



**Politecnico
di Torino**

ScuDo

Scuola di Dottorato ~ Doctoral School

WHAT YOU ARE, TAKES YOU FAR

Tesi di Dottorato
Corso di Dottorato in Ingegneria Civile e Ambientale (35° Ciclo)

Simulatore di Pioggia Reale da Laboratorio: dalla piovigine all'acquazzone

Roberto Bosio

Tutore:

Prof. Davide Poggi, Tutore

Commissione di esame di dottorato:

Prof. P. Perona, Referee, Ecole Polytechnique Federal de Lausanne

Prof. N. Montaldo, Referee, Università degli studi di Cagliari

Politecnico di Torino

2023

Dichiarazione

Questa tesi è concessa sotto licenza Creative Commons License, Attribution - Noncommercial - NoDerivative Works 4.0 International: vedi ww.creativecommons.org. Il testo può essere riprodotto per scopi non commerciali, a condizione che venga dato credito all'autore originale.

Con la presente dichiaro che, i contenuti e l'organizzazione di questa tesi costituiscono la mia opera originale e non compromettono in alcun modo i diritti di terzi, compresi quelli relativi alla sicurezza dei dati personali.

Roberto Bosio
2023

* Questa tesi è presentata in parziale adempimento dei requisiti per il conseguimento del **Dottorato di Ricerca** presso la Scuola di Dottorato del Politecnico di Torino (ScuDO).

“Non può piovere per sempre...”
il Corvo

Ringraziamenti

Durante questi anni di dottorato ho avuto la possibilità di imparare molto e crescere sia a livello personale che professionale. Ho avuto la fortuna di incontrare compagni di viaggio che mi hanno sempre incoraggiato e sostenuto nella mia avventura.

In primis, i miei ringraziamenti vanno al mio Tutor, prof. Davide Poggi che ha creduto in me sin dalla laurea magistrale guidandomi in questo percorso, offrendomi il suo supporto e l'opportunità di fare esperienza nel mondo della ricerca e della didattica.

Un ringraziamento al prof. Costantino Manes e al prof. Francesco Laio per la cura, l'interesse e l'attenzione manifestati nei miei confronti durante questo percorso.

Ringrazio tutto il Dipartimento DIATI che mi ha accolto in questi anni, i professori e gli amici dei BAD, Elia, Gloria ed Elisabetta in particolare, con cui ho condiviso buona parte di questo viaggio.

Un doveroso ringraziamento agli amici del “vecchio” BAD3, Roberto, Carla e Roberta che hanno condiviso con me le gioie e i dolori di quest'avventura trovando sempre un modo per raddrizzare una giornata storta con un consiglio o una risata.

Ringrazio i tesisti che hanno collaborato nel progetto, Marco, Josefina ed Elisabetta per il prezioso aiuto.

Ringrazio Andrea Cagninei, “il mio secondo supervisor”, per l'aiuto pratico nella realizzazione del setup sperimentale e per i preziosi suggerimenti in questi anni.

Ringrazio Davide Vettori, con cui ho condiviso l'ufficio in questi ultimi mesi frenetici. Grazie per la “pazzia” che ci accomuna, per l'aiuto e i preziosi suggerimenti durante la scrittura dell'articolo e di questa tesi.

Ringrazio Roberto Bert con cui si è instaurata una profonda amicizia nel corso degli anni che si è estesa anche al di fuori delle mura del Politecnico. Il reciproco supporto in laboratorio e non solo, le risate, le birrette uscendo dal laboratorio e le gioie (poche) quando finalmente qualcosa del setup funzionava saranno parte delle cose che ricorderò con più affetto di questa esperienza.

Ringrazio i Flying Shoes: Marco, Alessio, Dijo, Fabio ed Elisa che hanno fatto parte di questo percorso sin dall'inizio della mia avventura al Politecnico e grazie ai quali ho sempre avuto una valvola di sfogo nella musica.

Ringrazio la mia famiglia per avermi sempre appoggiato in tutte le mie decisioni, per avermi garantito stabilità, per avermi supportato nei momenti di bisogno e aver donato a me e Simona un tetto sopra la testa nella nuova avventura. Grazie per tutti i consigli. Questo risultato è anche vostro. Un ringraziamento speciale va a nonna Domenica, la mia tifosa numero uno, che non ha potuto vedermi coronare questo traguardo ma che sicuramente starà festeggiando, assieme agli altri nonni, con me.

Infine, ma sicuramente non per importanza, un ringraziamento speciale a Simona che da ormai più di dieci anni a questa parte mi accompagna in questa nostra avventura che stiamo costruendo passo dopo passo. Grazie per la tua semplicità e la tua simpatia contagiosa. Grazie per esserci sempre stata e per avermi supportato e sopportato. Grazie per essere la mia compagna e la mia amica.

Sommario

Questa tesi affronta il tema della generazione artificiale di pioggia in laboratorio con particolare attenzione alla corretta simulazione di sue proprietà fisiche, quali distribuzione dei diametri, energia cinetica e omogeneità spaziale. La generazione artificiale della pioggia risulta di particolare interesse in molti ambiti di ricerca perché garantisce la ripetibilità degli eventi e il controllo delle condizioni al contorno, impossibili da ottenere con pioggia naturale. Sebbene in letteratura vi sia un numero ragguardevole di apparati sperimentali, ad oggi non è ancora stato realizzato un sistema in grado di garantire una simulazione fedele della pioggia su una superficie ampia. A tale scopo un nuovo setup sperimentale è stato progettato, realizzato e calibrato all'interno del laboratorio di Idraulica "G. Bidone" del Politecnico di Torino.

La generazione artificiale di gocce di pioggia è stata esplorata a fondo grazie ad una campagna sperimentale condotta su un setup a piccola scala. Gli esperimenti si sono concentrati sui formatori ad ago e sull'interazione tra gocce e elementi atti alla loro rottura come reti e filamenti. Una completa caratterizzazione geometrica delle gocce prodotte e della loro redistribuzione prodotta per interazione con una

rete è stata ottenuta impiegando differenti tecniche, tra cui analisi volumetriche, “high-speed imaging” e misure con disdrometro ottico. La portata effluente dall’ago e l’intensità di pioggia sono state quantificate usando variabili indipendenti dalla temperatura, ivi introdotte, allo scopo di confrontare tra loro esperimenti condotti in diverse condizioni.

Il simulatore di pioggia presentato in questa tesi è costituito da: un modulo di pioggia equipaggiato con 17000 aghi e installato alla sommità di una torre di altezza 10.4m e impronta 14m², una rete di redistribuzione posta ad una distanza variabile dal modulo di pioggia e un sistema di controllo automatizzato dei carichi d’acqua agenti nel sistema. La pioggia generata in una serie di esperimenti è stata analizzata attraverso l’impiego di misure volumetriche e con disdrometro ottico. La calibrazione e validazione del sistema è stata condotta impiegando come riferimento i dati di pioggia locale raccolti da un ulteriore disdrometro ottico installato sul tetto del laboratorio durante una campagna di monitoraggio durata 24 mesi. I risultati delle analisi hanno mostrato come l’altezza del simulatore garantisca il raggiungimento di velocità prossime a quelle terminali per tutto lo spettro di diametri prodotti. Le analisi hanno inoltre evidenziato come il simulatore, con una precisa calibrazione della posizione della rete, sia in grado di riprodurre fedelmente le proprietà di pioggia naturale su un ampio spettro di intensità garantendo un’elevata omogeneità spaziale e temporale.

Indice

1. Introduzione	1
1.1 Premessa	1
1.2 Stato dell'arte.....	2
1.3 Obiettivi di ricerca	7
1.4 Struttura della tesi.....	8
2. La Pioggia Naturale	9
2.1 Metodologia.....	9
2.1.1. Strumenti di Misura	9
2.1.2. Analisi dei dati	14
2.2. Risultati.....	21
2.3. Conclusioni	28
3. Gocce di pioggia simulate.....	31
3.1 Metodologia.....	32
3.1.1 Aghi ipodermici	32
3.1.2 Introduzione delle variabili indipendenti dalla temperatura	34

3.1.3 Setup sperimentale per la stima dei diametri delle gocce prodotte.....	38
3.1.4 Analisi dei dati	46
3.2. Risultati.....	50
3.2.1 Test volumetrici	50
3.2.2 Analisi delle immagini	56
3.2.3 Analisi dei Video	59
3.3 Interazione goccia - rete	60
3.3.1 Test su filamento singolo	61
3.3.2 Test su rete	67
3.4 Conclusioni	70
4. Il Simulatore di Pioggia	73
4.1. Metodologia.....	73
4.1.1. Il setup sperimentale	73
4.1.2. Procedura di calibrazione.....	84
4.1.3. Analisi dei dati	89
4.2. Risultati.....	90
4.2.1. Simulazione senza rete di redistribuzione.....	90
4.2.2. Simulazione con rete di redistribuzione.....	94
4.2.3. Confronto tra pioggia simulata e pioggia naturale...	110
4.3. Discussioni.....	113
4.4. Conclusioni	115
5. Conclusioni e Futuri Sviluppi	117
5.1. Conclusioni	117
5.2. Sviluppi Futuri	119

5.2.1. Analisi e perfezionamento del sistema	119
5.2.2. Studi futuri	120
6. Bibliografia	125

Lista delle Figure

Figura 1: Esempi di simulatori di pioggia: (a) un simulatore di campo per studi di ruscellamento superficiale [25]; (b) un simulatore di laboratorio per studi di erosione del suolo	4
Figura 2: Esempi di simulatori di pioggia: (a) un simulatore di a goccia per studi di ruscellamento superficiale [32]; (b) un simulatore ad ugello per studi di erosione del suolo [13].....	6
Figura 3: Immagine della sensoristica installata nella stazione meteo sul tetto del laboratorio.....	10
Figura 4: Rappresentazione schematica del principio di misura del disdrometro ottico	11
Figura 5: Maschera di validazione applicata agli spettri di pioggia misurati dal disdrometro derivata dall'equazione (1) nel range di diametri 0-6mm. L'area evidenziata in grigio rappresenta l'area dello spettro in cui le misure sono valide. In rosso, la curva di velocità teorica $v(d)_{Gunn}$	16
Figura 6: Esempio di distribuzione cumulata di probabilità ricavata dalle misure del disdrometro. In rosso è indicato il d_{50} ricavato analiticamente come interpolazione lineare tra i due punti vicini.	18
Figura 7: Scatter della relazione KE_{mm-i} , sulla sinistra, e KE_{time-i} sulla destra dei medesimi dati rilevati da Sempere-Torres et al. [44] nel sud della Francia.	21
Figura 8: Evento di pioggia intensa misurato dal disdrometro ottico installato nella stazione meteo sul tetto in data 22-6-2021.....	22
Figura 9: Spettri medi di pioggia naturale suddivisi nelle 4 classi di intensità: pioggia leggera (a), pioggia moderata (b), pioggia forte (c) e pioggia torrenziale (d).	23

Figura 10: Distribuzioni medie dei diametri di pioggia naturale (DSDV) per le quattro classi di intensità ottenute dalle misure effettuate dal disdrometro.	24
Figura 11: Relazione tra diametro mediano (d_{50}) e intensità di pioggia misurati dal disdrometro. Alcune relazioni proposte in letteratura sono riportate a titolo di confronto con quella presentata in questo studio (10).....	25
Figura 12: Relazione tra energia cinetica (KE) e intensità di pioggia misurati dal disdrometro. Alcune relazioni proposte in letteratura sono riportate a titolo di confronto con quella presentata in questo studio (12).....	27
Figura 13: Ago 25g-25mm equipaggiato con copri-ago forato all'estremità. (a) una foto del sistema accoppiato; (b) schema esemplificativo del sistema ago.	34
Figura 14: Schema di una disposizione generalizzata degli aghi. Δx e Δz rappresentano l'interasse tra le file di aghi nelle due direzioni del piano di gocciolamento. Evidenziata in blu l'area di interesse (A_{int}) impiegata nella stima dell'intensità potenziale (i) al suolo nell'equazione (18).	37
Figura 15: Rendering esemplificativo del setup sperimentale impiegato durante i test volumetrici e di analisi delle immagini	38
Figura 16: Foto del setup schematizzato per le prove volumetriche. In rosso la definizione del carico agente sull'ago. In verde la direzione di spostamento del nonio	39
Figura 17: Un estratto del segnale audio registrato durante uno dei test volumetrici.....	39
Figura 18: Schema esemplificativo della tecnica Shadowgraph.	42
Figura 19: Immagine di una goccia catturata con tecnica shadowgraph.	42

Figura 20: Confronto tra un'immagine acquisita con modalità rolling shutter e global shutter.	43
Figura 21: Schema sintetico del sistema di triggering impiegato per la cattura delle gocce con high speed camera.	46
Figura 22: Esempio di analisi di un tratto di file audio. Ciascun triangolo rosso rappresenta un picco nel segnale audio corrispondente ad una goccia caduta.	48
Figura 23: Processo di analisi di una immagine: (a) l'immagine originale; (b) conversione in scala di grigi; (c) la maschera binaria ricavata; (d) il contorno rilevato della goccia sovrapposto a (b).	49
Figura 24: Risultati dei test volumetrici condotti con differenti tipi di aghi ipodermici commerciali: (a) portata di un singolo ago, la linea continua denota la portata teorica Q^* , i markers invece i dati misurati. (b) Diametro medio derivato dalle misure volumetriche. (c) Portate effluenti dall'ago 25g-25mm per differenti temperature, la linea continua rappresenta la portata teorica Q^*	55
Figura 25: Contorni rilevati dall'analisi delle immagini delle gocce prodotte dall'ago 25g-25mm con un carico di 36cm. In figura sono inoltre riportati il diametro medio rilevato (d) comprensivo della deviazione standard (σ) e l'eccentricità media (e).	56
Figura 26: Confronto tra i contorni rilevati delle gocce prodotte dall'ago 25g-25mm con estremità inclinata (linee di colore nero) e con estremità orizzontale (linee di colore grigio). Le principali caratteristiche geometriche delle gocce rilevate sono riassunte e differenziate impiegando le medesime colorazioni.	58
Figura 27: Risultati delle analisi dei video catturati dall'High Speed Camera: (a) alcuni frame di una goccia in caduta, il contorno identificato dall'analisi è inoltre riportato; (b) velocità media delle gocce per ciascun test analizzato, l'intervallo di confidenza pari a $\pm\sigma$ è riportato per ciascuno dei test; (c) diametro medio delle gocce individuate; (d) eccentricità media delle gocce individuate.	60

Figura 28: Esempio di interazione goccia-filamento (F1) al variare della distanza di caduta: a sinistra (a-b-c) distanza di caduta 1cm, a destra (d-e-f) distanza di caduta 8cm. In ordine le successive fasi: (a-d) condizioni iniziali, (b-e) interazione, (c-d) reset del ciclo.....63

Figura 29: Esempio di interazione goccia-filamento (F2) al variare della distanza di caduta: a sinistra (a-b-c) distanza di caduta 1cm, a destra (d-e-f) distanza di caduta 20cm. In ordine le successive fasi: (a-d) condizioni iniziali, (b-e) interazione/accumulo, (c-d) distacco e reset del ciclo.64

Figura 30. Rapporto di rottura al variare dell'altezza di caduta per i due filamenti testati.....66

Figura 31. Rete commerciale impiegata nei test.67

Figura 32. Esempio di interazione goccia-rete per due differenti diametri di goccia per un'altezza di caduta di 25cm. A sinistra (a) goccia di 2.4mm, a destra (b) goccia di 4.8mm. In ordine le varie fasi: (a-d) condizioni iniziali, (b-e) rottura e primo accumulo, (c-f) formazione di accumulo nella maglia della rete che porterà a successivo distacco.68

Figura 33. Redistribuzione dei diametri di pioggia dovute a due differenti altezze di caduta dalla rete di redistribuzione per le due classi di diametri del modulo pioggia: (a) gocce prodotte da copri-aghi, (b) gocce prodotte da ago. La freccia nera rappresenta la redistribuzione per rottura mentre quella in arancione la redistribuzione per accumulo. In grigio è evidenziata la classe di diametro delle gocce che impattano la rete.....69

Figura 34: Rendering esemplificativo del simulatore di pioggia realizzato.....75

Figura 35: Immagine esemplificativa di una trave reticolare utilizzata nella realizzazione della torre.....76

Figura 36: Rappresentazione sintetica del progetto-torre.....76

Figura 37: Rendering esemplificativo della struttura del modulo pioggia con vista di dettaglio del collettore di monte. Il sistema di riferimento impiegato per la definizione del carico d'acqua è inoltre riportato.....	77
Figura 38: Vista dall'alto del modulo pioggia installato.....	78
Figura 39: Piano inferiore di gocciolamento equipaggiato con sistema di copri-aghi.....	78
Figura 40: Rendering di una vista in sezione del serbatoio di carico.....	79
Figura 41: Immagine di un sensore WIKA A-10 impiegato.....	82
Figura 42: Sezione esemplificativa del telaio impiegato per l'installazione e messa in opera della rete di redistribuzione.....	83
Figura 43: Rete di redistribuzione installata al di sotto del piano di gocciolamento.....	84
Figura 44: Schema funzionale del simulatore di pioggia.....	86
Figura 45: Simulatore in azione durante gli esperimenti senza rete di redistribuzione.....	88
Figura 46: Vista in sezione del modulo pioggia. Le quote di attivazione di ciascun piano di gocciolamento sono evidenziate con una linea tratteggiata rossa. A sinistra, l'asse delle ordinate riporta le quote rispetto al sistema di riferimento già indicato in Figura 37.....	91
Figura 47: Intensità della pioggia simulata in funzione del carico d'acqua agente sul sistema. Le linee continue rappresentano le curve teoriche mentre i cerchi bianchi rappresentano i dati misurati al suolo. Le curve p_1, p_2, p_3 sono rispettivamente le curve teoriche per il piano di gocciolamento inferiore, medio e alto.....	92
Figura 48: Coefficiente di uniformità di Christiansen in funzione dell'intensità simulata (i^*).....	93

Figura 49: Distribuzione dei diametri di pioggia (DSDV) prodotta dal modulo pioggia per le tre classi di intensità simulate durante i test di calibrazione.94

Figura 50: Distribuzione dei diametri di pioggia (DSDV) prodotta dalla rete di redistribuzione R1 per le tre classi di intensità: (a) pioggia leggera, (b) pioggia moderata e (c) pioggia forte.98

Figura 51: Distribuzione dei diametri di pioggia (DSDV) prodotta dalla rete di redistribuzione R1 per le differenti configurazioni testate (D1-D6) al variare dell'intensità di pioggia (PL – Pioggia Leggera, PM – Pioggia Moderata, PF – Pioggia Forte).....99

Figura 52: Fenomeno di accumulo e formazione di gocce sulla rete di redistribuzione.100

Figura 53: Spettri medi di pioggia simulata dalla rete R1 suddivisi nelle 3 classi di intensità: pioggia leggera (a), pioggia moderata (b) e pioggia forte (c). Lo spettro della configurazione che meglio approssima le condizioni naturali è mostrato per ciascuna delle tre classi di intensità.101

Figura 54: Relazione tra energia cinetica al suolo e intensità per ciascuna delle configurazioni della rete R1 testate. La legge di potenza che meglio approssima i dati sperimentali è inoltre riportata.102

Figura 55: Distribuzione dei diametri di pioggia (DSDV) prodotta dalla rete di redistribuzione R2 per le tre classi di intensità: (a) pioggia leggera, (b) pioggia moderata e (c) pioggia forte. La distribuzione della pioggia senza rete è inoltre riportata come confronto.....106

Figura 56: Distribuzione dei diametri di pioggia (DSDV) prodotta dalla rete di redistribuzione R2 per le differenti configurazioni testate (D1-D6) al variare dell'intensità di pioggia (PL – Pioggia Leggera, PM – Pioggia Moderata, PF – Pioggia Forte).....107

