità di precipitazione pluviometro e disdrometro di giorno 2/10/20.

È interessante notare che, nonostante i due strumenti sfruttino principi di funzionamento totalmente diversi, la cumulata delle intensità di precipitazione risultante sia molto simile. Quanto detto è possibile osservarlo anche in *Figura 5.15*, dove viene riportato il confronto su base annuale tra i due strumenti.

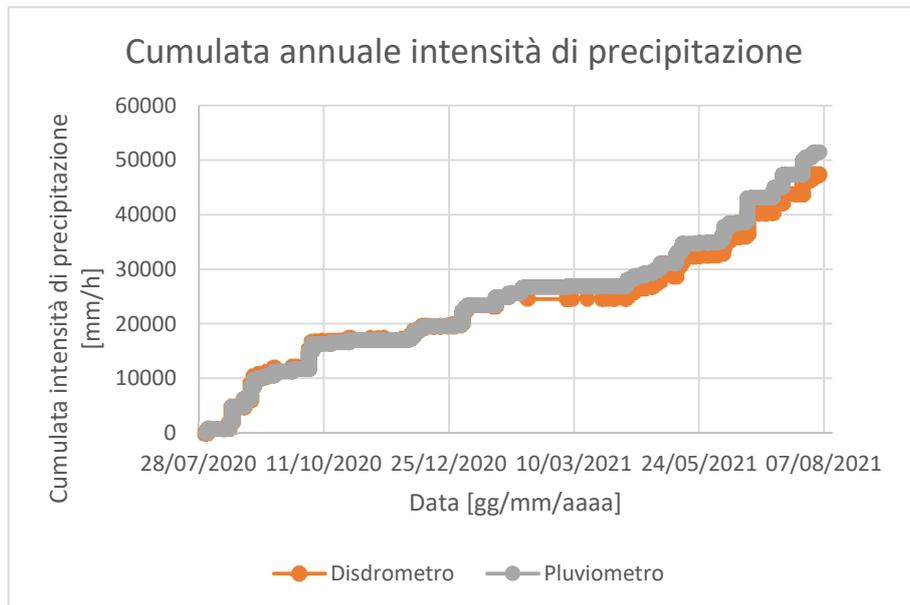


Figura 5.15. Confronto cumulate annuali di intensità di precipitazione pluviometro e disdrometro da Agosto 2020 ad Agosto 2021.

Si nota che le cumulate hanno un andamento molto simile per tutto il periodo di acquisizione dei dati. Fino a Febbraio 2021 abbiamo una sovrapposizione delle curve, mentre dopo si nota

una differenza di intensità di precipitazione dovuta ad un malfunzionamento del pluviometro.

Quanto osservato lascia pensare che le stime effettuate dal disdrometro, oltre ad avere una maggiore risoluzione risultino anche abbastanza affidabili.

6. CONCLUSIONI

L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi è la realizzazione di un simulatore di pioggia in scala reale, il cui scopo è quello di studiare i fenomeni di abbattimento del particolato atmosferico tramite processi di deposizione umida.

Il lavoro svolto può essere suddiviso in due principali fasi: la realizzazione del simulatore di pioggia e la successiva calibrazione dello stesso. Il prototipo è stato costruito sulla base di soluzioni progettuali già definite a priori, che sono state integrate da scelte fatte in corso d'opera al fine di ottenere il risultato voluto. Successivamente, gran parte del lavoro si è concentrato sulla calibrazione del sistema, in modo che gli eventi di precipitazione prodotti dal simulatore risultino il più possibile paragonabili agli eventi reali.

Per una corretta calibrazione del simulatore sono state effettuate delle campagne sperimentali su micro-scala finalizzate allo studio dei fenomeni di dispersione dei contaminanti, delle caratteristiche della pioggia e delle interazioni tra le gocce e l'aerosol disperso.

