

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Realizzazione di un simulatore di pioggia di laboratorio in scala reale



Relatore

Prof. Ing. Davide Poggi

Correlatore

Ing. Roberto Bosio

Candidato

Elisabetta Corte

Anno Accademico 2019/2020

1.	INTRODUZIONE	1
1.1	Background.....	1
1.2	Scopo dello studio.....	1
1.3	Domande scientifiche.....	2
1.4	Metodologia.....	2
2.	TEORIA	4
2.1	Bottiglia di Mariotte.....	4
2.2	Resistenza Fluido dinamica.....	5
2.2.1	Resistenza di forma.....	5
2.2.2	Resistenza di attrito viscoso.....	8
2.3	Processo di formazione delle gocce attraverso l'uso di aghi.....	11
2.4	Forma delle gocce.....	13
2.5	Cenni sulla teoria di propagazione degli errori.....	19
2.5.1	Somma e differenze.....	20
2.5.2	Prodotto e quoziente.....	20
3.	STATO DELL'ARTE	22
3.1	I simulatori di pioggia.....	22
	T. P. Regmi e A. L. Thompson 2000.....	25
	Aksoy et al. 2012.....	28
3.2	Tecniche di Misurazione.....	31
3.2.1	Misurazione manuale delle gocce di pioggia.....	32
3.2.1.1	Metodo fotografico.....	33
3.2.1.2	Shadowgraph imaging.....	34
3.2.2	Misurazione automatizzata delle gocce di pioggia.....	36
3.2.2.1	Disdrometri d'impatto.....	36
	Disdrometri acustici.....	37
	Disdrometri di spostamento.....	37
3.2.2.2	Disdrometri ottici.....	39
	Imaging ottico.....	39
	Dispersione ottica.....	40
4.	SENSORI DI PRECIPITAZIONE	41
4.1	RainFlow Sensor-RF4, ISAW.....	41
4.2	Laser Precipitation Monitor, Thies Clima.....	42
4.3	AO-RS2E, Alpha Omega Electronics.....	43
4.4	Optical disdrometer ODM 470, Eigenbrodt.....	44
4.5	DIS, Nesa.....	45
4.6	RD-80, Distromet LTD.....	46
4.7	Lufft WS100, OTT.....	47
4.8	OTT Parsivel ² , OTT.....	48

5.	STRUMENTAZIONE E SET-UP	51
5.1	Rainfall Simulator	51
5.2	Sistema di gocciolamento a piccola scala	59
5.2.1	Shadowgraph imaging.....	61
5.2.2	Metodo Volumetrico	67
6.	RISULTATI	70
6.1	Ago da 30 g.....	71
6.2	Ago da 27 g.....	72
6.3	Ago da 25 g.....	73
6.4	Confronto dei risultati	78
6.4.1	Intensità	78
6.4.2	Diametro delle gocce	80
7.	CONCLUSIONI	83
7.1	Sviluppi futuri	85
8.	BIBLIOGRAFIA	86

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1: Rappresentazione della bottiglia di Mariotte. («Bottiglia di Mariotte». 2019. <i>Wikipedia</i>).....	4
Figura 2.2: Numero di Strouhal espresso come funzione del numero di Reynolds (E.Marchi e A. Rubatta, 2000).	6
Figura 2.3: Aspetto della corrente che avvolge un cilindro per diversi range del numero di Reynolds (E.Marchi e A. Rubatta, 2000).	7
Figura 2.4: Coefficiente della resistenza offerta da una sfera ad una corrente uniforme in funzione del numero di Reynolds (E. Marchi e A. Rubatta, 2000).	8
Figura 2.5: Profilo della goccia che pende dal supporto (Parkinson e Phan 2018).	12
Figura 2.6: Rappresentazione dei tre modi di oscillare dell'armonica fondamentale nelle diverse fasi dell'oscillazione: (a) assialsimmetrico, (b) trasversale e (c) orizzontale. Dall'alto $t = 0, T/4, 3T/4$; dove T è il periodo di un'oscillazione. Le frecce indicano le direzioni di oscillazione. (Chowdhury et al. 2016).....	17
Figura 2.7: Le diverse zone di caduta delle gocce d'acqua in caduta libera. Per illustrare le tipiche forme della goccia in corrispondenza della relativa zona di caduta, sono riportate le immagini ingrandite di quest'ultima in diversi istanti ed elevazioni. La coordinata verticale h è positiva verso il basso e indica la distanza verticale che intercorre dalla punta dell'ago al punto di interesse della goccia di pioggia simulata (Chowdhury et al. 2016)	19
Figura 3.1: Rappresentazione grafica dello schema del formatore di gocce telescopico (T. P. Regmi e A. L. Thompson, 2000).....	26
Figura 3.2: Rappresentazione grafica del sistema del simulatore di pioggia (T. P. Regmi e A. L. Thompson, 2000).	27
Figura 3.3: Rappresentazione grafica e fotografia del simulatore di pioggia e del canale di erosione (Aksoy et al., 2012).	29
Figura 3.4: Dettaglio ugelli VeeJet utilizzati nel simulatore: (a) VeeJet 8030;(b) VeeJet 8050; (c) VeeJet 8060; (d) VeeJet 8070; (Aksoy et al., 2012).	29
Figura 3.5: Schema della disposizione degli ugelli disposti nella barra oscillante per le intensità di (a) 45 e 65 mm/h, (b) 85 e 105 mm/h (Aksoy et al., 2012).	30

Figura 3.6: Schema della configurazione della fotocamera statica, sviluppata per misurare la velocità di caduta delle gocce (Kathiravelu, Lucke, e Nichols, 2016).....	33
Figura 3.7: Schema generale di un sistema shadowgraph (Castrejón-García et al., 2011).....	34
Figura 3.8: Schema del principio di funzionamento di un disdrometro ad impatto (Kathiravelu, Lucke, e Nichols 2016).....	38
Figura 3.9: Schema delle apparecchiature VPS e fotografia del prototipo VPS (Liu, Gao, e Liu 2014).	40
Figura 4.1: RainFlow Sensor - RF4, ISAW.....	41
Figure 4.2: 5.4110.00.200, Thies Clima.	42
Figura 4.3: AO-RS2E, Alpha Omega Electronics.	43
Figura 4.4: Optical disdrometer ODM 470, Eigenbrodt.	44
Figura 4.5: DIS, Nesa.	45
Figura 4.6: Disdrometro ad impatto Joss-Waldvogel (Distromet Ltd., Basel, Switzerland).....	46
Figura 4.7: Lufft WS100, OTT.....	47
Figura 4.8: Parsivel ² , OTT.....	48
Figura 5.1: Rappresentazione grafica del setup del pioggiatore.	53
Figura 5.2: Grafico del profilo di velocità di una goccia con diametro equivalente pari a 3,9 mm.....	55
Figura 5.3: Sezione del serbatoio.....	56
Figura 5.4: Setup del pioggiatore.....	59
Figura 5.5 Scatto ottenuto utilizzando la tecnica shadowgraph.....	61
Figura 5.6: Setup per l'acquisizione delle immagini con la tecnica shadowgraph.....	61
Figura 5.7: Schema funzionale della tecnica shadowgraph impiegata nelle prove per la visualizzazione delle gocce d'acqua prodotte.	62
Figura 5.8: Immagine della goccia dalla quale si ricava il valore del diametro.	63
Figura 5.9: Immagine in scala di grigi della porzione contenente la goccia con il contorno rilevato attraverso l'analisi con Matlab.	64
Figura 5.10: Immagine fittizia con la presenza di più gocce nel piano di messa a fuoco.....	65

Figura 5.11: Immagine in scala di grigi del fotogramma fittizio nel quale sono visibili i contorni rilevati attraverso l'analisi con Matlab.	66
Figura 5.12: Porzioni di quattro frame successivi, nei quali è visibile il contorno della goccia e il baricentro trovato attraverso l'analisi di Matlab.	67
Figura 5.13: Rappresentazione su Matlab della registrazione e dei picchi per l'ago da 0,3 mm e carico 18 cm.	69
Figura 6.1: Grafico per il confronto dei valori di diametro ottenuti con la shadowgraph imaging e il metodo volumetrico.	76
Figura 6.2: Grafico del profilo di velocità di una goccia con diametro equivalente pari a 2,40 mm.	78
Figura 6.3: Grafico dell'intensità ottenuta per diversi valori di carico con le tre tipologie di ago: 25 g, 27 g e 30 g.	79
Figure 6.4: Grafico dei diametri ottenuti per diversi valori di carico con le tre tipologie di ago: 25 g, 27 g e 30 g.	81

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1: Espressioni per il calcolo della velocità terminale.....	10
Tabella 2.2: Espressioni per il calcolo del rapporto degli assi.....	15
Tabella 4.1: Riepilogo delle proprietà di ciascun sensore di pioggia considerato nell'analisi.	49
Tabella 5.1: Tabella di riepilogo dei dati relativi dimensione e velocità della goccia di 3,9 mm di diametro.	54
Tabella 6.1: Tipologie di aghi impiegati per l'esecuzione delle prove	70
Tabella 6.2: Risultati delle prove eseguite con l'ago da 0,3 mm di diametro, per i diversi valori di carico agente sullo stesso, ottenuti con il metodo volumetrico.	72
Tabella 6.3: Risultati delle prove eseguite con l'ago da 0,4 mm di diametro, per i diversi valori di carico agente sullo stesso, ottenuti con il metodo volumetrico.	73
Tabella 6.4: Risultati delle prove eseguite con l'ago da 0,5 mm di diametro, per i diversi valori di carico agente sullo stesso, ottenuti con il metodo volumetrico.	74
Tabella 6.5: Diametri medi e rispettive deviazioni standard, ottenuti dall'analisi delle immagini acquisite con la tecnica <i>shadowgraph</i> , per diversi valori di carico agente sull'ago da 0,5 mm di diametro.	75
Tabella 6.6: Riepilogo e confronto dei valori dei diametri delle gocce, ottenuti con l'applicazione delle due tecniche, per le prove eseguite con l'ago da 25 g.....	75
Tabella 6.7: Valori medi e deviazioni standard dell'eccentricità e della circolarità delle gocce, ottenuti con il metodo fotografico per l'ago da 25 g e diversi valori di carico.....	76
Tabella 6.8: Diametro della goccia, velocità teorica ed effettivamente raggiunta dalla goccia dopo aver percorso una distanza di 10,40 m, e sua velocità terminale.	77
Tabella 6.9: Formulazioni empiriche che esprimono il legame tra il carico agente e le intensità prodotte per le tre diverse tipologie di ago.	79
Tabella 6.10: Formulazioni empiriche che esprimono il legame tra il carico agente e il diametro delle gocce prodotte per le tre diverse tipologie di ago.	81

INDICE DEI SIMBOLI

Simbolo	Significato
St	Numero di Strouhal
f	Frequenza di distacco dei vortici nella scia di Von Kármán
l	Lunghezza caratteristica del corpo investito da una corrente fluida
v_f	Velocità del flusso che investe il corpo
F'	Forza che sollecita un corpo investito da una corrente fluida
D	Diametro della sfera o del cilindro investito da una corrente fluida
C_R	Coefficiente di resistenza
ρ	Densità del fluido
v_a	Velocità iniziale della corrente
Re	Numero di Reynolds
F_a	Forza di attrito viscoso
η	Coefficiente di attrito interno o di viscosità
K	Lunghezza caratteristica del corpo che attraversa il fluido
v	Velocità del corpo
U_t	Velocità terminale
d	Diametro equivalente della goccia
ρ_a	Densità dell'aria
$\rho_{a,z}$	Densità dell'aria all'altitudine z
μ_a	Viscosità dinamica dell'aria
g	Accelerazione gravitazionale

β	Frazione della velocità limite
t_β	Tempo necessario al raggiungimento della frazione β della velocità limite
z_β	Distanza necessaria al raggiungimento della frazione β della velocità limite
τ	Costante temporale
ν	Viscosità cinematica della goccia
n	Ordine delle perturbazioni armoniche sferiche
Bo	Numero gravitazionale di Bond
t_c	Tempo caratteristico
γ	Tensione superficiale del fluido
F_v	Frequenza adimensionale della vibrazione della goccia
f_v	Frequenza della vibrazione della goccia
S	Parametro per descrivere l'andamento della frequenza delle gocce
L_{Ca}	Lunghezza capillare
α	Rapporto degli assi della goccia
$\bar{\alpha}$	Valore medio del rapporto degli assi
c_{Max}	Corda semimaggiore della goccia
c_{min}	Corda semiminore della goccia
ρ_m	Densità del vapore acqueo in aria satura
We	Numero di Weber
U_1	Velocità del flusso dell'aria
Δp	Differenza di pressione all'interfaccia della goccia
R_1 e R_2	Raggi principali di curvatura
A	Ampiezza del rapporto degli assi

A_0	Massima ampiezza delle oscillazioni
x	Generica grandezza fisica determinata in modo indiretto
a	Generica grandezza fisica determinata in modo diretto
b	Generica grandezza fisica determinata in modo diretto
Δx	Errore associato alla grandezza fisica x
Δa	Errore associato alla grandezza fisica a
Δb	Errore associato alla grandezza fisica b
m	Massa della goccia di pioggia
C_D	Coefficiente di forma
s	Area della sezione di riferimento della goccia presa ortogonalmente rispetto la direzione del moto
i	Istante temporale
a	Accelerazione della goccia
y	Spostamento della goccia
Δt	Intervallo temporale
Δ	Dislivello piezometrico
Q	Portata massima sfiorata
C	Coefficiente di scabrezza
L	Lunghezza della condotta
D_i	Diametro interno della condotta
A_{imm}	Area dell'oggetto presente nell'immagine
P_{imm}	Perimetro dell'oggetto presente nell'immagine
P	Peso del volume d'acqua raccolto durante tutta l'esecuzione di una prova
P_s	Peso specifico delle gocce

V_{TOT}	Volume totale raccolto durante l'esecuzione di una prova
V	Volume della singola goccia
d_{eq}	Diametro equivalente della goccia stimato
t_p	Tempo della prova
A_p	Area di pertinenza di ciascun ago ipodermico
i	Intensità di precipitazione
h	Carico agente sull'ago
σ	Scarto quadratico medio
e	Eccentricità della goccia
c	Circolarità della goccia
U	Velocità della goccia
R^2	Coefficiente di determinazione

Sommario

I simulatori di pioggia costituiscono uno strumento molto diffuso per lo studio di fenomeni tra i quali il trasferimento dei sedimenti e il movimento delle sostanze chimiche nel suolo dovuti alla pioggia.

Questo studio ha lo scopo di realizzare un simulatore di pioggia capace di produrre precipitazioni artificiali che siano paragonabili a quelle naturali, in modo da ottenere risultati rappresentativi. Lo studio si propone inoltre di sviluppare una tecnica per l'osservazione delle singole gocce di pioggia e vuole identificare lo strumento di misurazione delle precipitazioni più idoneo tra quelli disponibili in commercio.

Il sistema è costituito da un piano di gocciolamento ad aghi posto alla sommità di una torre di dimensioni 3,50 x 4,00 x 10,70 m³.

Il simulatore produce intensità di precipitazione comprese tra i 2 mm/h e i 150 mm/h operando con variazioni di carico negli aghi che vanno dai 4 ai 50 cm. Sono state condotte numerose prove allo scopo di individuare quali tipologie di ago fossero più adatte alle nostre esigenze e al determinare una legge empirica che correlasse l'intensità di precipitazione ed il diametro medio delle gocce col carico agente sull'ago.

Diametro e velocità istantanea delle singole gocce sono stati determinati attraverso una tecnica di visualizzazione che si basa sul metodo "shadowgraph".

Tramite l'ausilio di una tecnica volumetrica è stato possibile validare i dati raccolti dall'analisi delle immagini e stimare l'intensità media prodotta da ciascun ago per ciascuna configurazione di carico.

Le prove hanno mostrato un comportamento pressoché lineare delle intensità di pioggia al variare del carico prodotto permettendo di controllare tale parametro facilmente e con precisione.

Si è inoltre ricavata una distribuzione dei diametri delle gocce piuttosto uniforme, evidenziando un'indipendenza dalle variazioni di carico sull'ago.

Il confronto tra i diametri raccolti per via indiretta e quelli reali ricavati dall'analisi delle immagini mostra una stretta correlazione tra i dati con differenze inferiori a 0,05 mm.

Abstract

Rainfall simulators represent a widespread tool for studying the fundamental behavior of sediment transfer and chemical movement in soil from rainfall. This study aims to design a rainfall simulator capable of producing an artificial precipitation comparable to the natural one, in order to obtain representative results. It also proposes to develop an optical technique to observe single raindrops, and to identify the most suitable rain drop measurement system among the commercially available ones.

A drip surface was placed at the top of a 3,50x4,00x10,70 m³ tower built using a TRUSS system. The drop-forming mechanism consisted of a PPE pipes network on which stainless steel needles were installed at the distance of 2,5 cm. The distribution system was powered by a tank at the top of the set-up and a load control system was developed in order to guarantee a constant head during the experiments.

This set-up can produce rainfall intensities ranging from 2mm/h to 150mm/h by varying the head on the needles between 4cm and 50cm. Several tests have been conducted in order to define which type of needle was ideal for our needs. Shadowgraph imaging has been used to detect and measure the real diameters and the instantaneous velocity of single falling drops.

The needles used to carry out the experiments were: 30g, 27g and 25g; the purpose was to identify for each one an empirical law capable of correlating the intensity of rainfall and the average diameter to the agent load.

In order to validate the collected data obtained from the shadowgraph imaging technique, during each test a contact microphone recorded the ticking of the drops falling in a container; then the volume collected was measured and weighed. This allowed to indirectly estimate an average control diameter and the average intensity produced by each needle for each loading configuration. The tests showed an almost linear behavior of the intensity for different head pressure, this allowed to control easily and precisely the intensity of the simulated rainfall. The experiments showed an almost uniform distribution of the diameters of the drops which were not influenced by the load variations. The comparison between the diameters obtained from the two different methods above mentioned showed a close correlation between the data, with differences of less than 0,05 mm.

1. INTRODUZIONE

1.1 Background

I simulatori di pioggia costituiscono uno strumento molto utile e oggi ampiamente utilizzato per lo studio di svariati processi idrologici.

Questi strumenti sono stati sviluppati con lo scopo di riprodurre gli eventi naturali di precipitazione nella loro interezza oppure dando la priorità solo ad alcune delle loro caratteristiche a seconda dello scopo specifico. I simulatori di pioggia permettono di riprodurre le precipitazioni naturali, consentendo lo studio di fenomeni come: erosione, generazione di deflusso superficiale, infiltrazione, trasferimento dei sedimenti, movimento di sostanze chimiche nel suolo, frane, dilavamento in atmosfera ed altri processi legati alle precipitazioni.

In questa tesi si è sviluppato il progetto di un simulatore di laboratorio in scala reale che avesse la capacità di riprodurre fedelmente le precipitazioni naturali in termini di dimensione delle gocce, distribuzione della precipitazione, intensità e velocità delle gocce.

1.2 Scopo dello studio

Negli anni sono stati realizzati numerosi simulatori di pioggia ma a causa dell'unicità dei fenomeni che sono stati studiati e della difficoltà nel riprodurre fedelmente tutte le caratteristiche delle precipitazioni, manca purtroppo uno standard progettuale.

In letteratura sono presenti numerose pubblicazioni nelle quali è stato sviluppato il progetto di simulatori di pioggia per lo studio di fenomeni come l'erosione del suolo, la formazione di deflusso superficiale e altri fenomeni idrologici. Per questioni pratiche durante la progettazione dei simulatori si è data maggiore importanza alla riproduzione fedele solo di alcune proprietà delle precipitazioni. Questo capita per esempio negli studi di processi erosivi e di innesco delle frane, per i quali si dà la priorità a parametri come l'intensità e la distribuzione uniforme delle gocce trascurando altri aspetti come la loro dimensione in relazione all'intensità.

Lo scopo principale di questo studio è stato quindi quello di realizzare un simulatore che sia in grado di riprodurre il più fedelmente possibile le precipitazioni reali, così da poter studiare il fenomeno di dilavamento dell'atmosfera, ottenendo dei risultati che siano il più possibile rappresentativi. È stata poi sviluppata una tecnica per osservare le gocce generate dal simulatore e sono stati individuati gli strumenti più adatti per le misure delle precipitazioni simulate, così da poterne verificare le proprietà.

1.3 Domande scientifiche

Il simulatore oggetto dello studio produce gocce di pioggia attraverso l'uso di aghi ipodermici; relativamente a questi, nella fase di realizzazione del simulatore, si è cercato di individuare quale fosse il legame tra le dimensioni dell'ago, la dimensione delle gocce prodotte e l'intensità di precipitazione generata.

1.4 Metodologia

Lo studio in laboratorio di fenomeni quali il deflusso superficiale dovuto ad eventi molto intensi, il raffrescamento dell'aria o la riduzione d'inquinanti dispersi sotto forma di aerosol, richiede l'uso di un simulatore capace di riprodurre fedelmente le precipitazioni reali per avere dei risultati che siano attendibili.

I simulatori si distinguono in due categorie: simulatori ad ago e simulatori ad ugello.

Questi ultimi lavorano sotto l'azione di carichi elevati e per produrre un incremento di intensità richiedono un aumento della pressione di esercizio che comporta una riduzione del diametro medio delle gocce generate; ciò è in totale controtendenza con quanto si osserva in un evento di pioggia naturale. Per questa ragione si è deciso di realizzare un simulatore di pioggia ad ago le cui gocce vengono prodotte con diametro uniforme anche al variare dell'intensità.

Questa tipologia di simulatori lavora a bassa pressione di conseguenza non impartisce alle gocce un valore di velocità iniziale che consenta il raggiungimento della velocità terminale percorrendo una breve distanza. Per questa ragione il simulatore è stato realizzato su una torre alta 10,70 m.

Il lavoro si articola in un primo capitolo introduttivo che fornisce alcuni concetti base riguardanti i simulatori di pioggia, espone lo scopo dello studio, i quesiti a cui si vuol dare risposta e contiene una breve descrizione di come si intende operare al fine di raggiungere gli obiettivi prefissati.

Il secondo capitolo riporta la teoria alla base del sistema di alimentazione del simulatore e i fenomeni che intervengono nel meccanismo di formazione e caduta delle gocce.

Il terzo capitolo illustra in maniera riassuntiva lo stato dell'arte dei simulatori di pioggia, esponendone le principali caratteristiche; riporta due pubblicazioni disponibili in letteratura, inerenti all'uso delle due diverse tipologie di simulatore; vengono inoltre mostrate le varie tecniche per la misura delle precipitazioni e delle loro caratteristiche.

Il quarto capitolo riporta alcuni dei sensori di precipitazione disponibili in commercio, fornendo una tabella riassuntiva riportante le principali caratteristiche di questi strumenti.

Il quinto capitolo descrive nel dettaglio il setup sperimentale del pioggiatore e del sistema per lo studio delle gocce prodotte da un singolo ago, la strumentazione e la metodologia adoperata per l'analisi.

Il sesto capitolo espone e confronta i risultati ottenuti dall'applicazione delle diverse tecniche, a seguito dell'analisi sperimentale condotta per ciascun ago.

Il settimo capitolo riporta le conclusioni e dei suggerimenti per implementazioni future.

2. TEORIA

2.1 Bottiglia di Mariotte

La bottiglia di Mariotte prende il nome dal fisico francese Edme Mariotte (1620-1684) e la sua progettazione è stata proposta per la prima volta da E. L. McCarthy (1934). La funzione principale di questo strumento è quella di garantire un carico costante, indipendentemente dalle variazioni di livello idrico all'interno di un serbatoio chiuso.

Il progetto proposto da E. L. McCarthy (1934) prevede tre elementi fondamentali: un serbatoio chiuso ermeticamente, una presa d'aria ed un sifone. La presa d'aria è ottenuta tramite un tubo rigido che attraversa il tappo del serbatoio, la parte inferiore di questo tubo, affinché il meccanismo funzioni correttamente, deve essere al di sotto del livello dell'acqua all'interno del serbatoio. Affinché l'acqua possa fuoriuscire dal serbatoio è necessario che dell'aria vi entri per compensare la variazione di volume. Di conseguenza, quando il sifone è innescato, si stabilisce una condizione di equilibrio in cui la quota piezometrica all'interno del serbatoio si trova all'imbocco del tubo trattandosi del punto nel quale si ha l'immissione dell'aria.

Il carico agente allo sbocco del sifone sarà pertanto costante e pari alla differenza di quota tra quest'ultimo e la quota d'immissione dell'aria nel serbatoio come rappresentato in figura 2.1.

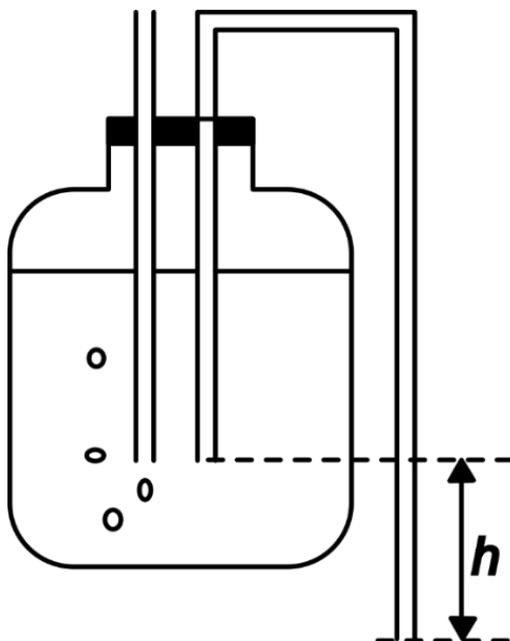


Figura 2.1: Rappresentazione della bottiglia di Mariotte. («Bottiglia di Mariotte». 2019. *Wikipedia*)

2.2 Resistenza Fluidodinamica

Un corpo che si muove attraverso un fluido è soggetto alla resistenza fluidodinamica, questa è una forza che si oppone al moto del corpo. L'entità della resistenza fluidodinamica che il corpo subisce dipende sia dal fluido che attraversa che da alcune proprietà del corpo stesso, più precisamente dipende da:

- densità del fluido;
- viscosità del fluido;
- velocità relativa tra fluido e corpo;
- forma geometrica del corpo.

Idealmente la resistenza fluidodinamica può essere divisa in due componenti:

- *resistenza di forma*;
- *resistenza di attrito viscoso*.

2.2.1 Resistenza di forma

Nel momento in cui il corpo incontra il fluido, le linee di corrente che inizialmente erano parallele, non potendo attraversare il corpo, devono deviare spostandosi lateralmente. La deviazione delle linee di corrente dipende dalla loro vicinanza al corpo, minore è la distanza dal corpo maggiore è la deviazione. A valle del corpo, le linee di flusso non si chiudono seguendo esattamente la superficie del corpo, ma lasciano una zona di ristagno. Questo si verifica per la viscosità, l'inerzia e la velocità delle linee di flusso. Nella zona di ristagno il fluido non è fermo ma in rotazione, si generano quindi dei vortici che fanno entrare questa zona in depressione. A causa della depressione che si genera a valle, il corpo viene attratto in direzione contraria a quella del suo moto, questa è la *resistenza di forma*. Tale fenomeno varia in funzione del valore della velocità.

I parametri che regolano il distacco dei vortici sono il numero di Strouhal, di Reynolds e la turbolenza del flusso.

Il primo a condurre studi relativi al distacco di vortici fu Strouhal. Nel 1878 egli studiò l'emissione sonora da fili e cavi sottoposti all'azione del vento e scoprì che il suono del cavo dipendeva dalla velocità del vento e dal diametro del cavo stesso.

Il numero di Strouhal dipende dalla frequenza di distacco dei vortici nella scia di Von Kármán f , dalla lunghezza caratteristica del corpo l che, nel caso si tratti di una sfera, è data dal diametro, e dalla velocità del flusso che investe il corpo v_f .

$$St = \frac{fl}{v_f}$$

La frequenza di distacco dei vortici di Von Kármán, quindi il numero di Strouhal, dipende dal numero di Reynolds. Kovásznay nel 1949, attraverso misure dirette, è riuscito a costruire un grafico che mette in relazione questi due numeri.

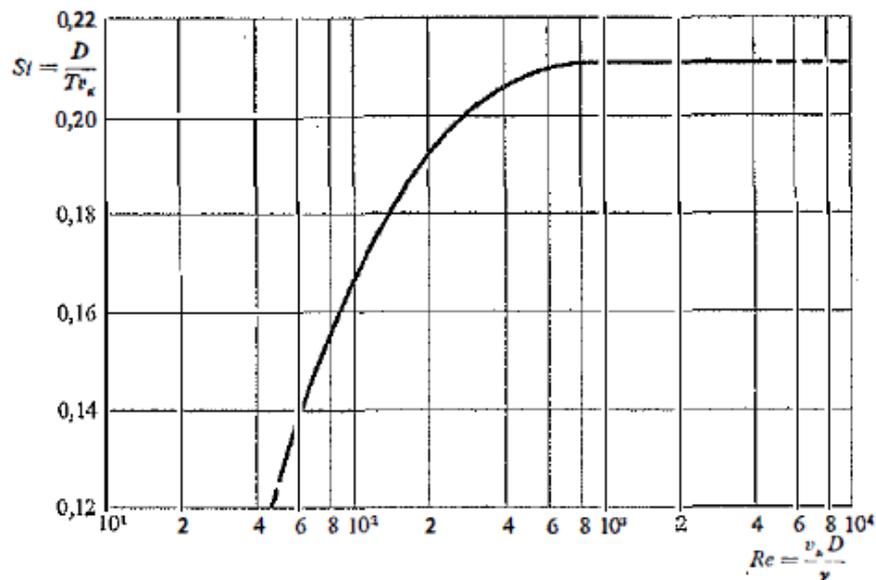


Figura 2.2: Numero di Strouhal espresso come funzione del numero di Reynolds (E.Marchi e A. Rubatta, 2000).