Figura 57: Spettri medi di pioggia simulata dalla rete R2 suddivisi nelle 3 classi di intensità: pioggia leggera (a), pioggia moderata (b) e

pioggia forte (c). Lo spettro della configurazione che meglio approssima le condizioni naturali è mostrato per ciascuna delle tre classi di intensità.108

Figura 58: Relazione tra energia cinetica al suolo e intensità per ciascuna delle configurazioni testate della rete R2. La legge di potenza che meglio approssima i dati sperimentali è inoltre riportata.109

Figura 59: Confronto delle distribuzioni di diametri di pioggia naturale (PN) e simulata in termini di pdf (a),(b),(c) e cdf (d),(e),(f). Per ciascun plot è riportata la configurazione che meglio approssima i risultati naturali. (a-d) Pioggia leggera, (b-e) Pioggia Moderata e (c-f) Pioggia Forte.111

Figura 60: Confronto delle differenti relazioni empiriche KE-i tra pioggia simulata e pioggia naturale (PN). In figura è riportata anche la configurazione senza rete di redistribuzione (NR).113

Lista delle Tabelle

Tabella 1: Suddivisione delle classi di diametro impiegate dal disdrometro ottico. Il diametro medio (d_m), l'ampiezza della classe (A_d), e il volume medio (V) sono riportati. Solamente le prime 24 classi nel range di diametri delle precipitazioni liquide sono riportate.12

Tabella 2: Suddivisione delle classi di velocità impiegate dal disdrometro ottico. La velocità media (v_m) e l'ampiezza della classe (A_v) sono riportati. Solamente le prime 27 classi nel range di velocità terminali delle precipitazioni liquide sono riportate.13

Tabella 3: Classificazione degli eventi di pioggia in funzione dell'intensità misurata al suolo secondo il "Manual of Surface Weather Observation Standards".15

Tabella 4: Eventi di pioggia registrati dal disdrometro dalla data di installazione suddivisi per classe di intensità. I valori medi di d_{50} ed energia cinetica (E) ricavati per ciascuna classe sono inoltre riportati.22

Tabella 5: Sommario delle principali formulazioni disponibili in letteratura per la definizione della grandezza d_{50} al variare dell'intensità di pioggia.....26

Tabella 6: Sommario delle principali relazioni disponibili in letteratura tra energia cinetica tempo-dipendente (KE_t) e intensità di pioggia (i).28

Tabella 7: Caratteristiche geometriche degli aghi impiegati nei test preliminari.....33

Tabella 8: Elenco dei test volumetrici svolti sui vari modelli di aghi. I parametri di densità e viscosità dell'acqua sono inoltre riportati.40

Tabella 9: Verifica ipotesi flusso laminare51

Tabella 10: Verifica ipotesi dissipazioni localizzate trascurabili	52
Tabella 11: Risultati dei test volumetrici condotti sui tre aghi principali	53
Tabella 12: Confronto tra i risultati dei test volumetrici condotti con ago 25g e ago 25g + copri-ago forato. Le differenze percentuali tra le portate Q^* e i diametri prodotti dai due sistemi sono inoltre riportate.	54
Tabella 13: Risultati ottenuti dall'analisi delle immagini per differenti carichi d'acqua agenti (h) sull'ago 25g-25mm. Il diametro medio (d_i), la relativa deviazione standard (σ_i) e l'eccentricità (e_i) sono riportati. Il diametro medio ricavato dai test volumetrici (d_v) è inoltre riportato. La differenza in valore percentuale in valore assoluto tra i diametri medi ricavati dai due metodi ($ \Delta $) è mostrata per confronto.	57
Tabella 14: Configurazioni testate per lo studio qualitativo dell'interazione goccia-filamento singolo.....	62
Tabella 15: Principali caratteristiche delle reti testate durante gli esperimenti.	85
Tabella 16: Principali proprietà della pioggia simulata per le configurazioni testate con la rete R1. Il d_{50} indica il diametro mediano in volume della distribuzione mentre KE rappresenta l'energia cinetica media della pioggia.	97
Tabella 17: Principali proprietà della pioggia simulata per le configurazioni testate con la rete R2. Il d_{50} indica il diametro mediano in volume della distribuzione mentre KE rappresenta l'energia cinetica media della pioggia.	104
Tabella 18: Confronto tra i risultati ottenuti per la pioggia naturale e la sua miglior simulazione in laboratorio.....	112

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Premessa

La pioggia rappresenta uno dei fenomeni naturali più importanti e interessanti, in grado di influenzare innumerevoli aree della vita umana, dall'agricoltura alle infrastrutture, dalla salute alla sicurezza pubblica. La sua natura imprevedibile ed incontrollabile ha da sempre rappresentato un importante ostacolo nello studio dei fenomeni ad essa associati. La pioggia, oltre a essere la principale fonte di approvvigionamento idrico, interagisce in molteplici modi con l'ambiente. Durante la caduta le gocce d'acqua catturano e trascinano al suolo le particelle sospese nell'atmosfera favorendo il fenomeno di dilavamento atmosferico e garantendo il controllo della qualità dell'aria in ambiente urbano. Allo stesso tempo, una volta raggiunto il suolo, la pioggia è un veicolo per tali particelle e per tutti gli inquinanti presenti favorendone l'infiltrazione nel suolo e il trasporto superficiale verso i corpi idrici. A seguito dell'impatto con superfici o foglie, l'energia cinetica delle gocce di pioggia è in grado di risospingere in

atmosfera particelle depositate o agenti patogeni nonché generare fenomeni erosivi al suolo.

I cambiamenti climatici a cui stiamo assistendo hanno un impatto sempre più significativo sulle condizioni meteorologiche in tutto il mondo, con conseguenze potenzialmente disastrose per la vita umana e l'ambiente naturale. Gli effetti di prolungati periodi di siccità, combinati all'intensificarsi di fenomeni meteorologici estremi sono spesso veicolo a frane, allagamenti, esondazioni e colate di fango causa di ingenti danni alle proprietà, alle infrastrutture nonché perdita di vite umane.

Oggi più che mai, la possibilità di simulare la pioggia in laboratorio rappresenta un punto cruciale nello studio dei fenomeni ad essa associati. Comprendere al meglio gli effetti e le azioni che la pioggia svolge permetterà in futuro di adottare soluzioni in grado di mitigare gli effetti negativi massimizzando invece quelli positivi.

1.2 Stato dell'arte

I simulatori di pioggia sono apparati sperimentali realizzati allo scopo di riprodurre in maniera accurata la pioggia naturale. Al fine di ottenere una replica fedele della pioggia naturale devono essere rispettate alcune condizioni essenziali [1–3] tra cui: (i) garantire il raggiungimento della velocità terminale alle gocce generate; (ii) riprodurre fedelmente la distribuzione dei diametri delle gocce; (iii) garantire un'elevata omogeneità spaziale e temporale dei fenomeni simulati; (iv) permettere la replica di pattern di intensità registrati. Il completo controllo delle variabili di pioggia rappresenta uno dei principali vantaggi di un simulatore di pioggia, permettendo di replicare specifiche condizioni innumerevoli volte. La possibilità di generare una precipitazione in qualunque istante garantisce una programmazione semplice degli esperimenti senza la necessità di

dover attendere un vero fenomeno temporalesco. La capacità di isolare gli effetti delle gocce di pioggia da fenomeni esterni come il vento nonché il monitoraggio ed il controllo di parametri atmosferici come temperatura e umidità garantiscono inoltre una ripetibilità degli esperimenti irraggiungibile in campo.

Sin dalla loro prima applicazione nel 1930 per studi sull'erosione del suolo [4], i simulatori di pioggia sono stati adattati ad innumerevoli casi studio permettendo l'analisi di fenomeni erosivi [4–10], ruscellamento superficiale [11–13], dilavamento [14], nonché lo studio degli effetti che la pioggia provoca sulle proprietà fisiche e chimiche del suolo [15–19], delle pavimentazioni [20] e materiali [21]. Le limitazioni in termini di superficie su cui è possibile generare una pioggia artificiale rappresentano uno dei principali svantaggi nell'impiego di questa tecnologia.

Una prima distinzione tra simulatori di pioggia può esser fatta in merito alla loro capacità di esser trasportati o meno, distinguendo dunque i setup sperimentali in simulatori di campo o simulatori di laboratorio [11,13,22–24]. I simulatori di campo si caratterizzano per la loro versatilità e capacità di esser facilmente montati e smontati. La necessità di esser trasportati e spostati facilmente in campo conduce in genere a sistemi di dimensioni contenute adatti a studi piuttosto localizzati. Tali sistemi permettono di effettuare analisi in zone di interesse come versanti vegetati o aree coltivate difficilmente riproducibili in laboratorio. In contrapposizione, i simulatori di laboratorio sono apparati generalmente più complessi caratterizzati da dimensioni importanti che ne precludono la possibilità di movimentazione. La limitazione nella mobilità è però compensata dalla possibilità di effettuare analisi in condizioni controllate utilizzando apparecchiature sofisticate in grado di effettuare studi di dettaglio. La possibilità di modificare l'area in cui gli esperimenti vengono realizzati, lascia spazio a innumerevoli campi di applicazione:

dallo studio dei fenomeni di ruscellamento, all'interazione con superfici e materiali, nonché alla calibrazione e taratura di sensori per il monitoraggio della pioggia.



Figura 1: Esempi di simulatori di pioggia: (a) un simulatore di campo per studi di ruscellamento superficiale [25]; (b) un simulatore di laboratorio per studi di erosione del suolo ¹.

Una seconda, e più comune classificazione dei simulatori di pioggia, riguarda invece il metodo di generazione della pioggia artificiale. In questo caso i prototipi vengono distinti in simulatori ad ugello o simulatori a goccia. Si definiscono simulatori ad ugello quegli apparati che generano la pioggia attraverso sistemi in pressione dotati di ugelli e/o sprinklers. Per via della velocità iniziale impressa dalla pressione nel sistema, questi sistemi richiedono altezze di caduta

¹ Wangeningen Rainfall Simulator. <https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/environmental-research/facilities-tools/environmental-sciences-laboratories/water-and-sediment-dynamics-lab/facilities/rainfall-simulator.htm>

piuttosto ridotte risultando di fatto un'ottima soluzione per la simulazione in campo, dove, come precedentemente accennato, la necessità di realizzare sistemi facilmente trasportabili e di semplice smontaggio limita in genere l'altezza massima ad alcuni metri sul piano campagna. Grazie alla facile gestione della pressione all'interno del sistema, questi simulatori sono in grado di riprodurre piogge poli disperse in un vasto range di intensità.

Le principali limitazioni di questi sistemi riguardano l'impossibilità di gestire correttamente la distribuzione dei diametri di pioggia in quanto strettamente legata al tipo di ugello utilizzato nonché alla pressione agente. È infatti noto come al crescere della pressione questi sistemi provochino una riduzione nei diametri medi prodotti [26]. Tale fenomeno risulta essere in completa contrapposizione con ciò che si osserva nei fenomeni naturali, dove si evidenzia un incremento del diametro medio al crescere dell'intensità [27]. Trattandosi di sistemi in pressione, la riproduzione di piogge leggere con intensità molto basse risulta essere particolarmente complessa. Le minime pressioni operative necessarie per il corretto funzionamento del sistema di generazione delle gocce producono intensità troppo elevate. Limitando il numero di ugelli attivi è comunque possibile ridurre tali intensità a discapito però dell'omogeneità spaziale al suolo. Uno dei principali problemi evidenziati dall'impiego di questa tipologia di simulatori è legata al fatto che lo spray continuo prodotto dagli ugelli tende ad esagerare le naturali condizioni di pioggia al suolo sia in termini di velocità delle particelle d'acqua al suolo, sia in termini di energia cinetica complessiva, richiedendo dunque delle modifiche ai sistemi per ridurre questi effetti indesiderati. Tra le varie soluzioni proposte in letteratura vi è, ad esempio, quella di dirigere gli ugelli verso l'alto in modo da annullare la velocità iniziale imposta alle particelle d'acqua [28,29]. Altri autori hanno suggerito l'impiego di bracci o dischi rotanti in grado di redistribuire la pioggia su di un'area

maggiore riducendo così l'intensità complessiva al suolo [30,31] ma introducendo dei potenziali problemi di pioggia intermittente al suolo.



Figura 2: Esempi di simulatori di pioggia: (a) un simulatore di a goccia per studi di ruscellamento superficiale [32]; (b) un simulatore ad ugello per studi di erosione del suolo [13].

I sistemi che invece producono le gocce di pioggia attraverso appositi formatori sono per l'appunto detti simulatori a goccia. La produzione di gocce è generalmente basata sull'impiego di aghi [22,24,33], tubi capillari o tubi in polietilene [29,34]. Basandosi sull'equilibrio tra tensione superficiale e peso, il diametro delle gocce prodotte da ciascun formatore è ben definito e non è soggetto a variazioni nel tempo [34]. Grazie a questo sistema di iniezione è possibile produrre piogge mono disperse senza subire variazioni in diametro al variare dell'intensità generata. La possibilità di produrre piogge mono disperse permette di isolare uno specifico diametro di pioggia ed effettuare indagini su di esso. Piogge poli disperse possono comunque essere prodotte impiegando differenti tipologie e dimensioni di formatori, utilizzando delle reti di rottura al di sotto del

piano di gocciolamento [3,14] o combinando i due sistemi. La necessità di generare un ampio range di intensità garantendo un'elevata omogeneità spaziale al suolo richiede l'installazione di un grande numero di iniettori ad interassi generalmente inferiori ai 3-4cm. La produzione di gocce con una velocità iniziale nulla, richiede elevate altezze di caduta al fine di garantire il raggiungimento delle velocità terminali di tutte le gocce prodotte dal piano di gocciolamento, rendendo di fatto questi sistemi particolarmente complessi per un impiego al di fuori del laboratorio. La stessa realizzazione in laboratorio risulta essere talvolta complessa per via di limitazioni di natura geometrica e logistica che limitano lo sviluppo in altezza dei setup impedendo di riprodurre correttamente le proprietà al suolo della pioggia naturale.

1.3 Obiettivi di ricerca

Questo lavoro di tesi ha come scopo la realizzazione di un simulatore di pioggia a grande scala in grado di replicare le principali proprietà della pioggia naturale sul più vasto range di intensità possibile. Ad oggi il principale gap evidenziato in letteratura è legato alla mancanza di un setup sperimentale versatile, in grado di unire i punti di forza dei differenti progetti proposti nel corso degli anni, garantendo una riproduzione fedele degli eventi di pioggia su un'ampia superficie simulativa.

Al fine di raggiungere tale scopo i seguenti obiettivi di ricerca sono stati fissati:

1. Progettare e realizzare un setup sperimentale in grado di replicare la pioggia naturale.
2. Misurare le caratteristiche della pioggia prodotta dal simulatore.

3. Quantificare le principali caratteristiche della pioggia naturale a scala locale categorizzandole per differenti tipologie di pioggia.
4. Validare i risultati ottenuti dal simulatore di pioggia in termini di distribuzione dei diametri, energia cinetica e omogeneità spaziale e temporale confrontandoli con quelli ricavati dai dati reali.

1.4 Struttura della tesi

Il presente lavoro di tesi si articola in cinque capitoli. Dopo un primo capitolo introduttivo, seguono tre capitoli, ciascuno dei quali costituito da una prima sezione metodologica che descrive le principali attività, una seconda sezione dedicata ai risultati e alle discussioni, ed infine un'ultima sezione dedicata alle conclusioni. Il secondo capitolo introduce le metodologie e le analisi impiegate per la simulazione delle gocce di pioggia e lo studio della loro interazione con una rete di redistribuzione. Nel terzo capitolo sono analizzate con attenzione le principali proprietà della pioggia naturale ad una scala locale indispensabili per la definizione dei requisiti del simulatore di pioggia nonché per la sua successiva calibrazione. Il quarto capitolo è dedicato alla descrizione del simulatore di pioggia realizzato, con un'analisi di dettaglio della pioggia prodotta in differenti condizioni e un confronto approfondito tra pioggia simulata e pioggia naturale. Il quinto, e ultimo capitolo, riporta le conclusioni del lavoro e alcuni possibili spunti su potenziali sviluppi futuri in termini di ottimizzazione del setup e applicazioni nel campo della ricerca.

Capitolo 2

La Pioggia Naturale

La necessità di simulare adeguatamente le proprietà dei fenomeni di pioggia naturale si traduce nella necessità di investigare a fondo tali proprietà ad una scala locale. Un'indagine approfondita delle proprietà locali della pioggia implica lo studio di diversi parametri, tra cui l'intensità, la durata, la distribuzione spaziale e temporale, la dimensione delle gocce d'acqua e la frequenza delle precipitazioni. Queste informazioni sono essenziali per lo sviluppo di modelli fisici accurati che possano simulare con precisione il comportamento della pioggia in una determinata area geografica.

2.1 Metodologia

2.1.1. Strumenti di Misura

Le proprietà locali della pioggia naturale sono state investigate mediante l'installazione di una stazione meteo equipaggiata con disdrometro ottico sul tetto del laboratorio di Idraulica "G. Bidone" presso il Politecnico di Torino. La Figura 3 mostra la stazione meteo installata sul tetto del laboratorio nel mese di Luglio 2018. Il sistema è

composto da un pluviometro e un sensore ambientale connessi ad un data-logger con connessione GSM. Completa il sistema un disdrometro ottico OTT HydroMet, Parsivel² installato nel mese di Maggio 2021.



Figura 3: Immagine della sensoristica installata nella stazione meteo sul tetto del laboratorio.

Il pluviometro a bascula è caratterizzato da un involucro in acciaio inox, alla cui sommità è presente un imbuto con area 200cm^2 . Lo strumento è in grado di misurare precipitazioni con una precisione di 0.2mm all'interno del range $0-150\text{ mm/h}$. Il sensore ambientale accoppia al suo interno un termometro, un igrometro, un radiometro e un anemometro ad ultrasuoni, permettendo la misura di molteplici variabili ambientali come: temperatura e umidità dell'aria, radiazione solare, direzione e velocità del vento. Il data-logger installato all'interno del quadro di controllo della stazione, permette la memorizzazione e l'invio dei dati ad un server FTP attraverso la rete GSM. Il data-logger è stato configurato al fine di interrogare i sensori connessi ad intervalli di tempo prefissati garantendo una risoluzione temporale elevata dei parametri monitorati.

Parsivel² è un disdrometro ottico che permette la misura di un diametro equivalente delle idrometeore che precipitano al suolo. Lo strumento utilizza un sensore ottico-laser per l'individuazione e la misura delle idrometeore. Il sensore è costituito da un'unità trasmettitore e un'unità ricevitore. La prima unità genera un piano laser orizzontale ($\lambda=780\text{nm}$) di dimensioni $18\times 3\text{cm}^2$ e spessore 1mm che viene convertito in un segnale elettrico dall'unità ricevitore. L'attenuazione di radiazione luminosa prodotta dall'attraversamento del piano laser da parte di un'idrometeora viene impiegata per la misura del suo diametro equivalente mentre la durata temporale di tale attenuazione fornisce la misura della velocità di caduta (vedi Figura 4).

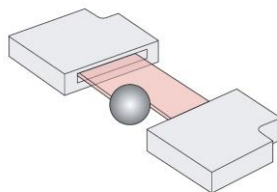


Figura 4: Rappresentazione schematica del principio di misura del disdrometro ottico².

Le particelle misurate vengono poi suddivise in 32 classi di diametri e 32 classi di velocità suddivise come descritto in Tabella 1 e 8. Il disdrometro è in grado di individuare particelle con diametri sino a 0.2mm e intensità di pioggia sino a 0.001 mm/h [35]. Lo strumento misura e conteggia le particelle transitate all'interno dell'area di campionamento fornendo un output cumulato con una frequenza di aggiornamento di 60s . Attraverso una connessione cablata RS 485, è possibile interagire direttamente con lo strumento memorizzando l'intero spettro di dati registrati comprensivo della matrice 32×32 classi prodotta dal sensore. Oltre alle misure di precipitazione, Parsivel²

² Immagine tratta dal manuale d'uso dello strumento.

fornisce altre informazioni tra cui: temperatura del sensore, visibilità, riflettività radar.