La prima fase del lavoro di calibrazione ha riguardato la scelta della tipologia di particolato da disperdere all'interno del sistema. È importante che il materiale scelto rappresenti al meglio le caratteristiche dimensionali del particolato presente in atmosfera e che allo stesso tempo sia facilmente osservabile tramite tecnica fotografica. A tal scopo sono state testate due diverse tipologie di polveri: le Dantec HGS10 e le ISOFine A2. Dalle curve di decadimento delle concentrazioni si è notato che le polveri ISOFine rimangono in sospensione per più tempo, inoltre rappresentano al meglio le caratteristiche dimensionali del particolato atmosferico in quanto sono polveri poli-disperse.

In una seconda fase, sono state fatte delle prove che hanno permesso di determinare le caratteristiche delle gocce in caduta.

Per la valutazione delle proprietà delle gocce è stata utilizzata la tecnica "shadowgraph"; in questo modo sono stati ottenuti i risultati relativi al diametro equivalente, la forma e la velocità terminale delle gocce. Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata un'High Speed Camera, che nonostante tenda a sovrastimare i parametri dimensionali della goccia a causa della sua risoluzione non eccelsa, è certamente lo strumento migliore per il calcolo della velocità della goccia. I risultati ottenuti hanno confermato che il piano di gocciolamento del simulatore di pioggia è posto ad un'altezza sufficiente da far raggiungere alle gocce delle velocità prossime a quella limite.

Nonostante le condizioni non siano totalmente rappresentative di ciò che in futuro avverrà all'interno del simulatore, le prove del campo di moto hanno permesso l'osservazione delle interazioni fra la goccia in caduta e le particelle in sospensione. Infatti, dall'analisi dei fotogrammi ottenuti è stato possibile osservare la generazione dei vortici dovuti al passaggio della goccia. Per elevate velocità delle gocce, è auspicabile che i vortici riescano a distaccarsi e creare delle zone ad alta concentrazione di particelle; queste a loro volta tendono ad aggregarsi per poi depositarsi al suolo. Nonostante quanto visto sin ora rappresenti solo un punto di partenza per gli studi futuri, questa teoria potrebbe spiegare come mai l'efficienza di abbattimento della deposizione umida risulti maggiore di quella dovuta al solo effetto di scavenging.

Infine, nell'ultima fase del lavoro ci si è concentrati sulla validazione dei dati rilevati dal disdrometro OTT Parsivel 2. Infatti, una volta messo in funzione il simulatore di pioggia, le precipitazioni ricreate artificialmente verranno monitorate da questo disdrometro; l'obiettivo finale è quello di effettuare le opportune modifiche al sistema in modo da ottenere delle caratteristiche della pioggia molto simili a quelle reali. La validazione è stata fatta tramite il confronto con i dati di intensità di precipitazione del pluviometro OTT Pluvio. I risultati ottenuti lasciano pensare che le stime effettuate dal disdrometro, oltre ad avere una maggiore risoluzione siano anche affidabili.

6.1. Sviluppi futuri

Il lavoro svolto rappresenta un grande passo avanti nella realizzazione di un sistema per la simulazione delle precipitazioni che permetta di approfondire i fenomeni di deposizione umida del particolato atmosferico. I risultati ottenuti hanno evidenziato delle tematiche molto interessanti da sviluppare in futuro.

Nella sperimentazione, le apparecchiature fotografiche e le fonti di illuminazione in possesso rappresentano una grande limitazione per il raggiungimento di risultati più soddisfacenti.

Ad esempio, sarebbe interessante effettuare nuovamente le prove del campo di moto della goccia implementando al set-up sperimentale utilizzato una fonte di illuminazione più potente; ciò permetterebbe di aumentare l'altezza del piano di gocciolamento e quindi studiare il campo di moto di gocce caratterizzate da una velocità prossima a quella terminale. Inoltre, sarebbe possibile iniettare all'interno del box delle polveri che rappresentino meglio le caratteristiche del particolato atmosferico.

Un altro aspetto da approfondire è legato alla distribuzione dei diametri delle gocce; infatti, dai dati rilevati con il disdrometro è possibile caratterizzare le precipitazioni al variare dell'intensità di precipitazione. Ciò permetterebbe di calibrare al meglio il sistema e rendere le precipitazioni simulate più simili a quelle reali.