Theodor von Kármán nel 1911 si dedicò alla ricerca sulla formazione dei vortici attorno ai corpi cilindrici immersi in un flusso ed elaborò una soluzione analitica nota come la traccia del vortice di Kármán. Un cilindro di diametro D , investito da una corrente fluida, viene sollecitato da una forza F' dipendente dal valore del coefficiente di resistenza C_R . Questo coefficiente è funzione del numero di Reynolds, per cui il moto della corrente che incontra un corpo cilindrico varia progressivamente al crescere del numero di Reynolds.

Per valori del numero di Reynolds inferiori a 0,5 il moto è laminare, per valori compresi tra 0,5 e 50, a poppa del cilindro si manifestano due vortici a delta simmetrici. Inizialmente la zona di separazione delle linee di flusso è in corrispondenza del punto di ristagno a poppa e si sposta successivamente verso monte. Nel campo dei numeri di Reynolds compresi tra 50 e 5000, i vortici si distaccano alternativamente dal cilindro e vengono trascinati verso valle dalla corrente. Questa doppia schiera di vortici alternati è la scia di

Kármán. I vortici viaggiano ad una velocità leggermente inferiore rispetto a quella che il fluido possiede quando investe il corpo e si disperdono in una turbolenza minuta della scia. Per valori del numero di Reynolds superiori a 5000, la scia resta turbolenta e torna ad essere simmetrica. Al crescere del numero di Reynolds la scia si restringe progressivamente. Per $Re = 5 \cdot 10^5$, lo strato limite laminare di prua passa a strato turbolento prima del distacco perciò lo spessore della scia ed il valore del coefficiente di resistenza diminuiscono significativamente. Dopo di che, se il numero di Reynolds cresce ulteriormente, la scia si allarga fino ad assumere un assetto che si mantiene costante per valori del numero di Reynolds crescenti.

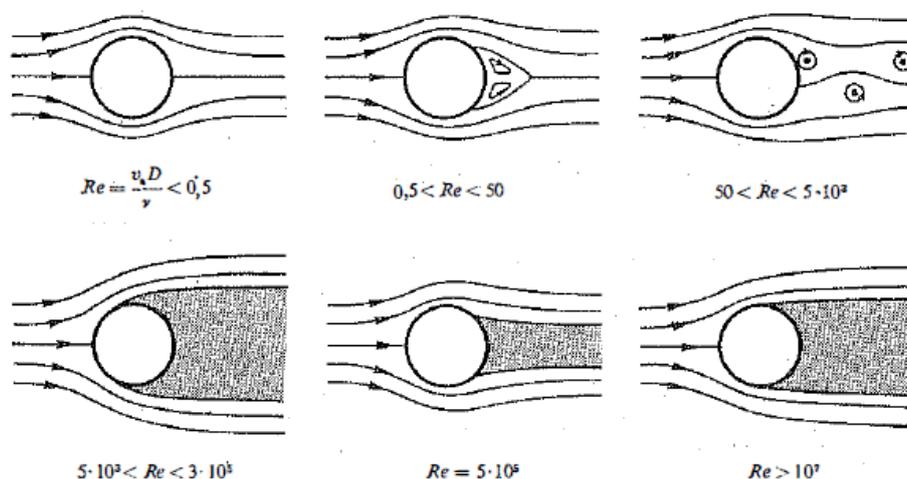


Figura 2.3: Aspetto della corrente che avvolge un cilindro per diversi range del numero di Reynolds (E.Marchi e A. Rubatta, 2000).

Nel caso di una sfera l'andamento del coefficiente di resistenza e della corrente, all'aumentare del numero di Reynolds, è simile al caso del cilindro. L'espressione per il calcolo della forza che sollecita la sfera è:

$$F' = C_R \rho \frac{v_a^2 \pi D^2}{2 \cdot 4}$$

Dove ρ e v_a sono rispettivamente la densità del fluido e la velocità iniziale della corrente.

Fino a valori del numero di Reynolds pari ad uno, il moto è laminare ed il valore del coefficiente di resistenza è pari a:

$$C_R = \frac{24}{Re}$$

Al crescere del numero di Reynolds il moto cambia progressivamente e si osserva un distacco di vena dalla sfera, questo si sposta dal punto di ristagno

di poppa verso monte. In queste condizioni il valore del coefficiente di resistenza non dipende più dal numero di Reynolds. Per valori di $Re \cong 3 \cdot 10^5$ il coefficiente di resistenza cade bruscamente, lo strato limite diventa turbolento e la zona di distacco viene trascinata verso poppa. Se il valore del numero di Reynolds cresce ulteriormente, il valore del coefficiente di resistenza diventa costante e la scia assume la forma di quella di Helmholtz.

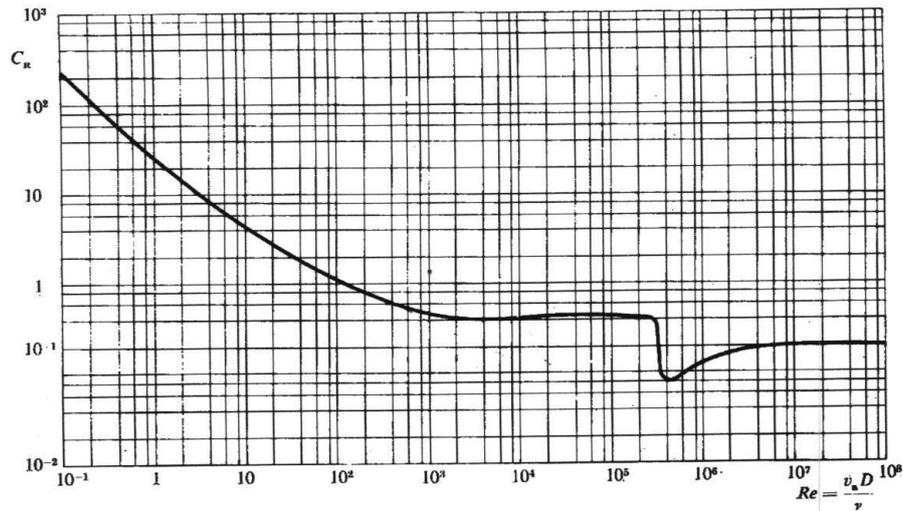


Figura 2.4: Coefficiente della resistenza offerta da una sfera ad una corrente uniforme in funzione del numero di Reynolds (E. Marchi e A. Rubatta, 2000).

2.2.2 Resistenza di attrito viscoso

La resistenza di attrito viscoso è dovuta alle forze viscosse che il corpo ed il fluido si scambiano. Considerando il fluido fermo e il corpo in movimento, come nel caso di una goccia di pioggia che cade attraversando l'aria, per la condizione di aderenza, se il fluido è viscoso le sue particelle a contatto con il corpo si muoveranno con il corpo stesso. Di conseguenza il corpo, durante il suo moto, esercita un'azione accelerante sulle particelle di fluido che a sua volta, per il principio di azione e reazione, eserciterà sul corpo un'azione frenante. La resistenza di attrito viscoso è quindi funzione della superficie a contatto con il fluido, della velocità del corpo e della viscosità del fluido.

$$F_a = -\eta \cdot K \cdot v$$

Dove:

- F_a è la forza di attrito viscoso;
- η è il coefficiente di attrito interno o di viscosità;
- K è la lunghezza caratteristica del corpo che attraversa il fluido;

– v è la velocità del corpo.

Quando un corpo cade liberamente in un fluido, come ad esempio l'aria, sotto l'effetto dell'accelerazione gravitazionale aumenta progressivamente la sua velocità, questo comporta un aumento della forza di attrito viscosa esercitata dal fluido.

Quando la forza che si oppone al moto del corpo in caduta libera raggiungerà la stessa intensità della forza di gravità, le forze agenti sul corpo saranno in equilibrio e, conseguentemente, l'accelerazione di questo sarà nulla. Il corpo continuerà la sua caduta ad una velocità costante pari a quella che viene definita la sua *velocità terminale*.

Con il termine *velocità terminale* s'intende la massima velocità raggiungibile da un oggetto che cade attraverso un mezzo fluido.

Facendo riferimento alle gocce di pioggia che cadono, queste accelerano fino al raggiungimento della loro velocità terminale, ma affinché tale valore di velocità venga raggiunto, le gocce devono poter percorrere una distanza che sia sufficiente al raggiungimento dell'equilibrio tra la forza gravitazionale e la forza di attrito viscoso.

Nel caso delle precipitazioni reali, le gocce raggiungono sempre la loro velocità limite; negli esperimenti di laboratorio, invece, va sempre verificato che la formazione delle gocce avvenga ad un'altezza dal livello del suolo tale da permettere alle stesse il raggiungimento della loro velocità limite.

Il valore della velocità terminale dipende anche dalla dimensione della goccia che viene definita attraverso il suo diametro equivalente, ovvero il diametro di una sfera avente lo stesso volume della goccia stessa. La velocità di caduta aumenta all'aumentare della dimensione della goccia, perciò maggiore è la dimensione della goccia, maggiore sarà la sua velocità terminale. Anche la resistenza al moto esercitata dall'aria ha un effetto crescente con la dimensione delle gocce. Più sono grandi le dimensioni delle gocce, maggiore è la distanza che devono percorrere per raggiungere la loro velocità limite.

Teoricamente la velocità terminale di un corpo rigido, indeformabile e sferico che cade liberamente attraverso un fluido, per esempio l'aria, può essere calcolata semplicemente imponendo l'uguaglianza tra la forza gravitazionale e la forza dovuta alla resistenza del fluido. Per ottenere il coefficiente di attrito interno dei corpi che attraversano l'aria sono stati condotti numerosi esperimenti su sfere rigide ed indeformabili in galleria del vento.

Le gocce di pioggia durante la caduta vibrano e ruotano, quindi utilizzare per lo studio della loro caduta lo stesso coefficiente che si applica allo studio di sfere rigide ed indeformabili porta risultati non del tutto attendibili (Gunn e Kinzer, 1949).

Diversi autori hanno proposto delle formulazioni per il calcolo della velocità terminale delle gocce di pioggia, come di seguito si riporta.

Autore	Velocità Limite	Note
Rogers, 1989	$U_t = c_1 d$	$c_1 = 4000 \text{ s}^{-1}$ $0.08 \leq d \leq 1.5 \text{ mm}$
Atlas et al., 1973	$U_t = 965 - 1030e^{-6d}$	$[d] = \text{cm}$ $[U_t] = \text{cm s}^{-1}$ $0.6 \leq d \leq 5.8 \text{ mm}$
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 and Yau, 1989	$U_t = c_2 \left(\frac{\rho_{a,0}}{\rho_a} \right)^{1/2} d^{1/2}$	c_1 $= 1500 \text{ cm}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ $\rho_{a,0} = 1.20 \text{ kg m}^{-3}$ $1.2 \leq d \leq 4.0 \text{ mm}$
Best, 1950	$U_t = 932e^{0.0405z} \{1 - e^{-(d/1.77)^{1.147}}\}$	$[U_t] = \text{cm s}^{-1}$ $z = \text{altitudine in km}$ $0.3 \leq d \leq 6.0 \text{ mm}$
Lhermitte, 1990	$U_t = 923 \left(\frac{\rho_{a,0}}{\rho_{a,z}} \right)^{0.5} [1 - e^{-(-6.8d^2 - 4.88d)}]$	$[d] = \text{cm}$ $[U_t] = \text{cm s}^{-1}$ $\rho_{a,z} = \text{densità}$ dell'aria $\text{all'altitudine } z$

Tabella 2.1: Espressioni per il calcolo della velocità terminale.

Wang e Pruppacher (1977) hanno dimostrato nei loro calcoli teorici che le gocce con diametro equivalente compreso tra 2,5 mm e 5 mm circa, sono quelle che richiedono le distanze di caduta maggiori per raggiungere la velocità limite. Hanno inoltre ricavato due espressioni per il calcolo del tempo (t_β) e della distanza (z_β) necessari al raggiungimento della frazione β della velocità limite:

$$t_\beta = -\tau \ln(1 - \beta)$$

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

Dove τ è una costante temporale che fornisce indicazioni in merito all'abbattimento delle oscillazioni della goccia ed è funzione del diametro medio della goccia (d), della viscosità cinematica della goccia (ν) e dell'ordine di oscillazione (n) (Chowdhury et al. 2016):

$$\tau = \frac{d^2}{4(n-1)(2n+1)\nu}$$

2.3 Processo di formazione delle gocce attraverso l'uso di aghi

La forma delle gocce d'acqua tende ad oscillare sia nei processi naturali che in quelli di laboratorio. Pur essendo state studiate per oltre un secolo, la comprensione delle vibrazioni naturali delle gocce d'acqua è ancora insoddisfacente.

Quando le gocce vengono prodotte con gli aghi, per effetto della forza gravitazionale, l'acqua scorre verso il basso all'interno dell'ago.

Inizialmente il profilo della goccia che si deve ancora formare è sferico, poi all'aumentare del rapporto tra forza gravitazionale e tensione superficiale, la goccia si deforma e risulta appesa alla sorgente. In questo caso, la vibrazione è l'effetto risultante della deformazione e dell'elasticità della regione della goccia vicino alla sorgente (Parkinson e Phan 2018).

La risposta oscillatoria della goccia è influenzata dalla sua forma; quest'ultima si discosta da quella sferica. La dinamica delle oscillazioni delle gocce, che durante la fase di formazione risultano appese al supporto, è governata da quattro parametri adimensionali:

- Numero di Reynolds (Re);
- Numero gravitazionale di Bond (Bo);
- Fattore dimensionale (per esempio, il rapporto tra il raggio equivalente della goccia ed il raggio dell'ago);
- Fattore di forma (per esempio, il rapporto degli assi della goccia).

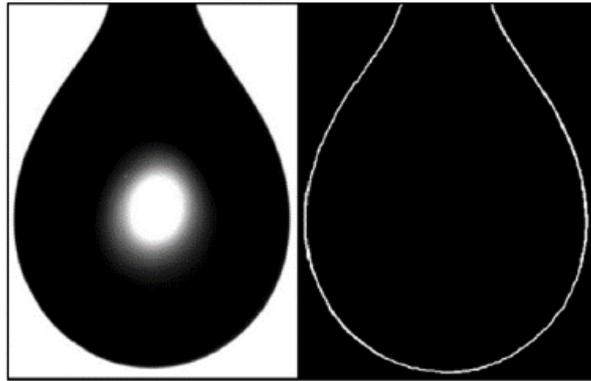


Figura 2.5: Profilo della goccia che pende dal supporto (Parkinson e Phan 2018).

Tra i vari esperimenti di laboratorio che sono stati condotti per lo studio della frequenza di risonanza delle gocce formate da aghi, quello di Parkinson e Phan (2018) è di particolare interesse.

Le vibrazioni naturali delle gocce sono state registrate tramite una tecnica di elaborazione di immagini digitali, senza l'applicazione di oscillazioni forzate sul supporto. Questo metodo si è rivelato efficace, e ha consentito la determinazione della frequenza delle gocce di acqua distillata di volume compreso tra 3,00 e 40,20 mm³.

La grandezza con la quale vengono identificate le gocce è il volume, dal quale possono essere ricavati diametro equivalente e massa delle gocce stesse. Dagli esperimenti condotti, la frequenza dominante è risultata inversamente proporzionale alla massa, fornendo una relazione esponenziale proporzionale al volume elevato alla potenza -0,744, approssimativamente -3/4. Il volume però, da solo, non fornisce informazioni complete sul fenomeno oscillatorio delle gocce, perciò è necessario definire un tempo caratteristico t_c . Seguendo l'analisi di O.A. Basaran e D.W. DePaoli (1994) il tempo caratteristico può essere definito come:

$$t_c = \sqrt{\frac{\rho R_{eq}^3}{\gamma}}$$

Dove ρ e γ sono rispettivamente la densità e la tensione superficiale del fluido, mentre R_{eq} è il raggio equivalente della goccia.

La frequenza adimensionale della vibrazione può essere ottenuta dal prodotto tra la frequenza ed il tempo caratteristico:

$$F_v = f_v t_c$$

In letteratura, il fattore dimensionale (adimensionalizzato) che viene tipicamente usato, è il rapporto tra il raggio equivalente della goccia e il raggio del supporto (R_{eq}/R_z). All'aumentare di questo rapporto, la frequenza delle vibrazioni diminuisce rapidamente tendendo allo zero (Strani e Sabetta 1984). Si è osservato però che, a parità di tale rapporto, la frequenza decresce significativamente al crescere delle dimensioni del supporto. Quindi, questo rapporto non può essere utilizzato per descrivere l'andamento della frequenza (Parkinson e Phan 2018).

Essendo la formazione delle gocce governata dall'equilibrio tra la forza gravitazionale e la tensione superficiale, Parkinson e Phan (2018) hanno proposto un nuovo parametro S che, oltre alla dimensione della goccia, tiene conto di questo equilibrio:

$$S = \frac{R_{eq}}{L_{Ca}}$$

Dove L_{Ca} è definita lunghezza capillare, ed è funzione della tensione superficiale e della forza gravitazionale secondo la seguente formula:

$$L_{Ca} = \sqrt{\frac{\gamma}{g\rho}}$$

La frequenza risulta proporzionale al parametro S elevato alla $-3/4$ (Parkinson e Phan 2018).

$$F_v \propto S^{-\frac{3}{4}}$$

2.4 Forma delle gocce

Le gocce di pioggia durante la caduta modificano la loro forma. I fattori che maggiormente influenzano l'aspetto della goccia sono: tensione superficiale, pressione idrostatica, pressione aerodinamica, circolazione interna, sforzo elettrico e la dimensione della goccia stessa (Beard e Chuang, 1987).

Fondamentalmente le gocce di pioggia possono essere in una condizione di equilibrio ed avere una forma stabile, oppure una forma in continua variazione caratterizzata da oscillazioni (Chowdhury et al. 2016).

Pruppacher and Beard (1970) hanno osservato come le gocce che cadono ad una velocità pari a quella terminale, hanno una forma che dipende dalla loro dimensione (Chowdhury et al. 2016). Sono stati individuati tre range di diametri, e le gocce sono state suddivise in tre classi.

- Classe I: $d < 0,25$ mm, nessuna deformazione rilevabile che si discosti dalla forma sferica;

- Classe II: $0,25 \leq d < 1$ mm, leggera deformazione, la tensione superficiale è quella prevalente e conferisce alla goccia una forma approssimativamente sferica;
- Classe III: $d \geq 1$ mm, elevata deformazione, la goccia risulta appiattita nella parte inferiore e cambia gradualmente curvatura fino ad assumere una forma sferica nella parte superiore.

Per descrivere la forma delle gocce di pioggia generalmente si fa riferimento al rapporto degli assi α , ovvero al rapporto tra la massima corda verticale e quella orizzontale.

Negli anni sono stati sviluppati diversi modelli per la descrizione della forma delle gocce in condizioni di equilibrio. I dettagli della ricerca teorica svolta nel passato, mostrano che il rapporto α diminuisce all'aumentare della dimensione della goccia. Questa considerazione è resa evidente anche da alcune delle formule riportate nella tabella 2.2.

Le basi fisico-matematiche per lo studio della forma di una goccia che cade, sono date dalle equazioni del moto di Navier-Stokes. La corretta applicazione delle condizioni al contorno consente lo studio del campo di moto che si genera attorno alla goccia, così come quello dell'acqua all'interno della goccia.

I parametri adimensionali, che descrivono la dinamica delle gocce che cadono liberamente, sono il numero di Reynolds (Re), il numero di Weber (We) ed il numero di Strouhal (St):

$$Re = \frac{U_1 d}{\nu}, \quad We = \frac{\rho_a U_1^2 d}{\gamma}, \quad St = \frac{f d}{U_1},$$

dove:

- U_1 è la velocità del flusso dell'aria (coincidente con la velocità terminale della goccia);
- ν è la viscosità cinematica;
- ρ_a è la densità dell'aria;
- γ è la tensione superficiale dell'acqua;
- f è la frequenza di distacco dei vortici di Von Kàrmàn della goccia;
- d è il diametro della goccia.

L'applicazione delle equazioni di Navier-Stokes, per questo tipo di fenomeno, è possibile per le gocce appartenenti alle prime due classi viste in precedenza, dove la velocità terminale ed il numero di Reynolds sono piccoli, condizioni in cui anche il numero di Weber è molto piccolo ed il numero di Strouhal è nullo; in questo caso il flusso non ha abbastanza energia da generare vortici. Per le gocce appartenenti a queste due classi, il valore della pressione

idrostatica nella parte inferiore della goccia è pressoché uguale a quello nella parte superiore. A causa dei bassi valori del numero di Reynolds non si verifica, oppure si verifica in ritardo, la separazione delle linee di flusso; questo porta ad avere un valore della pressione aerodinamica nella parte superiore della goccia simile a quello nella parte inferiore. Pertanto, a governare il comportamento delle gocce di piccole dimensioni, è la tensione superficiale che agisce in modo da minimizzare l'area di interfaccia, modellando la superficie della goccia in una sfera o una sfera schiacciata.

Autore	Rapporto degli assi	Note
Pruppacher and Beard, 1970	$\alpha = 1,03 - 0,062d$	$[d] = mm$
Beard and Chuang, 1987	$\alpha = 1,0048 + 0,0057d - 2,62d^2 + 3,682d^3 - 1,677d^4$	$[d] = cm$
Green, 1975	$a_0 = \left(\frac{\gamma}{g\rho}\right)^{1/2} \frac{(\alpha^{-2} - 2\alpha^{-1/3} + 1)^{1/2}}{\alpha^{1/6}}$ $a_0 = c_{Max}^{2/3} c_{min}^{1/3}$	c_{Max} = corda semimaggiore c_{min} = corda semiminore
Beard et al. 1989a	$\alpha = \frac{1 - 0,11W_e}{1 + 0,11W_e}$	
Imai, 1950	$\alpha = \left(1 + \frac{3}{32} \frac{d\rho_m U_t^2}{\gamma}\right)^{3/4}$	ρ_m = densità del vapore acqueo in aria satura
Andsager et al., 1999	$\bar{\alpha} = 1,012 - 0,144d - 1,03d^2$	$[d] = cm$ $\bar{\alpha}$ = valore medio del rapporto degli assi

Tabella 2.2: Espressioni per il calcolo del rapporto degli assi.

Per le gocce di maggiori dimensioni (classe III), la distanza tra la parte superiore ed inferiore è maggiore e di conseguenza sarà maggiore l'effetto della pressione idrostatica, in questo caso comparabile a quello della tensione superficiale. Queste gocce raggiungono valori di velocità elevati, perciò sia la velocità terminale che il numero di Weber sono grandi. L'ordine di grandezza delle forze aerodinamiche destabilizzanti è comparabile alle forze dovute alla tensione superficiale stabilizzante. Il flusso d'aria che si viene a generare attorno ad una goccia di grandi dimensioni, presenta un numero di Reynolds elevato. Le forze d'inerzia prevalgono sulle forze viscoso stabilizzanti, provocando la separazione delle linee di flusso attorno alla goccia e la creazione di una scia dietro quest'ultima. La distribuzione della pressione aerodinamica è variabile lungo la superficie della goccia e questa deve essere bilanciata dalla pressione idrostatica affinché la goccia sia stabile. In queste condizioni, la forma della goccia è data dall'equazione del bilanciamento della pressione di Laplace, che collega la curvatura in ciascun punto della superficie della goccia con la differenza di pressione all'interfaccia Δp .

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

Con R_1 e R_2 i raggi principali di curvatura.

La maggiore difficoltà nell'applicare questa formula è dovuta alla mancanza di informazioni sulla distribuzione della pressione aerodinamica attorno alla superficie della goccia nella sua forma di equilibrio.

Le osservazioni sul campo e in laboratorio, hanno dimostrato che le gocce della classe III, a causa delle loro oscillazioni, possono avere una vasta gamma di forme. In condizioni di precipitazione reale, la forma delle gocce è influenzata anche da altri fattori come: collisioni tra gocce di pioggia (Johnson and Beard 1984; Szakáll et al., 2014), sforzo di taglio e turbolenza prodotti dall'azione del vento (Tokay e Beard, 1996). Nel caso in cui le gocce vengano prodotte in laboratorio, questi fattori possono essere controllati o annullati. In questo modo però le gocce subiscono delle oscillazioni indotte dalla sorgente nelle fasi iniziali di caduta; queste oscillazioni vengono poi smorzate gradualmente dalla dissipazione viscosa, sino al raggiungimento della forma di equilibrio.

L'analisi delle oscillazioni delle gocce varia in funzione della loro dimensione. Le gocce di piccola ampiezza, avendo una forma, in condizioni di equilibrio, approssimativamente sferica, vengono studiate come perturbazioni armoniche sferiche (Rayleigh, 1879).

Le frequenze di oscillazione delle perturbazioni armoniche sferiche sono date dalla formula:

$$f_n = \left[\frac{2n(n-1)(n+2)\gamma}{\pi^2 \rho d^3} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Dove:

- n è l'ordine delle perturbazioni armoniche sferiche;
- d è il diametro della sfera che ha lo stesso volume della goccia;
- γ è la tensione superficiale;
- ρ è la densità dell'acqua.

Ogni frequenza di oscillazione è associata con $m = n + 1$ modi degeneranti. Ciascuna combinazione di ordine e modalità (n, m) ha un orientamento spaziale unico (Beard e Kubesh, 1991). Generalmente le oscillazioni della goccia di pioggia si considerano governate dalle tre modalità di oscillazione dell'armonica fondamentale; vale a dire, (2, 0), (2, 1), (2, 2), queste vengono indicate rispettivamente come modalità asimmetrica, trasversale e orizzontale (Testik e Barros, 2007). Le caratteristiche geometriche di queste oscillazioni sono mostrate nella figura 2.6.

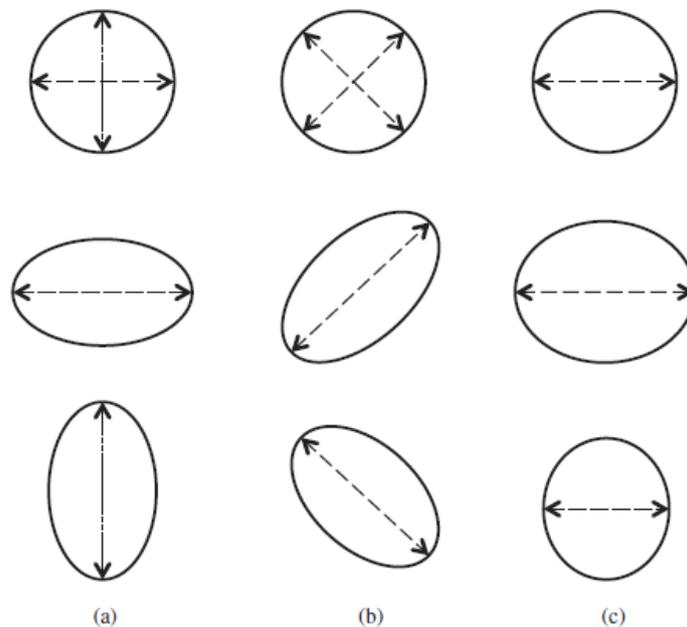


Figura 2.6: Rappresentazione dei tre modi di oscillare dell'armonica fondamentale nelle diverse fasi dell'oscillazione: (a) assialsimmetrico, (b) trasversale e (c) orizzontale. Dall'alto $t = 0, T/4, 3T/4$; dove T è il periodo di un'oscillazione. Le frecce indicano le direzioni di oscillazione. (Chowdhury et al. 2016).

La frequenza di oscillazione delle gocce con diametro equivalente superiore al millimetro, differisce da quella delle gocce sferiche, quindi non può essere calcolata con la formulazione di Rayleigh. Inoltre, le frequenze di oscillazione di queste gocce distorte mostrano dipendenza dal modo di oscillare (Feng and Beard, 1991).

In assenza di azioni esterne, le oscillazioni non possono persistere a lungo ed interviene lo smorzamento viscoso.

Come la goccia si avvicina alla sua forma di equilibrio, l'ampiezza del rapporto degli assi A decresce esponenzialmente (Testik e Barros, 2007; Chowdhury et al. 2016).

$$A = A_0 e^{-t/\tau}$$

Dove:

- A_0 è la massima ampiezza delle oscillazioni;
- t è il tempo trascorso dall'inizio delle oscillazioni;
- τ è la costante temporale definita nel paragrafo precedente.

Chowdhury et al. (2016) hanno eseguito degli esperimenti di laboratorio, con lo scopo di studiare il comportamento delle gocce d'acqua in caduta libera. Per la formazione delle gocce sono stati utilizzati degli aghi; le gocce, una volta formate, cadevano sotto l'azione del proprio peso senza l'aggiunta di altre forze esterne. Sulla base delle loro osservazioni sperimentali, sono state individuate per la caduta libera delle gocce tre zone distinte, di seguito denominate zona I, zona II e zona III. Uno schema rappresentante le diverse zone di caduta, con le relative immagini della goccia, è mostrato in figura 2.7.