Tabella 1: Suddivisione delle classi di diametro impiegate dal disdrometro ottico. Il diametro medio (d_m), l'ampiezza della classe (A_d), e il volume medio (V) sono riportati. Solamente le prime 24 classi nel range di diametri delle precipitazioni liquide sono riportate.

Classe	d_m (mm)	A_d (mm)	V (mm ³)
1	0.062	0.125	0.0005
2	0.187	0.125	0.0046
3	0.312	0.125	0.0178
4	0.437	0.125	0.0464
5	0.562	0.125	0.0963
6	0.687	0.125	0.1739
7	0.812	0.125	0.2852
8	0.937	0.125	0.4363
9	1.062	0.125	0.6333
10	1.187	0.125	0.8825
11	1.375	0.25	1.394
12	1.625	0.25	2.285
13	1.875	0.25	3.496
14	2.125	0.25	5.074
15	2.375	0.25	7.069
16	2.75	0.5	11.154
17	3.25	0.5	18.284
18	3.75	0.5	27.966
19	4.25	0.5	40.591
20	4.75	0.5	56.553
21	5.5	1	89.229
22	6.5	1	146.27
23	7.5	1	223.72

24	8.5	1	324.73
----	-----	---	--------

Tabella 2: Suddivisione delle classi di velocità impiegate dal disdrometro ottico. La velocità media (v_m) e l'ampiezza della classe (A_v) sono riportati. Solamente le prime 27 classi nel range di velocità terminali delle precipitazioni liquide sono riportate.

Classe	v_m (m/s)	A_v (m/s)
1	0.05	0.1
2	0.15	0.1
3	0.25	0.1
4	0.35	0.1
5	0.45	0.1
6	0.55	0.1
7	0.65	0.1
8	0.75	0.1
9	0.85	0.1
10	0.95	0.1
11	1.1	0.2
12	1.3	0.2
13	1.5	0.2
14	1.7	0.2
15	1.9	0.2
16	2.2	0.4
17	2.6	0.4
18	3	0.4
19	3.4	0.4
20	3.8	0.4
21	4.4	0.8
22	5.2	0.8
23	6	0.8
24	6.8	0.8

25	7.6	0.8
26	8.8	1.6
27	10.4	1.6

2.1.2. Analisi dei dati

I dati provenienti dalla stazione meteo sono stati analizzati e convertiti in un database locale accessibile e facilmente interrogabile in ambiente MATLAB. Intensità e precipitazioni cumulate sono state impiegate per individuare un range rappresentativo di intensità di pioggia locale utile per lo sviluppo del simulatore di pioggia.

I dati provenienti dal disdrometro sono invece memorizzati all'interno del software ASDO installato sul Server FTP. Il software permette l'osservazione in tempo reale dei dati provenienti dallo strumento, nonché dell'intero database memorizzato. Al fine di minimizzare la mole di dati memorizzati, il software memorizza unicamente le misure effettuate durante un evento di pioggia. Attraverso ASDO è possibile esportare in differenti formati le misure effettuate dallo strumento in un intervallo di tempo di proprio interesse. Tali dati sono stati importati in ambiente MATLAB per una prima analisi e realizzazione del database di misure. In accordo con il "Manual of Surface Weather Observation Standards" [36], gli eventi di pioggia sono stati suddivisi in 4 classi di intensità riassunte in Tabella 3.

Tabella 3: Classificazione degli eventi di pioggia in funzione dell'intensità misurata al suolo secondo il "Manual of Surface Weather Observation Standards".

Classificazione	Intensità (mm/h)
Leggera	< 2.5
Moderata	2.6 – 7.5
Forte	7.6 - 50
Torrenziale	> 50

Filtraggio e validazione dei dati

Tra i dati di maggior interesse forniti dal disdrometro vi sono sicuramente l'intensità (i), l'energia cinetica (KE) della pioggia nonché lo spettro di pioggia ($S_{v,d}$) associato. Quest'ultimo è costituito da una matrice 32x32 rappresentante il numero di particelle individuate dallo strumento all'interno dell'intervallo di misura (1min) e suddivise in classi di diametro e velocità. A partire dalla data di installazione, il disdrometro ha collezionato un totale di 32.000min di misure di pioggia. Una prima operazione di filtraggio ha rimosso dal dataset tutti gli eventi che riportavano un qualche errore di segnale da parte dello strumento nonché tutte le osservazioni con intensità inferiore a 0.1mm/h o con meno di 10 particelle individuate. Tale filtraggio ha permesso di eliminare eventuali letture erronee dello strumento non corrispondenti a reali eventi di pioggia.

Al fine di rimuovere eventuali outliers presenti nelle misure, è stata applicata una procedura di validazione, che, come descritto da Jaffrain et al. [37], consiste nell'eliminare tutte le particelle che non soddisfano la seguente condizione:

$$|v(d)_{\text{mis}} - v(d)_{\text{Gunn}}| \leq 0.6 v(d)_{\text{Gunn}} , \quad (1)$$

dove, $v(d)_{\text{mis}}$ è la velocità delle particelle appartenenti alla classe di diametro “d”, mentre $v(d)_{\text{Gunn}}$ è la velocità teorica secondo Gunn et al. [38] per la classe di diametro “d”. Si precisa che il diametro rappresentativo considerato per la stima della velocità teorica è il diametro medio della classe (vedi Tabella 1). In Figura 5 è raffigurata la maschera di validazione che ne consegue all’equazione (1).

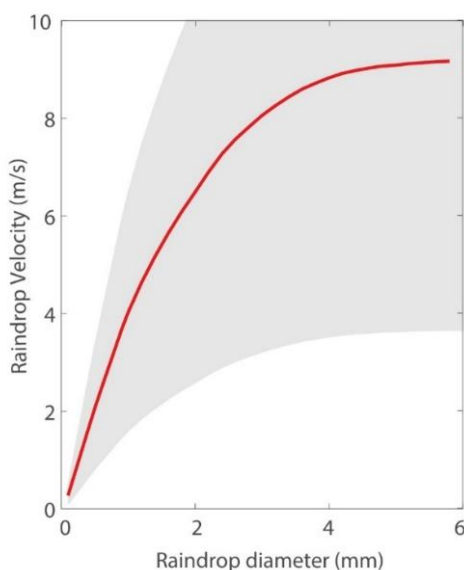


Figura 5: Maschera di validazione applicata agli spettri di pioggia misurati dal disdrometro derivata dall’equazione (1) nel range di diametri 0-6mm. L’area evidenziata in grigio rappresenta l’area dello spettro in cui le misure sono valide. In rosso, la curva di velocità teorica $v(d)_{\text{Gunn}}$.

Distribuzione dei diametri di pioggia (DSD)

Gli spettri di pioggia costituiti da una matrice 32x32 sono stati analizzati singolarmente ottenendo una distribuzione dei diametri per ogni istante misurato dallo strumento. Il numero totale di particelle dell’i-esima misura individuate per ciascuna classe di diametro ($N_{d,i}$) è stato ricavato sommando tutti gli elementi di ciascuna colonna dell’i-esimo spettro, come descritto in (2).

$$N_{d,i} = \sum_v S_{v,d,i} \quad (2)$$

Normalizzando tali valori come segue:

$$DSD_{N,i} = \frac{N_{d,i}}{\sum_d N_{d,i}}, \quad (3)$$

si ottiene la distribuzione dei diametri in numero (DSD_N) dell' i -esima misura. Tale distribuzione è particolarmente influenzata dalle classi di diametri inferiori ad 1mm presenti in grandissima quantità durante un evento di pioggia, rendendo particolarmente complessa la descrizione delle distribuzioni per diametri di pioggia superiori. Attraverso l'equazione (4) è possibile ottenere una distribuzione pesata dai volumi ($DSD_{V,i}$) delle singole classi di diametro (V_d) fornendo una rappresentazione più chiara della distribuzione dei diametri e di come sia effettivamente distribuito il volume di pioggia che precipita al suolo.

$$DSD_{V,i} = \frac{N_{d,i} V_d}{\sum_d N_{d,i} V_d} \quad (4)$$

Al fine di comparare tra loro in modo semplice le distribuzioni ottenute viene generalmente utilizzata una grandezza rappresentativa corrispondente al d_{50} . Tale valore rappresenta il diametro corrispondente al cinquantesimo percentile della distribuzione cumulata, ossia il diametro per cui il 50% del volume si trova al di sotto di tale dimensione ed il 50% al di sopra. Non disponendo dei diametri realmente caduti, ma solamente di una loro suddivisione in classi di diametro, il d_{50} è stato ottenuto interpolando linearmente tra i punti della distribuzione cumulata (vedi Figura 6). Suddividendo inoltre le

$DSD_{V,i}$ nelle classi di intensità descritte dalla Tabella 3, è possibile definire una distribuzione media ($\overline{DSD_V}$) rappresentativa della pioggia locale per ciascuna classe come segue:

$$\overline{DSD_V} = \frac{1}{N_i} \sum_i DSD_{V,i} \quad (5)$$

dove, N_i rappresenta il numero di distribuzioni presenti nella specifica classe di intensità analizzata.

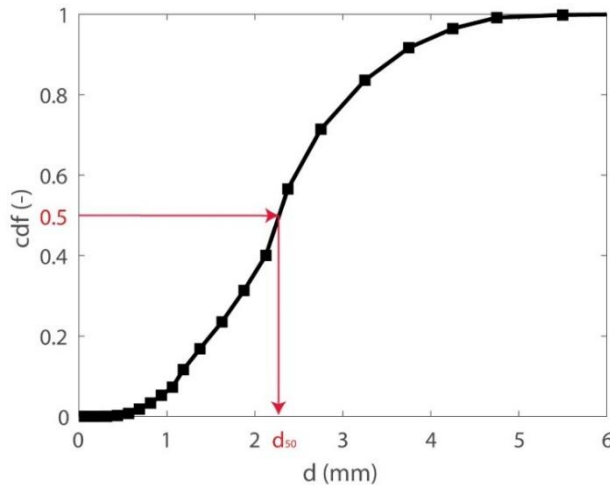


Figura 6: Esempio di distribuzione cumulata di probabilità ricavata dalle misure del disdrometro. In rosso è indicato il d_{50} ricavato analiticamente come interpolazione lineare tra i due punti vicini.

Energia Cinetica (KE)

L'energia cinetica della pioggia rappresenta una proprietà molto importante in quanto complice di molteplici effetti al suolo, tra cui fenomeni di erosione del suolo, wash-off e ri-sospensione di particelle depositate su superfici. Per sua definizione (6) l'energia cinetica della pioggia è strettamente correlata a due grandezze caratteristiche: la

distribuzione dei diametri (DSD), da cui si deriva la massa delle singole gocce, e loro velocità delle gocce. Nota infatti la distribuzione in volume (o massa) delle gocce di pioggia e nota la loro velocità è possibile stimare l'energia cinetica (KE) che trasportano al suolo come:

$$KE = \frac{1}{2} m v_d^2, \quad (6)$$

dove “m” è la massa della particella d'acqua e “v_d” è la velocità della goccia.

Come riportato da Kinnel [39] e Rosewell [40], l'energia cinetica della pioggia può esser descritta in un due modi complementari: secondo il volume o secondo il tempo. Comunemente l'energia cinetica è espressa come l'ammontare di energia per unità di volume di pioggia (KE_{mm}). Tale grandezza è espressa come energia per unità di superficie e di altezza di pioggia caduta (J/m² mm⁻¹) ed è ottenuta dalla seguente definizione:

$$KE_{mm} = 10^{-3} \frac{\rho}{2} \frac{\sum_i N(d_i) d_i^3 v_i^2(d_i)}{\sum_i N(d_i) d_i^3} \quad (7)$$

dove ρ è la densità dell'acqua, N(d_i) è il numero di gocce di diametro d_i cadute nell'unità di tempo e nell'unità di area e v_i(d_i) è la velocità terminale di una goccia di pioggia di diametro d_i.

Analogamente a quanto già detto, l'energia cinetica può anche essere espressa come l'energia al suolo per unità di tempo e unità di superficie (KE_{time}). Tale grandezza è espressa come energia per unità di superficie per unità di tempo (J/m² h⁻¹) ed è ottenuta dalla seguente definizione:

$$KE_{time} = 3.6 \cdot 10^{-3} \frac{\rho\pi}{12} \sum_i N(d_i) d_i^3 v_t^2(d_i) \quad (8)$$

Questa grandezza può esser vista come una quantità di energia assorbita dal suolo per unità di tempo oppure come una potenza della pioggia (W/m^2) [41].

Le due formulazioni sono strettamente correlate tra loro in quanto rappresentano due modi di vedere la medesima energia e pertanto possiamo facilmente passare da una all'altra attraverso la seguente formula:

$$KE_{time} = C \cdot i \cdot KE_{mm} \quad (9)$$

dove C rappresenta una costante di conversione dell'unità di tempo impiegata e i è l'intensità di pioggia.

Come anticipato, KE_{mm} è storicamente il metodo più comune di rappresentazione e misura dell'energia cinetica. Le motivazioni sono legate ai sistemi di misura e stima della distribuzione dei diametri di pioggia. Fino all'avvento nell'ultimo ventennio di sistemi ottici di misura, le DSD erano ricavate mediante misurazioni manuali come il metodo dei pellet di farina [22,26,42]. Tali tecniche prevedevano tempi di esposizione dei campioni troppo brevi (1-2s circa) per una stima accurata del tempo di campionamento e di KE_{time} .

Come evidenziato da Salles et al. [43] (vedi Figura 7), sebbene le due grandezze KE_{time} e KE_{mm} siano strettamente correlate, quando si ricerca una relazione tra quest'ultime e l'intensità di pioggia associata, si evidenzia in maniera chiara una minore eterogeneità dei dati nella relazione $KE_{time} - i$. La relazione $KE_{time} - i$ è generalmente descritta da una legge di potenza ($KE_{time} = ai^b$).

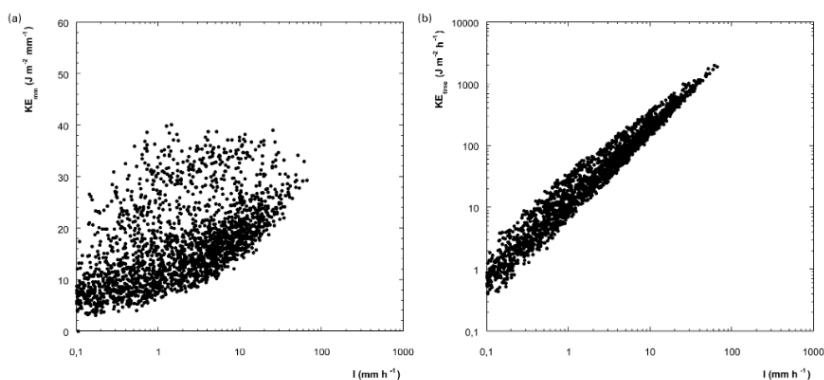


Figura 7: Scatter della relazione $KE_{\text{mm}}-i$, sulla sinistra, e $KE_{\text{time}}-i$ sulla destra dei medesimi dati rilevati da Sempere-Torres et al. [44] nel sud della Francia.

2.2. Risultati

I risultati dell'analisi statistica svolta sui dati di pioggia registrati dal disdrometro dal momento della sua installazione sono riassunti in Tabella 4. I dati mostrano chiaramente una prevalenza di eventi di pioggia leggera con intensità contenute ed inferiori ai 2.5mm/h . Il 10% degli eventi registrati ha intensità comprese all'interno del range $2.5-7.5\text{mm/h}$. Una piccola percentuale di eventi pari al 3.3% ha manifestato intensità comprese nel range $7.5-50\text{mm/h}$. Particolarmente rari gli eventi con intensità superiori ai 50mm/h con una percentuale di accadimento dello 0.5%. Un'analisi sui picchi di intensità annuali registrati ha inoltre evidenziato come in alcuni casi le intensità misurate abbiano raggiunto valori prossimi a 140mm/h . In Figura 8 è mostrato a titolo d'esempio uno degli eventi evidenziati per aver raggiunto intensità considerevoli.

Tabella 4: Eventi di pioggia registrati dal disdrometro dalla data di installazione suddivisi per classe di intensità. I valori medi di d_{50} ed energia cinetica (E) ricavati per ciascuna classe sono inoltre riportati.

Classificazione	# di eventi	%	d_{50} (mm)	\overline{KE} (J/m^2h^{-1})
Leggera	23623	85.20	0.92	6.43
Moderata	3004	10.80	1.3	65.6
Forte	937	3.38	2.1	399.9
Torrenziale	156	0.563	2.3	2030.4

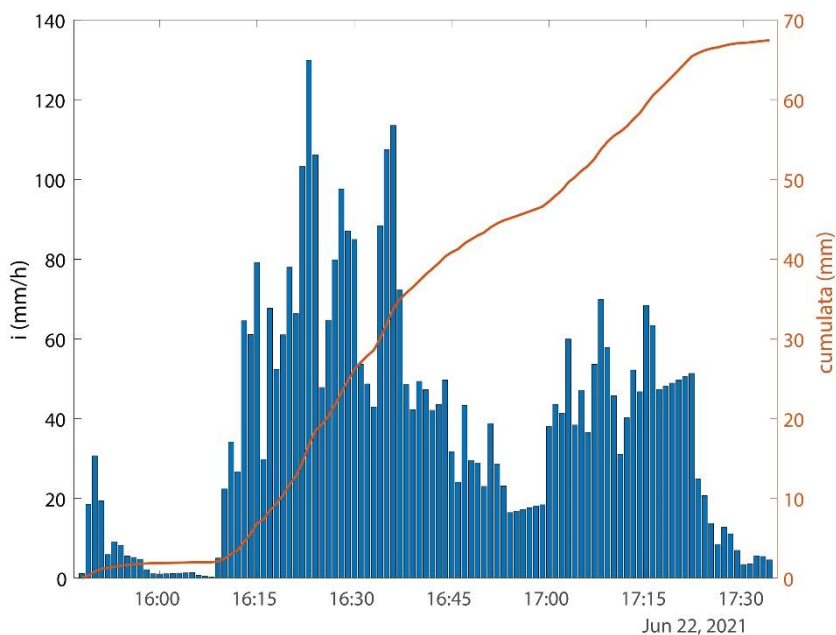


Figura 8: Evento di pioggia intensa misurato dal disdrometro ottico installato nella stazione meteo sul tetto in data 22-6-2021.

In Figura 9 sono riportati gli spettri medi di pioggia individuati per le 4 classi di intensità. Tali spettri rappresentano la percentuale media di gocce di pioggia cadute in 60s organizzate in classi di diametro e di velocità. In accordo con quanto indicato dal d_{50} in Tabella 4 e riportato da Laws et al. [27] appare evidente come al crescere dell'intensità vi sia un incremento in numero delle particelle di pioggia con dimensioni nel range 1-5mm.