BIBLIOGRAFIA

Sozzi, R. "La micrometeorologia e la dispersione degli inquinanti in aria." *Rapporto tecnico, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici* (2003).

Wang, P. K., and H. R. Pruppacher. "Acceleration to terminal velocity of cloud and raindrops." *Journal of Applied Meteorology* 16.3 (1977): 275-280.

Van Boxel, John H. "Numerical model for the fall speed of rain drops in a rain fall simulator." *Workshop on wind and water erosion*. 1997.

Beard, Kenneth V., e Catherine Chuang. 1987. «A New Model for the Equilibrium Shape of Raindrops». *Journal of the Atmospheric Sciences* 44(11): 1509–24.

Ngasoh, Felix Gemlack, et al. "A Revisit of Rainfall Simulator as a Potential Tool for Hydrological Research." *Agrometeorology*. IntechOpen, 2020.

Kathiravelu, Gopinath, Terry Lucke, and Peter Nichols. "Rain drop measurement techniques: a review." *Water* 8.1 (2016): 29.

Castrejón-García, R., et al. "The shadowgraph imaging technique and its modern application to fluid jets and drops." *Revista mexicana de física* 57.3 (2011): 266-275.

Tokay, Ali, Anton Kruger, and Witold F. Krajewski. "Comparison of drop size distribution measurements by impact and optical disdrometers." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 40.11 (2001): 2083-2097.

Marshall, John S. "The distribution of raindrops with size." *J. meteor.* 5 (1948): 165-166.

Best, Alfred Charles. "Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 76.329 (1950): 302-311.

John, Walter, et al. "Modes in the size distributions of atmospheric inorganic aerosol." *Atmospheric Environment. Part A. General Topics* 24.9 (1990): 2349-2359.

Marshall, J. S.; Palmer, W. Mc K. (1948). *THE DISTRIBUTION OF RAINDROPS WITH SIZE. Journal of Meteorology*, 5(4), 165–166.

Laws, J. Otis. "Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops." *Eos, Transactions American Geophysical Union* 22.3 (1941): 709-721.

Pall R, Dickinson WT, Beals D. Development and calibration of rainfall simulator. *Canadian Agricultural Engineering*. 1983;25:181-187

Carvalho, Sílvia CP, João LMP De Lima, and M. Isabel P. De Lima. "Using meshes to change the characteristics of simulated rainfall produced by spray nozzles." *International Soil and Water Conservation Research* 2.2 (2014): 67-78.

Kathiravelu, Gopinath, Terry Lucke, and Peter Nichols. "Rain drop measurement techniques: a review." *Water* 8.1 (2016): 29.)

Castrejón-García, R., et al. "The shadowgraph imaging technique and its modern application to fluid jets and drops." *Revista mexicana de física* 57.3 (2011): 266-275.

Mache, H. Ueber die Geschwindigkeit un Grosse der Regentrfen. *Meteorol. Z.* 1904, 39, 278.

Bagree, R. Characterization and Design of a Readout Circuit for a Piezoelectric-based Acoustic Disdrometer. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2012.

Distromet Ltd. Distromet. 2011. Available online: www.distromet.com (accessed on 15 June 2015).

Clima, T. Laser Precipitation Monitor Instruction for Use: 5.4110.X0.X00; Software Version 1.04; Adolf Thies GmbH & Co. KG: Göttingen, Germany, 2007.

Nešpor, V.; Krajewski, W.F.; Kruger, A. Wind-induced error of raindrop size distribution measurement using a two-dimensional video disdrometer. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2000, 17, 1483–1492. [CrossRef]

<https://www.arpa.vda.it/it/aria/1-inquinamento-atmosferico/2536-il-particolato-atmosferico>

<https://xearpro.it/aerosol-inquinante-atmosferico/>

<https://hess.copernicus.org/articles/22/2811/2018/>

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/76/4/jas-d-18-0309.1.xml>

http://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/pubblicazioni-anno-2014/calendario-2014/copy_of_gennaio-2014