Nella zona I, la goccia varia la sua forma in modo continuo a causa delle oscillazioni indotte dalla sorgente, queste oscillazioni vengono gradualmente smorzate dalla dissipazione viscosa. Alla fine della Zona I, le gocce hanno raggiunto una forma quasi stabile, indicata come forma di equilibrio. Nella Zona II, le gocce che hanno raggiunto la loro forma di equilibrio e valori di velocità sub-terminali, continuano ad accelerare per raggiungere la velocità terminale. Nella Zona III, le gocce hanno raggiunto la forma di equilibrio e la velocità terminale.

Dalla descrizione delle tre zone si evince che, nella Zona II le gocce possono raggiungere la forma di equilibrio senza però raggiungere la velocità terminale, ovvero, questa forma di equilibrio può sussistere nonostante i campi di velocità e pressione non si siano completamente sviluppati. Per questo fenomeno ci possono essere diverse spiegazioni plausibili. Una di queste, per esempio, può essere rappresentata dal fatto che, durante questa fase di accelerazione, i cambiamenti nei campi di velocità e pressione potrebbero avere un effetto trascurabile sulla forma della goccia, e le forze idrodinamiche e aerodinamiche potrebbero variare in modo da mantenerla quasi costante (Chowdhury et al. 2016).

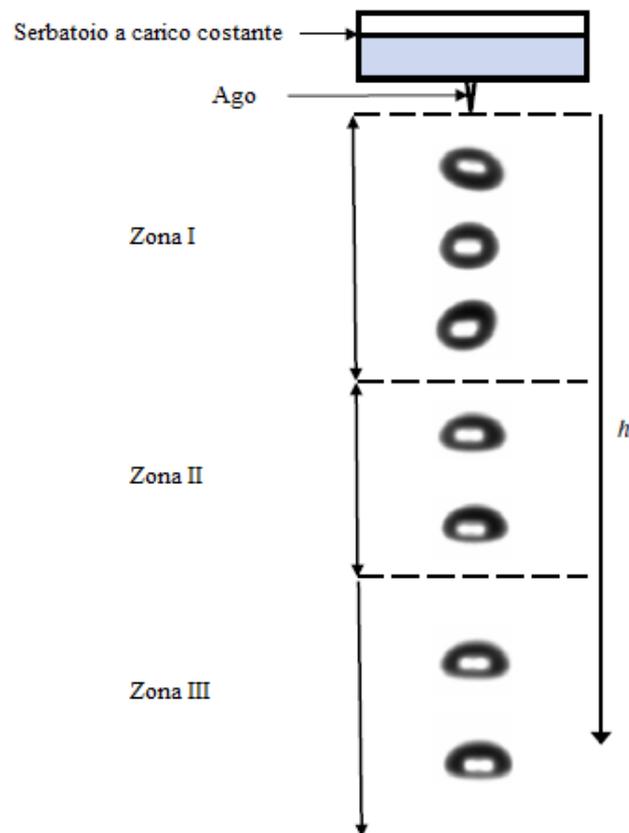


Figura 2.7: Le diverse zone di caduta delle gocce d'acqua in caduta libera. Per illustrare le tipiche forme della goccia in corrispondenza della relativa zona di caduta, sono riportate le immagini ingrandite di quest'ultima in diversi istanti ed elevazioni. La coordinata verticale h è positiva verso il basso e indica la distanza verticale che intercorre dalla punta dell'ago al punto di interesse della goccia di pioggia simulata (Chowdhury et al. 2016)

2.5 Cenni sulla teoria di propagazione degli errori

I valori ottenuti tramite la misura di una grandezza fisica sono generalmente accompagnati dalla stima dell'errore ad essa associato. Se una grandezza fisica è legata matematicamente ad una o più grandezze, determinate in modo diretto e aventi ciascuna un proprio errore, per determinare l'errore della grandezza ottenuta tramite una misura non diretta, bisogna tener conto della propagazione dell'errore.

Generalmente la stima di una grandezza fisica la si ottiene attraverso misure indirette, questa deriva quindi da altre grandezze ottenute attraverso misurazione diretta o tramite l'utilizzo di strumenti tarati.

La misura dell'errore di una generica grandezza x , determinata per via indiretta, dipenderà dalla relazione funzionale che lega tale grandezza a quelle misurate direttamente da cui dipende.

2.5.1 Somma e differenze

Definita $x = a + b$, i massimi valori probabili di a e b sono rispettivamente $a + \Delta a$ e $b + \Delta b$, dove Δa e Δb sono gli errori associati alle due grandezze. Di conseguenza il massimo valore probabile di x sarà:

$$x + \Delta x = (a + \Delta a) + (b + \Delta b) = (a + b) + (\Delta a + \Delta b)$$

Mentre il minimo sarà:

$$x - \Delta x = (a - \Delta a) + (b - \Delta b) = (a + b) - (\Delta a + \Delta b)$$

Da quanto riportato sopra, si ricava che l'errore legato alla grandezza x sarà pari alla somma degli errori delle grandezze da cui esso dipende:

$$\Delta x = \Delta a + \Delta b$$

In modo analogo, si può ricavare il valore dell'errore nel caso in cui x sia dato dalla differenza di due grandezze, $x = a - b$. Il massimo valore probabile per x sarà:

$$x + \Delta x = (a + \Delta a) - (b - \Delta b) = (a - b) + (\Delta a + \Delta b)$$

Mentre il minimo sarà:

$$x - \Delta x = (a - \Delta a) - (b + \Delta b) = (a - b) - (\Delta a + \Delta b)$$

Da cui si ricava nuovamente che:

$$\Delta x = \Delta a + \Delta b$$

In conclusione: date due o più grandezze acquisite per misurazione diretta comprensive di propria incertezza, l'errore massimo associato a una grandezza fisica, ottenuta dalle suddette grandezze tramite somma, differenza o combinazione delle due, sarà pari alla somma degli errori di queste singole grandezze.

2.5.2 Prodotto e quoziente

Definita $x = a \cdot b$, i valori massimi probabili di a e b sono, come visto in precedenza, rispettivamente $a + \Delta a$ e $b + \Delta b$. Conseguentemente il massimo valore probabile di x sarà:

$$x + \Delta x = (a + \Delta a)(b - \Delta b) = ab + a\Delta b + b\Delta a + \Delta a\Delta b$$

Ipotizzando $\Delta a \ll a$ e $\Delta b \ll b$, il prodotto tra Δa e Δb risulterà trascurabile, ottenendo così:

$$\Delta x = a\Delta b + b\Delta a$$

Si introduce dunque il concetto di errore relativo:

$$\frac{\Delta x}{|x|} = \frac{a\Delta b + b\Delta a}{ab} = \frac{\Delta a}{|a|} + \frac{\Delta b}{|b|}$$

Le grandezze presenti al denominatore sono riportate in valore assoluto, in quanto l'errore relativo è una quantità definita sempre positiva, indipendentemente dal valore della grandezza fisica cui è associato.

Il concetto di errore relativo è utile per la determinazione dell'errore di una grandezza fisica pari al rapporto di due grandezze.

Definita $x = a/b$, il massimo valore probabile per x sarà:

$$x + \Delta x = \frac{a + \Delta a}{b - \Delta b}$$

Introducendo l'errore relativo, si ottiene:

$$x + \Delta x = \frac{a}{b} \cdot \frac{1 + \frac{\Delta a}{|a|}}{1 - \frac{\Delta b}{|b|}} = \frac{a}{b} \frac{\left(1 + \frac{\Delta a}{|a|}\right) \left(1 - \frac{\Delta b}{|b|}\right)}{\left(1 - \frac{\Delta b}{|b|}\right) \left(1 - \frac{\Delta b}{|b|}\right)}$$

Trascurando il quadrato dei termini degli errori, si ottiene:

$$x + \Delta x = \frac{a}{b} \left(1 + \frac{\Delta a}{|a|} + \frac{\Delta b}{|b|}\right)$$

Da cui per passaggi successivi:

$$1 + \frac{\Delta x}{|x|} = 1 + \frac{\Delta a}{|a|} + \frac{\Delta b}{|b|}$$

$$\frac{\Delta x}{|x|} = \frac{\Delta a}{|a|} + \frac{\Delta b}{|b|}$$

In conclusione: date due o più grandezze acquisite per misurazione diretta comprensive di propria incertezza, l'errore relativo associato a una grandezza fisica, ottenuta dalle suddette grandezze tramite prodotto, quoziente o combinazione delle due, sarà pari alla somma degli errori relativi di queste singole grandezze.

3. STATO DELL'ARTE

3.1 I simulatori di pioggia

Il simulatore di pioggia è ad oggi uno strumento molto diffuso e utile per lo studio di svariati processi idrologici, in particolare quelli che riguardano l'interazione dell'acqua piovana con il suolo, come i fenomeni di erosione, la generazione del deflusso superficiale e l'infiltrazione.

I simulatori di pioggia vengono utilizzati negli studi sulla crosta del suolo e sull'erosione del suolo da oltre 30 anni (I. Abudi, G. Carmi, P. Berliner 2012). L'erosione del suolo è un processo chiave per comprendere le forme della superficie terrestre (Pennock et al. 1987, Clarke e Rendell 2000), il destino delle risorse, dei beni e dei servizi che il suolo dà all'umanità (Sharma et al. 2017). Al fine di raggiungere la sostenibilità, è necessario comprenderne a pieno il fenomeno così da poterlo gestire correttamente. L'erosione del suolo dipende dall'erodibilità dei suoli (Keesstra et al., 2016a; Kavian et al., 2017) e dall'erosività della pioggia (Kavian et al., 2011; Mohammadi e Kavian, 2015; Rodrigo-Comino et al., 2016a); per quantificare quest'ultima è rilevante la conoscenza della dimensione delle gocce.

Un altro campo di applicazione molto importante è dato dallo studio del trasferimento dei sedimenti e del movimento chimico nel suolo causato dalle piogge.

L'uso del simulatore di pioggia è molto indicato anche per il miglioramento delle conoscenze sul processo e l'occorrenza delle frane, nonché sul flusso di detriti. Con dispositivi di laboratorio attrezzati, vengono simulati diversi fenomeni in condizioni attentamente controllate, sia con modelli fisici su piccola scala, che su vasta scala (Reid et al., 1997; Iverson et al., 1997; Iverson, 1997; Rahardjo et al., 2002; Ochiai et al., 2004; Moriwaki et al., 2004; Reid et al., 2011).

Gli eventi meteorici molto intensi si verificano con una bassa frequenza e sono quelli che contribuiscono maggiormente alle variazioni geomorfologiche. L'imprevedibilità, la rarità e la casualità delle precipitazioni naturali rendono difficile studiarne gli effetti mentre si verificano e richiede molti anni di misurazioni affinché queste siano significative (Keesstra et al. 2014, Cerdà et al. 2017, Rodrigo-Comino et al. 2018).

I simulatori di pioggia generalmente forniscono una precipitazione più rapida, efficiente, controllata e adattabile alle esigenze specifiche, aiutando ad accelerare l'acquisizione dei dati. L'uso di questo strumento può quindi fornire una precipitazione precisa e correttamente indirizzata dal ricercatore.

I simulatori di pioggia offrono quindi l'opportunità di applicare diverse intensità di pioggia, di controllarne le caratteristiche e di ripetere gli

esperimenti; quest'ultimo aspetto è fondamentale per ottenere un campionamento di dati che sia significativo. È evidente che, affinché i risultati di questi studi siano rappresentativi dei fenomeni reali, le precipitazioni artificiali debbano comunque avere caratteristiche simili a quelle naturali. Le proprietà delle gocce di pioggia che dovrebbero essere riprodotte sono: distribuzione casuale, dimensione media, velocità terminale, angolo di caduta ed uniformità; le precipitazioni riprodotte devono anche essere in grado di simulare quelle reali in termini di intensità e durata. Altre caratteristiche desiderabili per un simulatore sono: basso costo e portabilità, questo nel caso in cui si vogliano eseguire esperimenti sul campo. I piccoli simulatori di pioggia portatili sono strumenti efficienti per la misurazione del deflusso e dell'erosione del suolo grazie al basso consumo di acqua, alle misurazioni accurate e alla loro gestione semplice ed economica (Ries et al. 2013, Vaezi et al. 2017). Idealmente questi dovrebbero essere facilmente gestibili da un numero ridotto di personale.

Purtroppo, la duplicazione della gamma di dimensioni delle gocce, dell'energia cinetica delle precipitazioni naturali, la distribuzione controllabile, uniforme o uguale nell'area in esame, è tuttora una sfida difficile.

Esistono numerosi simulatori di pioggia in uso, questo perché applicazioni diverse richiedono proprietà diverse, e perciò è stato necessario sviluppare dispositivi adatti alle esigenze particolari; ciò ha portato alla mancata definizione di un progetto standard. I simulatori tendono inoltre a compromettere alcune proprietà delle precipitazioni, a causa delle limitazioni di progettazione e di gestione necessarie.

La progettazione del simulatore comprende due sfide fondamentali: duplicare il più fedelmente possibile le caratteristiche fisiche delle precipitazioni naturali, e farlo con un dispositivo adatto all'area studiata e alle risorse disponibili.

I simulatori di pioggia, portatili o non, vengono classificati in base alla modalità di formazione delle gocce. Tipicamente i simulatori si distinguono in due categorie: simulatori a ugello e simulatori ad ago. La scelta tra le due tipologie si basa generalmente su vincoli geometrici, portabilità e costi.

I simulatori ad ago sono generalmente utilizzati per aree non più grandi di 1 m^2 , funzionano a bassa pressione e sono progettati per produrre gocce di grandi dimensioni, riuscendo a formare solo una gamma ristretta di dimensioni di gocce. Questo tipo di simulatori, per produrre le gocce di pioggia, utilizzano meccanismi di formazione come aghi ipodermici, tubi capillari e corde (Mutchler and Hermsmeier 1965). Tale sistema lavora a bassa pressione, perciò, affinché le gocce raggiungano la velocità terminale, è necessario che queste cadano da un'altezza intorno ai 9 m (Kavian et al. 2019). Per questo motivo, l'uso di questo tipo di simulatori è stato limitato per gli

esperimenti di laboratorio e non sul campo. Le gocce formate dai simulatori alimentati per gravità, iniziano la caduta a riposo e accelerano fino al raggiungimento della velocità limite. Minore è la dimensione della goccia, minori sono la velocità terminale e l'altezza di caduta necessaria per raggiungerla (Laws e Parsons, 1943). L'energia cinetica delle gocce, che è direttamente correlata alla dimensione delle gocce stesse e al quadrato della loro velocità al momento dell'impatto, varierà di conseguenza. In alcune applicazioni, per ottenere gocce con diametro inferiore rispetto a quello che si ottiene con il semplice uso di aghi ipodermici o tubi capillari, è stato installato al di sotto del piano di formazione delle gocce uno schermo di redistribuzione (T. P. Regmi e A. L. Thompson, 2000).

La piccola area precipitata, e la gamma limitata di diametri delle gocce generate da questo tipo di simulatori, costituiscono delle limitazioni rilevanti (Lora et al. 2016).

Durante gli anni '60, furono progettati e utilizzati sistemi di simulazione delle precipitazioni pressurizzati, per superare questi limiti (Moore et al. 1983, Paige et al. 2004, McLaughlin e Brown 2006).

Il sistema pressurizzato è costituito da uno o più ugelli spruzzatori, che possono essere fissi oppure rotanti. Il tipo di ugello maggiormente usato negli studi di simulazione delle precipitazioni è il VeeJet.

L'intervallo di pressione ottimale, ai fini della simulazione delle precipitazioni, è di circa 34–2000 kPa (Kavian et al. 2019). Questo tipo di simulatore può essere utilizzato anche per aree di dimensioni superiori a 1 m², e offre una gamma più ampia di dimensioni di gocce, superando i limiti di quelli che funzionano a bassa pressione. Inoltre, il funzionamento a pressione permette alle gocce di raggiungere la velocità terminale partendo da un'altezza di caduta inferiore, consentendo l'uso di simulatori con altezze più contenute e facilitandone così il trasporto per esperimenti sul campo. Spesso però, impartiscono alle gocce un'eccessiva energia cinetica rispetto alle precipitazioni naturali, con un conseguente elevato rischio di erosione e risultati non coerenti con la realtà.

Le dimensioni delle gocce di pioggia sono significativamente diverse a seconda della pressione operativa. È una regola generale, nell'uso dei simulatori di pioggia con ugelli come formatori di gocce, che maggiore è la pressione, minore è la media delle dimensioni delle gocce. Un aumento della pressione di lavoro però comporta anche un aumento dell'intensità media, e questo comportamento è esattamente l'opposto di ciò che si osserva con la pioggia naturale, dove, se aumenta l'intensità, aumenta anche la dimensione delle gocce.

Gli ugelli spruzzatori fissi tendono a produrre una distribuzione conica delle gocce (Hall, 1970), mentre i simulatori che utilizzano ugelli spruzzatori rotanti

hanno una periodicità inevitabile nell'intensità delle precipitazioni sulla superficie, per cui si verifica una forte ondata di pioggia seguita da un periodo di riposo (M. C. Battany e M. E. Grismer, 2000). Se utilizzati negli studi sull'erosione, tali simulatori producono meno erosione rispetto all'applicazione delle piogge non periodiche (Becher, 1994). L'angolo di oscillazione degli ugelli rotanti influenza il valore dell'intensità e del coefficiente di uniformità. All'aumentare di questo, l'intensità della pioggia simulata aumenta, ed il coefficiente di uniformità diminuisce (Kavian et al, 2019).

I criteri fondamentali che vengono considerati nella progettazione di un simulatore sono svariati, alcuni di questi criteri sono finalizzati alla somiglianza delle gocce prodotte con le precipitazioni naturali, come per esempio le dimensioni delle gocce, la velocità, l'angolo di impatto quasi verticale; altri sono correlati alle prestazioni come l'uniformità spaziale, e la capacità di riprodurre precipitazioni di diversa durata e intensità; mentre ulteriori caratteristiche desiderabili includono portabilità e basso costo.

Il generatore di gocce dovrebbe essere in grado di bagnare in modo omogeneo un'area preferibilmente ampia, e di produrre le gocce con una distribuzione dimensionale simile a quella delle precipitazioni naturali. La dimensione dell'area che viene bagnata in modo omogeneo è molto importante per gli studi sulla generazione di deflusso nei terreni naturali.

Nelle pagine a seguire sono riportati due esempi di simulatori di pioggia, uno per ciascuna tipologia di simulatore.

T. P. Regmi e A. L. Thompson 2000

T. P. Regmi e A. L. Thompson nel 2000 si dedicarono al progetto e alla costruzione di un simulatore di pioggia fisso in scala di laboratorio che producesse gocce con caratteristiche simili a quelle delle precipitazioni naturali.

Le principali caratteristiche del simulatore sono l'uso di formatori telescopici, di uno schermo di ridistribuzione delle gocce e l'applicazione del principio idraulico di spostamento del volume positivo.

Per la formazione delle gocce, e per il controllo della loro dimensione e della velocità di formazione, sono stati utilizzati due tipi di tubi ipodermici in acciaio inossidabile di diversa lunghezza e calibro, come mostrato nella figura 3.1.

Il tubo ipodermico per il controllo della portata è lungo 5 cm e di calibro 21 (diametro interno intorno ai 0,65 mm), quello per il controllo della dimensione delle gocce è lungo 2 cm e di calibro 9 (diametro interno intorno ai 3 mm). Questi sono disposti in un arrangiamento telescopico della lunghezza di 1,9 cm, se si considera anche la testa del bullone di bronzo di diametro 0,79 cm,

il sistema è lungo 2,4 cm. La testa in ottone di ciascun bullone è stata perforata per una profondità di 1,5 cm, in modo da poter alloggiare il tubo di calibro 9; la lunghezza rimanente è stata forata per potervi alloggiare quello di calibro 21. Il tubo ipodermico di calibro 21 è stato inserito nel bullone fino al livello della testa del bullone stesso, passando all'interno del tubo di calibro 9 per 1,5 cm. Entrambi i tubi sono stati fissati al bullone con della resina epossidica.

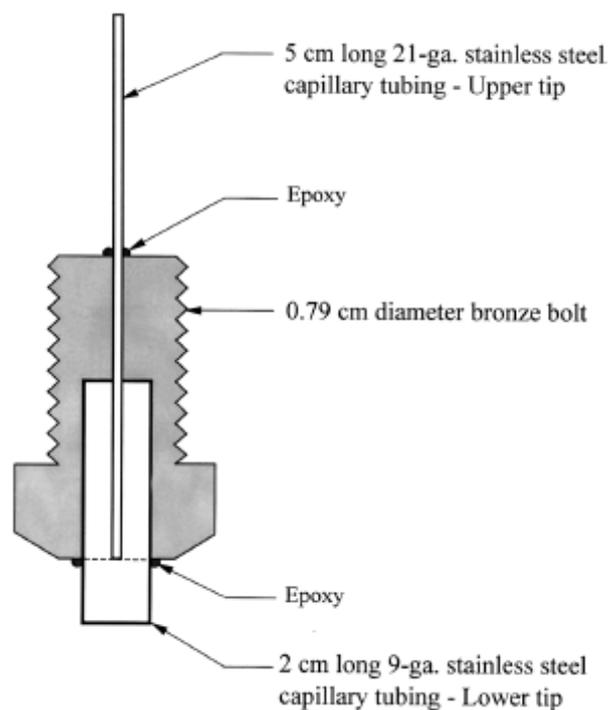


Figura 3.1: Rappresentazione grafica dello schema del formatore di gocce telescopico (T. P. Regmi e A. L. Thompson, 2000).

Il progetto dello schema idraulico di questo simulatore di pioggia si basa sul principio dello spostamento del volume positivo in un serbatoio sigillato. Il serbatoio è dotato di un tubo d'ingresso dell'aria graduato, di diametro interno 20 mm e spessore 2 mm, in materiale poliuretano trasparente, per il controllo del carico. Il carico nel serbatoio si misura dalla parte inferiore del tubo di ingresso dell'aria alla punta inferiore del formatore della goccia. Il serbatoio funziona come una bottiglia di Mariotte, perciò al suo interno, nella parte inferiore del tubo di ingresso dell'aria, si registra la pressione atmosferica. Il carico negli aghi viene controllato muovendo verticalmente il tubo mediante un motore passo-passo completamente automatizzato, accoppiato ad una cremagliera in nylon e un sistema a pignone in ottone, questo sistema consente di variare il carico con una precisione di 0,9 mm. La portata varia con il carico, perciò questo sistema consente un controllo preciso dell'intensità della

precipitazione simulata. La tenuta d'aria in corrispondenza del tubo per il controllo del carico è stata ottenuta attraverso l'uso di una serie di anelli in teflon (V-ring), posti all'interno di un alloggiamento in acciaio inossidabile spesso 1,9 cm con tensione regolabile.

Il sistema di gocciolamento è costituito da un serbatoio in acciaio inossidabile di $1 \times 1 \times 0,6 \text{ m}^3$, spesso 0,64 cm, chiuso inferiormente attraverso un piano di gocciolamento, sempre in acciaio inossidabile, di $1 \times 1 \text{ m}^2$ e spesso 0,95 cm. Nei fori filettati del piano di gocciolamento sono stati avvitati 216 gocciolatori, in una configurazione geometrica di triangoli equilateri, a 7,7 cm di distanza, in modo da ridurre al minimo il numero di gocciolatori, garantendo comunque adeguati tassi di intensità, area coperta e uniformità di applicazione. Il serbatoio di gocciolamento ha una capacità sufficiente per garantire un carico di 0,65 m su una superficie di 1 m^2 . Per le prove che richiedono un carico maggiore, l'acqua viene fornita da un serbatoio ausiliario da $1,89 \text{ m}^3$, collegato al serbatoio di gocciolamento attraverso delle linee di mandata dell'aria e dell'acqua, consentendo il funzionamento in continuo.

Il sistema viene fornito con acqua trattata ad osmosi inversa (RO).

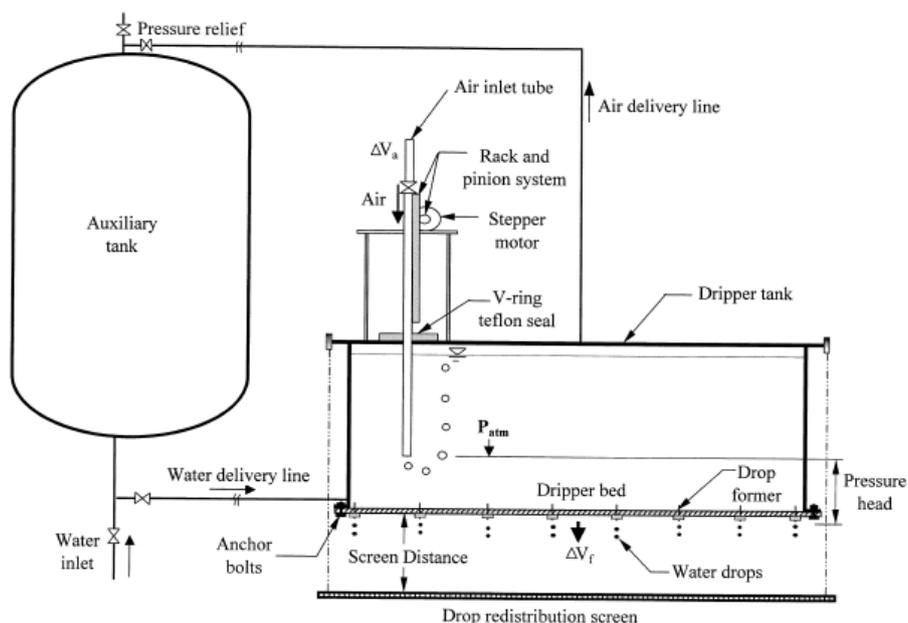


Figura 3.2: Rappresentazione grafica del sistema del simulatore di pioggia (T. P. Regmi e A. L. Thompson, 2000).

Per ottenere uno spettro più ampio di distribuzione dei diametri è stato posizionato, al di sotto del serbatoio di gocciolamento, uno schermo di redistribuzione in acciaio inossidabile composto da fili di 0,4 mm e maglie di 3,07 mm. Durante questo studio è stata individuata la posizione dello schermo

di redistribuzione che produce una distribuzione dimensionale delle gocce più simile a quella naturale in relazione all'intensità. Il sistema è stato installato su di un'apposita torre ad un'altezza di 14 m, giudicata sufficiente per il raggiungimento del 95% della velocità terminale da parte delle gocce con diametro minore o uguale a 4,3 mm.

Questo simulatore permette il controllo del carico del piano di gocciolamento con incrementi di 0,9 mm, e produce piogge simulate di intensità comprese tra 0,25 e 160 mm/h, con incrementi di 0,25 mm/h. I formatori di gocce, ottenuti tramite tubi capillari, sono in grado di produrre gocce di 4,5 mm di diametro mediamente. Lo schermo di redistribuzione al di sotto del piano di gocciolamento permette la modifica dei diametri delle gocce, producendo una distribuzione più simile a quella delle piogge naturali nel range di intensità compreso tra 12,7 e 152,4 mm/h.

Al variare del carico, mantenendo fissa la posizione dello schermo di redistribuzione, la distribuzione della dimensione delle gocce non presenta variazioni significative. Quest'ultima varia notevolmente con la variazione della quota del piano di redistribuzione, la cui oscillazione non sembra apportare miglioramenti nello spettro dimensionale delle gocce, rispetto a quanto ottenibile con una sua sospensione fissa.

Aksoy et al. 2012

Lo studio condotto da Aksoy et al. nel 2012 aveva lo scopo di specificare le caratteristiche delle precipitazioni di un simulatore di pioggia ad ugello su scala di laboratorio, e di valutare la qualità e la riproducibilità della pioggia simulata, per lo studio del meccanismo di trasporto dei sedimenti da una sezione collinare in un canale di erosione.

Il simulatore, realizzato all'interno del laboratorio, è munito di una barra montata al soffitto ad un'altezza di 2,60 m dal letto del canale, su cui sono stati posizionati gli ugelli. La distanza dal canale di erosione è tale da garantire il raggiungimento della velocità terminale delle gocce prodotte. La barra non è fissa ma oscilla grazie ad un motore e la sua periodicità è regolata da un convertitore di frequenza. Il canale di erosione posizionato sotto il simulatore si trova ad un'altezza di 1,15 m da terra.

L'alimentazione avviene attraverso un serbatoio collegato al sistema di approvvigionamento idrico e una pompa che alimenta una condotta principale. Questa si dirama in quattro o cinque tubi, a seconda del numero di ugelli utilizzati per la simulazione. All'estremità di ciascun tubo sono installati gli ugelli e immediatamente a monte di questi sono montati dei misuratori di pressione.

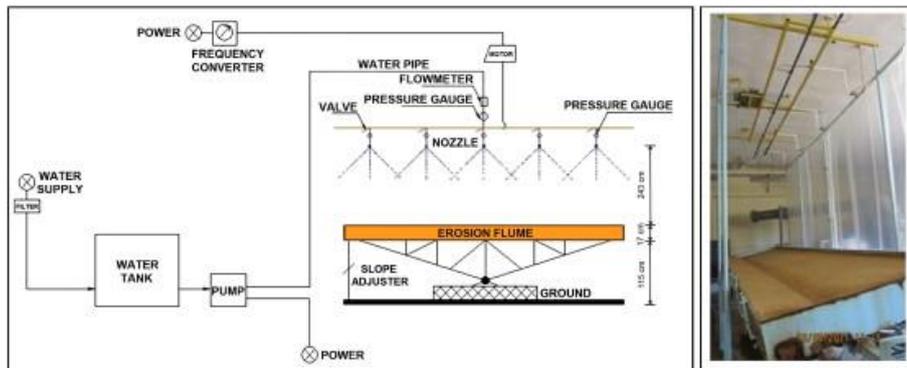


Figura 3.3: Rappresentazione grafica e fotografia del simulatore di pioggia e del canale di erosione (Aksoy et al., 2012).