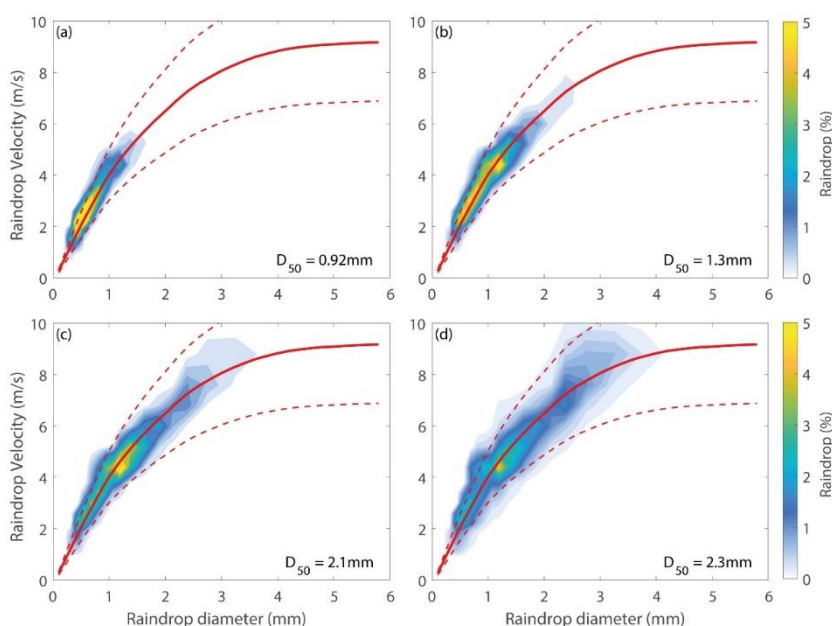


Figura 9: Spettri medi di pioggia naturale suddivisi nelle 4 classi di intensità: pioggia leggera (a), pioggia moderata (b), pioggia forte (c) e pioggia torrenziale (d).

Tale comportamento appare inoltre evidente in Figura 10 dove sono mostrate le distribuzioni medie dei diametri di pioggia per ciascuna delle quattro classi di intensità definite al punto 3.2.2. I risultati mostrano infatti un chiaro spostamento del picco di volume al variare della classe di intensità analizzata. Per le piogge leggere il volume di pioggia è costituito da gocce di diametro nel range 0.2-4mm

con particolare predominanza di gocce di diametro 0.7-1.2mm e un picco attorno agli 0.9mm. Il volume, per le piogge moderate, è costituito da gocce nel range 0.4-5.5mm, con una predominanza di gocce di diametro 0.8-3mm e un picco attorno a 1.2mm. Le piogge forti mostrano un volume costituito da gocce nel range 0.3-6mm con particolare predominanza di gocce di diametro 1.2-3.8mm e un picco in corrispondenza dei 2.5mm. Per finire, il volume delle piogge torrenziali è costituito da diametri nel range 0.3-6mm con una particolare predominanza di gocce con diametro 1.4-4.2mm e un picco evidente attorno ai 2.5mm.

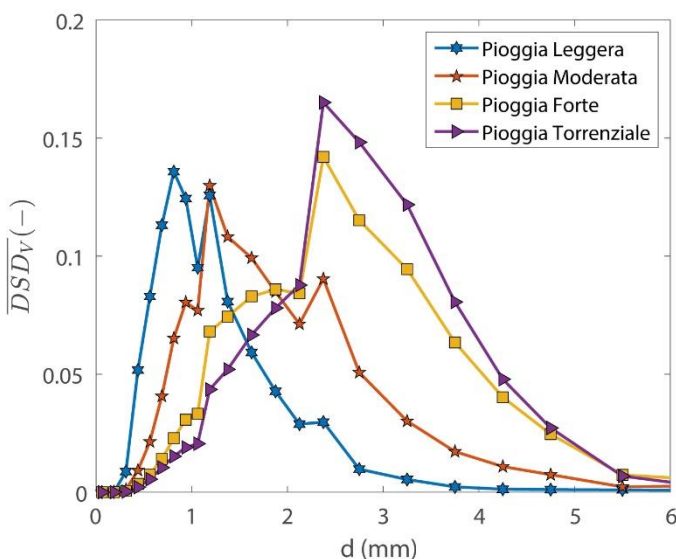


Figura 10: Distribuzioni medie dei diametri di pioggia naturale ($\overline{DSD_V}$) per le quattro classi di intensità ottenute dalle misure effettuate dal disdrometro.

La Figura 11 mostra la relazione tra il d_{50} e l'intensità di pioggia misurata. Appare evidente un incremento del diametro medio al crescere dell'intensità, con valori che variano tra gli 0.8mm per intensità nell'ordine dei 2mm/h e i 2.5mm per intensità di 60mm/h. In

accordo con quanto evidenziato in letteratura [27,45–49], sono state individuate due formulazioni empiriche: una legge di potenza ($d_{50} = ki^p$) e una legge logaritmica ($d_{50} = \log_{10} i + c$) che correlano i dati misurati dal disdrometro.

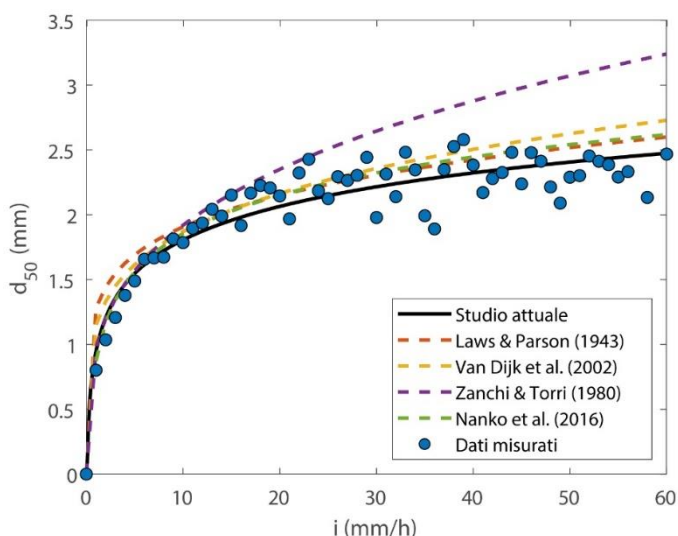


Figura 11: Relazione tra diametro medio (d_{50}) e intensità di pioggia misurati dal disdrometro. Alcune relazioni proposte in letteratura sono riportate a titolo di confronto con quella presentata in questo studio (10).

Tra le due regressioni presentate, quella descritta dall'equazione (10) si dimostra più efficace nell'approssimazione del diametro medio. In figura sono riportati alcuni dei risultati proposti in letteratura come confronto con i dati misurati.

$$d_{50} = 0.859 \log_{10} i + 0.947, R^2 = 0.822 \quad (10)$$

$$d_{50} = 1.17i^{0.185}, R^2 = 0.777 \quad (11)$$

In Tabella 5 sono riassunte alcune delle formulazioni proposte in letteratura. Come si può notare, i parametri individuati all'interno della nostra analisi sui dati di pioggia locale, ricadono piuttosto bene all'interno del range evidenziato in letteratura. Le differenti tipologie di parametrizzazioni e valori dei parametri "k" e "p" presenti in tabella e proposti in lavori precedenti sono probabilmente da imputare alla grande variabilità dei contesti meteorologici considerati dai vari autori.

Tabella 5: Sommario delle principali formulazioni disponibili in letteratura per la definizione della grandezza d_{50} al variare dell'intensità di pioggia.

Autore	Formulazione	Luogo
Laws and Parson (1943) [27]	$d_{50} = 1.28i^{0.173}$	Washington DC
Coutinho and Tomàs (1995) [50]	$d_{50} = 1.16i^{0.227}$	Portogallo
Van Dijk et al. (2002) [51]	$d_{50} = 1.15i^{0.211}$	West Java
Lu et al. (2008) [52]	$d_{50} = 1.21i^{0.176}$	Taiwan
Best (1950) [47]	$d_{50} = 1.11i^{0.232}$	Londra
Brandt (1989) [48]	$d_{50} = 0.92i^{0.123}$	Amazzonia
Zanchi and Torri (1980) [53]	$d_{50} = 0.98i^{0.292}$	Firenze

Atlas and Plank (1953) [45]	$d_{50} = 0.92i^{0.21}$	Ottawa
Meshesha et al. [54]	$d_{50} = 0.79\ln(i) + 0.874$	Etiopia
Nanko et al. (2016) [46]	$d_{50} = 1.07i^{0.221}$ $d_{50} = 0.981 \log_{10} i + 0.874$	Georgetown, SC

La relazione tra energia cinetica e intensità è riassunta in Figura 12. In questo caso una funzione di potenza è proposta come miglior approssimazione dei dati misurati. In Tabella 6 sono riassunte alcune delle formulazioni empiriche proposte in letteratura. Come per il diametro mediano, anche in questo caso i parametri individuati, ricadono perfettamente all'interno del range di valori proposti in lavori precedenti.

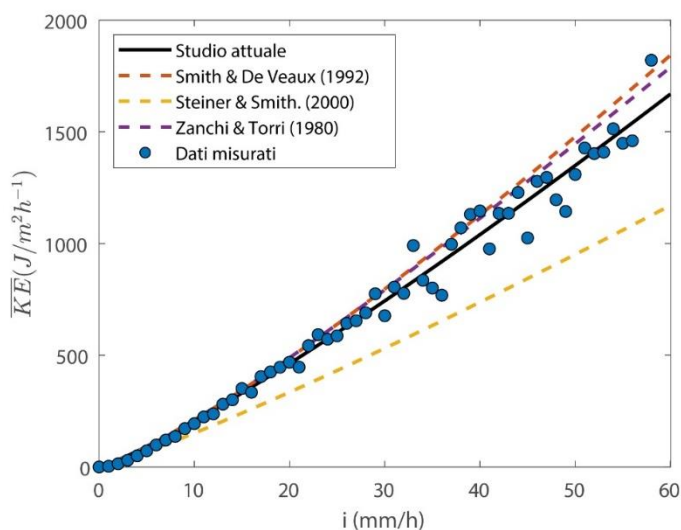


Figura 12: Relazione tra energia cinetica (\overline{KE}) e intensità di pioggia misurati dal disdrometro. Alcune relazioni proposte in letteratura sono riportate a titolo di confronto con quella presentata in questo studio (12).

$$\overline{KE} = 14.05i^{1.167}, R^2 = 0.979 \quad (12)$$

Tabella 6: Sommario delle principali relazioni disponibili in letteratura tra energia cinetica tempo-dipendente (KE_t) e intensità di pioggia (i).

Autore	Formulazione	Luogo
	$KE_t = 13i^{1.21}$	Oregon
	$KE_t = 11i^{1.23}$	Alaska
Smith and De Veaux (1992) [41]	$KE_t = 18i^{1.24}$	Arizona
	$KE_t = 11i^{1.17}$	New Jersey
	$KE_t = 10i^{1.18}$	North Carolina
	$KE_t = 11i^{1.14}$	Florida
Steiner and Smith (2000) [55]	$KE_t = 11i^{1.25}$	Northern Mississippi
Zanchi and Torri (1980) [53]	$KE_t = i(9.81 + 11.25 \log_{10} i)$	Firenze

2.3. Conclusioni

In questo capitolo della tesi, sono state analizzate e individuate le principali proprietà della pioggia naturale a scala locale, indispensabili per un corretto dimensionamento e progetto del simulatore di pioggia. I dati raccolti dalla stazione meteo installata sul tetto del laboratorio di Idraulica presso il Politecnico di Torino hanno permesso di individuare una parametrizzazione accurata della relazione tra energia cinetica, d_{50} e intensità di pioggia al suolo. Le formulazioni proposte mostrano un'ottima approssimazione dei dati misurati nonché una buona

coerenza con le parametrizzazioni proposte in letteratura. Una distribuzione media dei diametri di pioggia per ciascuna delle quattro classi di intensità analizzate è stata individuata. Tali distribuzioni, unitamente a quanto ricavato dalle analisi del d_{50} medio hanno evidenziato un incremento dei diametri medi al crescere dell'intensità di pioggia con valori di d_{50} che variano da 0.9mm per pioggia leggera sino a 2.3mm per pioggia torrenziale. Tale incremento si rispecchia inoltre sull'energia cinetica al suolo con un incremento di circa $2000 \text{ J/m}^2\text{h}^{-1}$, tra pioggia leggera e pioggia torrenziale. Un'analisi statistica condotta su 45000 minuti di pioggia registrati dal disdrometro dalla sua data di installazione nel Maggio 2021 ha evidenziato come più dell'95% degli eventi possano essere presentano intensità inferiori a 7.5mm/h con una prevalenza importante di eventi di intensità inferiore ai 2.5mm/h. Piuttosto rari, ma comunque presenti (3% circa), gli eventi di "pioggia forte" mentre particolarmente rari sono quelli con intensità superiori ai 50mm/h (0.5% circa). I risultati ottenuti in questo capitolo saranno impiegati come riferimento per la progettazione, calibrazione e ottimizzazione del set-up sperimentale.

Capitolo 3

Gocce di pioggia simulate

La necessità di simulare una pioggia naturale richiede numerose accortezze, prima fra tutte l'individuazione del sistema più adatto alla produzione di gocce di pioggia. Come anticipato nel capitolo precedente, la natura imprevedibile e la grande variabilità della pioggia rendono questa fase della progettazione particolarmente cruciale. La necessità di simulare un vasto range di intensità preservando inalterate le proprietà naturali della pioggia richiede un accurato studio preliminare delle tipologie di formatori disponibili al fine di individuare la più adatta alle esigenze del progetto.

In questo capitolo verranno trattate nel dettaglio le prove preliminari che hanno condotto all'individuazione del sistema di gocciolamento e alla tipologia di rete più adatte alle esigenze del simulatore di pioggia. In aggiunta, saranno descritte alcune applicazioni di analisi delle immagini impiegate nella misura della velocità e delle proprietà geometriche delle gocce prodotte.

3.1 Metodologia

La scelta del formatore di gocce più adatto per il simulatore di pioggia in progetto si basa in primo luogo su tre requisiti fondamentali:

- Garantire un'ampia gamma di intensità nei limiti geometrici imposti al massimo carico agente sul sistema di gocciolamento con un'elevata precisione in funzione di quest'ultimo;
- Produrre gocce con diametri sufficientemente grandi da ricoprire l'intero spettro della pioggia naturale;
- Economicità e reperibilità in commercio per via dell'elevato numero di formatori richiesti.

Come riportato nel precedente capitolo, i simulatori a goccia sono generalmente realizzati impiegando sistemi di gocciolamento ad ago, con tubi capillari o in polietilene. A seguito di una prima analisi sulla natura e sulla facilità di installazione, manutenzione e sostituzione di questi sistemi, i sistemi ad ago sono risultati essere i più adatti per il setup in progetto. L'impiego di aghi permette un elevato controllo sulla portata effluente grazie ai diametri particolarmente contenuti nonché alla varietà di modelli disponibili in commercio. Il costo contenuto e la facilità di installazione e sostituzione garantiscono interventi di manutenzione semplici e rapidi.

3.1.1 Aghi ipodermici

A seguito di una preliminare analisi dei modelli e delle tipologie di ago disponibili nel mercato, tre differenti modelli di aghi ipodermici sono stati selezionati come campioni per i test preliminari. La Tabella 7 riassume le principali caratteristiche geometriche dei tre campioni. Gli aghi testati sono dotati di ali per connessione luer-lock che garantisce un'installazione sicura eliminando il rischio di rimozione

involontaria dal supporto. La loro estremità in acciaio inossidabile garantisce stabilità contro potenziali fenomeni corrosivi che potrebbero provocarne l'occlusione o la riduzione di sezione. L'estremità degli aghi presenta una sezione obliqua pensata per facilitare le operazioni di prelievo e iniezione che non risulta in alcun modo interferire con il processo di formazione e distacco delle gocce (vedi sez.2.3.2.). L'elevata disponibilità commerciale e il costo contenuto costituiscono un ulteriore punto a loro favore. Eliminando l'estremità chiusa dei copri-ago è possibile ottenere un nuovo formatore in grado di generare gocce con diametri superiori a quelli prodotti dal singolo ago. La Figura 13 mostra l'accoppiamento realizzato tra ago e copri-ago forato. In questa particolare configurazione, come evidenziato nello schema di Figura 13b, è possibile ottenere gocce di maggiori dimensioni senza influenzare la portata, e di conseguenza, l'intensità, prodotta al suolo. L'ago interno agisce da regolatore di portata mentre il copri-ago esterno garantisce una maggiore superficie di contatto permettendo l'accumulo ed il distacco di gocce più grandi.

Tabella 7: Caratteristiche geometriche degli aghi impiegati nei test preliminari

Modello	Diametro esterno (mm)	Spessore (mm)	Diametro interno (mm)	Lunghezza (mm)
30g-13mm	0.311	0.076	0.160	13
27g-18mm	0.413	0.102	0.210	18
25g-25mm	0.514	0.127	0.261	25

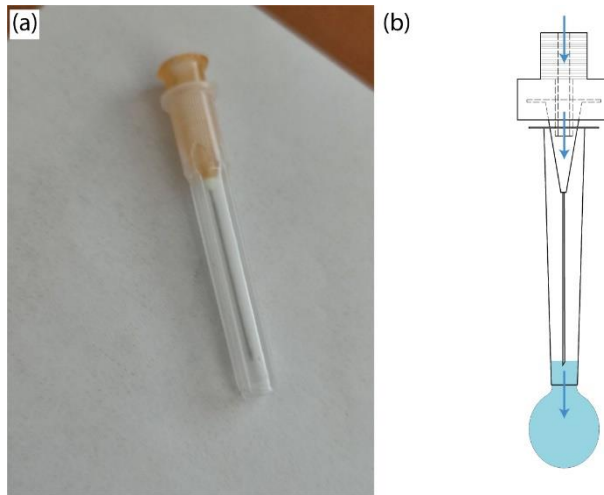


Figura 13: Ago 25g-25mm equipaggiato con copri-ago forato all'estremità. (a) una foto del sistema accoppiato; (b) schema esemplificativo del sistema ago.

3.1.2 Introduzione delle variabili indipendenti dalla temperatura

I test preliminari hanno lo scopo di verificare la relazione teorica tra portata effluente dal singolo ago (Q) e carico d'acqua agente (h) per differenti tipologie di aghi commerciali. Sulla base delle limitazioni geometriche individuate in fase progettuale del simulatore di pioggia, il massimo carico previsto sul sistema di gocciolamento è pari a 50cm.

Si definisce il numero di Reynolds dell'ago (Re), come:

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (13)$$

dove “ v ” è la velocità media all’interno dell’ago, “ d ” il diametro interno dell’ago e “ ν ” la viscosità cinematica dell’acqua. Come dimostrato nel paragrafo successivo (vedi Tabella 9), per carichi così bassi si può facilmente assumere che Re sia inferiore a 2000 considerato valore limite per la zona di transizione a flusso turbolento in ognuna delle configurazioni testate. Sulla base di tale considerazione si può assumere che il flusso all’interno dell’ago sia in regime laminare. Pertanto, la portata può essere descritta dall’equazione di Hagen-Poiseuille per flussi laminari, per cui:

$$Q = \frac{\rho g h S^2}{8\pi\mu L} \quad (14)$$

Dove ρ e μ sono rispettivamente la densità e la viscosità dell’acqua, S è l’area della sezione dell’ago, L la lunghezza dell’ago e h il carico agente. La formula descritta trascura eventuali termini di dissipazione locale all’imbocco e allo sbocco dell’ago. Le dissipazioni localizzate possono essere descritte come in (15), dove “ α ” è una costante compresa tra 0-1 generalmente mentre “ v ” e “ g ” sono rispettivamente la velocità del fluido nella sezione considerata e l’accelerazione gravitazionale. Si può facilmente dimostrare (vedi Tabella 10) come tale quantità sia trascurabile (<2%) rispetto al carico agente.

$$\Delta h = \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

L’equazione (14) può inoltre essere riscritta nel seguente modo:

$$Q = \frac{ghS^2}{8\pi\nu L} \quad (16)$$

dove ν rappresenta la viscosità cinematica dell'acqua. Appare evidente che, considerando trascurabili i fenomeni di dilatazione termica dell'ago, l'unico parametro dipendente dalla temperatura è la viscosità del fluido. È dunque possibile riarrangiare l'equazione (16) come segue:

$$Q^* = Q \cdot \nu = \frac{ghS^2}{8\pi L}, \quad (17)$$

ricavando una nuova espressione per la portata effluente dall'ago (Q^*) indipendente dalla temperatura dell'acqua.

L'intensità potenziale prodotta al suolo (i) può essere definita come il rapporto tra la portata effluente dal singolo ago e la sua area di interesse (A_{int}) come riportato in (18). Tale area, come mostrato in Figura 14 corrisponde alla porzione di superficie potenzialmente interessata dal singolo ago ed è funzione dell'interasse imposto tra gli aghi del sistema di gocciolamento.

$$i = \frac{Q}{A_{int}} \quad (18)$$

Combinando (18) e (16) si ricava la relazione teorica delle intensità simulate:

$$i = \frac{ghS^2}{A_{int}8\pi\nu L} \quad (19)$$

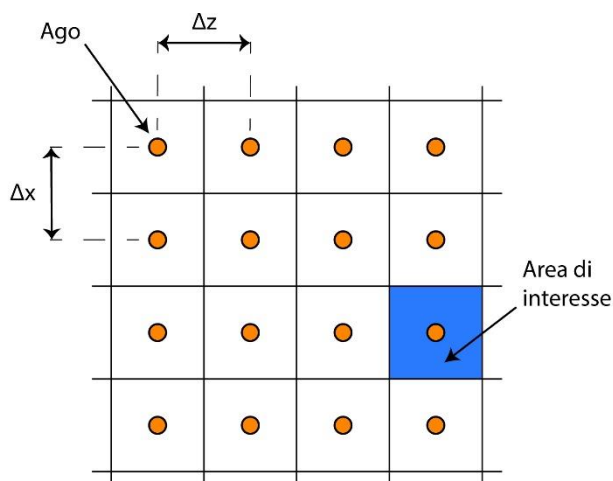


Figura 14: Schema di una disposizione generalizzata degli aghi. Δx e Δz rappresentano l'interasse tra le file di aghi nelle due direzioni del piano di gocciolamento. Evidenziata in blu l'area di interesse (A_{int}) impiegata nella stima dell'intensità potenziale (i) al suolo nell'equazione (18).

Analogamente a quanto fatto in (17) si ottiene:

$$i^* = i \cdot \nu = \frac{ghS^2}{A_{int}8\pi L} = \frac{Q^*}{A_{int}}, \quad (20)$$

che rappresenta una nuova formulazione dell'intensità teorica al suolo indipendente dalla temperatura dell'acqua.

La definizione di Q^* e i^* sarà indispensabile per poter confrontare risultati provenienti da test condotti a temperature differenti.

3.1.3 Setup sperimentale per la stima dei diametri delle gocce prodotte

Misure volumetriche

I test preliminari sono stati condotti su di un setup a singolo ago ispirato a quello di Fernández-Raga et al. [56] e rappresentato in Figura 15. Il sistema consiste in un ago installato su di un nonio mobile a circa 1.5m di altezza dal piano di lavoro e connesso ad un serbatoio da 20l. Il carico agente sull'ago è così facilmente gestito e monitorato movimentando il nonio e cambiando la quota dell'ago rispetto al livello nel serbatoio (vedi Figura 16). L'elevato volume disponibile ha permesso di considerare trascurabili le variazioni di livello all'interno del serbatoio e considerare dunque un livello statico costante durante gli esperimenti. La stima della portata e dei diametri prodotti è stata condotta con metodo volumetrico e di analisi delle immagini. Il volume d'acqua prodotto dall'ago è stato raccolto all'interno di un becher di vetro e pesato da una bilancia di precisione (vedi Figura 15).

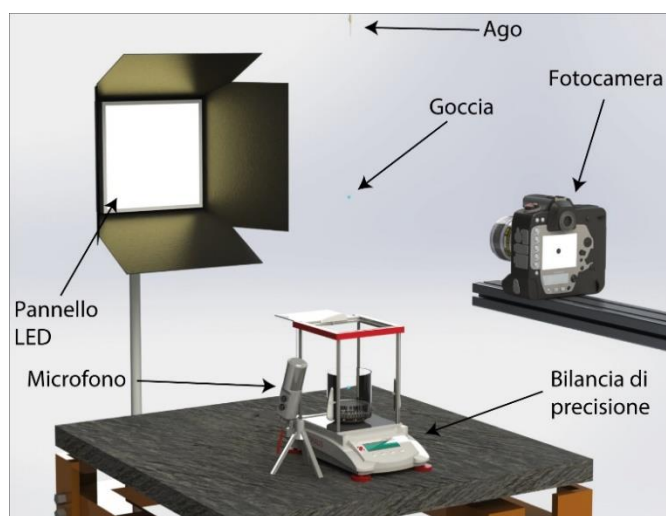


Figura 15: Rendering esemplificativo del setup sperimentale impiegato durante i test volumetrici e di analisi delle immagini

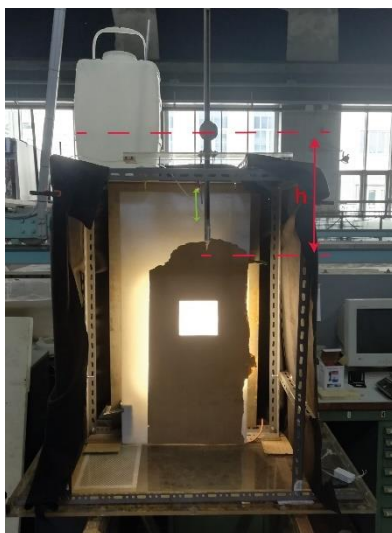


Figura 16: Foto del setup schematizzato per le prove volumetriche. In rosso la definizione del carico agente sull'ago. In verde la direzione di spostamento del nonio

Ciascuna prova aveva una durata di 30min al fine di garantire la raccolta di un volume rappresentativo di acqua e una misura precisa del peso. Durante le prove, un microfono posto in prossimità del becher registrava il ticchettio delle gocce cadute (vedi Figura 17) permettendo di determinare con esattezza il numero di gocce raccolte.

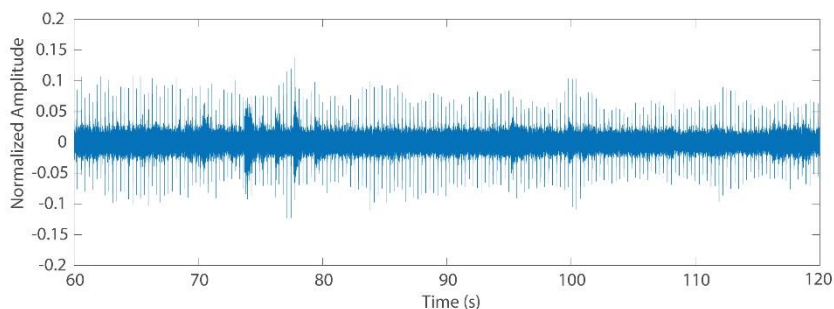







Figura 17: Un estratto del segnale audio registrato durante uno dei test volumetrici.

La temperatura dell'ambiente e dell'acqua è stata costantemente monitorata al fine di stimare viscosità e densità dell'acqua. Le configurazioni di carico testate si sono estese su tutto il range di carichi previsti sul sistema di gocciolamento definitivo, pari a 0-50cm. L'elenco dei test condotti comprensivo della temperatura registrata e dei valori di viscosità e densità dell'acqua assunti è riportato in Tabella 8. Al fine di verificare l'accuratezza dei dati teorici e sperimentali al variare della temperatura, sono state condotte tre prove a differente temperatura sull'ago selezionato al termine dei test preliminari.

Tabella 8: Elenco dei test volumetrici svolti sui vari modelli di aghi. I parametri di densità e viscosità dell'acqua sono inoltre riportati.

Modello	Simbolo	T (°C)	ρ (Kg/m ³)	ν (m ² /s)
30g-13mm		17	998.8	$1.074 \cdot 10^{-6}$
27g-18mm		17	998.8	$1.074 \cdot 10^{-6}$
25g-25mm		17	998.8	$1.074 \cdot 10^{-6}$
25g-25mm		12.5	999.7	$1.207 \cdot 10^{-6}$
25g-25mm		20	998.2	$9.977 \cdot 10^{-7}$
25g-25mm + copri-ago		14	999.4	$1.160 \cdot 10^{-6}$

Le temperature sono state selezionate per rappresentare al meglio il range di oscillazione annuale in laboratorio (12-22°C). In aggiunta ai test già citati, allo scopo di produrre gocce dal diametro superiore,

alcuni ulteriori test sono stati condotti sul formatore ottenuto accoppiando l'ago da 25gauge con il suo rispettivo copri-ago forato (vedi Figura 13). I test sono stati condotti solamente per alcuni dei carichi precedentemente testati al solo scopo di verificare il comportamento del sistema rispetto a quello senza copri-ago.

Analisi fotografiche

Le analisi fotografiche sono state svolte per la determinazione delle proprietà geometriche delle gocce prodotte dall'ago 25g-25mm selezionato a seguito dei test volumetrici. Una fotocamera Nikon DSLR D810 con obiettivo Zeiss ZE/ZF.2 Makro-Planar T* 50mm f/2 utilizzata in modalità "raffica", posta 1m al di sotto della quota dell'ago impiegato nei test, ha catturato immagini delle gocce ad una frequenza di scatto di 6Hz. Posizionando la camera ad una distanza di 20cm dal piano di gocciolamento, l'area di messa a fuoco disponibile è pari a $14.7 \times 8,4 \text{cm}^2$ con una profondità di messa a fuoco di 2.5mm circa. Le immagini catturate hanno una dimensione di 7360x4192px garantendo una risoluzione di circa 50px/mm. Le operazioni di controllo degli scatti e trasferimento delle immagini sono state gestite tramite il software "Camera Control PRO2" installato su di un laptop pc connesso alla camera. Una prima post-elaborazione in MATLAB delle immagini ha permesso di scartare le immagini vuote, mantenendo unicamente quelle in cui era presente una goccia a fuoco. Le foto sono state scattate con ISO 200 e uno shutter-speed pari ad 1/8000s garantendo un fermo immagine della goccia preciso privo di strisciate. Al fine di ottenere delle immagini nitide e massimizzare l'individuazione del contorno delle gocce è stata impiegata la tecnica shadowgraph (vedi Figura 18). Tale tecnica consiste nel posizionare l'oggetto da immortalare tra una sorgente luminosa e l'obiettivo della camera. La goccia agisce come una lente convergente, i raggi che l'attraversano vengono deviati a causa del loro angolo di incidenza.

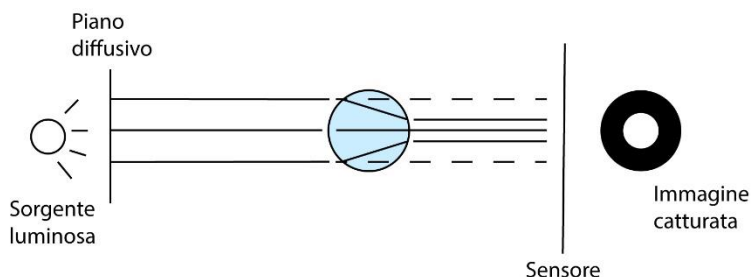


Figura 18: Schema esemplificativo della tecnica Shadowgraph.

Come evidenziato in Figura 18, i raggi che raggiungono la goccia vengono convogliati verso il centro di quest'ultima prima di raggiungere il sensore generando un'immagine particolarmente luminosa nel centro della goccia e proiettando un'ombra in corrispondenza dalla sagoma esterna. Come si evince in Figura 19, le gocce appaiono come dei punti scuri con una zona molto luminosa al loro interno, facilitando l'individuazione precisa e chiara del loro contorno. A tale scopo, il piano di gocciolamento è stato posizionato tra la fotocamera e una lampada LED da 100W (vedi Figura 15) dotata di schermo diffusore. La lampada è stata posta ad una distanza di circa 30cm dal piano di caduta delle gocce, individuata come sufficiente per ottenere un contorno nitido della particella.

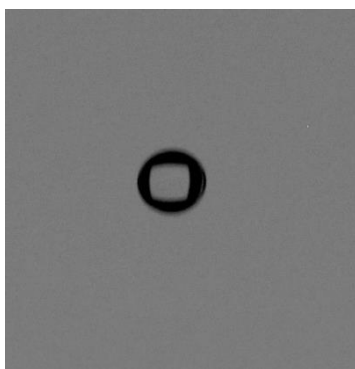


Figura 19: Immagine di una goccia catturata con tecnica shadowgraph.

Analisi video

Un setup analogo a quello appena presentato è stato impiegato per investigare la forma e la velocità raggiunta dalle gocce in corrispondenza del suolo. In questo caso il sistema di gocciolamento a singolo ago è stato installato ad una quota di 10.4m corrispondente alla quota prevista per il piano di gocciolamento del simulatore di pioggia. Una High Speed Camera Photron Nova S16 con un obiettivo Nikkor MACRO 200mm connessa ad un pc ha permesso la cattura e l'analisi di alcune gocce durante le fasi finali di caduta ad una quota di 30cm dal suolo. Questa camera è equipaggiata con un sensore CMOS in grado di registrare video con una risoluzione di 1024x1024px, a 12-bit di profondità, con un frame-rate di 16000fps e uno shutter-speed di 0.2 μ s. Framerate superiori a 16000 possono essere raggiunti riducendo la risoluzione delle immagini. Grazie al sistema di acquisizione "global shutter" dei frame, i pixel sono catturati tutti nel medesimo istante garantendo un'immagine priva di distorsioni (vedi Figura 20).



Figura 20: Confronto tra un'immagine acquisita con modalità rolling shutter e global shutter.³

³ <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/rolling-and-global-shutter>

La camera è dotata di una memoria interna da 128GB su cui vengono immagazzinati i frame catturati che poi vengono successivamente trasferiti ad un PC tramite una connessione 10-Gigabit ethernet. Grazie all'utilizzo di una modalità "trigger", la camera può essere controllata per avviare la registrazione in corrispondenza di uno specifico evento. Durante l'utilizzo in questa modalità, la camera memorizza temporaneamente le immagini in loop permettendo di registrare anche i frame antecedenti l'istante di trigger. Questa tecnica è particolarmente utile quando il fenomeno da registrare è imprevedibile o quando l'unico trigger disponibile è un suono che segue il fenomeno da osservare. Utilizzando la medesima tecnica shadowgraph descritta per la cattura delle immagini e posizionando l'high speed camera ad una distanza di 40cm dal piano di gocciolamento sono state catturate alcune gocce in prossimità del suolo. L'area inquadrata durante le prove era di circa 35x35mm garantendo una risoluzione di circa 35px/mm. La stima della velocità di transito di una goccia (v_d) si basa sulla misura del suo spostamento (s) tra due frame successivi di cui è nota la distanza temporale (dt).

$$v_d = \frac{s}{dt} \quad (21)$$

Al fine di mantenere la massima risoluzione disponibile, la camera ha effettuato le riprese con un frame rate di 16.000 fps. Tale frame rate si è dimostrato essere sufficiente per la stima della velocità di transito delle gocce d'acqua permettendo di osservare la goccia in caduta per numerosi frames. In accordo con quanto affermato da Gunn et al. [38], infatti, la velocità terminale prevista per delle gocce di circa 2.5mm è pari a 7.5 m/s. Ciò implica un tempo di transito (t_i) all'interno dell'area di cattura della camera pari a:

$$t_t = \frac{h_{image}}{v_{t,droplet}} = \frac{35 \text{ mm}}{7500 \text{ mm/s}} = 4.67 \text{ ms}, \quad (22)$$

corrispondente a circa 75 frames per un frame rate di 16000fps.

Per via delle loro imperfezioni geometriche, le gocce, durante la loro caduta sono soggette a delle forze di drag che, al variare della forma della goccia, tendono a modificarne la traiettoria in maniera piuttosto imprevedibile e casuale. Lo schema in Figura 21 mostra il sistema di trigger impiegato per la cattura delle sole gocce transitanti all'interno del piano di messa a fuoco della camera. Il sistema è costituito da 3 elementi fondamentali:

- Una sottile lamina plastica, di dimensioni 5x0,1cm posta in corrispondenza del piano di messa a fuoco della camera 10cm al di sotto dell'area di cattura.
- Un microfono per catturare il ticchettio delle gocce che transitando all'interno del piano di messa a fuoco colpiscono la lamina.
- Un pc connesso ad una scheda d'acquisizione National Instruments NI-DAQ-USB-6343 su cui è in esecuzione il software LabVIEW.

La scheda d'acquisizione analizza il segnale audio del microfono con una frequenza di campionamento di 48KHz. Quando una goccia che transita nel piano di messa a fuoco colpisce la lamina generando un segnale acustico, viene immediatamente inviato un trigger digitale verso l'high speed camera avviando la memorizzazione degli ultimi 500 frames.

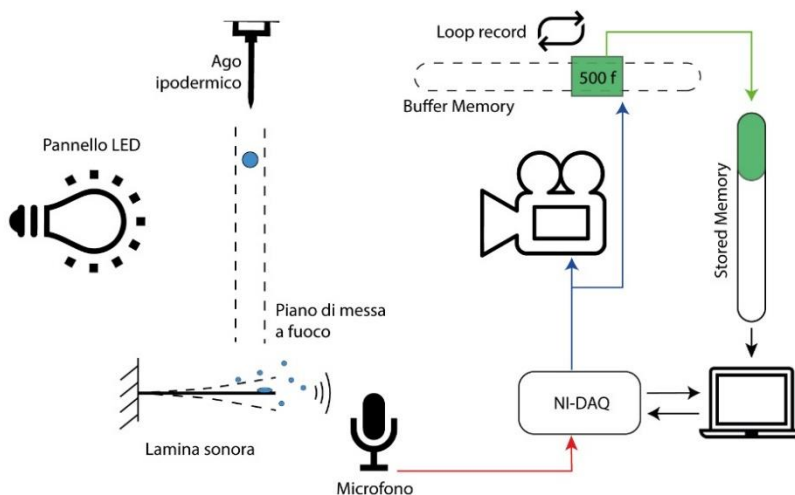


Figura 21: Schema sintetico del sistema di triggering impiegato per la cattura delle gocce con high speed camera.

Tale quantità è stata definita, sulla base di alcuni test preliminari, al fine di evitare che eventuali latenze nell'invio del trigger digitale possano causare la mancata cattura della goccia.

3.1.4 Analisi dei dati

In questo paragrafo sono descritte le principali tecniche di analisi dei dati impiegate per le analisi volumetriche e fotografiche.

Analisi Volumetriche

A seguito di ciascuna i -esima prova, il volume raccolto (V_i) è stato definito come rapporto tra il peso misurato dalla bilancia (P_i) e la densità del fluido (ρ) stimata dalle misure di temperatura (T_i):

$$V_i = \frac{P_i}{\rho(T_i)} \quad (23)$$

Tale volume rappresenta un elemento indispensabile per la stima dell'intensità riproducibile al suolo e per la definizione dell'interasse massimo tra i singoli iniettori del simulatore di pioggia. Dividendo il volume per la durata dell'i-esima prova (t_i) si ricava infatti la portata effluente da un singolo ago (Q_i) per un dato carico.

$$Q_i = \frac{V_i}{t_i} \quad (24)$$

Come descritto in (18), dividendo la portata Q_i per l'area di interasse degli iniettori è possibile stimare l'intensità equivalente al suolo definendo così i limiti di operabilità del simulatore di pioggia. Applicando poi le definizioni riportate in (17) e (20) è possibile ottenere le grandezze indipendenti dalla temperatura permettendo il confronto dei risultati ottenuti in prove con temperature differenti

I file audio di ciascuna prova sono stati analizzati in MATLAB per determinare con esattezza il numero di gocce cadute e la frequenza media di distacco nell'arco del test. Attraverso il comando "findpeaks" è possibile individuare i picchi all'interno di un qualsiasi segnale fornendo alcune condizioni al contorno come un valore di soglia (threshold) da superare, un intervallo minimo di tempo tra due picchi successivi o una variazione minima tra segnale medio locale e picco. In Figura 22 è riportato un esempio dell'analisi effettuata su di una porzione di segnale audio, i triangoli rossi rappresentano i picchi di segnale individuati e corrispondenti ad una goccia caduta.