Gli esperimenti condotti hanno simulato quattro diverse intensità di pioggia e per ciascuna di esse è stato utilizzato un diverso tipo di ugello. Per simulare l'intensità di 45 mm/h sono stati installati nella barra oscillante quattro ugelli VeeJet 8030 mentre per 65 mm/h ne sono stati installati quattro di tipo VeeJet 8050. Per le intensità superiori pari a 85 e 105 mm/h sono invece stati utilizzati rispettivamente cinque ugelli VeeJet 8060 e cinque ugelli VeeJet 8070.

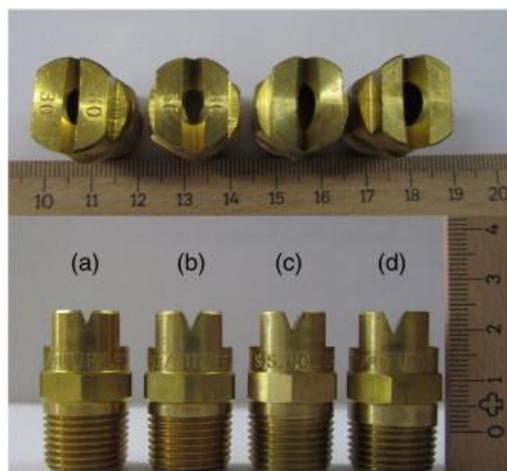


Figura 3.4: Dettaglio ugelli VeeJet utilizzati nel simulatore: (a) VeeJet 8030; (b) VeeJet 8050; (c) VeeJet 8060; (d) VeeJet 8070; (Aksoy et al., 2012).

Il numero di ugelli è stato valutato in modo tale da garantire una distribuzione uniforme delle precipitazioni sul canale. La distanza tra gli ugelli era fissa e pari a 145 cm per le intensità di 45 e 65 mm/h e a 125 cm per le intensità di 85 e 105 mm/h.

La distribuzione spaziale delle gocce prodotte dagli ugelli segue una distribuzione a forma di campana, con le gocce di maggiori dimensioni al centro e quelle più piccole ai bordi. La pressione operativa su ciascun ugello è stata scelta per garantire che gli spruzzi prodotti dai singoli ugelli si intersecassero con quelli vicini, così da garantire una maggiore uniformità della pioggia sul canale. Anche la movimentazione degli ugelli contribuisce a migliorare la distribuzione delle gocce. Tuttavia, non è possibile evitare la presenza di zone con tassi di pioggia più elevati in corrispondenza della sovrapposizione dei getti di ugelli vicini.

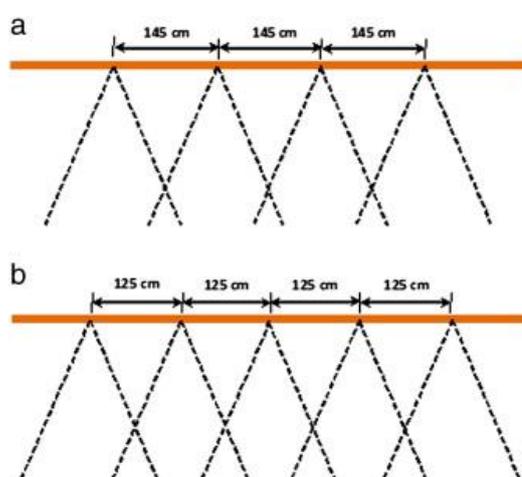


Figura 3.5: Schema della disposizione degli ugelli disposti nella barra oscillante per le intensità di (a) 45 e 65 mm/h, (b) 85 e 105 mm/h (Aksoy et al., 2012).

La portata è monitorata da un misuratore di portata ed è gestita manualmente attraverso una valvola di bypass, in modo da controllare accuratamente l'intensità della pioggia simulata.

Si è osservato che l'intensità varia con il diametro dell'orifizio dell'ugello, la pressione sull'ugello, la distanza degli ugelli e il movimento degli ugelli. L'oscillazione della barra su cui sono montati gli ugelli porta però a spruzzare una rilevante quantità d'acqua al di fuori del canale.

Le gocce prodotte dagli ugelli per simulare l'intensità di 45 mm/h hanno una velocità maggiore di quella terminale, perciò durante la loro caduta rallentano. Le gocce di pioggia delle intensità 65, 85 e 105 mm/h hanno una velocità iniziale che è inferiore alla velocità limite per cui durante la loro caduta accelerano.

Con questo simulatore è stato possibile riprodurre quattro intensità di precipitazione con diametri delle gocce compresi tra 2,2 e 3,1 mm. È stata inoltre valutata l'uniformità spaziale della pioggia simulata attraverso il

coefficiente di uniformità definito da Christiansen (1941), ottenendo valori compresi tra 82% e 89% in funzione dell'intensità. L'energia cinetica delle precipitazioni simulate rientra nei range riportati in letteratura per le precipitazioni naturali.

3.2 Tecniche di Misurazione

Per una previsione realistica ed il monitoraggio delle caratteristiche delle gocce di pioggia, uno strumento solido di misurazione delle precipitazioni deve essere in grado di:

- Misurare con precisione sia le dimensioni delle gocce più grandi (fino a 10 mm) sia quelle più piccole (fino a 0,3 mm).
La misurazione accurata di gocce di pioggia di dimensione superiori ai 6 mm è essenziale per gli studi sulla qualità delle acque piovane che utilizzano simulatori di pioggia; è con gocce di queste dimensioni che avviene infatti un maggiore trasporto degli inquinanti lavati via dalle aree urbane (Kathiravelu et al, 2016).
A causa della bassa sensibilità degli strumenti le misurazioni su gocce di dimensioni più piccole, indipendentemente dalla tecnica utilizzata, risultano essere ancora molto complicate. Inoltre, le intense precipitazioni comportando schizzi e vibrazioni, causano distorsioni nella misurazione delle gocce più piccole.
- Misurare accuratamente il numero delle gocce di pioggia.
La determinazione del numero di gocce di pioggia è una caratteristica fondamentale per qualunque strumento che voglia determinare la distribuzione granulometrica di un dato evento temporalesco.
- Misurare con precisione la velocità di caduta.
La misura della velocità delle gocce è necessaria per la stima dell'energia cinetica, dalla quale dipende il potenziale processo di wash-off causato dall'impatto della caduta.
- Mantenere la precisione della misurazione anche in presenza di vento.
Il movimento dell'aria influenza la traiettoria della goccia, compromettendo così la precisione della sua misura. Se si utilizzano campionatori acustici, anche il rumore del vento può essere causa di mancata precisione della misurazione.
- Misurare le intensità delle precipitazioni su tutte le gamme previste.
Per gli studi idrologici è fondamentale poter determinare le caratteristiche di tutti i tipi di precipitazione e conoscere quindi, per ogni evento meteorico, la sua intensità senza dover ricorrere all'uso di diversi strumenti di misurazione.

– Campionare in continuo.

Il campionamento in continuo è essenziale per una corretta osservazione e analisi di eventi temporaleschi. Esso consente infatti di analizzare un intero fenomeno senza perderne alcun istante, permettendo così di determinare le caratteristiche delle precipitazioni durante tutto l'arco temporale di interesse.

Per oltre un secolo ci sono stati molti studi che hanno descritto l'uso di tecniche di misurazione delle gocce di pioggia. Inizialmente i metodi di misurazione erano manuali, successivamente, grazie al miglioramento della tecnologia, questi metodi si sono evoluti includendo tecniche fotografiche e, più recentemente, disdrometri automatici e misurazioni laser.

La stima di alcune caratteristiche delle gocce di pioggia, quali dimensione, forma, velocità, energia cinetica e distribuzione della dimensione delle gocce, è cruciale per svariate applicazioni scientifiche, commerciali e industriali. Alcuni esempi di queste applicazioni sono: telerilevamento, meteorologia (previsione del tempo), telecomunicazioni (distorsione del segnale), meteorologia radar dell'agricoltura e dell'orti-coltura (resa delle colture), fisica atmosferica, foto-rilevamento delle nuvole e misurazione della microstruttura delle precipitazioni troposferiche.

Le caratteristiche delle gocce di pioggia sono importanti anche per la gestione delle acque piovane, in particolare per la comprensione di come i processi di lavaggio dell'inquinamento, influiscono sulla qualità delle acque piovane. Per esempio, le gocce di pioggia di maggiori dimensioni, possedendo maggiore energia cinetica, hanno la capacità di lavare una maggiore quantità di inquinanti dalle superfici impermeabili provocando maggiori concentrazioni di tali sostanze che vengono poi riversate negli ambienti acquatici a valle.

I metodi di misurazione delle gocce di pioggia possono essere classificati in tecniche manuali e tecniche automatiche.

3.2.1 Misurazione manuale delle gocce di pioggia

Le tecniche di misurazione manuale delle gocce di pioggia comprendono: il metodo delle macchie (misurazione delle macchie in carta assorbente tinta), metodo del recipiente di farina (misurazione delle gocce di pioggia che cadono in un recipiente contenente farina setacciata e producono della pasta della dimensione della goccia) e il metodo dell'immersione nell'olio (misura delle gocce di pioggia in un recipiente contenente olio).

L'uso delle tecniche manuali di misurazione è efficace negli studi che prevedono la misurazione della dimensione della goccia, ma non sono adatti per la misurazione di gocce di piccole dimensioni, cioè al di fuori dell'intervallo normale (0,3–6 mm).

Nonostante la loro semplicità i metodi di misurazione manuale richiedono un grande dispendio di tempo, non sono in grado di contare con precisione le gocce, non sono adatti per studi di monitoraggio continuo delle precipitazioni; risultano poi essere meno efficaci in condizioni di precipitazioni intense e in presenza di vento. Inoltre, queste tecniche manuali non possono fornire dati sulla velocità terminale delle gocce, necessaria per stimare l'energia cinetica delle precipitazioni.

Tra le tecniche di misurazione manuale rientrano anche i metodi fotografici.

3.2.1.1 Metodo fotografico

Il metodo fotografico è stato ampiamente utilizzato per misurare le dimensioni e la velocità delle gocce di pioggia, fu introdotto da Mache nel 1904 e da allora ha subito molti miglioramenti. Inizialmente, Laws misurava la dimensione delle gocce utilizzando una fotocamera di 9 cm e 12 cm montata dietro ad un chopper-disc guidato da un piccolo motore sincrono.

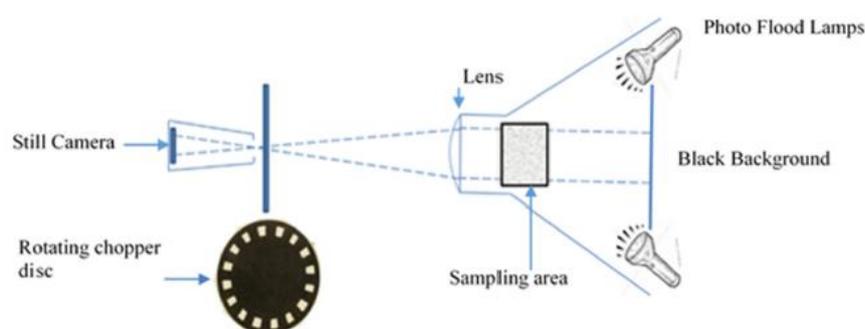


Figura 3.6: Schema della configurazione della fotocamera statica, sviluppata per misurare la velocità di caduta delle gocce (Kathiravelu, Lucke, e Nichols, 2016).

I problemi di infiltrazione di luce hanno limitato l'uso del metodo fotografico al campionamento notturno. L'uso della fotocamera dell'Illinois ha comportato errori di conteggio delle gocce dovuti alla sovrapposizione di più gocce.

La pixilazione digitale ha anche limitato l'accuratezza di diverse tecniche fotografiche. Inoltre, le tecniche fotografiche sono influenzate dalle condizioni ambientali come, per esempio, il vento che può causare l'allontanamento delle gocce e, di conseguenza, errori di misurazione. Spesso le tecniche fotografiche sono dispendiose in termini di tempo, per questa ragione il loro uso è limitato. Sebbene limitate alle misurazioni statiche e definite dalla frequenza di acquisizione dei fotogrammi al secondo, le tecniche fotografiche sono però in grado di misurare con precisione la velocità di

caduta. Questa può essere determinata in vari modi. Salvador et al. (2009) hanno agito sulla velocità dell'otturatore: riducendola le gocce nella fotografia appaiono come cilindri e il diametro e la velocità di caduta delle stesse possono essere calcolati in base alla velocità impostata dell'otturatore. De Jong (2010) utilizzò una fotocamera Canon Powershot dotata di un modulo Stopshot capace di attivare due flash successivi. Le immagini della singola goccia venivano così catturate due volte permettendone la misurazione della velocità.

3.2.1.2 Shadowgraph imaging

La shadowgraph imaging è una tecnica ottica che sfrutta la differenza tra l'indice di rifrazione del mezzo che si vuole studiare e dell'ambiente circostante. È data da due componenti principali: una sorgente di illuminazione posteriore ed una telecamera ad alta risoluzione. L'obiettivo della retroilluminazione è quello di ottenere uno sfondo omogeneo per l'elemento di acquisizione e di fornire luce che viene rifratta dall'oggetto o dal mezzo sottoposto all'analisi. Come conseguenza, le foto che si acquisiscono con questa tecnica, presentano uno sfondo luminoso e delle ombre in corrispondenza dell'interfaccia tra regioni con differente indice di rifrazione. Il sistema di acquisizione contiene gli elementi ottici richiesti per formare e registrare un'immagine della sagoma dell'oggetto o della sua ombra.

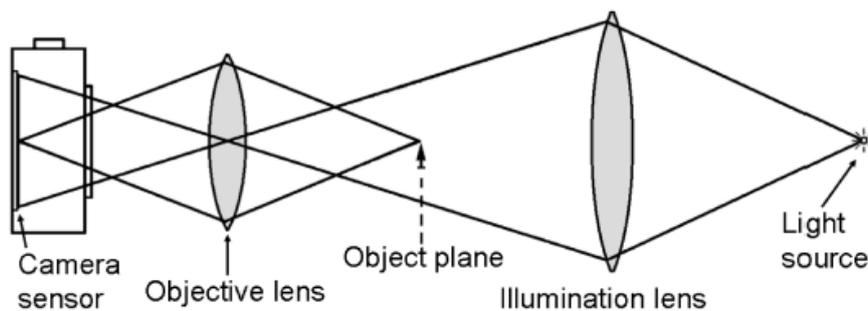


Figura 3.7: Schema generale di un sistema shadowgraph (Castrejón-García et al., 2011).

L'uso di questa tecnica è appropriato quando il mezzo che si sta studiando è trasparente e presenta un indice di rifrazione molto diverso dal mezzo in cui si trova, come per esempio l'aria e l'acqua. La tecnica shadowgraph infatti, viene utilizzata per determinare quantitativamente importanti proprietà di jet, spray e gocce.

In termini generali, la shadowgraph imaging, evidenzia la differenza tra l'indice di rifrazione del corpo e di ciò che lo circonda, nel presente caso di applicazione della goccia e dell'aria.

Tra le varie tecniche ottiche che vengono utilizzate per lo studio di particelle, liquidi e gas in movimento, la tecnica di osservazione shadowgraph, si distingue, essendo economica ed attendibile. Questa tecnica inoltre presenta dei vantaggi rispetto ad altre tecniche di visualizzazione, perché non è invasiva, consente l'acquisizione di immagini e in molti casi, se utilizzata in unione con dei processori di immagini digitali, la misurazione di diverse caratteristiche come: la velocità, la direzione del movimento e la dimensione degli oggetti.

Per ottenere delle immagini che siano effettivamente utili all'analisi, le componenti che devono essere controllate e adattate, sono numerose. Di fatto, tutti i sistemi shadowgraph sono simili ma differiscono proprio nella definizione di queste variabili. Tra queste rientrano: il contrasto, la nitidezza e la luminosità delle immagini che dipendono da parametri come l'ingrandimento, la sensibilità alla luce, il campo visivo, la profondità di campo e la lunghezza focale del sistema ottico.

Idealmente, il sistema shadowgraph dovrebbe essere progettato in maniera tale da soddisfare alcune condizioni dipendenti dal campo visivo, dalla nitidezza e dalla luminosità, tuttavia, nella pratica, alcuni sistemi sono progettati in modo più pragmatico in base alla disponibilità dei componenti ottici. La specifica dominante dei componenti ottici è la sua capacità di ingrandimento che è determinata dalla dimensione di ciò che deve essere identificato sulle immagini.

Altre variabili, come la profondità del campo visivo, la dimensione e la sensibilità del sensore, sono spesso scelte e adattate per rendere più idonea allo scopo la qualità dell'immagine acquisita dal sensore. Variabili aggiuntive come la distorsione ottica e la distanza di acquisizione, sono spesso scelte per migliorare la qualità dell'immagine o facilitare le operazioni del sistema.

La principale fonte di errore in questa tecnica è dovuta alla limitata profondità di campo. In teoria, per qualsiasi sistema ottico di immagine, c'è un piano di messa a fuoco sul quale può essere catturata l'immagine più nitida; la nitidezza dell'immagine si riduce via via che gli elementi fotografati si trovano ad essere più lontani o più vicini al piano di messa a fuoco. La profondità di campo è definita come la regione del piano di messa a fuoco nel quale gli oggetti sono sufficientemente nitidi o a fuoco, se la goccia non è a fuoco apparirà più grande causando una sovrastima del suo diametro.

Anche se i principi ottici che regolano questa tecnica sono semplici, l'implementazione dei dati non è altrettanto facile.

Il metodo di analisi delle immagini può essere riprodotto in diversi programmi numerici computazionali e in diversi linguaggi, tra cui *MatLab*, *LabView* o

Visual C. Queste analisi si basano sul tracciare i contorni degli oggetti nelle immagini shadowgraph, attraverso l'identificazione dei colori o del gradiente del livello dell'intensità. Nel caso in cui questa tecnica venga applicata per lo studio delle proprietà delle gocce di pioggia, una volta individuati i contorni, si possono determinare l'area, la posizione e il diametro. Questi dati vengono poi utilizzati per misurare diverse proprietà in base alla particolare applicazione.

Nella pratica, il processo è complesso e richiede svariati aggiustamenti e l'applicazione di filtri a causa delle imperfezioni del setup e delle immagini.

3.2.2 Misurazione automatizzata delle gocce di pioggia

I recenti progressi nella tecnologia e nell'elettronica hanno permesso di esplorare metodologie di misurazione automatica delle gocce. Tra queste metodologie rientrano: dispositivi per misurare lo spostamento e l'energia meccanica delle gocce di pioggia che colpiscono una superficie; l'imaging ottico per misurare la velocità, il diametro e la forma delle gocce di pioggia, attraverso l'uso della fotocamera; tecniche acustiche che misurano il rumore prodotto dalle gocce che colpiscono un diaframma; la dispersione ottica, con la quale, attraverso l'utilizzo di un fascio di luce o laser, si possono determinare dimensione, forma, velocità e diametro delle gocce. Tutti questi strumenti hanno il vantaggio, rispetto alle tecniche manuali, di misurare le gocce di pioggia in tempo reale praticamente senza limiti di durata.

3.2.2.1 Disdrometri d'impatto

La determinazione dell'energia cinetica delle gocce di pioggia è fondamentale per lo studio dell'erosione del suolo e dell'inquinamento delle acque piovane. L'energia cinetica esprime il potenziale delle gocce a spostare quelle particelle che normalmente sarebbero legate ad una superficie, causando così la loro partecipazione al deflusso superficiale.

La combinazione della distribuzione della dimensione delle gocce e della loro velocità di caduta può fornire una stima dell'energia cinetica delle stesse. Esistono però dei sistemi che consentono la stima diretta di tale grandezza, questi sono i metodi acustici e di spostamento.

I disdrometri d'impatto sono limitati nella misura della dimensione delle gocce, non possono misurare gocce con diametro equivalente superiore a 5,5 mm e comportano difficoltà nella misurazione di diametri di gocce di pioggia più piccoli. Nel caso poi di piogge intense, gli schizzi e le vibrazioni, introducono una ulteriore fonte di errore nella stima della dimensione delle gocce più piccole.

– Disdrometri acustici

I disdrometri acustici generano e registrano un segnale elettrico tramite un sensore piezoelettrico quando una goccia cade su un diaframma specifico. Sulla base della relazione tra energia cinetica e le dimensioni delle gocce cadute, il segnale elettrico generato viene convertito in energia cinetica attraverso l'energia acustica misurata.

Modifiche ai sensori utilizzati nei primi disdrometri acustici hanno consentito il loro uso anche in ambienti marini, tuttavia sono rimaste difficoltà nell'effettuare le misure durante eventi con intensità di precipitazione elevata.

A causa della difficoltà nell'ottenere una risposta acustica uniforme sull'intero diaframma di rilevazione, la stima della dimensione delle gocce non è sempre precisa. Permane ancora la difficoltà nella misurazione accurata della dimensione delle gocce più piccole, questo a causa di diaframmi non sufficientemente sensibili e degli effetti di spruzzo. Inoltre, questi disdrometri non possono essere utilizzati quando l'evento meteorologico è di tipo temporalesco a causa del rumore di fondo che diminuisce la precisione di misurazione.

Uno studio, eseguito inclinando un disdrometro acustico parallelamente alla direzione del vento ha mostrato come gli effetti del vento siano stati ridotti a un livello accettabile. Tuttavia, questo non garantisce ancora risultati affidabili o permanenti.

– Disdrometri di spostamento

Nella stima della dimensione delle gocce di pioggia attraverso l'utilizzo di un disdrometro di spostamento, si rileva l'energia da esse generata al momento dell'impatto e la si converte tramite induzione magnetica in impulso elettrico che fornisce, il valore del diametro equivalente.

Sempre al fine di ottenere maggior precisione nella misurazione della dimensione delle gocce, oltre all'induzione magnetica, sono stati sperimentati diversi meccanismi come, per esempio, molle elastiche, estensimetri e trasduttori di pressione.

Probabilmente il disdrometro di spostamento più utilizzato è il disdrometro Joss-Waldvogel, questo è stato concepito per la determinazione della dimensione delle gocce di pioggia, espressa in termini di diametro sferico equivalente.

Il disdrometro di Joss-Waldvogel è costituito da un trasduttore nel quale lo spostamento verso il basso causato dall'impatto della goccia su una superficie in polistirolo (area di 50 cm²), provoca l'induzione di una tensione in una bobina di rilevamento. Questa tensione, opportunamente amplificata, viene applicata ad un'altra bobina all'interno del trasduttore stesso per contrastare il movimento del piano e riportarlo nella sua

posizione originaria.

Il diametro sferico equivalente viene misurato a partire dal valore della forza verticale applicata al trasduttore durante l'impatto della goccia. La forza applicata al trasduttore varia durante l'impatto, perciò lo strumento fornisce la misura della dimensione della goccia tenendo conto della relazione che lega questa grandezza alla velocità ed alla forma della goccia stessa. Infatti, il valore del diametro lo si ricava attraverso una relazione empirica, assunta non lineare, che lega tale valore alla velocità di caduta della goccia.

In condizioni di laboratorio, questo strumento è in grado di fornire la dimensione della goccia con precisione. Il forte movimento dell'aria, presente quando le misure vengono eseguite all'aperto, comporta una variazione della forma, della velocità e della traiettoria delle gocce di pioggia, causando errori nella stima del diametro equivalente. È stato dimostrato che esiste discontinuità nella risposta del trasduttore tra gocce che viaggiano alla velocità terminale e gocce che viaggiano ad una velocità sensibilmente inferiore.

Questo tipo di disdrometro ha subito diverse modifiche negli anni. Tra queste quella di maggior successo è l'aggiunta di un convertitore digitale. Anche se questo disdrometro presenta molti vantaggi, come la possibilità di misurare un'ampia gamma di dimensioni delle gocce e la capacità di campionare continuamente per lunghe durate, permangono limitazioni quali il conteggio accurato delle gocce cadute e la misurazione accurata di velocità, energia cinetica, intensità e forma della goccia.

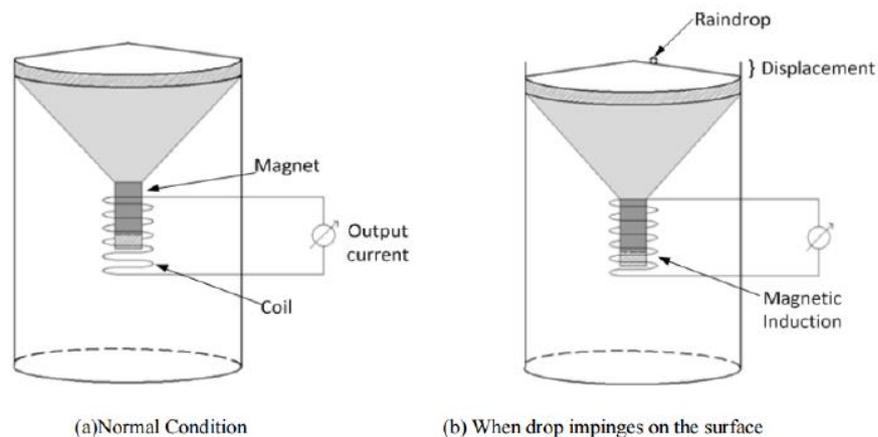


Figura 3.8: Schema del principio di funzionamento di un disdrometro ad impatto (Kathiravelu, Lucke, e Nichols 2016).

3.2.2.2 Disdrometri ottici

Le tecniche di misurazione ottiche non sono intrusive, queste non influenzano il comportamento delle gocce durante la misurazione e hanno risolto con successo il problema della rottura e degli schizzi delle gocce; problematiche ancora presenti in altri metodi di misurazione.

– Imaging ottico

Le tecniche di imaging ottico che sono state recentemente sviluppate prevedono l'uso di due videocamere per mostrare la microstruttura della goccia di pioggia, compreso il contorno frontale e laterale, la velocità di caduta, l'inclinazione della goccia e la velocità orizzontale. Con questa tecnica, è possibile misurare con precisione anche i parametri generali delle precipitazioni come l'intensità della pioggia e la distribuzione delle dimensioni delle gocce. Le due videocamere registrano le immagini delle gocce che vengono utilizzate per misurare accuratamente la velocità di caduta, il diametro e la forma (compreso lo schiacciamento).

Liu, Gao, e Liu (2014) hanno sviluppato un sistema video (VPS) in grado di misurare accuratamente la forma e la velocità della goccia. Lo strumento è costituito da un'unità ottica, da un'unità di imaging (matrice planare di dispositivi ad accoppiamento di carica CCD), da un'unità di acquisizione e controllo e un'unità di elaborazione dati. Lo spazio cilindrico tra l'unità ottica e l'unità di imaging è il volume di campionamento ($300 \times 40 \times 30 \text{ mm}^3$). Man mano che le gocce di precipitazione cadono attraverso il volume di campionamento, la telecamera CCD esegue due esposizioni non simultanee in un singolo fotogramma, il che consente di ottenere la doppia esposizione di immagini di gocce. La dimensione e la forma possono essere ricavate dalle immagini delle gocce; la velocità di caduta può essere calcolata sullo spostamento delle particelle nell'immagine a doppia esposizione in base al tempo intercorrente tra le due esposizioni successive; la distribuzione della dimensione delle gocce e la loro velocità, l'intensità delle precipitazioni e le precipitazioni cumulate, possono essere calcolate mediante integrazione temporale.

L'innovazione di VPS consiste nella possibilità di misurare, attraverso un solo sensore CCD a matrice planare, la forma, le dimensioni e la velocità delle gocce di pioggia, superando quelli che sono i limiti di un disdrometro CCD a scansione lineare e di un disdrometro d'impatto. Le misurazioni sul campo dimostrano la capacità del VPS di misurare le proprietà microfisiche delle singole particelle e i parametri integrali delle precipitazioni.

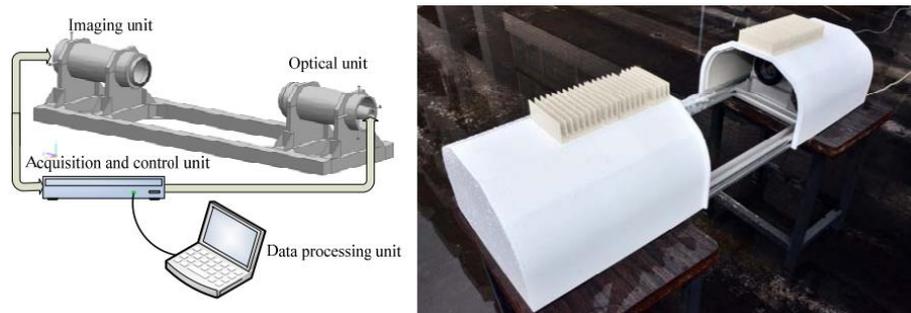


Figura 3.9: Schema delle apparecchiature VPS e fotografia del prototipo VPS (Liu, Gao, e Liu 2014).

– Dispersione ottica

Le tecniche di dispersione ottica prevedono la generazione di un fascio planare laser orizzontale che viaggia verso un ricevitore in cui vengono eseguite misurazioni elettriche. Le gocce che passano attraverso il fascio luminoso provocano la dispersione della luce. L'attenuazione della luce, causata da ciascuna goccia, viene convertita dal ricevitore in un impulso elettrico, dal quale poi si ottiene una misurazione accurata della velocità di caduta.