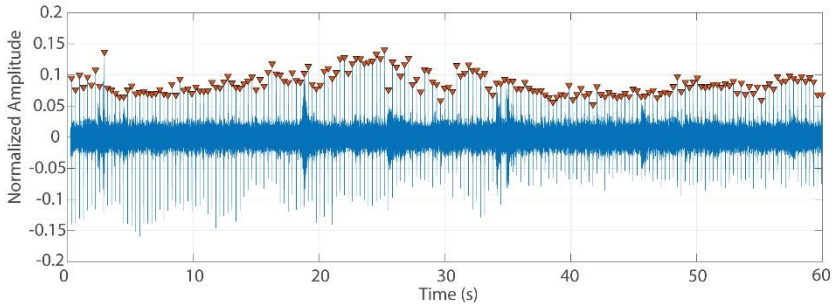


Figura 22: Esempio di analisi di un tratto di file audio. Ciascun triangolo rosso rappresenta un picco nel segnale audio corrispondente ad una goccia caduta.

Una volta definito il numero di gocce cadute, il volume medio di una goccia ($V_{drop,i}$) è ricavato dal rapporto tra volume totale raccolto ($V_{test,i}$) e numero di gocce cadute ($N_{drop,i}$):

$$V_{drop,i} = \frac{V_{test,i}}{N_{drop,i}} \quad (25)$$

Approssimando la goccia ad una sfera è infine possibile definire un diametro equivalente rappresentativo delle gocce prodotte dall'ago ($d_{v,i}$):

$$d_{v,i} = \left(\frac{6 \cdot V_{drop,i}}{\pi} \right)^{1/3} \quad (26)$$

Analisi fotografiche

Le fotografie catturate durante ciascun test sono state analizzate in ambiente MATLAB. Dopo una prima conversione in scala di grigi (Figura 23b), le immagini sono state sottoposte ad una procedura di conversione in immagine binaria mediante un processo adattivo prodotto dalla funzione “imbinarize” (Figura 23c). Una volta in

possesso della sagoma della goccia è possibile definirne le principali caratteristiche geometriche quali il contorno (Figura 23d), l'area e il diametro equivalente. La disponibilità di numerose immagini permette di tener conto di eventuali oscillazioni della goccia nella sua prima fase di caduta definendo un diametro medio [57].

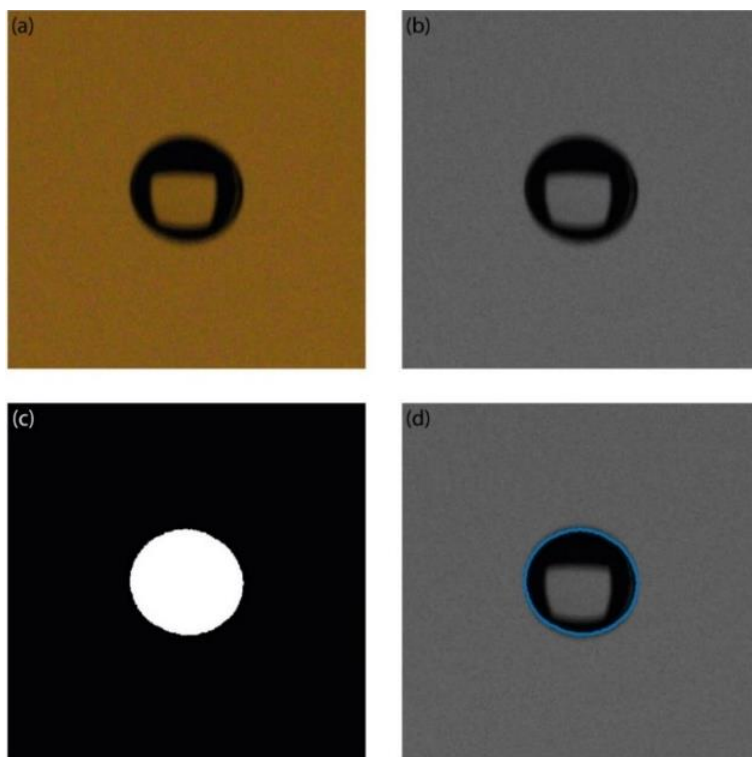


Figura 23: Processo di analisi di una immagine: (a) l'immagine originale; (b) conversione in scala di grigi; (c) la maschera binaria ricavata; (d) il contorno rilevato della goccia sovrapposto a (b).

Analisi video

Attraverso una procedura simile a quella proposta per l'analisi fotografica è possibile ottenere delle immagini binarie delle gocce durante la loro caduta. La stima della velocità di caduta è effettuata identificando lo spostamento del baricentro della goccia tra frame

successivi. La velocità è dunque ricavata attraverso l'equazione (21). Analogamente a quanto fatto per la velocità, anche i parametri geometrici medi della goccia come diametro equivalente e rapporto degli assi sono individuati per esser poi confrontati con quelli descritti in letteratura. L'eccentricità (e) è stata calcolata come segue:

$$e = 1 - \frac{a_{min}}{a_{max}}, \quad (27)$$

dove, a_{min} e a_{max} sono rispettivamente l'asse minore e l'asse maggiore della sagoma della goccia analizzata.

3.2. Risultati

In questa sezione verranno descritti e commentati i risultati ottenuti a seguito dei test preliminari condotti.

3.2.1 Test volumetrici

In Tabella 9 sono riportate le verifiche relative all'assunzione di flusso laminare all'interno dell'ago introdotte al punto 3.1.2. Come si può facilmente notare, il numero di Reynolds è sempre inferiore ai valori limite relativi alla transizione a flusso turbolento, validando dunque l'ipotesi fatta in precedenza. La Tabella 11 riassume i dati ricavati dalle prove volumetriche condotte sulle tre principali tipologie di aghi analizzate. I dati evidenziano una forte dipendenza della portata e dei diametri prodotti dalle caratteristiche geometriche degli aghi. In Figura 24a è riportato il confronto tra la curva teorica delle portate attese di ciascun ago (linea continua) e i dati sperimentali raccolti (markers). I dati volumetrici concordano molto bene con gli andamenti teorici previsti, evidenziando un incremento delle portate al crescere del diametro dell'ago, in accordo con quanto descritto dall'equazione (17). I dati mostrati in Figura 24a possono essere impiegati per

individuare l'intensità al suolo prodotta dal simulatore di pioggia al variare del carico agente nelle diverse condizioni di temperatura del laboratorio in cui sarà realizzato. Dividendo i risultati per un'area di interesse scelta e per la viscosità dell'acqua si ricava infatti la curva di intensità simulata.

Tabella 9: Verifica ipotesi flusso laminare

h ¹	30g-13mm			27g-18mm			25g-25mm		
	V ²	v ³	Re ⁴	V ²	v ³	Re ⁴	V ²	v ³	Re ⁴
4	-	-	-	0,7	0,01	1	2,2	0,02	3
6	-	-	-	1,8	0,03	3	4,2	0,04	5
8	-	-	-	2,7	0,05	4	6,3	0,06	7
10	1,3	0,04	3	3,4	0,06	5	7,8	0,08	10
12	1,6	0,05	4	4,2	0,07	7	9,2	0,09	11
14	2,1	0,07	5	4,7	0,08	8	11	0,11	13
16	2,8	0,09	6	6	0,10	10	12,8	0,12	16
18	3,2	0,10	7	6,8	0,12	11	15,7	0,15	19
20	3,5	0,11	8	7,9	0,13	13	17,8	0,17	22
22	3,8	0,12	8	8,4	0,14	14	19,8	0,19	24
24	3,9	0,12	9	9,3	0,16	15	21,7	0,21	26
30	4,7	0,15	10	11,4	0,19	18	26,3	0,26	32
36	5,7	0,18	13	14,4	0,24	23	31,2	0,30	38
42	6,7	0,21	15	17	0,29	27	37,3	0,36	46
48	7,7	0,24	17	19,3	0,33	31	42,7	0,41	52

¹ Carico (cm). ² Volume raccolto in 30min (cm³). ³ Velocità media nell'ago (m/s). ⁴ Numero di Reynolds (-).

Tabella 10: Verifica ipotesi dissipazioni localizzate trascurabili

h ¹	30g-13mm			27g-18mm			25g-25mm		
	V ²	v ³	$\frac{v^2}{2g}$ ⁴	V ²	v ³	$\frac{v^2}{2g}$ ⁴	V ²	v ³	$\frac{v^2}{2g}$ ⁴
4	-	-	-	0,7	0,01	0,0	2,2	0,02	0,0
6	-	-	-	1,8	0,03	0,0	4,2	0,04	0,0
8	-	-	-	2,7	0,05	0,0	6,3	0,06	0,0
10	1,3	0,04	0,0	3,4	0,06	0,0	7,8	0,08	0,0
12	1,6	0,05	0,0	4,2	0,07	0,0	9,2	0,09	0,0
14	2,1	0,07	0,0	4,7	0,08	0,0	11	0,11	0,1
16	2,8	0,09	0,0	6	0,10	0,1	12,8	0,12	0,1
18	3,2	0,10	0,1	6,8	0,12	0,1	15,7	0,15	0,1
20	3,5	0,11	0,1	7,9	0,13	0,1	17,8	0,17	0,1
22	3,8	0,12	0,1	8,4	0,14	0,1	19,8	0,19	0,2
24	3,9	0,12	0,1	9,3	0,16	0,1	21,7	0,21	0,2
30	4,7	0,15	0,1	11,4	0,19	0,2	26,3	0,26	0,3
36	5,7	0,18	0,2	14,4	0,24	0,3	31,2	0,30	0,5
42	6,7	0,21	0,2	17	0,29	0,4	37,3	0,36	0,7
48	7,7	0,24	0,3	19,3	0,33	0,6	42,7	0,41	0,9

¹ Carico (cm). ² Volume raccolto in 30min (cm³). ³ Velocità media nell'ago (m/s).⁴ Termine cinetico (cm).

Tabella 11: Risultati dei test volumetrici condotti sui tre aghi principali

h ¹	30g-13mm			27g-18mm			25g-25mm		
	V ²	Q ^{*3}	\bar{d}_v ⁴	V ²	Q ^{*3}	\bar{d}_v ⁴	V ²	Q ^{*3}	\bar{d}_v ⁴
4	-	-	-	0,7	54.1	1,98	2,2	170,2	2,29
6	-	-	-	1,8	139.2	2,53	4,2	324,8	2,39
8	-	-	-	2,7	208.8	2,20	6,3	464,1	2,41
10	1,3	100.5	2,02	3,4	263.0	2,21	7,8	603,3	2,39
12	1,6	123.7	2,02	4,2	324.8	2,18	9,2	711,5	2,40
14	2,1	162.4	1,96	4,7	363.5	2,11	11	850,8	2,41
16	2,8	216.6	1,94	6	464.1	2,18	12,8	990,0	2,42
18	3,2	247.5	1,98	6,8	525.9	2,20	15,7	1214,3	2,43
20	3,5	270.7	1,96	7,9	611.0	2,21	17,8	1376,7	2,43
22	3,8	293.9	1,96	8,4	649.7	2,24	19,8	1531,4	2,43
24	3,9	301.6	1,97	9,3	719.3	2,25	21,7	1678,3	2,43
30	4,7	363.5	1,98	11,4	881.7	2,23	26,3	2034,1	2,45
36	5,7	440.8	2,01	14,4	1113.7	2,23	31,2	2413,1	2,48
42	6,7	518.2	2,02	17	1314.8	2,27	37,3	2884,8	2,45
48	7,7	595.5	2,02	19,3	1492.7	2,24	42,7	3302,5	2,44

¹ Carico (cm). ² Volume raccolto in 30min (cm³). ³ Portata T-indipendente (cm⁵/h²).

⁴ Diametro medio (mm).

La relazione tra diametro medio delle gocce prodotte e carico agente è riassunta in Figura 24b. Il grafico, così come i dati riportati in Tabella 11, evidenziano un incremento del diametro medio prodotto al crescere delle dimensioni dell'ago mentre non si evidenzia alcuna dipendenza dal carico agente. Il diametro medio prodotto risulta crescere passando da 1.9mm per l'ago 30g, a 2.22mm per l'ago 27g sino a 2.43mm per l'ago 25g. I risultati confermano quanto evidenziato

da Karbaschi et al. [58] per cui il fenomeno di formazione e distacco di una goccia dipende dall'equilibrio tra forze di tensione superficiale e forze peso. Come evidenziato dalla Figura 24c, i dati sperimentali per le prove condotte a differenti temperature sull'ago da 25gauge concordano molto bene con la curva teorica dell'equazione (17). In Tabella 12 è riportato un confronto tra i dati ottenuti per l'ago 25g ed il medesimo ago accoppiato al copri-ago forato. Le portate indipendenti dalla temperatura (Q^*) ottenute nelle due configurazioni sono piuttosto simili, con differenze inferiori al 7% mentre il diametro medio prodotto dalla seconda configurazione è notevolmente maggiore con un diametro medio di 4.8mm, circa il doppio di quello prodotto dall'ago 25g.

Tabella 12: Confronto tra i risultati dei test volumetrici condotti con ago 25g e ago 25g + copri-ago forato. Le differenze percentuali tra le portate Q^* e i diametri prodotti dai due sistemi sono inoltre riportate.

h (cm)	Q^* (cm ⁵ /h ²)			d _v (mm)		
	25g	25g + copri-ago	Δ (%)	25g	25g + copri-ago	Δ (%)
20	1137.7	1064.5	6.4	2.43	4.82	98.3
24	1326.4	1320	0.5	2.43	4.81	97.9
30	1572.8	1580.1	0.5	2.45	4.79	95.3
42	2136.7	2080	2.7	2.45	4.82	97

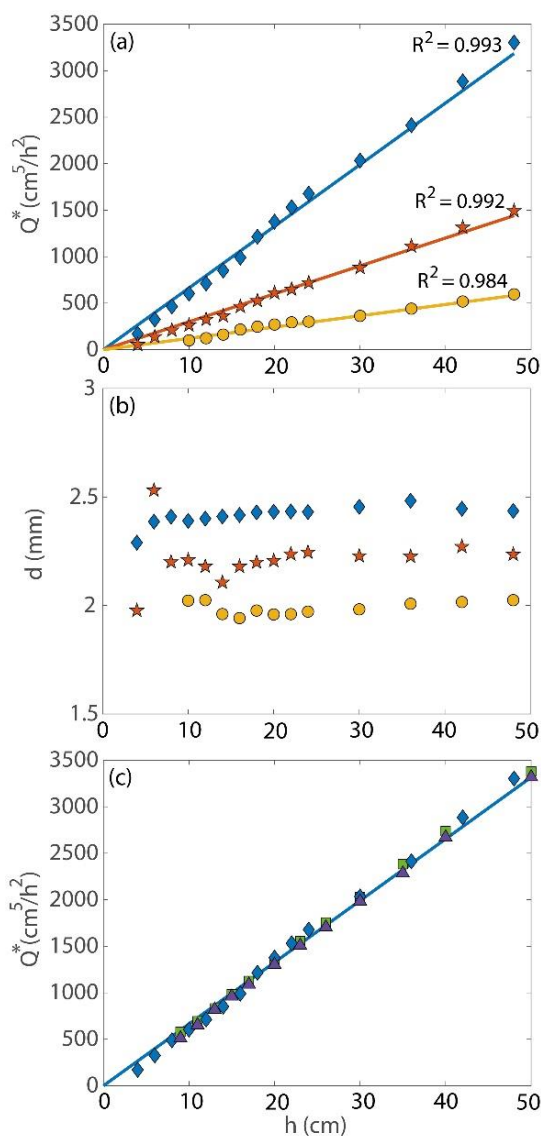


Figura 24: Risultati dei test volumetrici condotti con differenti tipi di aghi ipodermici commerciali: (a) portata di un singolo ago, la linea continua denota la portata teorica Q^* , i markers invece i dati misurati. (b) Diametro medio derivato dalle misure volumetriche. (c) Portate effluenti dall'ago 25g-25mm per differenti temperature, la linea continua rappresenta la portata teorica Q^* .

3.2.2 Analisi delle immagini

In Figura 25 sono riportati, a titolo esemplificativo, i contorni delle gocce rilevati in uno dei test svolti. I dati evidenziano come il metodo di analisi delle immagini permetta di individuare correttamente il contorno delle gocce prodotte garantendo un'ottima precisione con una deviazione standard inferiore al 4.5% del diametro medio stimato. Le gocce appaiono di forma pressoché circolare durante le loro prime fasi di caduta grazie alle ridotte velocità di transito che non producono forze di drag sufficienti a deformare in modo evidente la forma della goccia come accade invece una volta raggiunta la loro velocità terminale [59].

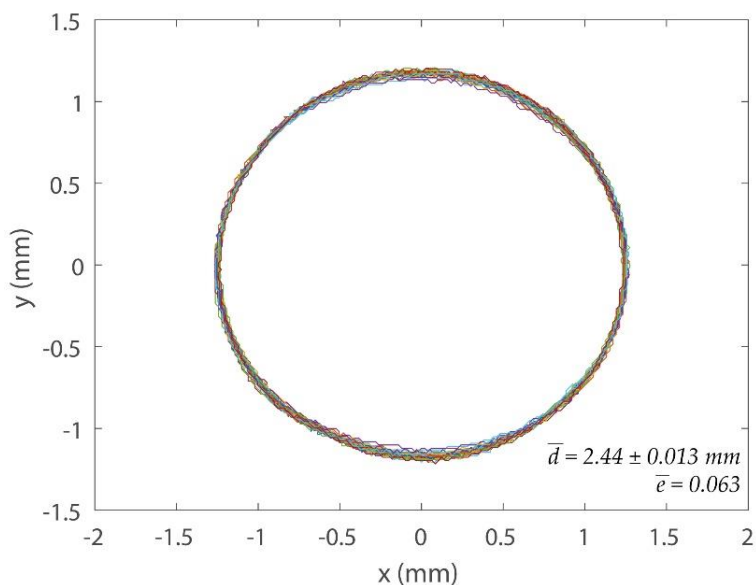


Figura 25: Contorni rilevati dall'analisi delle immagini delle gocce prodotte dall'ago 25g-25mm con un carico di 36cm. In figura sono inoltre riportati il diametro medio rilevato (\bar{d}) comprensivo della deviazione standard (σ) e l'eccentricità media (\bar{e}).

I risultati ottenuti dalle analisi delle immagini scattate all'ago 25g sono riassunti in Tabella 13. I corrispondenti dati volumetrici e la differenza percentuale in valore assoluto tra due metodi sono inoltre riportati per facilitarne il confronto. I dati evidenziano come i risultati ottenuti dai due metodi siano pressoché identici con differenze inferiori al 2% confermando l'affidabilità delle misure ottenute.

Tabella 13: Risultati ottenuti dall'analisi delle immagini per differenti carichi d'acqua agenti (h) sull'ago 25g-25mm. Il diametro medio (d_i), la relativa deviazione standard (σ_i) e l'eccentricità (e_i) sono riportati. Il diametro medio ricavato dai test volumetrici (d_v) è inoltre riportato. La differenza in valore percentuale in valore assoluto tra i diametri medi ricavati dai due metodi ($|\Delta|$) è mostrata per confronto.

h (cm)	$d_i \pm \sigma_i$ (mm)	e_i (-)	d_v (mm)	Δ (%)
10	2.39 ± 0.006	0.100	2.39	0
16	2.40 ± 0.005	0.105	2.42	0.9
22	2.41 ± 0.013	0.095	2.43	1.2
30	2.43 ± 0.010	0.070	2.45	1.2
36	2.44 ± 0.013	0.063	2.48	1.8
42	2.44 ± 0.012	0.053	2.45	0.3
48	2.44 ± 0.100	0.040	2.44	0.2

Si può inoltre notare una progressiva riduzione dell'eccentricità media delle gocce osservate al crescere del carico agente. Tale fenomeno non è in realtà correlato al carico ma è puramente dovuto

alla configurazione del setup sperimentale. Durante i test, infatti, la camera è mantenuta nella medesima posizione, l'incremento di carico è ottenuto abbassando la quota dell'ago rispetto al serbatoio. Ne consegue che al crescere del carico le gocce osservate percorrono una distanza di caduta via via più breve, transitando dunque con una velocità inferiore da cui ne deriva una minor deformazione provocata dalle forze di drag. In Figura 26 è mostrato un confronto tra i contorni delle gocce individuati per un ago da 25g con estremità orizzontale e l'ago da 25g a sezione obliqua.