Dalla metà del 20° secolo, i disdrometri ottici sono stati usati, con successo, per contare e dimensionare le singole gocce di pioggia. Le valutazioni delle prestazioni dei disdrometri ottici hanno suggerito che tali strumenti si limitassero alla misurazione di gocce di elevata dimensione e che le misurazioni dell'intensità delle precipitazioni fossero inaccurate. Sebbene i disdrometri ottici siano sensibili agli effetti del vento, è stata utilizzata con successo in condizioni di vento (velocità del vento fino a 20 m/s) una loro versione modificata (A.J. Illingworth e C.J.Stevens) che includeva nella rilevazione anche un impulso associato. Molti modelli sono anche in grado di differenziare tra solidi e liquidi consentendo le misure anche per la neve.

4. SENSORI DI PRECIPITAZIONE

In commercio sono disponibili varie tipologie di strumenti atti alla misurazione delle precipitazioni. Considerate le dimensioni del simulatore di pioggia, sarebbe utile adoperare uno strumento che permetta di conoscere in tempo reale l'intensità simulata così, da facilitare la scelta del carico agente sugli aghi. Alcuni di questi strumenti hanno la capacità di valutare altre caratteristiche, quali il diametro equivalente, la velocità e persino l'energia cinetica delle gocce.

Di seguito si riporta una breve descrizione di alcuni dei sensori disponibili in commercio, e relativa tabella contenente i range di misurazione degli strumenti e, ove noto, il prezzo.

4.1 RainFlow Sensor-RF4, ISAW

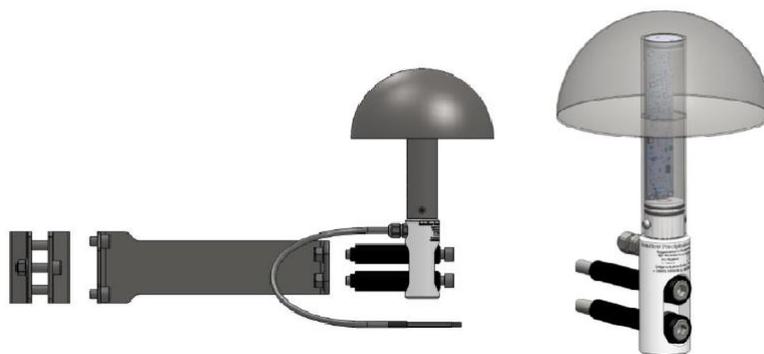


Figura 4.1: RainFlow Sensor - RF4, ISAW.¹

Il RainFlow RF4 è un disdrometro di tipo acustico. Il suo design e la sua struttura speciale lo rendono resistente al vento, alle temperature estreme, alla brina, alla luce solare e all'abrasione. Questo sensore è in grado di distinguere le precipitazioni liquide e solide, è particolarmente ottimizzato per la misurazione della pioggia e il rilevamento della grandine.

Può essere utilizzato per il monitoraggio delle precipitazioni di pioggia e grandine, il calcolo del numero e delle dimensioni delle gocce di pioggia; si presta ad essere installato su boe meteorologiche offshore.

Il sensore RainFlow RF4 misura l'impatto delle singole particelle liquide e solide su un emisfero in acciaio inossidabile attraverso l'uso di un microfono, un elaboratore e calcolatore del segnale.

¹ <https://www.isaw-products.com/rainflow-rf4/>

Per ogni singolo impatto, il momento che viene trasferito sulla superficie di rilevamento dipende dalla massa, dalla velocità, dal tipo e dall'angolo di incidenza della particella sull'emisfero.

Il sensore è in grado di determinare alcune caratteristiche della pioggia quali: intensità fino a valori di 250 mm/h, numero e dimensione delle gocce.

La funzione di disdrometria fornisce un risultato di valore statistico definito come una distribuzione che esprime la percentuale di gocce situate nelle classi di dimensioni delle gocce. Il sensore considera 27 classi di uguale intervallo (0,25 mm), il limite superiore della classe più piccola è 0,75 mm e il limite inferiore della classe più grande è 7 mm.

Questo strumento non fornisce il valore della velocità delle gocce di pioggia.

I sensori ISAW sono strumenti acustici e perciò potrebbero essere potenzialmente influenzati dalle vibrazioni trasmesse dalla struttura alla quale viene ancorata. Può risentire pure, in misura minore, del rumore parassita a bassa frequenza proveniente dall'ambiente circostante, ad esempio un'eccessiva vicinanza a traffico pesante o macchinari.

4.2 Laser Precipitation Monitor, Thies Clima



Figure 4.2: 5.4110.00.200, Thies Clima.²

Il laser precipitation monitor è uno strumento ottico in grado di acquisire il tipo di precipitazione, l'intensità e lo spettro.

Distingue tra le seguenti tipologie di precipitazione: pioviggine (anche congelata), pioggia (anche congelata), grandine, neve, granelli di neve / aghi di ghiaccio, grandine soffice / granuli di ghiaccio.

Percepisce particelle comprese tra 0,16 e 8 mm con velocità comprese tra i 0,2 e 20 m/s. Misurano intensità di precipitazione comprese tra 0,005 e 250 mm/h.

<https://www.thiesclima.com/en/Products/Precipitation-Electrical-devices/>²

4.3 AO-RS2E, Alpha Omega Electronics



Figura 4.3: AO-RS2E, Alpha Omega Electronics.³

AO-RS2E è un sensore di precipitazione che utilizza un Doppler avanzato a 24 GHz.

Questo sensore viene applicato in stazioni meteorologiche per la rilevazione delle precipitazioni, come sistema meteorologico nelle smart city e per le previsioni ed il controllo delle inondazioni fluviali.

Attraverso un sistema radar a 24 GHz viene registrata la velocità delle gocce, dal cui confronto con la dimensione delle gocce, viene determinata la quantità o l'intensità di pioggia. Il tipo di precipitazione (pioggia/neve/pioggia ricoperta da neve/ pioggia ghiacciata/ grandine) è determinato in funzione della sua velocità.

Il sensore misura: l'intensità di precipitazione nel range da 0 a 100 mm/h con una precisione del 10% e il diametro delle gocce di pioggia nel range da 0,5 a 5 mm con una precisione di 0,1 mm.

https://www.alphaomega-electronics.com/es/estaciones-compactas-kits/4669-ao-rs2e-sensor-de-radar-de-precipitacion-pluviometro.html?search_query=RS2E+&results=2³

4.4 Optical disdrometer ODM 470, Eigenbrodt



Figura 4.4: Optical disdrometer ODM 470, Eigenbrodt.⁴

Il disdrometro ottico OMD 470 è particolarmente indicato per eseguire la misurazione della distribuzione della dimensione delle gocce in condizioni di vento anche elevato, viene perciò utilizzato nelle barche, nelle boe e per applicazioni a terra.

Il principio di funzionamento si basa sull'estinzione della luce, dovuta al passaggio di gocce di pioggia o di idrometeorite solide attraverso un volume sensibile cilindrico di 120 mm di lunghezza e 22 mm di diametro. Il segnale ottico è proporzionale all'area della sezione trasversale dell'oggetto che attraversa il cilindro.

La sorgente luminosa del disdrometro è un LED IR da 150 mW (diodo ad emissione di luce infrarossa), che emette luce con lunghezza d'onda di 880 nm.

Solo la porzione di luce parallela all'asse ottico può raggiungere il diodo ricevitore, il segnale ottico viene poi convertito in un impulso elettrico. La profondità e la durata dell'impulso sono direttamente proporzionali all'area della sezione trasversale e al tempo di permanenza della goccia nel volume

⁴ <https://www.eigenbrodt.de/en/info-center/downloads/prospects-and-catalogues/>

attivo. Pertanto, il disdrometro misura contemporaneamente la dimensione e la velocità delle gocce.

Il volume sensibile viene mantenuto perpendicolare alla direzione del flusso locale per mezzo di una banderuola e, grazie alla sua forma cilindrica, le misurazioni sono indipendenti dall'angolo di incidenza delle gocce di pioggia.

Il disdrometro ottico OMD 470 è in grado di rilevare la dimensione e la distribuzione delle dimensioni delle gocce, con una risoluzione di 0,05 mm, in un intervallo compreso tra 0,5 e 6 mm.

4.5 DIS, Nesa



Figura 4.5: DIS, Nesa.⁵

Il disdrometro Nesa è un sensore elettronico basato su tecnologia radar doppler a 24Ghz, in grado di determinare la precipitazione (pioggia, neve e ghiaccio) distinguendola per tipologia, intensità e quantità.

Questo sensore si presta per applicazioni in svariati campi del monitoraggio ambientale ed è particolarmente indicato per le stazioni meteorologiche in campo aeronautico e stradale. Di facile installazione, non richiede alcun tipo di calibrazione periodica ed è protetto da sovratensioni ed agenti corrosivi.

⁵ <https://www.nesasrl.eu/en/sensors/roads/dis.aspx>

Il funzionamento si basa su di un fascio di onde elettromagnetiche emesse da un'antenna orientata verso l'alto con un lobo trasmissivo sufficientemente ampio per rilievi su tutto il piano a 180° circa, e che viene retro-diffuso dalle idrometeore (gocce di pioggia, chicchi di grandine, fiocchi di neve) in caduta libera.

Il segnale di ritorno captato dall'antenna ricevente risulta formato da tante componenti in frequenza diverse tra loro e legate alla velocità di caduta delle idrometeore (effetto Doppler). L'ampiezza di queste componenti dipende dalla riflettività delle idrometeore e dalla loro densità all'interno della porzione di spazio osservata dallo strumento.

Poiché una goccia che cade a velocità costante provoca un eco il cui effetto Doppler è variabile a seconda della posizione, un particolare algoritmo permette di ricavare dallo spettro del segnale la distribuzione dimensionale delle idrometeore e da questa i parametri caratteristici della precipitazione.

L'intensità della pioggia/neve/grandine e la relativa quantità, vengono determinate a partire dalla velocità di caduta e dalla dimensione delle gocce. Il tipo di precipitazione è invece determinata in base alla diversa velocità di caduta. I campi di misura, per l'intensità di precipitazione e i diametri delle gocce di pioggia, sono rispettivamente 0 - 200 mm/h e 0,3 - 5,0 mm.

4.6 RD-80, Distromet LTD



Figura 4.6: Disdrometro ad impatto Joss-Waldvogel (Distromet Ltd., Basel, Switzerland).⁶

Il disdrometro ad impatto LTD è uno strumento che permette di misurare la distribuzione delle dimensioni delle gocce di pioggia in modo continuo e automatico.

⁶ <https://distromet.com/94>

Lo strumento, collegato ad un processore, produce un impulso elettrico per ogni goccia che colpisce la superficie sensibile. L'ampiezza dell'impulso è funzione del diametro della goccia. Nel processore RD-80 gli impulsi sono divisi in 127 classi di diametro delle gocce e per ogni goccia che colpisce il sensore viene trasmesso un codice ASCII a sette bit all'interfaccia seriale del PC.

Tale disdrometro rileva il diametro delle gocce di pioggia nel range compreso tra 0,3 e 5 mm con una precisione del 5%.

4.7 Lufft WS100, OTT



Figura 4.7: Lufft WS100, OTT.⁷

Lufft WS100 è un sensore di pioggia con tecnologia radar e riscaldamento regolabile in grado di riconoscere in tempo reale il tipo di precipitazione (pioggia, neve, nevischio, pioggia gelata, grandine) e l'intensità. Tale sensore non richiede alcun tipo di manutenzione e viene utilizzato in campi quali idrologia e gestione delle risorse idriche, scienze agrarie e ambientali, automazione degli edifici, meteorologia o controllo negli aeroporti e del traffico.

Utilizzando un radar Doppler a 24 GHz, misura la velocità di tutte le forme di acqua condensata: pioggia, pioggia gelata, grandine, neve e nevischio.

⁷ <https://www.ott.com/products/meteorological-sensors-26/lufft-ws100-radar-precipitation-sensor-smart-disdrometer-2391/>

Questo sensore misura: la dimensione delle gocce nel range 0,3-5 mm, l'intensità da valori compresi tra 0,01 e 200 mm/h e la velocità delle gocce con limite inferiore di 0,9 m/s e superiore di 15,5 m/s.

4.8 OTT Parsivel², OTT



Figura 4.8: Parsivel², OTT.⁸

OTT Parsivel² è un moderno disdrometro ottico con tecnologia laser per la misurazione completa di tutti i tipi di precipitazione.

Tale strumento cattura sia la dimensione che la velocità delle particelle che cadono, classificandole in una delle 32 classi di dimensioni e velocità separatamente. I dati grezzi vengono utilizzati per calcolare il tipo, la quantità, l'intensità e l'energia cinetica della precipitazione, la visibilità della precipitazione e la riflettività radar equivalente.

Parsivel² misura quindi il tipo di precipitazione; l'intensità per valori compresi tra 0,001 e 1200 mm/h; il diametro delle particelle in un range compreso tra 0,2 e 8 mm nel caso delle gocce di pioggia; la velocità delle gocce da 0,2 a 20 m/s e l'energia cinetica per valori compresi tra 0 e 999,999 J/(m²h).

⁸ <https://www.ott.com/it-it/prodotti/strumenti-meteorologici-215/ott-parsivel2-765/>

Dispositivo	Intensità [mm/h]	Diametro delle gocce [mm]	Velocità [m/s]	Energia cinetica [J/(m²h)]	Prezzo [€]
RainFlow Sensor-RF4, ISAW	< 250	0,75-7	-	-	1685
AO-RS2E, Alpha Omega Electronics	0-100	0,5-5	-	-	720
Optical disdrometer ODM 470, Eigenbrodt	-	0,5-6	-	-	
DIS, Nesa	0-200	0,3-5	-	-	1792
RD-80, Distromet LTD	-	0,3-5	-	-	30959
Lufft WS100, OTT	0,01-200	0,3-5	0,9-15,5	-	
Parsivel ² , OTT	0,001- 1200	0,2-8	0,2-20	0-999,99	
5.4110.00.200 Thies Klima	0,005-250	0,16-8	0,2-20	-	

Tabella 4.1: Riepilogo delle proprietà di ciascun sensore di pioggia considerato nell'analisi.

Come mostrato in tabella, non è stato possibile reperire i prezzi di tutti i sensori per la misura delle precipitazioni, per tale ragione non è stato possibile procedere con un'analisi costi benefici.

È comunque possibile, attraverso una semplice analisi delle proprietà di ciascuno strumento, risalire a quelli più idonei al perseguimento dello scopo. Il simulatore di pioggia sarà progettato in maniera tale da riprodurre un ampio range di precipitazione compreso tra i 5 e i 200 mm/h. Per tale ragione si escludono dalla selezione i sensori il cui range di misurazione non include quello prodotto dal simulatore di pioggia.

Il sensore *AO-RS2E* della *Alpha Omega Electronics* rientra tra quelli di cui è fornito il prezzo, risultando essere il più economico. Non è però in grado di stimare le intensità di precipitazione superiori ai 100 mm/h. I sensori *Optical disdrometer ODM 470* del *Eigenbrodt* e *RD-80* di *LTD* si limitano invece a fornire il valore del diametro delle gocce, senza misurare l'intensità di precipitazione. Dell'ultimo sensore nominato è stato fornito il prezzo, risultato eccessivamente elevato, anche nel caso in cui tale strumento fosse stato in grado di fornire maggiori informazioni sulle caratteristiche delle precipitazioni.

Tutti i sensori che sono stati considerati permettono di misurare la dimensione delle gocce in un range idoneo allo studio di quelle prodotte con il simulatore. Il disdrometro della *Nesa* fornisce un valore del diametro delle gocce di pioggia in funzione della loro velocità. Affinché la stima del diametro sia accurata, le gocce devono avvicinarsi al sensore ad una velocità costante pari alla loro velocità terminale. Non potendo garantire che le gocce abbiano già raggiunto il 100% della loro velocità terminale al momento della misura da parte del sensore, si rischia di ottenere una sottostima del diametro delle gocce di pioggia simulate.

Lo strumento che copre il più ampio range di diametri è il disdrometro ottico di *Thies Clima*, che rileva gocce con diametro compreso tra 0,16 e 8 mm.

L'altra caratteristica della pioggia simulata che si vuole stimare è la velocità delle gocce, questa grandezza viene fornita esclusivamente da tre degli otto strumenti considerati nell'analisi: *Lufft WS100* e *Parsivel²*, entrambi della *OTT*, e il *5.4110.00.200* di *Thies Clima*. Il range di velocità che tali strumenti riescono a misurare è adatto al caso in esame, infatti se si calcola il valore della velocità terminale con l'ipotesi di gocce sferiche e indeformabili, per valori del diametro equivalente compresi tra 2 e 5 mm, il valore della velocità terminale sarà compreso tra 4.76 e 10.64 m/s.

L'unico strumento capace di fornire anche il valore dell'energia cinetica delle gocce è il *Parsivel²*. Tra tutti gli strumenti descritti, questo è quello che fornisce il maggior numero di informazioni in merito alle caratteristiche delle precipitazioni, rientrando nei range adatti al presente caso.

Gli strumenti che risultano essere i più adatti alla stima delle caratteristiche della pioggia simulata sono tre:

- *Lufft WS100* di *OTT*;
- *Parsivel²* di *OTT*;
- *5.4110.00.200* di *Thies Clima*.

Di questi però non è noto il prezzo. Ipotizzando che tutti e tre abbiano lo stesso rapporto qualità prezzo, il *Parsivel²* risulta essere la scelta migliore.

5. STRUMENTAZIONE E SET-UP

5.1 Rainfall Simulator

In generale, le principali difficoltà che si incontrano nella progettazione di un simulatore di precipitazione che lavora a bassa pressione sono:

- l'individuazione del numero e della disposizione adeguati dei formatori di gocce (a parità di carico, l'intensità di precipitazione aumenta al diminuire della spaziatura dei formatori);
- l'ottenimento di una distribuzione uniforme;
- la corretta distribuzione delle dimensioni delle gocce;
- il controllo preciso del tasso di applicazione;
- il raggiungimento della velocità limite.

Durante la fase di progettazione del simulatore si è tenuto conto di tutti gli aspetti sopra elencati, cercando inoltre di realizzare un sistema che fosse capace di riprodurre delle precipitazioni il più possibile simili a quelle reali.

In letteratura sono presenti numerose pubblicazioni riguardanti l'uso di simulatori di pioggia nelle quali viene descritto il loro progetto e le proprietà della pioggia simulata. Preliminarmente, tra queste pubblicazioni, si sono valutate quelle ritenute più idonee a fornire elementi utili alla progettazione di un simulatore di pioggia che fosse adatto allo studio del fenomeno di dilavamento degli inquinanti in atmosfera.

L'ottenimento di risultati attendibili, in questo tipo di studio, è condizionato dalla capacità di riprodurre gocce di pioggia che abbiano dimensioni e intensità paragonabili a quelle delle precipitazioni naturali. Richiamando quanto riportato nel capitolo terzo, i simulatori di pioggia ad ugello non sono adatti a questo scopo, infatti, all'aumento della loro pressione operativa, conseguono un aumento dell'intensità e una riduzione della dimensione delle gocce, il che risulta essere in totale controtendenza con quanto accade nelle precipitazioni naturali.

Avendo escluso la tipologia di simulatore ad ugello per il presente studio, quella che più si addice al raggiungimento dello scopo è quella ad ago.

Un'altra caratteristica delle precipitazioni naturali che si vuole riprodurre è la velocità delle gocce. Un simulatore ad ago non riesce ad impartire alle gocce una velocità iniziale, quest'ultime partono da ferme ed accelerano durante la loro caduta finché le forze agenti su di essa non raggiungono l'equilibrio, a quel punto continueranno il loro moto con una velocità pari a quella terminale. Per garantire che le gocce possano raggiungere la velocità terminale, è

necessario che queste percorrano una distanza sufficientemente elevata da consentire il raggiungimento dell'equilibrio tra le forze.

Tra i vari simulatori descritti in letteratura, per quanto detto sopra, quello proposto da Regmi e Thompson nel 2000 (descritto nel capitolo 3) risulta essere il più indicato. Questo infatti produce le gocce di pioggia ricorrendo all'uso di tubi capillari in acciaio inossidabile posizionati ad un'altezza di 14 m dal suolo, così da permettere alle gocce di raggiungere almeno il 95% della loro velocità terminale quando queste hanno un diametro equivalente minore e uguale a 4,3 mm.

Per il progetto del setup del simulatore di pioggia ci si è dunque ispirati a quello proposto da Regmi e Thompson (2000).

La struttura è costituita da una torre con tre livelli di irrigidimento a pianta rettangolare, complessivamente $3,50 \times 4,00 \times 10,70 \text{ m}^3$, realizzata mediante sistema TRUSS. Gli elementi principali che compongono ciascuno dei tre livelli sono:

- quattro colonne a traliccio,
- quattro travi a traliccio, di irrigidimento,
- quattro nodi di collegamento.

Le varie parti che compongono la struttura della torre sono state montate in laboratorio. L'assemblaggio della struttura è stato eseguito con l'ausilio di un carroponente ed ha richiesto l'intervento di quattro persone addette al montaggio e un coordinatore, responsabile inoltre delle manovre del carroponente.

L'altezza della torre è stata limitata dagli spazi disponibili in laboratorio poiché, a causa della presenza del carroponente nella zona dove si è deciso di posizionare il simulatore, non è stato possibile realizzare una torre con altezza superiore ai 10,70 m.

Si è detto che per far raggiungere la velocità terminale alle gocce con un sistema di formazione ad ago, o almeno una sua percentuale abbastanza elevata, è necessario che queste cadano da un'altezza sufficientemente elevata. Per questa ragione il piano di gocciolamento è stato posizionato alla sommità della torre. Le gocce vengono formate ad un'altezza rispetto al pavimento del laboratorio di 10,40 m. Vista l'importanza della velocità delle gocce, è stata determinata la goccia più grande in grado di raggiungere almeno il 95% della propria velocità terminale. A tal scopo si è deciso di semplificare l'analisi considerando le gocce simulate come delle sfere indeformabili. Si è valutato l'equilibrio dinamico tra la forza gravitazionale e la forza di attrito viscoso, da cui si è poi ricavato il valore della velocità terminale U_t .

$$m \cdot g = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot s \cdot U_t^2$$

$$U_t = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot 2}{C_D \cdot \rho_a \cdot s}}$$

Dove:

- g è l'accelerazione gravitazionale;
- C_D è il coefficiente di forma (nel caso di una sfera è pari a 0,47);
- ρ_a è la densità dell'aria;
- s è l'area della sezione di riferimento della goccia presa ortogonalmente rispetto la direzione del moto;
- U_t è la velocità terminale della goccia.

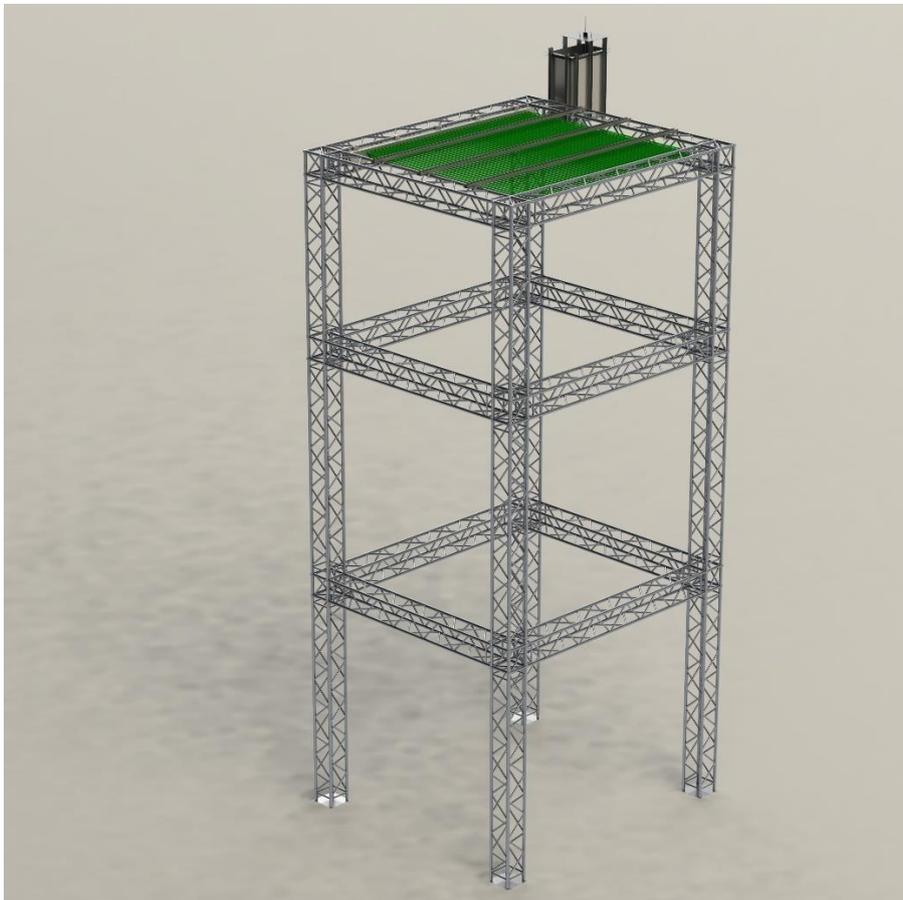


Figura 5.1: Rappresentazione grafica del setup del pioggiatore.

Sono state poi applicate le equazioni del moto effettuando una discretizzazione nel tempo in intervalli di 0,05 s. Per risolvere il sistema è

necessario impostare le condizioni al contorno, date dal valore della velocità e dello spazio all'istante iniziale, entrambe poste uguali a zero.

$$\begin{cases} v_i = v_{i-1} + a_{i-1} \cdot \Delta t \\ a_i = g - \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot s \cdot v_i^2 \cdot \frac{1}{m} \\ y_i = y_{i-1} + v_{i-1} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a_{i-1} \cdot \Delta t^2 \end{cases}$$

Dove:

- v è la velocità;
- a è l'accelerazione;
- y è lo spostamento;
- i è l'istante temporale.

In funzione della dimensione della goccia cambia il valore della massa, da cui dipende la velocità limite e l'accelerazione della goccia; la velocità e lo spostamento sono a loro volta dipendenti dal valore dell'accelerazione all'istante precedente.

A seguito di quanto riportato in precedenza si è determinata la più grande goccia in grado di raggiungere il terreno con una velocità pari ad almeno il 95% della sua velocità terminale. Quest'ultima è risultata avere un diametro pari a 3,9 mm, per cui tutte le gocce aventi diametro minore o uguale a questo valore riusciranno a raggiungere un valore di velocità pari ad almeno il 95% della loro velocità terminale. Come detto precedentemente, tale misura è ricavata in modo approssimato, questo perciò va considerato come valore indicativo e non esatto. Nella tabella a seguire si riportano: il diametro della goccia d , il valore della velocità U raggiunta dalla goccia dopo aver percorso 10,40 m, il 95% della velocità terminale, la velocità terminale della goccia U_t .

d	U	95%U_t	U_t
[mm]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
3,9	8,921	8,929	9,399

Tabella 5.1: Tabella di riepilogo dei dati relativi dimensione e velocità della goccia di 3,9 mm di diametro.

Di seguito si riporta il grafico avente nell'asse orizzontale il valore delle velocità e nell'asse verticale, diretto verso il basso, lo spostamento. Sono stati

inoltre indicati, attraverso due rette, il valore corrispondente al 95% della velocità terminale (retta verticale) e la distanza del piano di gocciolamento dal suolo (retta orizzontale).

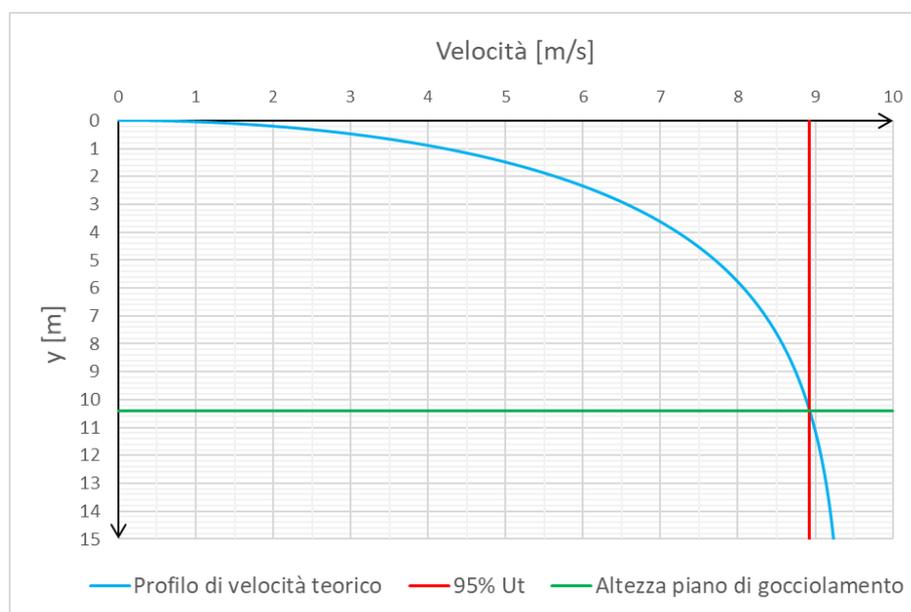


Figura 5.2: Grafico del profilo di velocità di una goccia con diametro equivalente pari a 3,9 mm.

Dal grafico si può notare come il profilo di velocità della goccia di 3,9 mm di diametro passi in prossimità dell'intersezione delle rette rappresentanti il 95% della velocità terminale della goccia e la massima distanza che la goccia può percorrere. Questo conferma ciò che si è affermato in precedenza, e cioè che le gocce di diametro pari a 3,9 mm, percorrendo una distanza di caduta di 10,4 m, riescono a raggiungere una velocità prossima al 95% della loro velocità terminale.

Al fine di mantenere i valori d'intensità di precipitazione costanti per l'intera durata di una prova, è stato progettato un sistema di alimentazione in grado di garantire un carico costante sugli aghi in ogni condizione di portata richiesta dal sistema.

Il sistema è costituito da un serbatoio di altezza pari a 1 m e pianta rettangolare di dimensioni 0,5 x 0,8 m², al cui interno è stato disposto uno sfioratore a calice libero di muoversi in direzione verticale. Lo sfioratore a calice sarà montato su di un supporto metallico, mosso a sua volta da un sistema di sollevamento a vite, controllato da un motore passo-passo. Il carico nel serbatoio verrà quindi controllato dal movimento verticale dello sfioro.

Affinché il pelo libero rimanga costante, la portata sfiorata deve essere stabile. Il serbatoio verrà alimentato da una pompa che fornirà una portata superiore

rispetto a quella massima richiesta dal simulatore, così da ottenere l'equilibrio tra portata in ingresso, portata in uscita e portata sfiorata. In questa maniera il carico all'interno del serbatoio si manterrà costante.



Figura 5.3: Sezione del serbatoio.

Essendo lo sfioro mobile, è necessario che il tubo che accoglie l'acqua sfiorata per portarla fuori da serbatoio sia flessibile; quando il carico nel serbatoio è massimo, cioè quando lo sfioro è alla massima distanza dal fondo, il tubo sarà teso, quando invece il carico è minimo il tubo deve potersi alloggiare nel fondo del serbatoio senza subire danni.

Per garantire il carico che permetta l'erogazione della portata minima senza che il tubo si danneggi o si formino delle strozzature, l'imbocco delle tubazioni non verrà posto in corrispondenza del fondo del serbatoio ma ad una distanza da quest'ultimo di almeno 20 cm. In questa maniera si fornisce al tubo lo spazio per alloggiarsi sul fondo.

Il range di intensità di precipitazione che si vuole simulare comprende valori dai 5 mm/h ai 200 mm/h, ai quali corrispondono valori di portata nel collettore

rispettivamente di 1,02 e 40,83 l/min. Come precedentemente detto, la pompa che alimenterà il serbatoio dovrà fornire una portata maggiore di quella massima in uscita richiesta dal simulatore; per cui considerando di voler avere un eccesso di portata pari a 20 l/min, la pompa dovrà fornire una portata di 60 l/min. Il tubo che convoglia l'acqua sfiorata è stato dimensionato considerando la condizione più gravosa, ossia per un valore di portata pari alla massima sfiorata e considerando la condotta in pressione. La massima portata sfiorata è data dalla differenza tra la portata in ingresso (60 l/min) e la portata minima in uscita (1,02 l/min). Per il calcolo del diametro del tubo è stata applicata la *formula di Hazen-Williams*:

$$\Delta = \frac{10,675 \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,8704}} \cdot L$$

$$D_i = \left(\frac{10,675 \cdot Q^{1,852}}{\Delta \cdot C^{1,852}} \cdot L \right)^{\frac{1}{4,8704}}$$

Dove con:

- Δ si indica il dislivello piezometrico (10,5 m);
- Q la portata massima sfiorata (59 l/min);
- C il coefficiente di scabrezza (150);
- L la lunghezza della condotta (11 m);
- D_i il diametro interno della condotta (0,0176 m).

Il diametro interno della condotta deve essere di almeno 17,6 mm, in maniera tale da garantire il corretto funzionamento del sistema. Pertanto, si prevede l'utilizzo di un tubo in polietilene da 3/4" a cui corrisponde un diametro interno di almeno 19mm.

L'acqua dal serbatoio verrà convogliata al collettore principale costituito da uno scatolare in acciaio inox a sezione rettangolare 100 x 200 mm², che verrà fissato all'ultimo livello di irrigidimento della torre attraverso degli elementi in acciaio costruiti ad hoc. Il collettore verrà opportunamente forato, in modo da potervi installare le tubazioni sulle quali verranno posti gli aghi.

La distanza tra gli aghi è stata scelta in modo da garantire dei valori di intensità e distribuzione delle gocce adeguati. Tale distanza consente inoltre un'agevole installazione delle tubazioni e sostituzione degli aghi. Questi ultimi saranno perciò disposti secondo una configurazione geometrica di quadrati di 2,5 cm di lato. Le tubazioni saranno disposte su tre livelli distinti e avranno sul medesimo livello interasse di 7,5 cm. Tale scelta è legata per l'appunto a necessità d'installazione dei tubi. Distribuendo le tubazioni su tre livelli distinti sarà infatti possibile installare agevolmente le tubazioni garantendo comunque una distanza orizzontale tra gli aghi pari a 2,5cm.

Gli aghi verranno montati a loro volta su ciascuna tubazione ad un interasse di 2,5 cm.

A monte del collettore principale, due tubi da 1,5'' collegheranno il serbatoio a quest'ultimo. Due elettrovalvole saranno installate a monte del collettore e consentiranno di regolare il passaggio dell'acqua.

Nel collettore sarà disposto uno sfiato per consentire l'uscita dell'aria al momento dell'ingresso dell'acqua. Lo sfiato sarà posizionato all'estremità del collettore, il quale, sarà leggermente inclinato in modo che la quota dell'estremità a monte sia superiore di quella a valle.

Per ottenere un controllo preciso dell'intensità delle precipitazioni simulate, bisogna conoscere il carico agente sugli aghi. Il progetto prevede l'installazione di tre misuratori di pressione nel collettore principale, uno al centro e due alle estremità. All'interno dei collettori secondari la velocità dell'acqua è molto ridotta, si presume perciò che le perdite di carico siano trascurabili. In questa maniera è possibile fissare il carico all'interno del serbatoio in funzione del carico agente sugli aghi, tenendo quindi in considerazione le perdite di carico che si hanno dal serbatoio fino ai punti in cui sono installati i misuratori di pressione.

La torre del simulatore di pioggia durante l'esecuzione delle prove sarà isolata dall'esterno attraverso l'uso di un telo impermeabile che ricopre i quattro lati della struttura. Durante l'esecuzione delle prove verranno rilasciati in aria degli inquinanti al fine di studiare il fenomeno di dilavamento di questi, scopo ultimo di questo studio. È inoltre possibile che in laboratorio si presentino delle correnti d'aria che potrebbero influenzare la traiettoria delle gocce. Per queste ragioni è fondamentale ai fini delle prove che il simulatore sia correttamente isolato dall'esterno. Il telo permette anche di proteggere l'ambiente esterno al simulatore dalle gocce d'acqua generate evitando che si bagnino.

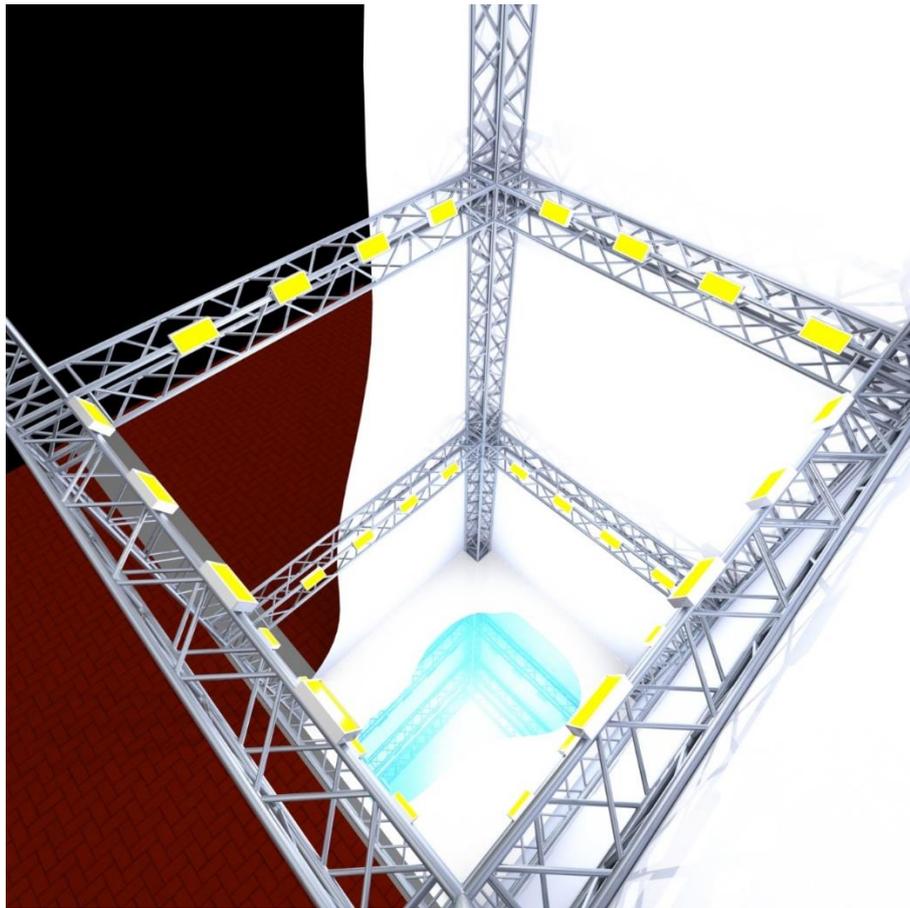


Figura 5.4: Setup del pioggiatore

5.2 Sistema di gocciolamento a piccola scala

L'intensità e la dimensione delle gocce riprodotte da un simulatore di pioggia ad ago dipendono sostanzialmente dal carico e dalla dimensione dell'ago. Per individuare quale tipologia di ago installare nel simulatore in relazione al carico agente, è stato realizzato un setup per la formazione di gocce da un singolo ago.

Al fine di mantenere il carico costante per l'intera durata di ciascun esperimento, è stato utilizzato un sistema di alimentazione ispirato alla bottiglia di Mariotte.

Per alimentare questo sistema non servono grandi volumi d'acqua, le prove hanno generalmente una durata di circa 30 minuti e le portate uscenti da un singolo ago per i valori di carico applicati sono dell'ordine di 10^{-7} - 10^{-5} l/s. Inoltre, tenendo conto della possibilità di poter riempire il serbatoio quando necessario, è stato sufficiente l'utilizzo di una bottiglia da mezzo litro.

Nella bottiglia sono stati realizzati due fori, uno sul fondo ed uno in sommità (nel tappo) per consentire rispettivamente l'uscita dell'acqua e l'inserimento del tubo per l'ingresso dell'aria.

La tenuta ermetica è stata garantita attraverso l'applicazione di un sigillante nelle zone di connessione alla bottiglia.

Per avere il controllo preciso del carico sull'ago, si è operato sulla posizione dello stesso, attraverso l'utilizzo di un nonio lineare, alla cui estremità sono state fissate la parte terminale del deflussore e la parte sommitale dell'ago in modo da garantire non solo il controllo del carico ma anche la stabilità e verticalità dell'ago durante l'esecuzione di tutta la prova.

L'ago è stato collegato alla bottiglia attraverso un deflussore montato su di un apposito raccordo in plastica fissato alla bottiglia. In questo modo è possibile garantire sia la tenuta ermetica della bottiglia sia una buona aderenza tra deflussore e raccordo, impedendo l'insorgere di perdite in corrispondenza di tale collegamento.

La forma delle gocce generate dall'ago non è quella di una sfera perfetta, risulta invece variabile in funzione delle loro dimensioni e lungo il tragitto percorso dalle gocce a partire dal punto in cui sono state generate. Per descrivere la loro dimensione generalmente si fa riferimento al valore del diametro equivalente, ossia il valore del diametro della sfera avente il medesimo volume della goccia.

Tra i diversi metodi esistenti per la determinazione della dimensione delle gocce, sono stati adottati un metodo fotografico e uno volumetrico.

Il primo è, come detto, un metodo fotografico che sfrutta la tecnica dello *shadowgraph imaging*, consistente nel posizionamento dell'oggetto da immortalare tra una sorgente luminosa diffusa e l'obiettivo della camera, ottenendo così delle immagini nelle quali il contorno della goccia può essere individuato in modo chiaro e preciso, come si può notare dalla figura 5.5. Dall'analisi di queste immagini è possibile ricavare il diametro reale della goccia.

Il secondo metodo, fornendo il diametro medio equivalente delle gocce, è stato adoperato principalmente al fine di effettuare un confronto tra tale valore e quelli dei diametri reali, ottenuti tramite la tecnica *shadowgraph*. Attraverso questo secondo metodo è possibile inoltre il calcolo dell'intensità prodotta da ciascun ago per le diverse condizioni di carico. Tale grandezza risulta fondamentale per la valutazione della capacità di un simulatore di riprodurre le precipitazioni reali, facilitando quindi la scelta della tipologia di ago da installare nel sistema di gocciolamento del simulatore di pioggia.



Figura 5.5 Scatto ottenuto utilizzando la tecnica shadowgraph.

5.2.1 Shadowgraph imaging

Si è optato per l'utilizzo della tecnica *shadowgraph imaging* poiché, sfruttando la differenza tra l'indice di rifrazione del mezzo in esame e l'ambiente circostante, risulta ottimale quando l'oggetto che si vuole immortalare nell'immagine è trasparente e presenta un diverso indice di rifrazione rispetto a quello del mezzo circostante.

Avendo l'aria e l'acqua due differenti indici di rifrazione ed essendo entrambe trasparenti, questa tecnica si presta perfettamente all'analisi delle gocce di pioggia che cadono attraverso l'aria.

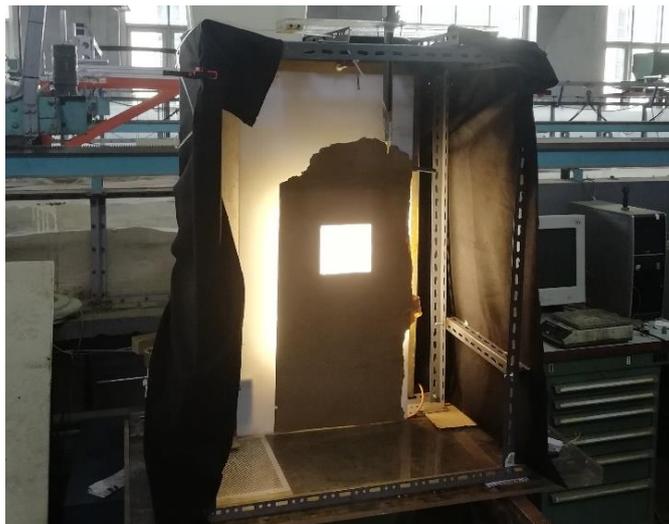


Figura 5.6: Setup per l'acquisizione delle immagini con la tecnica *shadowgraph*.

Le componenti principali per applicare tale tecnica sono due: una sorgente di illuminazione posteriore ed una telecamera ad alta risoluzione.

La retroilluminazione permette di ottenere uno sfondo omogeneo e fornire la luce poi rifratta dalla goccia. In tal modo, grazie alla presenza di tale sfondo luminoso e delle ombre in corrispondenza del contorno della goccia, l'immagine acquisita risulta chiara e nitida. Un esempio di immagine della goccia ottenuta tramite questa tecnica è riportato nella figura 5.5.

La fonte luminosa è costituita da due pannelli a LED posti davanti all'obiettivo della camera e al di sopra dei quali sono stati fissati degli schermi, atti a consentire la diffusione della luce. L'effetto di retroilluminazione è quindi ottenuto ponendo l'ago tra l'obiettivo della telecamera e le fonti luminose, e disponendo queste ultime in posizione verticale parallelamente al piano di gocciolamento.

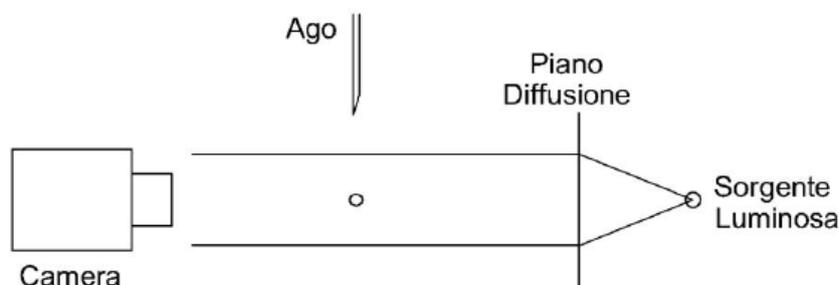


Figura 5.7: Schema funzionale della tecnica shadowgraph impiegata nelle prove per la visualizzazione delle gocce d'acqua prodotte.

La fotocamera utilizzata per determinare il diametro reale delle gocce è una Nikon D810 con obiettivo Zeiss ZE/ZF.2 Makro-Planar T* 50mm f/2, questa è controllata con l'ausilio di computer e acquisisce raffiche d'immagini con una frequenza di scatto pari a circa 6 Hz. Per ottenere una profondità di campo sufficiente alla perfetta messa a fuoco della goccia ed evitare strisciate, la fotocamera è stata posizionata ad una distanza di 20 cm dal piano di caduta, con un rapporto focale f/5.6 e un tempo di esposizione pari a 1/8000s. In questa maniera la profondità di campo risulta essere di 3 mm con risoluzione pari a circa 51px/mm.

La calibrazione della macchina fotografica è stata eseguita fotografando un target posizionato in corrispondenza del piano di gocciolamento. A tale scopo è stato utilizzato un righello con gradazione ogni mezzo millimetro in modo da ottenere un'elevata precisione.

Una volta acquisite le immagini, sono state analizzate per ricavare il valore del diametro reale delle gocce attraverso il software *Matlab*. È stato formulato uno script che permettesse di identificare in ciascuna fotografia la goccia di

pioggia e calcolarne il diametro reale, per poi convertirlo successivamente da pixels in millimetri.

L'analisi delle immagini da un punto di vista computazionale risulta essere un problema oneroso. Per velocizzare l'analisi, è stata installata la *parallel computing toolbox* nel computer con il quale sono state elaborate le immagini. Questa consente di risolvere problemi computazionali onerosi e ad alto contenuto di dati utilizzando processori multicore, GPU e cluster di computer. In particolare, questa *toolbox* permette di utilizzare funzioni abilitate per il calcolo parallelo in *Matlab*, come il ciclo *parfor* (*parallel for loop*).

Per condurre l'analisi delle immagini sono necessari i parametri di calibrazione e per ottenere dei risultati corretti è fondamentale che questi siano attendibili.

Le immagini vengono analizzate singolarmente, queste vengono tagliate al fine di ridurre l'onere computazionale e di evitare di commettere errori a causa della presenza di altri oggetti all'esterno dello sfondo illuminato ma visibili nell'immagine per intero. Le gocce seguono una traiettoria precisa, ciò permette di ritagliare le immagini, eliminando i bordi laterali e mantenendo solamente la parte centrale interessata dalla caduta della goccia. L'analisi viene quindi eseguita esclusivamente sulla zona nella quale ci si aspetta di trovare la goccia, trascurando il resto dell'immagine.

La nuova immagine della goccia viene quindi convertita in scala di grigi, e successivamente binarizzata. Questa operazione, chiamata anche *sogliatura*, rappresenta nell'elaborazione digitale delle immagini un semplice metodo per passare da un'immagine a livelli di grigio ad un'immagine binaria. Consiste nel catalogare i singoli pixel come "pixel oggetto" o "pixel di sfondo" a seconda che questi abbiano un valore rispettivamente superiore o inferiore ad una certa soglia. Il risultato di questa operazione è un'immagine in bianco e nero, nella quale si può osservare, generalmente, in bianco l'oggetto ed in nero lo sfondo.

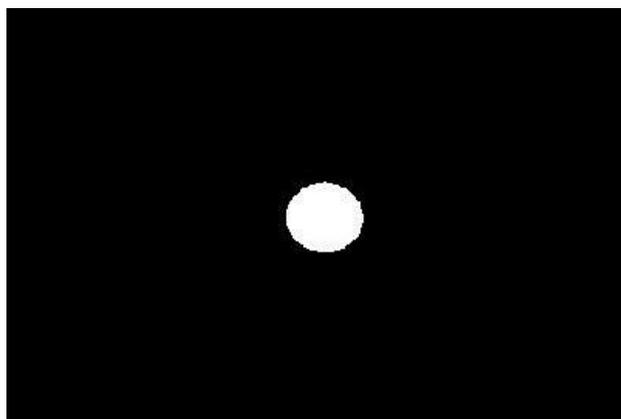


Figura 5.8: Immagine della goccia dalla quale si ricava il valore del diametro.

Avendo utilizzato la tecnica *shadowgraph*, lo sfondo dell'immagine ottenuta si presenta chiaro per via della retroilluminazione, l'oggetto immortalato risulterà invece scuro, per cui nel caso in esame dalla binarizzazione si otterrà un'immagine della sagoma della goccia nera su base bianca. Per ottenere la consueta immagine dell'oggetto bianco su sfondo nero, è stata quindi invertita la maschera.

Si procede quindi alla rimozione di eventuali *cluster* presenti sullo sfondo, così da ottenere una immagine binaria pulita nella quale risulta visibile esclusivamente la goccia.

Come già detto in precedenza, la tecnica utilizzata per l'acquisizione delle immagini immortalata esclusivamente i contorni della goccia. Per questa ragione è stato necessario riempire la zona interna al contorno, prima di poter procedere con il calcolo del diametro.

A questo punto si è ottenuta un'immagine della goccia completamente bianca su sfondo nero come rappresentato nella figura 5.8.

Dall'immagine in bianco e nero sono state calcolate alcune proprietà della geometria della goccia: baricentro, diametro, asse maggiore, asse minore, parametro di circolarità ed eccentricità delle gocce. I primi quattro valori vengono calcolati direttamente attraverso dei comandi di *Matlab*, l'eccentricità viene invece calcolata come la differenza tra l'asse maggiore e l'asse minore, rapportata al valore del diametro della goccia.

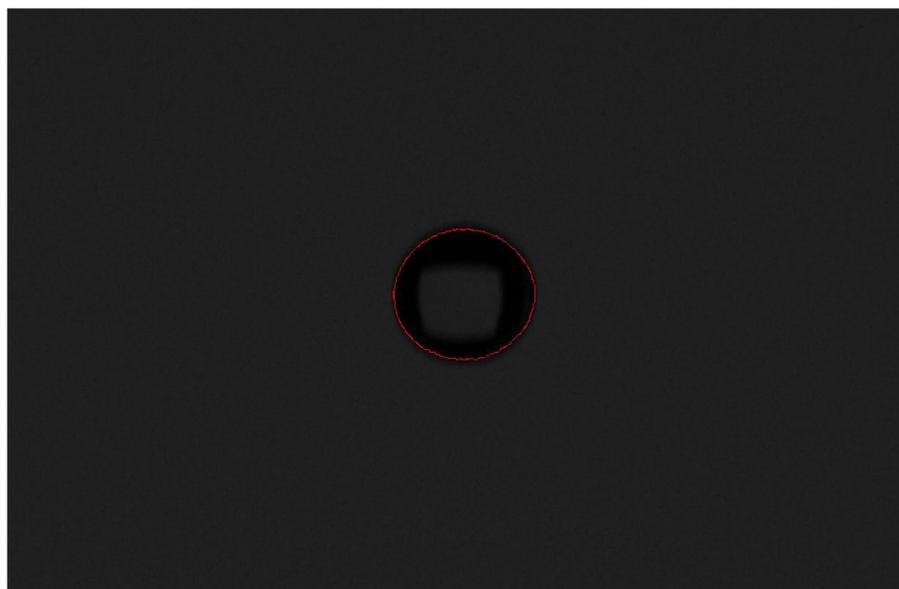


Figura 5.9: Immagine in scala di grigi della porzione contenente la goccia con il contorno rilevato attraverso l'analisi con *Matlab*.

I valori dell'eccentricità e della circolarità sono utili all'identificazione della forma delle gocce. Tanto minore sarà l'eccentricità quanto più la forma della

goccia nel piano sarà simile a quella di una circonferenza. La circolarità è un valore compreso tra 0 e 1, valore per il quale l'oggetto in esame risulta essere un cerchio perfetto, e si calcola come:

$$\frac{4 \cdot A_{imm} \cdot \pi}{P_{imm}^2}$$

Dove A_{imm} e P_{imm} sono rispettivamente l'area e il perimetro dell'oggetto presente nell'immagine, nel caso specifico, la goccia.

I valori dei diametri così ottenuti sono in pixel e verranno successivamente convertiti in millimetri.

È stato poi calcolato il valore medio e la deviazione standard del diametro, dell'eccentricità e della circolarità delle gocce, escludendo dal calcolo eventuali valori anomali. Nel calcolo della deviazione standard dei diametri delle gocce, si è tenuto conto della propagazione dell'errore dovuta alla deviazione standard del fattore di conversione da pixel a millimetri.

In questa prima fase dello studio è sufficiente analizzare una singola goccia per immagine, poiché il setup permette il gocciolamento da un solo ago. Pensando ai possibili sviluppi futuri, per i quali si studierà la dimensione e la forma delle gocce generate da più aghi contemporaneamente, risulta di notevole utilità ricavare le proprietà di più gocce presenti in una stessa foto.

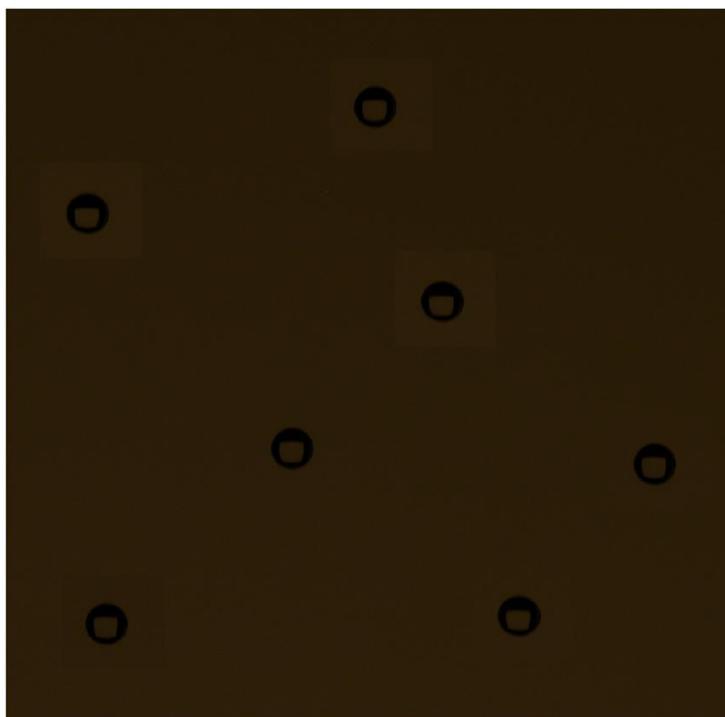


Figura 5.10: Immagine fittizia con la presenza di più gocce nel piano di messa a fuoco.

A tale scopo è stato implementato uno *script* in grado di eseguire le operazioni sino ad ora indicate in presenza di più gocce nel medesimo fotogramma. Non avendo a disposizione nessun fotogramma con gocce multiple, si è provveduto alla realizzazione fittizia di alcuni fotogrammi “test” ottenendo un’immagine avente le medesime caratteristiche di una foto ottenuta con la tecnica shadowgraph (sfondo luminoso e contorno della goccia scuro), con la presenza di più gocce nel piano di messa a fuoco.

L’analisi di questa immagine, condotta attraverso l’uso di *Matlab*, non differisce da quella svolta per le fotografie contenenti una singola goccia, se non per il numero di parametri, pari alle gocce presenti in ciascuna foto analizzata.

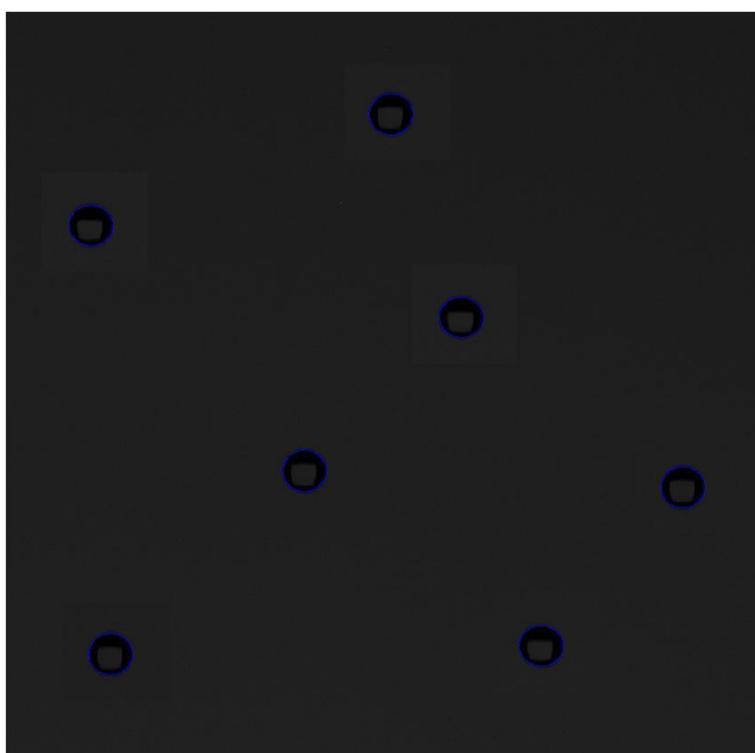


Figura 5.11: Immagine in scala di grigi del fotogramma fittizio nel quale sono visibili i contorni rilevati attraverso l’analisi con *Matlab*.