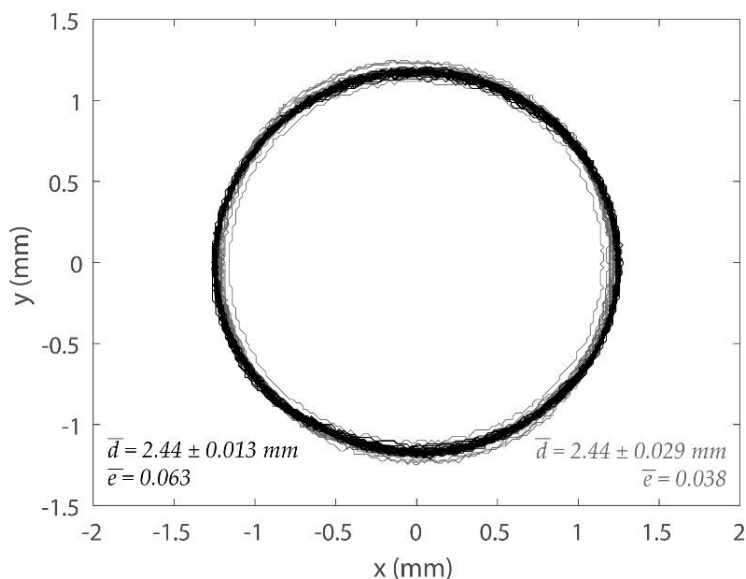


Figura 26: Confronto tra i contorni rilevati delle gocce prodotte dall'ago 25g-25mm con estremità inclinata (linee di colore nero) e con estremità orizzontale (linee di colore grigio). Le principali caratteristiche geometriche delle gocce rilevate sono riassunte e differenziate impiegando le medesime colorazioni.

I dati evidenziano come i diametri delle gocce prodotte siano comparabili, con una differenza inferiore all'1% a conferma di quanto introdotto nella sezione 2.1.1 in merito agli effetti trascurabili dell'estremità obliqua degli aghi commerciali selezionati.

3.2.3 Analisi dei Video

Per quanto riguarda le misure di velocità delle gocce in prossimità del suolo, sono stati analizzati un totale di 14 video. I risultati sono mostrati in Figura 27. La Figura 27a, mostra un esempio del processo di rilevamento e definizione del contorno della goccia durante la sua caduta. Tre istanti ad una distanza di dieci frame l'uno dall'altro, sono riportati come esempio.

Per ciascun video è stata individuata una velocità media riportata poi in Figura 27b. Gli intervalli di confidenza di ciascun test, corrispondenti a $\pm\sigma$ sono inoltre riportati. La velocità media rilevata è di 7.47 m/s, corrispondente al 99% della velocità terminale di una goccia di 2.5mm di diametro [38]. Il diametro medio delle gocce rilevato dall'analisi video è pari a 2.52mm, leggermente superiore a quello rilevato dalle misure volumetriche e delle immagini. Questa leggera discrepanza è imputabile alla minore risoluzione dei video ottenuti con l'High Speed Camera rispetto alle immagini scattate con la fotocamera, nonché alle difficoltà tecniche nel catturare delle gocce in caduta libera perfettamente a fuoco con una profondità di messa a fuoco di circa 1mm. Come appare evidente in Figura 27a, le gocce mostrano una leggera deformazione corrispondente in un allargamento della parte inferiore provocata dalle forze di drag agenti su quest'ultima. In Figura 27d, è riportata l'eccentricità rilevata per ciascuna delle gocce intercettata nei test. I risultati hanno evidenziato una eccentricità media delle gocce pari a 0.119. Tale valore risulta in accordo con quelli riportati da Beard et al. [59] pari a circa 0.11 per una goccia di 2.5mm di diametro.

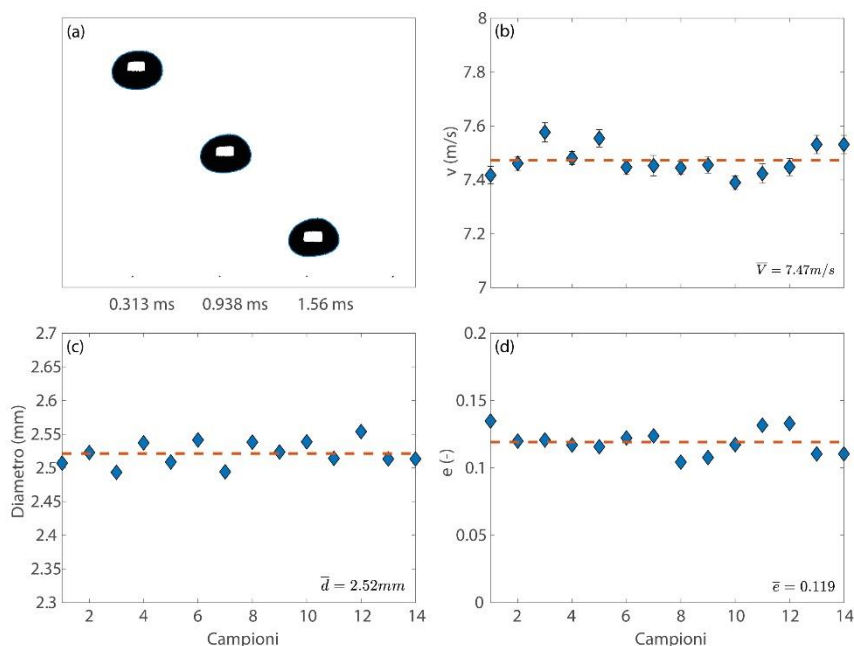


Figura 27: Risultati delle analisi dei video catturati dall'High Speed Camera: (a) alcuni frame di una goccia in caduta, il contorno identificato dall'analisi è inoltre riportato; (b) velocità media delle gocce per ciascun test analizzato, l'intervallo di confidenza pari a $\pm\sigma$ è riportato per ciascuno dei test; (c) diametro medio delle gocce individuate; (d) eccentricità media delle gocce individuate.

3.3 Interazione goccia - rete

L'impiego di aghi come formatori di gocce garantisce un elevato controllo sull'intensità prodotta e sulle dimensioni delle gocce generate. Allo stesso tempo non è possibile riprodurre una distribuzione di pioggia simile a quella naturale a meno di non impiegare differenti tipologie di iniettori o posizionare una rete al di sotto del piano di gocciolamento in grado di rompere le gocce originali in uno spettro più vasto di diametri. Il primo caso garantisce sicuramente un controllo accurato della pioggia prodotta ma introduce anche delle disuguaglianze in termini di portata effluente dagli aghi

legata alle differenti dimensioni degli stessi che va quindi ad influenzare l'intensità al suolo. In aggiunta, la distribuzione dei diametri risulterà comunque poco realistica in quanto somma di più distribuzioni mono disperse.

Il secondo caso rappresenta la scelta più comune nel campo dei simulatori di pioggia con formatori ad ago in quanto permette di mantenere una portata costante sull'intera area di simulazione andando ad intervenire unicamente sulla distribuzione dei diametri a terra. Sebbene rappresenti una tecnica particolarmente comune, prevedere gli effetti dell'interazione goccia-rete è particolarmente complesso per via dei numerosi fattori geometrici e fisici in gioco.

A tale scopo è stata svolta un'analisi qualitativa di tale interazione andando a investigare nel dettaglio il fenomeno di interazione tra goccia e singolo filo, ed estendendo poi tale analisi ad un campione di rete commerciale. Le analisi sui differenti filamenti sono state condotte seguendo il medesimo principio descritto per le analisi video alla sezione 2.1.3.

3.3.1 Test su filamento singolo

L'interazione goccia-filo è stata investigata incrementando man mano la distanza tra ago selezionato (25g-25mm) e filamento e osservando come cambiasse il comportamento della goccia all'impatto. Due dimensioni di filamento e differenti distanze di caduta sono state investigate. Le configurazioni testate sono riassunte in Tabella 14. In Figura 28 e Figura 29 sono mostrati a titolo di esempio alcuni fermo-immagine ottenuti da dei video registrati per entrambe le tipologie di filamento. Come si può facilmente notare il comportamento è fortemente influenzato dalla velocità con cui la goccia impatta sul filo e dalla dimensione stessa del filamento.

Tabella 14: Configurazioni testate per lo studio qualitativo dell'interazione goccia-filamento singolo.

Filamento 0.5mm		Filamento 2mm	
ID	Altezza caduta (cm)	ID	Altezza caduta (cm)
F1-2	2mm	F2-2	2mm
F1-4	4mm	F2-4	4mm
F1-8	8mm	F2-8	8mm
F1-10	10mm	F2-10	10mm
F1-20	20mm	F2-20	20mm
F1-40	40mm	F2-40	40mm
F1-80	80mm	F2-80	80mm
-	-	F2-200	200mm

In Figura 28 appare evidente come anche per minime distanze (a-b-c) il fenomeno di accumulo sul filamento sia pressoché trascurabile e non si manifestino rotture da parte della goccia. Al crescere della distanza (d-e-f), si può notare come invece la goccia intercettata venga rotta in frazioni più piccole del diametro originale. Anche in questo caso non si osserva alcun fenomeno di accumulo sul filamento.

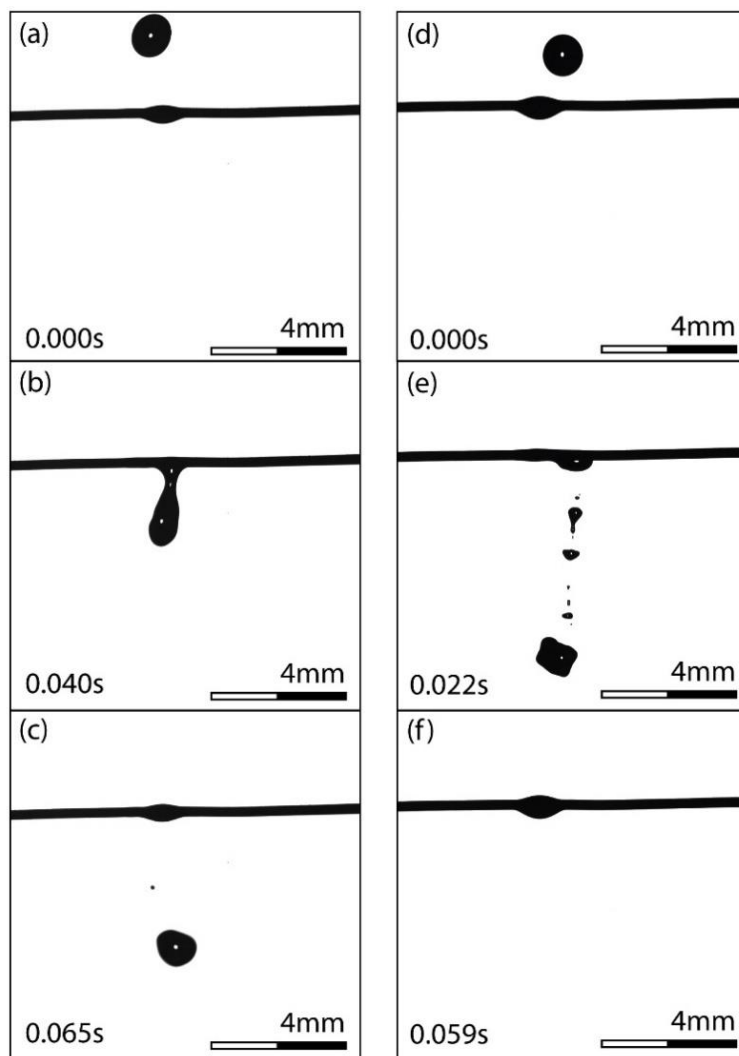


Figura 28: Esempio di interazione goccia-filamento (F1) al variare della distanza di caduta: a sinistra (a-b-c) distanza di caduta 1cm, a destra (d-e-f) distanza di caduta 8cm. In ordine le successive fasi: (a-d) condizioni iniziali, (b-e) interazione, (c-d) reset del ciclo.

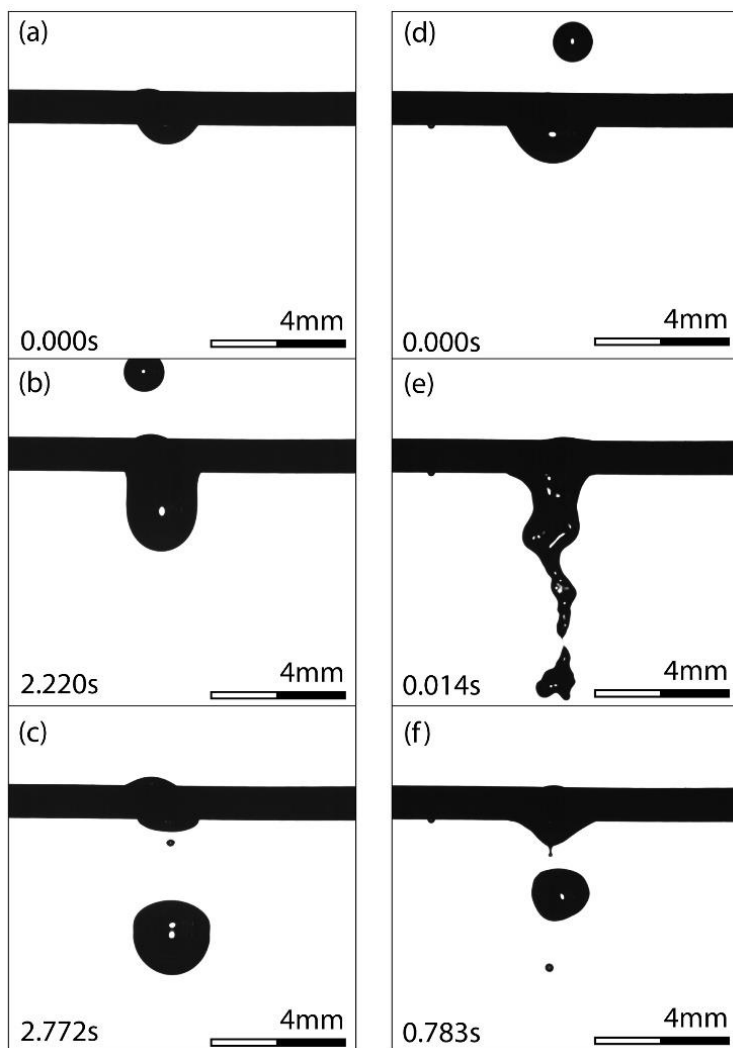


Figura 29: Esempio di interazione goccia-filamento (F2) al variare della distanza di caduta: a sinistra (a-b-c) distanza di caduta 1cm, a destra (d-e-f) distanza di caduta 20cm. In ordine le successive fasi: (a-d) condizioni iniziali, (b-e) interazione/accumulo, (c-d) distacco e reset del ciclo.

In Figura 29 è riportata invece l'interazione tra goccia e un filamento di 2mm. Anche in questo caso si evidenzia una forte dipendenza dalla distanza di caduta oltre ad una chiara periodicità nei

fenomeni di interazione/accumulo la cui durata è strettamente legata alla distanza di caduta della goccia. Al crescere della distanza il fenomeno di accumulo tende a ridursi sebbene una piccola parte di acqua venga man mano rilasciata sul filamento finché il volume accumulato non si distacca a seguito dell'impatto di una goccia successiva. La differenza in termini di accumulo e formazione di gocce di grandi dimensioni si nota bene osservando e confrontando le due gocce distaccate in Figura 29c-f. Sebbene le gocce nella loro prima fase di distacco non abbiano ancora una forma stabile per cui si possa definire con esattezza un diametro equivalente, si può comunque notare facilmente come la goccia distaccata nel fermo immagine 'c' sia certamente più grande di quella catturata nel fermo immagine 'f'.

Vista l'impossibilità di caratterizzare precisamente i diametri equivalenti delle gocce a seguito dell'impatto col filamento per tutte le prove condotte, si è proceduto ad un'analisi più qualitativa che permetta di definire un "rapporto di rottura" (Rr) individuando il numero di gocce cadute sul filamento (n_{prima}) ed il numero di gocce cadute al di sotto del filamento (n_{dopo}) nel medesimo periodo:

$$Rr = \frac{n_{dopo}}{n_{prima}}. \quad (28)$$

Tale rapporto ha lo scopo di definire qualitativamente come evolva il fenomeno di accumulo sul filamento al variare della distanza tra filamento e ago. In Figura 30 è mostrato il risultato delle analisi condotte per i diversi filamenti. I test sono stati condotti sino all'individuazione di una distanza per cui il rapporto Rr fosse superiore a 2.

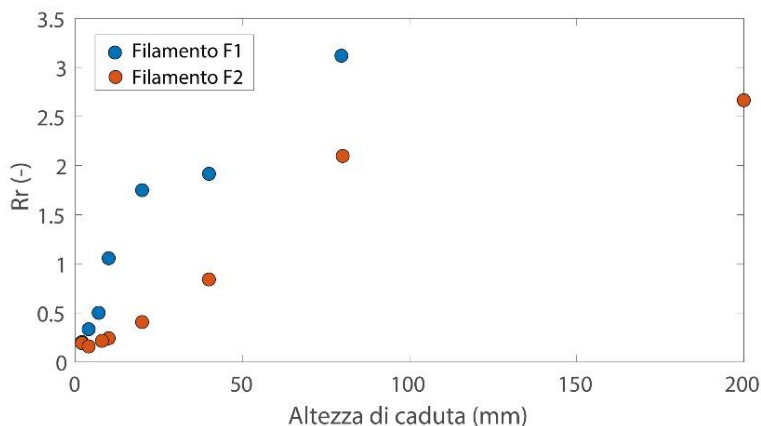


Figura 30. Rapporto di rottura al variare dell'altezza di caduta per i due filamenti testati.

I risultati mostrano come al crescere del diametro del filamento aumenti la distanza di caduta per la quale il fenomeno di rottura delle gocce inizia a divenire predominante. Tale distanza è pari a circa 10mm per il filamento da 0.5mm mentre raggiunge i 50mm circa per quello da 2mm. Tale distanza non va confusa con quella per cui il fenomeno di accumulo viene meno. L'effetto di rottura non preclude il rilascio di parte di acqua sul filamento che nel tempo si accumula producendo poi il distacco di una goccia di grande diametro a seguito della caduta di una nuova goccia. Questi risultati confermano dunque come sia possibile spezzare e redistribuire le gocce al di sotto della rete di redistribuzione posizionandola ad una distanza superiore a 5/10cm dal piano di gocciolamento.

3.3.2 Test su rete

Al fine di investigare i fenomeni evidenziati sul singolo filamento, si è proceduto a testare l'interazione tra le gocce prodotte dai due differenti formatori selezionati e una rete commerciale (vedi Figura 31) con maglia 5mm, spessore del filamento 1mm e maglia reale di 4mm.

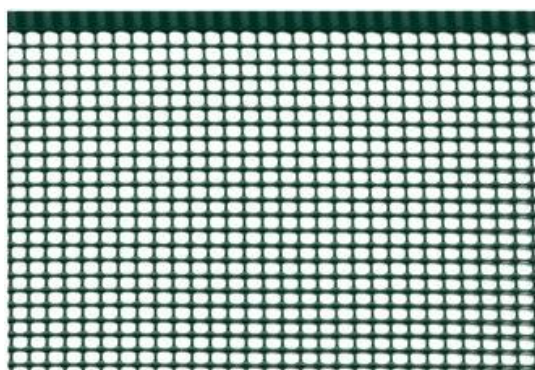


Figura 31. Rete commerciale impiegata nei test.