Si è poi eseguita un’ulteriore prova per valutare la velocità reale delle gocce generate in prossimità del suolo, riprendendo in *super slow-motion* la caduta di una goccia di diametro pari a 2,4 mm dal piano di gocciolamento del simulatore di pioggia.

Sempre attraverso l’uso di *Matlab* è stato analizzato il video al fine di calcolare la velocità della goccia ripresa. Come per l’analisi delle immagini, ciascun frame del video in scala di grigi è stato binarizzato, successivamente è stata

invertita la maschera, sono stati eliminati eventuali cluster ed è stato riempito il vuoto all'interno della goccia. Dopodiché per ogni *frame* così ottenuto sono state individuate le coordinate del baricentro della goccia, a partire dalle quali sono state calcolate attraverso la *formula di Pitagora*, le distanze percorse dalla goccia tra due *frame* successivi.

Si è calcolato il valore medio delle distanze, convertendolo poi da pixel a millimetri.

Noto il tempo che intercorre tra l'acquisizione di un *frame* e quello successivo, si è calcolata la velocità della goccia.

Nella figura 5.12 sono riportati i ritagli di quattro *frame* successivi, nei quali è visibile il baricentro trovato attraverso *Matlab* ed è possibile seguire la caduta della goccia.

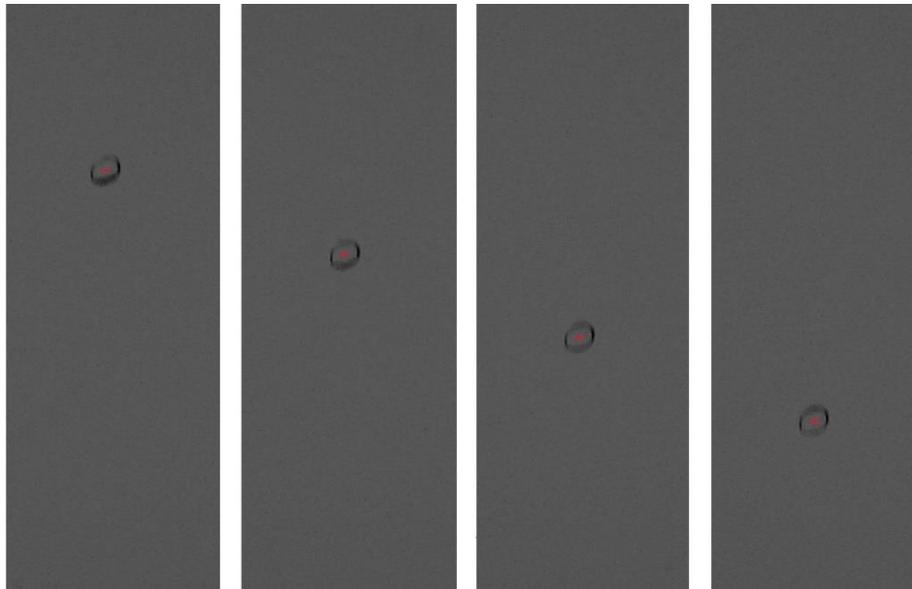


Figura 5.12: Porzioni di quattro *frame* successivi, nei quali è visibile il contorno della goccia e il baricentro trovato attraverso l'analisi di *Matlab*.

5.2.2 Metodo Volumetrico

Al fine di validare i dati ottenuti con la tecnica fotografica, è stato impiegato parallelamente un metodo volumetrico. Durante l'intera durata di ciascuna prova, il volume delle gocce cadute è stato raccolto in un apposito contenitore, sul quale è stato posizionato un microfono a contatto per la registrazione del ticchettio delle gocce al momento dell'impatto con il contenitore. La durata di ciascuna prova è stata fissata pari a 30 minuti, al fine di garantire la collezione di un sufficiente quantitativo di gocce e poter confrontare i risultati ottenuti dalle varie prove riducendo l'errore nella stima del diametro medio.

Il microfono utilizzato per le prove ha una sezione clip, che consente di fissarlo stabilmente al contenitore. Le registrazioni ottenute grazie all'uso di questo microfono hanno permesso il conteggio delle gocce anche quando, durante la prova, in laboratorio si stavano eseguendo altre attività che generavano rumore. Questo aspetto si è rivelato fondamentale, in quanto ha permesso di avere una maggiore autonomia nella programmazione delle prove, che purtuttavia si è evitato di svolgere in presenza di rumori non continui, al fine di evitare picchi dovuti al rumore circostante che si confondessero con quelli generati dall'impatto delle gocce.

Per registrare è stato utilizzato il software *Audacity*, che consente di regolare il volume di registrazione, salvando nel formato più congeniale, in questo caso *.m4a*, e di verificare nell'immediato se il microfono sta registrando correttamente il ticchettio delle gocce attraverso la sua interfaccia.

Un apposito contenitore, dotato di un piatto risonante e un volume di raccolta al di sotto è stato impiegato durante gli esperimenti. Tale scelta consente una registrazione chiara e nitida dell'impatto goccia-piatto riducendo al minimo il problema dell'attenuazione del suono provocato dall'accumulo di acqua sul piatto.

Prima e dopo ciascuna prova, è stato pesato il contenitore attraverso l'uso di una bilancia digitale con una precisione del decimo di grammo. La differenza tra il peso successivo e antecedente la prova rappresenta il peso del volume d'acqua raccolto nella singola prova.

L'elaborazione dei file audio per il calcolo del numero delle gocce cadute in 30 minuti di prova è stata effettuata attraverso l'uso del software *Matlab*.

I picchi delle gocce sono stati contati attraverso la funzione *findpeak*. Questa considera come picchi tutti quei valori maggiori dei campioni ad essi adiacenti e i valori pari a infinito. Per evitare che venissero considerati dal comando anche i picchi dovuti al rumore di fondo, è stato necessario imporre un valore di distanza minima tra due picchi successivi e fissare un *threshold*. L'analisi è stata eseguita per ogni prova singolarmente, in quanto la distanza tra due picchi successivi varia per ciascuna prova audio in funzione della frequenza con la quale vengono generate le gocce. Quest'ultima è funzione del carico agente sull'ago e della dimensione del diametro dell'ago stesso.

Per verificare che tale imposizione fosse corretta, è stata prima effettuata una prova su una porzione del segnale applicando la funzione *findpeak* e, attraverso la sua rappresentazione grafica, accertando il corretto posizionamento dei picchi.

Infine, il comando *findpeak* è stato applicato all'intero segnale, ottenendo il numero complessivo di gocce cadute durante tutta la prova.

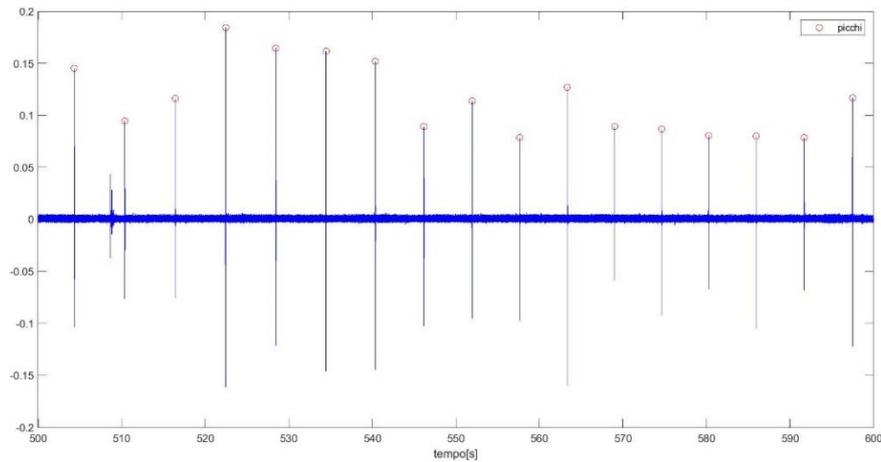


Figura 5.13: Rappresentazione su Matlab della registrazione e dei picchi per l'ago da 0,3 mm e carico 18 cm.

Attraverso queste prove è stato possibile stimare indirettamente il diametro medio equivalente e l'intensità media prodotta da ciascun ago per le diverse configurazioni di carico.

Per ogni singola prova, la prima grandezza che viene misurata è il peso P del volume d'acqua raccolto durante tutta l'esecuzione della stessa. Noto il peso specifico delle gocce P_s (997 kg/m^3), è possibile ricavare il volume totale raccolto V_{TOT} .

$$V_{TOT} = \frac{P}{P_s}$$

Questo, diviso per il numero delle gocce cadute all'interno del contenitore, fornisce un valore medio del volume delle singole gocce V .

Noto il volume medio delle gocce, è possibile risalire ad un valore medio del loro diametro equivalente d_{eq} , essendo tale grandezza pari al diametro della sfera avente il medesimo volume delle singole gocce.

$$d_{eq} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{1}{\pi} V}$$

Il valore dell'intensità di precipitazione simulata è stato calcolato considerando il setup del pioviggiatore, ossia un'area di pertinenza per ciascun ago pari a 625 mm^2 ($25 \times 25 \text{ mm}^2$). Questa è stata ottenuta dividendo il volume totale raccolto durante la prova per l'area di pertinenza A_p e la durata della prova stessa t_p .

$$i = \frac{V_{TOT}}{A_p \cdot t_p}$$

6. RISULTATI

Nelle pagine seguenti sono riportati i risultati ottenuti con l'applicazione del metodo volumetrico, relativi le prove eseguite con le diverse tipologie di ago e diversi valori del carico su di esso agente. I risultati ricavati con l'applicazione della tecnica shadowgraph, per le prove eseguite con l'ago da 25 g e per sette diversi valori di carico agente, sono stati poi confrontati con quelli ricavati attraverso la tecnica volumetrica.

Gli aghi ipodermici impiegati in questo studio sono tre: 30g, 27g e 25g.

Diametro esterno [mm]	Gauge:
0,3	30
0,4	27
0,5	25

Tabella 6.1: Tipologie di aghi impiegati per l'esecuzione delle prove

Lo scopo delle prove è quello di individuare per ciascuno degli aghi utilizzati una legge empirica in grado di correlare intensità di pioggia e diametro medio al carico agente.

Per ciascuna tipologia di ago, la prima prova è stata eseguita per un valore di carico pari a 20 cm e si è proseguito riducendo il valore del carico agente con step di 2 cm, fino a che non si è osservato che la frequenza con la quale venivano generate le gocce risultava essere eccessivamente bassa e, conseguentemente, così anche l'intensità. Una volta eseguita la prova con il valore di carico minimo, lo si è aumentato eseguendo le prove con un carico di 22 e 24 cm.

Avendo eseguito l'analisi per l'ottenimento dei risultati alla conclusione di ogni singola prova, è stato possibile osservare come i valori dei diametri e delle intensità variassero in funzione del carico. Si è notato da subito che le intensità di precipitazione hanno un comportamento pressoché lineare col variare del carico, e che i diametri delle gocce hanno una distribuzione abbastanza uniforme, risultando quindi non influenzati dalle variazioni di carico all'ago.

Si è continuato ad aumentare il carico agente sugli aghi ma, viste le considerazioni fatte nel paragrafo precedente, lo si è fatto incrementandolo di 6 cm per volta fino a raggiungere un valore di carico agente pari a 48 cm.

Risultando di interesse ai fini dello studio continuare ad investigare sui risultati relativi questa tipologia di ago, solo per l'ago da 25 g, è stata eseguita un'ulteriore prova applicando un valore del carico pari a 53 cm non consentendo il nonio l'applicazione di un carico superiore a tale valore.

Il carico è stato misurato dalla punta degli aghi, perciò non avendo questi la stessa lunghezza, a parità di carico agente la lettura nel nonio è diversa per ciascuna tipologia di ago.

Quando la punta dell'ago si trova alla stessa quota della parte inferiore del tubo d'ingresso dell'aria della bottiglia di Mariotte, la pressione agente è quella atmosferica. La lettura nel nonio in corrispondenza di tale posizione dell'ago viene considerata pari a zero e, come precedentemente detto, è differente per ciascuna tipologia di ago.

Durante l'esecuzione di ogni prova si è prestata particolare attenzione a due aspetti fondamentali che, se trascurati, porterebbero a degli errori nella stima delle grandezze oggetto dell'analisi. Il primo è la presenza di bolle d'aria all'interno del deflussore, per cui si richiede di verificarne l'assenza in quanto, in caso contrario, queste costituirebbero un ostacolo al flusso, riducendo la frequenza di formazione delle gocce e una conseguente sottostima dell'intensità di precipitazione.

Il secondo aspetto di cui bisogna tener conto è la corretta posizione dell'ago. Per ciascuna prova si è verificato il corretto inserimento nel deflussore e la verticalità dell'ago al fine di evitare un'eventuale sua inclinazione che potrebbe portare ad un'alterazione della forma della goccia.

I risultati ottenuti attraverso il metodo volumetrico saranno soggetti ad un errore associato alla precisione della bilancia, avente precisione del decimo di grammo. Tale errore si ripercuote, in maniera diversa, sulla stima dell'intensità e del diametro medio delle gocce.

L'errore delle intensità di precipitazione è di $\pm 0,32$ mm/h, mentre quello associato ai diametri medi equivalenti varia per ciascuna prova, in quanto dipende dal numero di gocce cadute. All'aumentare del carico e del diametro dell'ago ipodermico, il numero delle gocce aumenta e, conseguentemente, l'errore sul valore del diametro medio si riduce.

L'errore che si commette nella stima del diametro medio varia da $\pm 0,04$ mm a $\pm 0,002$ mm, rispettivamente per la prova eseguita con ago da 30 g e carico pari a 12 cm e quella eseguita con ago da 25 g e carico pari a 53 cm.

6.1 Ago da 30 g

Le prove eseguite con l'ago da 30g, corrispondente ad un valore del diametro di 0,3 mm, sono state eseguite per 11 valori di carico compresi tra 12 cm e 48 cm. Durante l'esecuzione della prova con carico di 12 cm si è osservato che la frequenza con la quale cadevano le gocce era pari a 0,2 gocce al secondo, e

il valore di intensità pari a 5,1 mm/h. Per questa ragione non si è proseguito oltre con la riduzione del carico agente sull'ago.

Dall'analisi dei dati ottenuti con le prove, è possibile osservare come all'aumentare del carico agente sull'ago corrisponda un aumento del volume totale raccolto, del numero delle gocce e dell'intensità; il valore del diametro equivalente medio non risulta invece influenzato dalle variazioni di carico.

Con un carico agente variabile da 12 cm a 48 cm si riesce quindi a produrre un'intensità compresa tra 5 mm/h e 25 mm/h, con gocce aventi valore del diametro equivalente pari a circa 2 mm, più precisamente compreso tra 1,9 mm e 2,0 mm.

Carico	Peso	V _{TOT}	Gocce	V	d _{eq}	σ	i
[cm]	[g]	[mm ³]	-	[mm ³]	[mm]	[mm]	[mm/h]
12	1,6	1604,8	368	4,36	2,03	0,042	5
14	2,1	2106,3	532	3,96	1,96	0,031	7
16	2,8	2808,4	730	3,85	1,94	0,023	9
18	3,2	3209,6	791	4,06	1,98	0,021	10
20	3,5	3510,5	889	3,95	1,96	0,019	11
22	3,8	3811,4	963	3,96	1,96	0,017	12
24	3,9	3911,7	971	4,03	1,97	0,017	13
30	4,7	4714,1	1152	4,09	1,98	0,014	15
36	5,7	5717,2	1344	4,25	2,01	0,012	18
42	6,7	6720,2	1561	4,31	2,02	0,010	22
48	7,7	7723,2	1771	4,36	2,03	0,009	25

Tabella 6.2: Risultati delle prove eseguite con l'ago da 0,3 mm di diametro, per i diversi valori di carico agente sullo stesso, ottenuti con il metodo volumetrico.

6.2 Ago da 27 g

Le prove con l'ago da 27g sono state eseguite complessivamente per 13 diversi valori di carico compresi tra 8 cm e 48 cm.

Si osserva lo stesso comportamento delle prove eseguite con l'ago da 0,3 mm: per cui all'aumento del carico sull'ago corrisponde un aumento del volume totale raccolto, del numero delle gocce e dell'intensità; il valore del diametro

equivalente medio, come in precedenza, non risulta invece influenzato dalle variazioni di carico.

L'intensità che si riesce a simulare con un carico agente variabile tra 8 e 48 cm è compresa tra 9 mm/h e 62 mm/h.

Con l'ago da 27g è possibile produrre delle gocce con diametro equivalente di poco superiore a 2 mm, nello specifico questo è risultato avente valori compresi tra 2,1 mm e 2,27 mm.

Carico	Peso	V_{TOT}	Gocce	V	d_{eq}	σ	i
[cm]	[g]	[mm ³]	-	[mm ³]	[mm]	[mm]	[mm/h]
8	2,7	2708,1	484	5,60	2,20	0,027	9
10	3,4	3410,2	602	5,66	2,21	0,022	11
12	4,2	4212,6	774	5,44	2,18	0,017	13
14	4,7	4714,1	960	4,91	2,11	0,015	15
16	6,8	6820,5	1277	5,34	2,17	0,011	22
18	6,8	6820,5	1221	5,59	2,20	0,011	22
20	7,9	7923,8	1404	5,64	2,21	0,009	25
22	8,4	8425,3	1434	5,88	2,24	0,009	27
24	9,3	9328,0	1569	5,95	2,25	0,008	30
30	11,4	11434,3	1967	5,81	2,23	0,007	37
36	14,4	14443,3	2493	5,79	2,23	0,005	46
42	17	17051,2	2770	6,16	2,27	0,004	55
48	19,3	19358,1	3298	5,87	2,24	0,004	62

Tabella 6.3: Risultati delle prove eseguite con l'ago da 0,4 mm di diametro, per i diversi valori di carico agente sullo stesso, ottenuti con il metodo volumetrico.

6.3 Ago da 25 g

Sono state eseguite 16 prove per l'ago da 25 g, con valori di carico compresi tra 4 cm e 53 cm. Lo spettro di intensità che si è ottenuto con l'ago da 0,5 mm è risultato essere quello più ampio, con il valore minore di carico si riesce a simulare una precipitazione di intensità pari a 7 mm/h, con il maggiore una pari a 143 mm/h.

Le gocce generate da questa tipologia di ago hanno un valore medio del diametro equivalente maggiore di 2 mm, ma comunque inferiore a 2,5mm.

Precisamente, il valore più piccolo di diametro è stato ottenuto con la prova da 4 cm di carico ed è pari a 2,29 mm, quello maggiore, pari a 2,49 mm, è stato ottenuto due volte, con un carico pari a 36 e 53 cm.

Carico	Peso	V_{TOT}	Gocce	V	d_{eq}	σ	i
[cm]	[g]	[mm ³]	-	[mm ³]	[mm]	[mm]	[mm/h]
4	2,2	2206,6	350	6,30	2,29	0,035	7
6	4,2	4212,6	590	7,14	2,39	0,019	13
8	6,3	6319,0	860	7,35	2,41	0,013	20
10	7,8	7823,5	1091	7,17	2,39	0,010	25
12	9,2	9227,7	1272	7,25	2,40	0,009	30
14	11	11033,1	1508	7,32	2,41	0,007	35
16	12,8	12838,5	1742	7,37	2,41	0,006	41
18	15,7	15747,2	2091	7,53	2,43	0,005	50
20	17,8	17853,6	2365	7,55	2,43	0,005	57
22	19,8	19859,6	2624	7,57	2,44	0,004	64
24	21,7	21765,3	2885	7,54	2,43	0,004	70
30	26,3	26379,1	3410	7,74	2,45	0,003	84
36	31,2	31293,9	3883	8,06	2,49	0,003	100
42	37,3	37412,2	4853	7,71	2,45	0,002	120
48	42,7	42828,5	5481	7,81	2,46	0,002	137
53	44,4	44533,6	5482	8,12	2,49	0,002	143

Tabella 6.4: Risultati delle prove eseguite con l'ago da 0,5 mm di diametro, per i diversi valori di carico agente sullo stesso, ottenuti con il metodo volumetrico.

Per questa tipologia di ago si è svolta l'analisi delle immagini, su foto scattate per 7 diverse prove. Nella tabella di seguito sono riportati i valori del diametro medio e della deviazione standard σ per ciascuna di queste, tenendo conto della propagazione dell'errore legato allo scarto quadratico medio del parametro di conversione da pixel a millimetri.

Carico	d_{eq}	σ
[cm]	[mm]	[mm]
10	2,4	0,1189
16	2,4	0,0232
22	2,41	0,0318
30	2,43	0,0310
36	2,45	0,0317
42	2,44	0,0311
48	2,44	0,0333

Tabella 6.5: Diametri medi e rispettive deviazioni standard, ottenuti dall'analisi delle immagini acquisite con la tecnica *shadowgraph*, per diversi valori di carico agente sull'ago da 0,5 mm di diametro.

Confrontando i valori dei diametri ottenuti con la tecnica fotografica e con la tecnica volumetrica si osserva una stretta correlazione dei dati, con differenze inferiori ai 0,05 mm.

Carico	Metodo fotografico	Metodo volumetrico	 Differenza
	d_{eq}	d_{eq}	
[cm]	[mm]	[mm]	[mm]
10	2,40	2,4	0,00
16	2,40	2,41	0,01
22	2,41	2,44	0,03
30	2,43	2,45	0,02
36	2,45	2,49	0,04
42	2,44	2,45	0,01
48	2,44	2,46	0,02

Tabella 6.6: Riepilogo e confronto dei valori dei diametri delle gocce, ottenuti con l'applicazione delle due tecniche, per le prove eseguite con l'ago da 25 g.

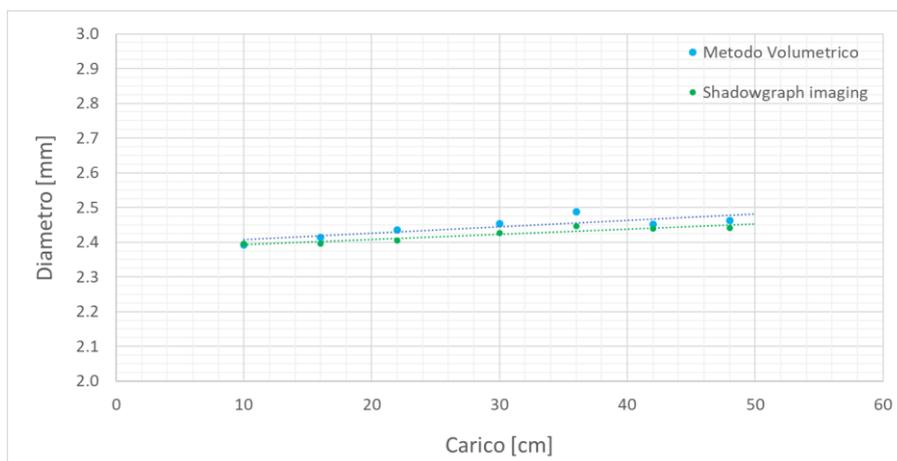


Figura 6.1: Grafico per il confronto dei valori di diametro ottenuti con la shadowgraph imaging e il metodo volumetrico.

Sempre attraverso l'analisi delle immagini con *Matlab*, sono stati determinati due parametri che descrivono la forma delle gocce: l'eccentricità e la circolarità.

Più la goccia si avvicina ad avere una forma sferica, tanto più sarà piccolo il valore dell'eccentricità e . Questo infatti è stato calcolato come rapporto tra la differenza dei due assi della goccia, maggiore e minore, e il diametro.

La circolarità c invece è un parametro che viene direttamente calcolato da *Matlab* e varia tra 0 e 1, più la forma della goccia sarà prossima a quella sferica, più vicino all'unità sarà il valore di circolarità.

Carico [cm]	e		c	
	Valore medio	σ	Valore medio	σ
10	0,1096	0,0214	0,8695	0,0066
16	0,1009	0,0050	0,8799	0,0185
22	0,0906	0,0185	0,8987	0,0195
30	0,0608	0,0140	0,9225	0,0182
36	0,0575	0,0177	0,9388	0,0141
42	0,0488	0,0153	0,9574	0,0111
48	0,0260	0,0098	0,9793	0,0114

Tabella 6.7: Valori medi e deviazioni standard dell'eccentricità e della circolarità delle gocce, ottenuti con il metodo fotografico per l'ago da 25 g e diversi valori di carico.

Si osserva una stretta correlazione tra i due parametri, per cui ad un valore elevato dell'eccentricità corrisponde un valore basso di circolarità, e viceversa.

I valori che sono stati ottenuti confermano quanto si poteva già affermare dall'osservazione delle foto delle gocce, e cioè che in prossimità dell'ago ipodermico da cui sono generate, le gocce presentano una forma approssimativamente sferica. Inoltre si osserva che, all'aumentare del carico, il valore di circolarità cresce. Per aumentare il carico sull'ago quest'ultimo deve scendere di quota perciò, all'aumentare del carico, la distanza tra l'ago e le gocce immortalate si riduce. Da queste considerazioni si può dedurre che più la goccia è vicina al formatore, più la sua forma sarà simile a quella sferica.

Sulla base di quanto emerso dalle analisi, l'ago 25g risulta essere il più adatto per i nostri scopi e a tal proposito si è dunque proseguito all'analisi della velocità di caduta di una goccia prodotta con questo ago.

Dall'analisi del video in *super slow motion*, che riprende in prossimità del pavimento la caduta di una goccia di diametro pari a 2,40 mm dal piano di gocciolamento del simulatore di pioggia, si è ottenuto il valore della velocità che questa riesce a raggiungere effettivamente percorrendo una distanza pari all'altezza del pioggiatore. Secondo i calcoli eseguiti ipotizzando che la goccia sia una sfera indeformabile, una goccia di diametro equivalente pari a 2,40 mm ha una velocità terminale di 7,37 m/s. Dopo aver percorso 10,40 m arriva a raggiungere la velocità di 7,29 m/s, pari cioè al 99% della velocità terminale calcolata.

Il valore della velocità, ottenuto dall'analisi del video, è pari a 7,36 m/s. Questo differisce in maniera trascurabile dal valore stimato di velocità che la goccia avrebbe dovuto raggiungere dopo aver percorso una distanza pari all'altezza del simulatore, risultando prossimo al valore teorico della velocità terminale.

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

Tabella 6.8: Diametro della goccia, velocità teorica ed effettivamente raggiunta dalla goccia dopo aver percorso una distanza di 10,40 m, e sua velocità terminale.

Di seguito si riporta graficamente l'andamento del profilo di velocità teorico di una goccia di 2,40 mm di diametro, avendo nell'asse orizzontale i valori di velocità e nell'asse verticale i valori della distanza percorsa dalla goccia nella

caduta. Sono stati inoltre indicati, attraverso due rette, il valore corrispondente alla velocità terminale (retta verticale) e la distanza del piano di gocciolamento dal suolo (retta orizzontale); attraverso una croce si evidenzia il valore ottenuto dalla misurazione.

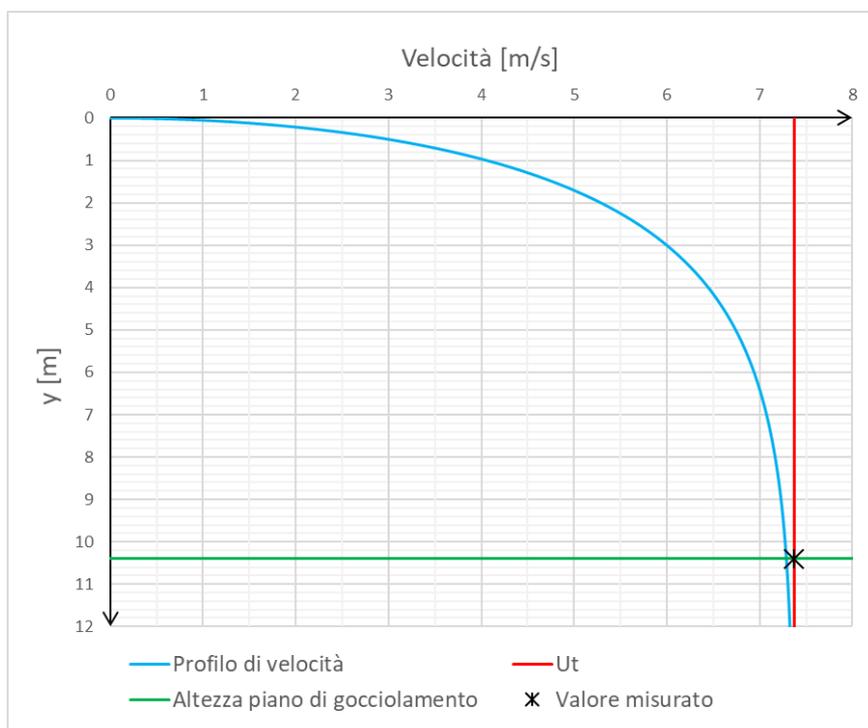


Figura 6.2: Grafico del profilo di velocità di una goccia con diametro equivalente pari a 2,40 mm.

Dal grafico si nota come la velocità teorica della goccia, per un valore dello spostamento pari all'altezza del piano di gocciolamento del simulatore, sia prossima al raggiungimento della velocità terminale, e come il valore di velocità misurato quasi coincida con il valore della velocità terminale teorica.

6.4 Confronto dei risultati

6.4.1 Intensità

Come accennato precedentemente, attraverso la rappresentazione grafica dell'intensità in funzione del carico, si nota come per tutti e tre gli aghi questa cresca in modo pressoché lineare con l'aumentare del carico agente.

Uno degli obiettivi dello studio era individuare per ciascuno degli aghi utilizzati una legge empirica in grado di correlare l'intensità di pioggia con il carico agente. Attraverso la rappresentazione grafica dei dati in Excel è stata

valutata la linea di tendenza per i dati sperimentali ottenuti per ciascun ago. Per tutte e tre le serie di dati si è scelta una legge lineare, in quanto è quella che ne descrive meglio il comportamento. Il valore di h corrisponde al carico agente (cm) mentre il valore di i all'intensità di precipitazione (mm/h).

Si è inoltre ricavato il valore del *coefficiente di determinazione* R^2 , rappresentante una misura statistica di quanto sono vicini i dati alla linea di regressione, ed è pari al quadrato della correlazione. Più questo valore sarà prossimo all'unità, maggiore sarà la correlazione.

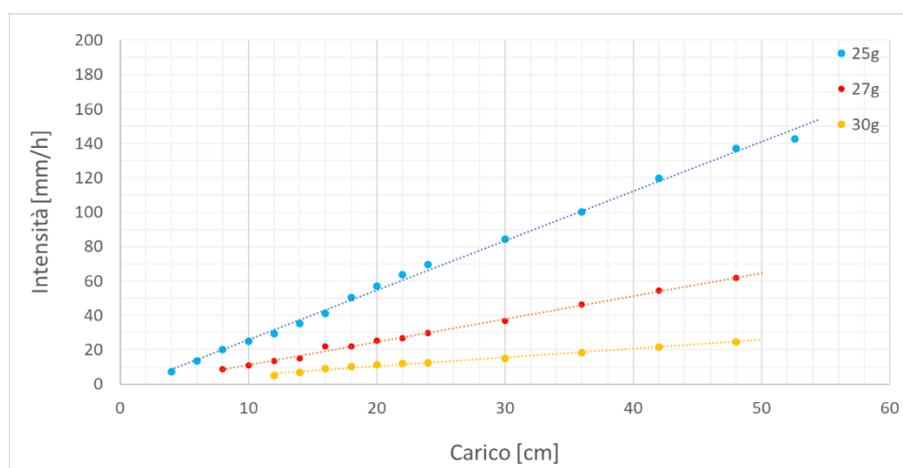


Figura 6.3: Grafico dell'intensità ottenuta per diversi valori di carico con le tre tipologie di ago: 25 g, 27 g e 30 g.

30 g	27 g	25 g
$i = 0.5076h + 0.3189$	$i = 1.3385h - 2.1815$	$i = 2.8764h - 2.9364$
$R^2 = 0.9879$	$R^2 = 0.9964$	$R^2 = 0.9968$

Tabella 6.9: Formulazioni empiriche che esprimono il legame tra il carico agente e le intensità prodotte per le tre diverse tipologie di ago.

La prima cosa che colpisce è il valore dell'intercetta della regressione lineare per l'ago da 27 g e quello da 25 g, assumendo questi valori negativi. L'intensità di precipitazione non può assumere valori negativi, perciò quello che si deduce è che non è possibile applicare le due leggi di regressione sopra citate per valori del carico agente sull'ago troppo piccoli. L'intercettazione dell'asse orizzontale avviene in corrispondenza dei valori del carico agente pari a circa 1,63 e 1,02 cm rispettivamente per l'ago da 27 g e da 25 g.

Anche la legge ottenuta per l'ago da 30 g non è applicabile per bassi valori del carico agente. Secondo la regressione lineare quando il carico sull'ago è nullo si riesce comunque a generare delle precipitazioni, precisamente con un valore di intensità pari a 0,3189 mm/h, e ciò non è possibile.

Fatte queste considerazioni, le leggi ottenute si prestano perfettamente alla stima delle intensità di precipitazione nel range di carichi analizzato; infatti, i coefficienti di determinazione risultano prossimi all'unità per tutte e tre le leggi.

Si osserva come il coefficiente angolare delle rette di regressione, cioè la loro pendenza, cresca all'aumentare della dimensione dell'ago. A parità di differenza di carico sugli aghi, il range delle intensità simulate cresce all'aumentare della dimensione dell'ago.

Considerando di variare il carico da 12 cm a 48 cm, con l'ago da 30 g si ottengono delle precipitazioni con un valore di intensità compreso tra 5,1 e 24,7 mm/h, con l'ago da 27 g compreso tra 13.5 e 61.9 mm/h, e con l'ago da 25 g compreso tra 29.5 e 137.0 mm/h.

A causa di vincoli di tipo geometrico, non è possibile applicare sul piano di gocciolamento del simulatore carichi superiori a 70 cm; per questa ragione è molto importante avere la possibilità di produrre un range di intensità ampio, nonostante le limitazioni sulle variazioni di carico.

Da questa considerazione si deduce come tra le tre diverse tipologie di ago utilizzate per l'esecuzione delle prove, quella da 25 g si dimostra la più adatta al fine di svolgere le simulazioni con il pioviggiatore in scala reale.

6.4.2 Diametro delle gocce

Sempre attraverso la rappresentazione grafica dei dati presenti su foglio Excel, è stata ricavata la linea di tendenza per i diametri medi equivalenti ottenuti per ciascun ago a differenti valori di carico e, anche in questo caso, si è scelta una legge lineare.

Come si evince dal grafico soprastante, i diametri delle gocce generate dalla stessa tipologia di ago hanno un andamento pressoché uniforme al variare del carico. Osservando le linee di tendenza si nota che queste non sono perfettamente parallele all'asse orizzontale bensì hanno una leggera inclinazione, ad indicare una leggera crescita del valore del diametro medio equivalente all'aumentare del carico.

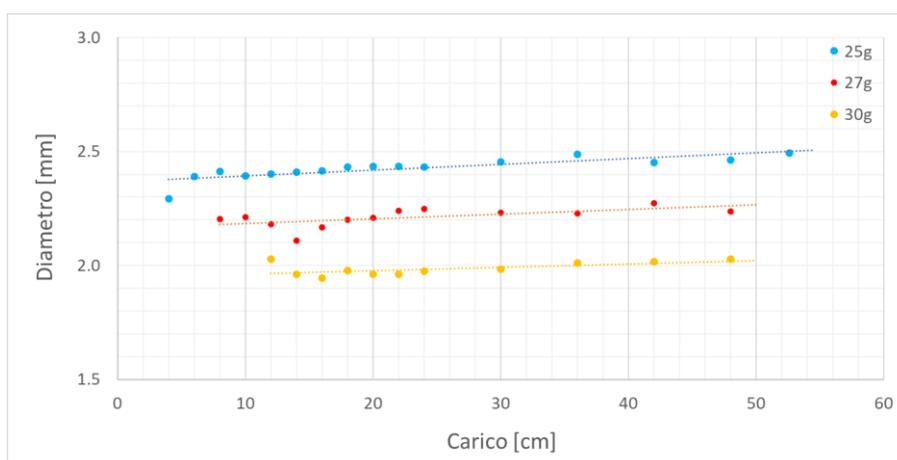


Figure 6.4: Grafico dei diametri ottenuti per diversi valori di carico con le tre tipologie di ago: 25 g, 27 g e 30 g.

Di seguito si riportano le espressioni delle regressioni lineari ottenute, il valore di h corrisponde al carico agente (cm) mentre il valore di d_{eq} al diametro medio equivalente (mm).

30 g	27 g	25 g
$d_{eq} = 0.0015h + 1.948$	$d_{eq} = 0.0021h + 2.163$	$d_{eq} = 0.0025h + 2.367$
$R^2 = 0.362$	$R^2 = 0.3987$	$R^2 = 0.6643$

Tabella 6.10: Formulazioni empiriche che esprimono il legame tra il carico agente e il diametro delle gocce prodotte per le tre diverse tipologie di ago.

Le tre equazioni presentano tutte coefficiente angolare ed intercetta maggiori di zero. Il coefficiente angolare assume valori molto piccoli, dell'ordine di 10^{-3} , indice del fatto che i diametri delle gocce sono pressoché indipendenti dal carico agente. All'aumentare della dimensione dell'ago aumenta il valore dell'intercetta e quindi dei diametri delle gocce. Se ne deduce che, per modificare il diametro delle gocce non è sufficiente variare il carico, risulta necessario cambiare l'ago ipodermico che le genera.

I valori dei coefficienti di determinazione sono bassi, specialmente per gli aghi da 30 e 27 g, questo porta a pensare che la dimensione delle gocce sia variabile in modo casuale per la stessa tipologia di ago, rendendo pertanto impossibile individuare una correlazione stretta tra i valori. Ciò non è dovuto alla tipologia di regressione scelta, in quanto anche l'applicazione delle altre leggi porterebbe comunque a valori bassi del coefficiente di determinazione.

Il range di variazione della dimensione delle gocce prodotte da uno stesso ago è molto ristretto, nonostante le rette di regressione non siano orizzontali. Si osserva che all'aumentare della dimensione dell'ago corrisponde un aumento anche del range dei valori del diametro medio equivalente delle gocce.

Avendo appurato da questa analisi che il controllo della dimensione delle gocce lo si ottiene andando a modificare la dimensione dell'ago e non agendo sul valore di carico, sarebbe utile capire come varia il diametro delle gocce in relazione alla tipologia di ago utilizzato.

Approssimativamente si può affermare che passando da un ago da 30 g ad uno da 27 g e, successivamente, da uno da 27 g ad uno da 25 g, il valore del diametro aumenta approssimativamente di 0,2 mm ad ogni variazione.

7. CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo lavoro di tesi era lo sviluppo del progetto di un simulatore di pioggia, che potesse essere poi applicato per lo studio del dilavamento degli inquinanti in atmosfera. Il simulatore deve perciò permettere la riproduzione di precipitazioni con caratteristiche simili a quelle reali, affinché i risultati ottenuti dai futuri studi si possano considerare rappresentativi.

Le tre caratteristiche principali delle precipitazioni naturali che si vogliono simulare, oggetto di analisi nel presente studio sono: la dimensione delle gocce di pioggia, l'intensità di precipitazione e la velocità delle gocce.

Per poter generare delle precipitazioni con valori di intensità elevati e, contemporaneamente, delle gocce la cui dimensione sia coerente con tali valori, è stata scelta una tipologia di simulatore ad ago.

Le gocce di pioggia naturale arrivano al suolo ad una velocità costante pari a quella terminale. Affinché le gocce generate con il simulatore raggiungano la loro velocità terminale, o una sua percentuale sufficientemente elevata, è necessario che il piano di gocciolamento del simulatore sia sufficientemente distante dal suolo, in modo da permettere alle gocce di avvicinarsi alla loro condizione di equilibrio.

Nella presente tesi è stato presentato il progetto completo di un simulatore di pioggia ispirato a quello proposto da T. P. Regmi e A. L. Thompson (2000). Il simulatore è costituito da una torre in sistema TRUSS di altezza pari a 10,70 m con un piano di gocciolamento posizionato ad una distanza dal suolo di 10,40 m.

Tale altezza si è stimata essere sufficiente a garantire il raggiungimento di una velocità prossima a quella terminale per gocce aventi diametro equivalente minore o uguale a 3,9 mm.

Al fine di caratterizzare in maniera esaustiva il setup finale si prevede la necessità d'installare una sensoristica in grado di determinare le proprietà della pioggia prodotta dal simulatore. Un'analisi di mercato condotta su differenti produttori di disdrometri ha evidenziato la presenza di numerosi prodotti in grado di misurare proprietà della pioggia quali, distribuzione dei diametri, intensità, velocità, energia cinetica, ecc... Sulla base dei dati raccolti e delle necessità del progetto, tra cui troviamo la necessità di misurare in *real time* distribuzione dei diametri, velocità, intensità ed energia cinetica, il disdrometro Parsivel² di OTT è risultato essere il più adatto allo scopo.

Allo scopo di effettuare il corretto dimensionamento di ciascun elemento del simulatore è stato necessario eseguire dei test su di un setup a piccola scala. Tale setup aveva tra gli obiettivi quello di individuare una legge empirica in grado di correlare intensità di pioggia e diametro delle gocce con il carico agente.

Per le prove sono stati utilizzati 3 diversi tipi di ago ipodermico: 30 g, 27 g e 25 g.

Per la valutazione della dimensione delle gocce e delle intensità, ottenute in ciascuna condizione analizzata sono stati applicati due metodi, uno volumetrico e uno fotografico.

Attraverso il metodo volumetrico è stato possibile stimare un diametro medio delle gocce prodotte oltre all'intensità equivalente prodotta dall'ago.

Il metodo volumetrico non potrà essere applicato per lo studio delle intensità e della dimensione delle gocce prodotte dal simulatore in scala reale per ovvie ragioni. Per questa ragione è stato utilizzato anche un metodo fotografico, il quale potrà poi essere applicato allo studio delle gocce prodotte dal simulatore in scala reale. Il metodo volumetrico inoltre, è servito a validare i dati raccolti con l'applicazione del metodo fotografico.

L'applicazione del metodo fotografico ha consentito la determinazione del diametro delle gocce, nonché notevoli altre informazioni sulla loro forma. Tale tecnica presenta grandi potenziali, in quanto potrà essere implementata in un setup più complesso dotato di high speed camera, con cui sarà possibile osservare nel dettaglio, non solo la velocità istantanea della goccia, ma anche l'evoluzione della sua forma e il flusso che si sviluppa attorno ad essa.

I risultati ottenuti durante il test volumetrico hanno evidenziato una relazione pressoché perfettamente lineare tra carico agente sull'ago e intensità equivalente prodotta. È stato dunque possibile stimare una legge empirica, valida nel range di carichi considerato, che permetta di prevedere con accuratezza l'intensità prodotta. Il range d'intensità riproducibile è ovviamente funzione del diametro dell'ago e cresce al crescere di quest'ultimo. Le analisi condotte attraverso il metodo volumetrico e quello fotografico hanno dimostrato la sostanziale indipendenza del diametro della goccia dal carico agente sull'ago stesso.

Una volta definita la tipologia d'ago più adatta alle necessità del setup, è stata eseguita un'ulteriore prova per la validazione delle ipotesi effettuate in merito alla velocità al suolo raggiunta dalle gocce. Le analisi effettuate sulle immagini raccolte da una camera ad elevati fps (frames per second) hanno evidenziato il raggiungimento di velocità molto vicine a quelle supposte, validando di fatto le ipotesi effettuate in fase di progetto.

7.1 Sviluppi futuri

La presente tesi è incentrata sulle prime fasi di progettazione di un simulatore di pioggia ad ago, con focus sulla determinazione del legame vigente tra il valore delle intensità di pioggia simulate, il diametro equivalente delle gocce e il carico agente sull'ago.

Nella sperimentazione ci si è limitati allo studio del fenomeno tramite l'utilizzo di soli tre aghi. Potrebbe risultare di interesse ripetere le prove con l'utilizzo di aghi ipodermici di diametro superiore a 0,5 mm, valutando la dimensione delle gocce che si riesce a produrre e i valori di intensità simulabili operando una variazione di carico pari a quella massima consentita dal setup del pioggiatore.

La simulazione di pioggia, con l'uso di un'unica tipologia di ago ipodermico, porta alla formazione di gocce orientativamente tutte della stessa dimensione, anche se durante la caduta, considerata la vicinanza degli aghi, è plausibile che le gocce collidano andando a formare un'unica goccia di maggiori dimensioni. Per ottenere una migliore distribuzione dimensionale delle gocce, si potrebbe disporre al di sotto del piano di gocciolamento uno schermo di redistribuzione, come nel setup proposto da T. P. Regmi e A. L. Thompson (2000). Si potrebbe valutare come variano le dimensioni delle gocce generate in funzione della distanza dello schermo dal piano di gocciolamento.

Per l'applicazione della tecnica *shadowgraph* allo studio della dimensione delle gocce prodotte dal simulatore di pioggia in scala reale, sarebbe utile l'ausilio di un *trigger*, ossia di un dispositivo che permette di controllare il flash da remoto. I flash potrebbero essere posizionati dietro il piano di messa a fuoco diretti verso la camera, così da fornire la retroilluminazione. Disponendo poi più fotocamere sulla torre, in differenti posizioni dal piano di gocciolamento, anch'esse controllabili da remoto, si potrebbero acquisire delle immagini delle gocce da diverse angolazioni permettendo lo studio della variazione della forma delle gocce, durante le fasi che precedono il raggiungimento dell'equilibrio.

8. BIBLIOGRAFIA

- Abudi, I., G. Carmi, e P. Berliner. 2012. «Rainfall Simulator for Field Runoff Studies». *Journal of Hydrology* 454–455: 76–81.
- Aksoy, Hafzullah et al. 2012. «A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume». *CATENA* 98: 63–72.
- Andsager, Karen, Kenneth V. Beard, e Neil F. Laird. 1999. «Laboratory Measurements of Axis Ratios for Large Raindrops». *Journal of the Atmospheric Sciences* 56(15): 2673–83.
- Atlas, D., R. C. Srivastava, e R. S. Sekhon. 1973. «Doppler Radar Characteristics of Precipitation at Vertical Incidence». *Reviews of Geophysics* 11(1): 1–35.
- Basaran, Osman A., e David W. DePaoli. 1994. «Nonlinear oscillations of pendant drops». *Physics of Fluids* 6(9): 2923–43.
- Battany, M. C., e M. E. Grismer. 2000. «Development of a Portable Field Rainfall Simulator for Use in Hillside Vineyard Runoff and Erosion Studies». *Hydrological Processes* 14(6): 1119–29.
- Beard, Kenneth V., V. N. Bringi, e M. Thurai. 2010. «A New Understanding of Raindrop Shape». *Atmospheric Research* 97(4): 396–415.
- 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.
- Beard, K. V., H. T. Ochs III, and R. J. Kubesh (1989a), «Natural oscillations of small raindrops». *Nature*, 342, 408–410.
- Beard, Kenneth V., e Rodney J. Kubesh. 1991. «Laboratory Measurements of Small Raindrop Distortion. Part 2: Oscillation Frequencies and Modes». *Journal of the Atmospheric Sciences* 48(20): 2245–64.
- Best, A. C. 1950. «Empirical Formulae for the Terminal Velocity of Water Drops Falling through the Atmosphere». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 76(329): 302–11.
- Bhattacharyya, P K. 2007. «On the Capillary Phenomena of Jets». : 11.

- «Bottiglia di Mariotte». 2019. *Wikipedia*.
https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Bottiglia_di_Mariotte&oldid=106373783.
- Becher HH. 1994. «Relative energies of simulated rainstorms. Conserving Soil Resources, European Perspectives». *Rickson RJ (ed.); University Press: Cambridge*; 208-214.
- Castrejón-García, R., J. R. Castrejón-Pita, G. D. Martín, e I. M. Hutchings. 2011. «The shadowgraph imaging technique and its modern application to fluid jets and drops». *Revista mexicana de física* 57(3): 266–75.
- Cerdà, Artemi et al. 2017. «Pinus halepensis M. versus Quercus ilex subsp . Rotundifolia L. runoff and soil erosion at pedon scale under natural rainfall in Eastern Spain three decades after a forest fire». *Forest Ecology and Management* 400: 447–56.
- Chowdhury, M. Nasimul, Firat Y. Testik, Mathew C. Hornack, e Abdul A. Khan. 2016. «Free Fall of Water Drops in Laboratory Rainfall Simulations». *Atmospheric Research* 168: 158–68.
- Clarke, M. L., e H. M. Rendell. 2000. «The Impact of the Farming Practice of Remodelling Hillslope Topography on Badland Morphology and Soil Erosion Processes» *Catena* 40(2): 229–50.
- Clarke, Michèle L, e Helen M Rendell. 2000. «The Impact of the Farming Practice of Remodelling Hillslope Topography on Badland Morphology and Soil Erosion Processes». *CATENA* 40(2): 229–50.
- De Jong, S 2010. «Low Cost Disdrometer». *Masters Thesis, Delf University of Technology, Delft, The Netherlands*.
- Feng, James Q., e Kenneth V. Beard. 1991. «A Perturbation Model of Raindrop Oscillation Characteristics with Aerodynamic Effects». *Journal of the Atmospheric Sciences* 48(16): 1856–68.
- Green, A. W. 1975. «An Approximation for the Shapes of Large Raindrops». *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)* 14(8): 1578–83.
- Gunn, Ross, e Gilbert D. Kinzer. 1949. «THE TERMINAL VELOCITY OF FALL FOR WATER DROPLETS IN STAGNANT AIR». *Journal of Meteorology* 6(4): 243–48.
- Hall, M. J. 1970. «A Critique of Methods of Simulating Rainfall». *Water Resources Research* 6(4): 1104–14.

- Illingworth, A.J.; Stevens, C.J 1987. «An optical disdrometer for the measurement of raindrop size spectra in windy conditions». *J. Atmos. Ocean. Technol.* 4, 411–421.
- Imai, I. (1950), «On the velocity of falling raindrops». *Geophys. Mag. Tokyo*, 21, 244–249.
- Iverson, Richard M. 1997. «The Physics of Debris Flows». *Reviews of Geophysics* 35(3): 245–96.
- Iverson, Richard, Mark Reid, e R. Lahusen. 1997. «Debris-flow mobilization from landslides. Annu Rev Earth Planet Sci». *Annu. Rev. Earth Planet. Sci* 25: 85–138.
- Johnson, David B., e Kenneth V. Beard. 1984. «Oscillation Energies of Colliding Raindrops». *Journal of the Atmospheric Sciences* 41(7): 1235–41.
- Kathiravelu, Gopinath, Terry Lucke, e Peter Nichols. 2016. «Rain Drop Measurement Techniques: A Review». *Water* 8(1): 29.
- Kavian, A., Y. Fathollah Nejad, M. Habibnejad, e K. Soleimani. 2011. «Modeling Seasonal Rainfall Erosivity on a Regional scale: A case Study from Northeastern Iran». *International Journal of Environmental Research* 5(4): 939–50.
- Kavian, Ataollah et al. 2018. «Simulated Raindrop's Characteristic Measurements. A New Approach of Image Processing Tested under Laboratory Rainfall Simulation». *Catena* 167: 190–97.
- Kavian, Ataollah et al. 2019. «Design, manufacture and calibration of the SARI portable rainfall simulator for field and laboratory experiments». *Hydrological Sciences Journal* 64(3): 350–60.
- Kavian, Ataollah, Samaneh Sabet, Karim Solaimani, e Behnoosh Jafari. 2017. «Simulating the effects of land use changes on soil erosion using RUSLE model». *Geocarto International* 32: 97–111.
- Keesstra, S. D., A. J. a. M. Temme, J. M. Schoorl, e S. M. Visser. 2014. «Evaluating the Hydrological Component of the New Catchment-Scale Sediment Delivery Model LAPSUS-D». *Geomorphology* 212: 97–107.
- Keesstra, Saskia D. et al. 2016. «The Significance of Soils and Soil Science towards Realization of the United Nations Sustainable Development Goals». *SOIL* 2(2): 111–28.
- Lassu, Tamás, Manuel Seeger, Piet Peters, e Saskia D. Keesstra. 2015. «The Wageningen Rainfall Simulator: Set-up and Calibration of an Indoor

- Nozzle-Type Rainfall Simulator for Soil Erosion Studies». *Land Degradation & Development* 26(6): 604–12.
- Laws, J. Otis, e Donald A. Parsons. 1943. «The Relation of Raindrop-Size to Intensity». *Eos, Transactions American Geophysical Union* 24(2): 452–60.
- Lhermitte, Roger. 1990. «Attenuation and Scattering of Millimeter Wavelength Radiation by Clouds and Precipitation». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 7(3): 464–79.
- Liu, X. C., T. C. Gao, e L. Liu. 2014. «A Video Precipitation Sensor for Imaging and Velocimetry of Hydrometeors». *Atmospheric Measurement Techniques* 7(7): 2037–46.
- Lora, Marco, Matteo Camporese, e Paolo Salandin. 2016. «Design and Performance of a Nozzle-Type Rainfall Simulator for Landslide Triggering Experiments». *CATENA* 140: 77–89.
- Marchi, Enrico, e Antonello Rubatta. 2000. *Meccanica dei fluidi: principi e applicazioni idrauliche*. Torino: Utet.
- McCarthy, E. L. 1934. «Mariotte’s Bottle». *Science* 80(2065): 100–100.
- McLaughlin, Richard A., e Tabitha T. Brown. 2006. «Evaluation of Erosion Control Products with and Without Added Polyacrylamide1». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 42(3): 675–84.
- Mohamadi, Mohamad Ayob, e Ataollah Kavian. 2015. «Effects of Rainfall Patterns on Runoff and Soil Erosion in Field Plots». *International Soil and Water Conservation Research* 3(4): 273–81.
- Moore, I.D., Hirschi, M.C., and Barfield, B.J., 1983. «Kentucky rainfall simulator». *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 26 (4), 1085–1089.
- Moriwaki, H. et al. 2004. «Failure Processes in a Full-Scale Landslide Experiment Using a Rainfall Simulator». *Landslides* 1(4): 277–88.
- Mutchler, C. K., and L. F. Hermsmeier. 1965. «A review of rainfall simulators». *Transactions of the ASAE* 8(67): 67-68.
- Ochiai, Hirotaka et al. 2004. «A Fluidized Landslide on a Natural Slope by Artificial Rainfall». *Landslides* 1(3): 211–19.
- Paige, Ginger B., Jeffrey J. Stone, Justin R. Smith, e Jeffrey R. Kennedy. 2004. «THE WALNUT GULCH RAINFALL SIMULATOR: A

COMPUTER-CONTROLLED VARIABLE INTENSITY RAINFALL SIMULATOR».

- Parkinson, Lauren M., e Chi M. Phan. 2018. «Natural Vibration of an Aqueous Pendant Drop». *Experimental Thermal and Fluid Science* 90: 48–54.
- Pennock, D. J., B. J. Zebarth, e E. De Jong. 1987. «Landform Classification and Soil Distribution in Hummocky Terrain, Saskatchewan, Canada». *Geoderma* 40(3): 297–315.
- Pruppacher, H. R., e K. V. Beard. 1970. «A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 96(408): 247–56.
- Rahardjo, H, E C Leong, e R B Rezaur. «Studies of Rainfall-Induced Slope Failures». : 15.
- Reid, Mark E. 2011. «Entrainment of Bed Sediment by Debris Flows : Results from Large-Scale Experiments». *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* (201103): 367–74.
- Reid, Mark E, Richard G LaHusen, e Richard M Iverson. «DEBRIS-FLOW INITIATION EXPERIMENTS USING DIVERSE HYDROLOGIC TRIGGERS». : 13.
- Ries, Johannes, Thomas Iserloh, M. Seeger, e Donald Gabriels. 2013. «Rainfall simulations - Constraints, needs and challenges for a future use in soil erosion research». *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues* 57: 1–10.
- Rodrigo-Comino, Jesús et al. 2016. «Soil Erosion Processes in European Vineyards: A Qualitative Comparison of Rainfall Simulation Measurements in Germany, Spain and France». *Hydrology* 3: 6.
- Rodrigo-Comino, Jesus, Saskia Keesstra, e Artemi Cerda. 2018. «Soil Erosion as an Environmental Concern in Vineyards: The Case Study of Celler Del Roure, Eastern Spain, by Means of Rainfall Simulation Experiments». *Beverages* 4(2): 31.
- Rogers, R. R. 1989. «Raindrop Collision Rates». *Journal of the Atmospheric Sciences* 46(15): 2469–72.
- Rogers, Roddy R., e Man K. Yau. 1989. *A Short Course in Cloud Physics / R.R. Rogers, M.K. Yau*. 3rd ed. Oxford: Pergamon.

- Salvador, R.; Bautista-Capetillo, C.; Burguete, J.; Zapata, N.; Serreta, A.; Playán, E 2009. «A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers». *Irrig. Sci*, 27, 307–317.
- Sharma, N.K. et al. 2017. «Increasing farmer's income and reducing soil erosion using intercropping in rainfed maize-wheat rotation of Himalaya, India». *Agriculture Ecosystems & Environment* 247: 43–53.
- «sperI_cap9.pdf». http://www.astro.unipd.it/ciroi/spfis1/sperI_cap9.pdf (11 luglio 2020).
- Strani, M., e F. Sabetta. 1984. «Free Vibrations of a Drop in Partial Contact with a Solid Support». *Journal of Fluid Mechanics* 141: 233–47.
- Szakáll, Miklós et al. 2014. «A Wind Tunnel Study of the Effects of Collision Processes on the Shape and Oscillation for Moderate-Size Raindrops». *Atmospheric Research* 142: 67–78.
- T. P. Regmi, e A. L. Thompson. 2000. «RAINFALL SIMULATOR FOR LABORATORY STUDIES». *Applied Engineering in Agriculture* 16(6): 641–47.
- Testik, F. Y., e Ana P. Barros. 2007. «Toward Elucidating the Microstructure of Warm Rainfall: A Survey». *Reviews of Geophysics* 45(2).(19 maggio 2020).
- Tokay, Ali, e Kenneth V. Beard. 1996. «A Field Study of Raindrop Oscillations. Part I: Observation of Size Spectra and Evaluation of Oscillation Causes». *Journal of Applied Meteorology* 35(10): 1671–87.
- Vaezi, Ali Reza, Mohammad Abbasi, Gianbattista Bussi, e Saskia Keesstra. 2017. «Modeling Sediment Yield in Semi-Arid Pasture Micro-Catchments, NW Iran». *Land Degradation and Development* 28(4): 1274–86.
- Wang, P. K., e H. R. Pruppacher. 1977. «Acceleration to Terminal Velocity of Cloud and Raindrops». *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)* 16(3): 275–80.