Oltre alla raccolta di video qualitativi dell'interazione goccia-rete, sono state condotte delle analisi su di un piccolo setup costituito da alcuni aghi posizionati al di sopra della rete di gocciolamento. Un disdrometro ottico (vedi 3.1.1) ha raccolto i dati di pioggia prodotta dall'interazione gocce-rete permettendo di descrivere con maggior dettaglio la distribuzione della pioggia prodotta dalla rete. In Figura 32 sono mostrati a titolo di esempio alcuni fermo-immagine dell'interazione osservata per due delle prove condotte. I test di rottura si sono soffermati sull'osservazione di sole due distanze di caduta: 25cm e 200cm. I risultati dell'analisi sono riassunti in Figura 33.

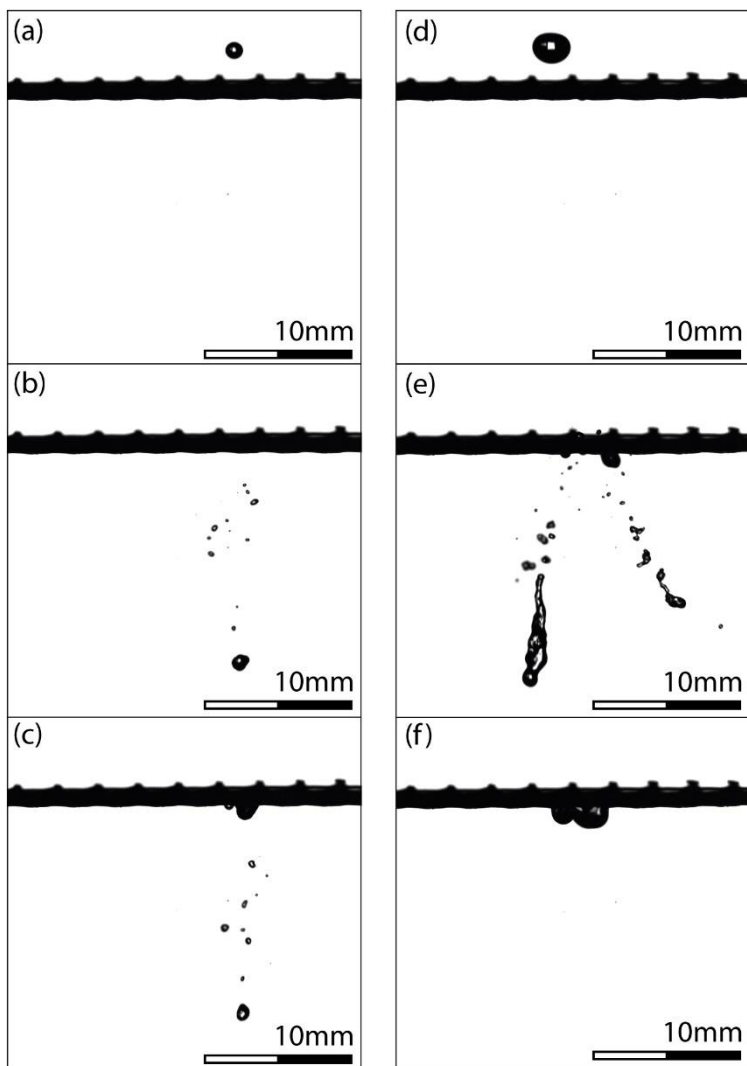


Figura 32. Esempio di interazione goccia-rete per due differenti diametri di goccia per un'altezza di caduta di 25cm. A sinistra (a) goccia di 2.4mm, a destra (b) goccia di 4.8mm. In ordine le varie fasi: (a-d) condizioni iniziali, (b-e) rottura e primo accumulo, (c-f) formazione di accumulo nella maglia della rete che porterà a successivo distacco.

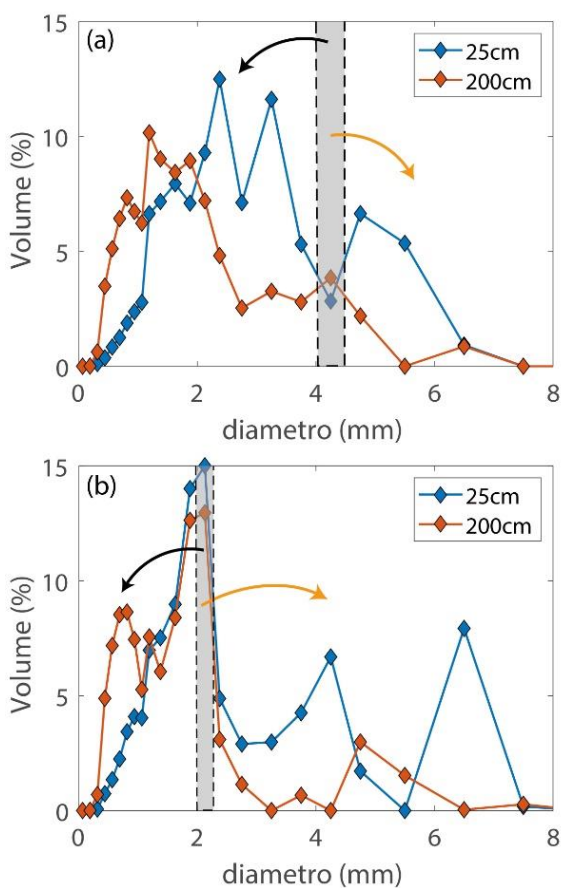


Figura 33. Redistribuzione dei diametri di pioggia dovute a due differenti altezze di caduta dalla rete di redistribuzione per le due classi di diametri del modulo pioggia: (a) gocce prodotte da copri-aggi, (b) gocce prodotte da ago. La freccia nera rappresenta la redistribuzione per rottura mentre quella in arancione la redistribuzione per accumulo. In grigio è evidenziata la classe di diametro delle gocce che impattano la rete.

Per quanto riguarda le gocce prodotte con copri-ago si può osservare come per entrambe le distanze testate si verifichi un abbattimento quasi totale delle gocce di partenza (meno del 5%) a cui consegue una redistribuzione del volume di partenza. Tale abbattimento è dovuto al fatto che la dimensione della maglia non

permette il passaggio indisturbato di gocce di 4.8mm. In particolare, si può apprezzare un importante fenomeno di rottura con conseguente formazione di gocce di diametro inferiore a quello di partenza. Al contempo si osserva anche un leggero fenomeno di accumulo sulla rete con conseguente formazione di gocce di diametro superiore a quello di partenza e proporzionale alla dimensione della maglia della rete. Al crescere della distanza di caduta tale fenomeno tende a scomparire per via della crescente energia cinetica posseduta dalle gocce all'impatto che favorisce i fenomeni di rottura in diametri sempre più piccoli.

Per quanto riguarda invece le gocce prodotte dall'ago si nota anche in questo caso un discreto abbattimento dei diametri originali, seppur non così accentuato come al punto precedente grazie alle dimensioni ridotte delle gocce che riescono in parte ad attraversare indisturbate la rete. Per entrambe le distanze si può apprezzare un importante fenomeno di rottura con conseguente formazione di gocce di diametro inferiore a quello di partenza. L'interazione tra goccia e rete produce inoltre accumulo sulla rete con conseguente distacco di gocce proporzionali alle dimensioni della maglia della rete. Come per le gocce più grandi, al crescere della distanza tale fenomeno tende a ridursi a favore del processo di rottura in gocce più piccole per via della crescente energia cinetica delle gocce all'impatto.

3.4 Conclusioni

In questo capitolo è stato analizzato nel dettaglio lo studio della produzione di gocce mediante un sistema di gocciolamento ad aghi. Differenti tipologie di aghi sono state testate al fine di verificare la corrispondenza tra i dati sperimentali e le curve teoriche previste. Una nuova definizione di due parametri di portata e intensità indipendenti dalla temperatura è stata presentata. Attraverso questi parametri è possibile comparare tra loro esperimenti condotti in condizioni di temperatura differenti in modo semplice. I test svolti hanno permesso

di dimostrare un'effettiva dipendenza della portata dai parametri geometrici degli aghi impiegati. Tale dipendenza è ben descritta dall'equazione (17). L'applicazione di un metodo fotografico di analisi delle immagini ha permesso di verificare e convalidare i dati volumetrici nonché di evidenziare le potenzialità di questo tipo di analisi in grado di fornire molteplici informazioni in merito alla forma e alle dimensioni delle gocce di pioggia osservate. L'impiego di una high speed camera all'interno del setup ha permesso di analizzare nel dettaglio la reale velocità di alcune gocce prodotte dopo una caduta di circa 10m. I risultati hanno confermato come tale altezza sia più che sufficiente per garantire il raggiungimento di velocità pari a circa il 99% di quella terminale per gocce di 2.5mm.

A seguito dei test condotti, l'ago da 25gauge è risultato essere l'unico in grado di garantire un elevato range di portate all'interno del range di carichi ammissibili nel simulatore di pioggia (0-50cm). Tali portate, considerando un interasse tra gli aghi del simulatore di pioggia pari a 25mm, corrispondono a delle intensità variabili tra 2mm/h e 140mm/h all'interno del range di temperature operative del laboratorio (12-25°C). In merito ai diametri, l'ago da 25gauge risulta essere quello in grado di garantire la maggior dimensione delle gocce prodotte tra i modelli testati con un diametro medio di 2.43mm. La possibilità di incrementare tale diametro sino a 4.8mm attraverso l'applicazione di un copri-ago forato, garantisce gocce sufficientemente grandi da coprire pressoché l'intero range di pioggia generalmente misurata in natura, senza comportare modifiche alla portata effluente e di conseguenza all'intensità simulata al suolo. A seguito di tali considerazioni l'ago 25g-25mm risulta essere quello più adatto al setup sperimentale in progetto.

Il fenomeno di interazione tra goccia e differenti tipologie di filamento è stato analizzato nel dettaglio. L'impiego di una high speed camera ha permesso di osservare l'evoluzione dei fenomeni

d'interazione tra goccia e filamento al variare della distanza di caduta delle gocce. Le analisi hanno evidenziato una forte dipendenza dalla dimensione del filamento nonché dall'altezza di caduta delle gocce evidenziando una distanza di circa 5cm come altezza minima di caduta per l'attivazione dei fenomeni di rottura su di un filamento di 2mm di diametro.

Gli effetti di redistribuzione prodotti da una rete commerciale sono stati investigati impiegando un disdrometro ottico e un setup a piccola scala. Le analisi hanno evidenziato la presenza di due principali fenomeni: un fenomeno di rottura con formazione di gocce di diametro più piccolo e un fenomeno di accumulo d'acqua sulla rete con conseguente formazione di gocce di diametro proporzionale alla maglia della rete. Al crescere della distanza di caduta l'effetto di accumulo tende a ridursi a favore della rottura in gocce più piccole per via della maggior energia cinetica posseduta dalle gocce all'impatto. I risultati hanno evidenziato come la rete commerciale selezionata garantisca una redistribuzione delle gocce sull'intero spettro di pioggia reale (0-7mm) garantendo un buon controllo della pioggia prodotta.

Capitolo 4

Il Simulatore di Pioggia

In questo capitolo verranno descritte le fasi di progettazione, realizzazione e calibrazione di un simulatore di pioggia per applicazioni sperimentali su grande scala. Tale simulatore, come introdotto nel Capitolo 1, ha lo scopo di garantire la riproduzione fedele delle principali proprietà della pioggia naturale, quali: distribuzione dei diametri, energia cinetica e omogeneità spaziale sul più ampio range di intensità realizzabile in laboratorio.

4.1. Metodologia

4.1.1. Il setup sperimentale

Il simulatore di pioggia realizzato all'interno del laboratorio di idraulica "G.Bidone" del Politecnico di Torino, consiste in una torre con dimensioni in pianta di $4 \times 3.5 \text{m}^2$ e uno sviluppo in altezza di 10.70m. Una sua rappresentazione complessiva è riportata in Figura 34. Come per tutti i modelli sperimentali la scelta delle dimensioni del set-up deve garantire il raggiungimento degli scopi di ricerca,

rispettando però quelle che sono le limitazioni geometriche dell'ambiente in cui verrà realizzato. Nel caso in oggetto la principale limitazione è legata all'altezza del laboratorio e alla possibilità di movimentare gli elementi della torre durante le fasi di montaggio e smontaggio mediante carro ponte. L'altezza della torre è stata dunque vincolata in modo da garantire il passaggio del sistema di sollevamento senza produrre interferenze.

La torre è stata realizzata con una struttura a tralicci di alluminio denominata TRUSS System. Le travi e le colonne hanno una sezione $40 \times 40 \text{cm}^2$ costituita da tubolari principali di diametro 5cm e spessore 3mm (vedi Figura 35). Il reticolo secondario è costituito da tubolari di 2cm e spessore 2mm. Il sistema modulare a tralicci permette grande facilità di montaggio e smontaggio grazie ai sistemi di connessione rapidi e alla leggerezza degli elementi. La presenza in commercio di una vasta gamma di supporti e sistemi di ancoraggio garantisce un notevole vantaggio nella realizzazione del setup

La struttura complessiva schematizzata in Figura 36 è costituita da 3 piani, i primi realizzati con colonne da 3.5m mentre l'ultimo da 2.5m. Alla sommità di ciascun piano è presente un cordolo di irrigidimento realizzato con il medesimo sistema di travi che garantisce rigidità alla struttura e permette la connessione tra i piani intermedi, garantendo libertà e facilità di installazione di apparecchiature.

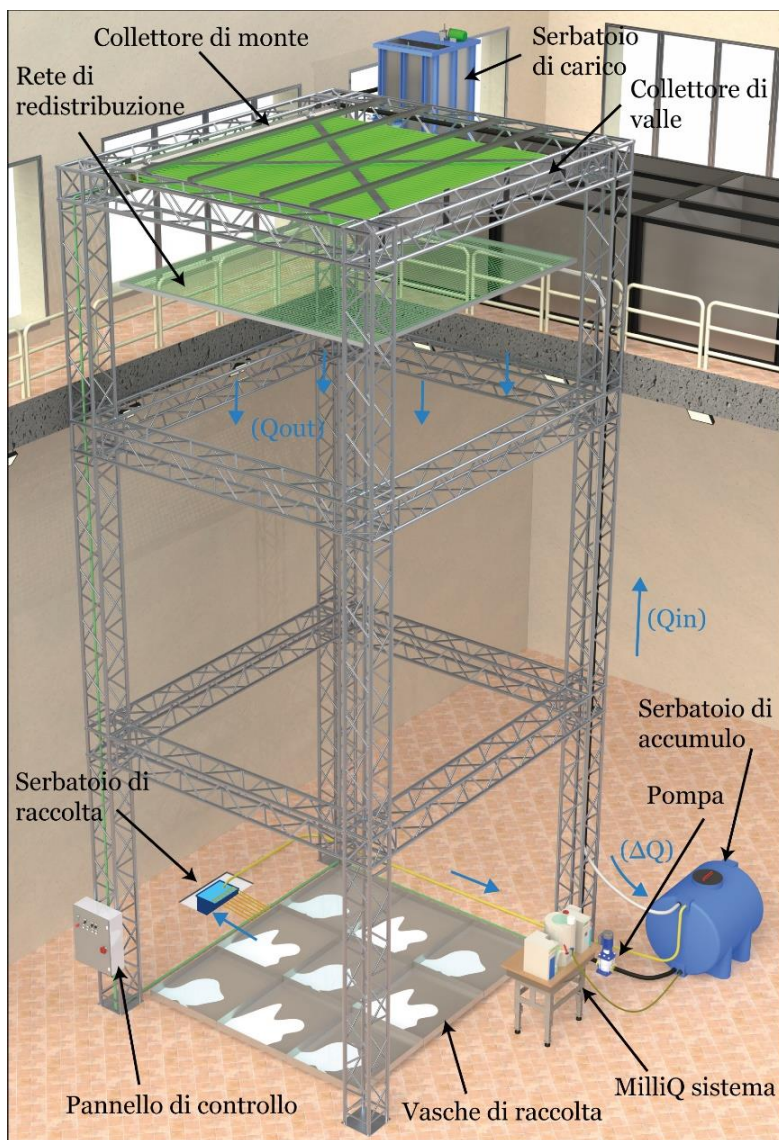


Figura 34: Rendering esemplificativo del simulatore di pioggia realizzato.



Figura 35: Immagine esemplificativa di una trave reticolare utilizzata nella realizzazione della torre.

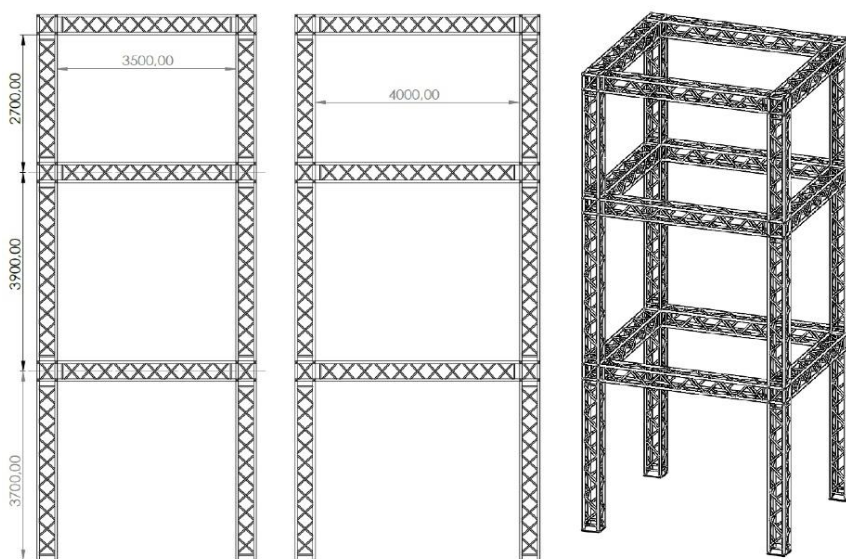


Figura 36: Rappresentazione sintetica del progetto-torre.

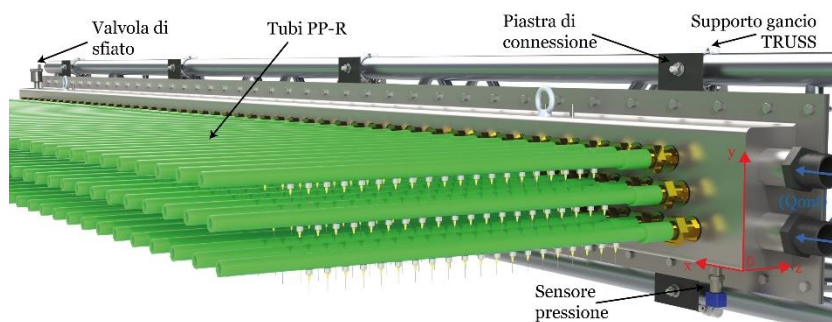


Figura 37: Rendering esemplificativo della struttura del modulo pioggia con vista di dettaglio del collettore di monte. Il sistema di riferimento impiegato per la definizione del carico d'acqua è inoltre riportato.

Il sistema di gocciolamento è costituito da due collettori $20 \times 10 \times 350 \text{ cm}^3$ in acciaio inox AISI304 connessi da una rete di 121 tubi PPR del diametro di 20mm e spessore 3mm. I tubi sono disposti su tre file ad una distanza verticale di 5cm tra ciascuna per permetterne l'installazione ravvicinata. Le file sono state disposte in modo da ottenere un interasse di 2.5cm tra ciascun tubo che forma il reticolo di gocciolamento (vedi Figura 37). Ciascun tubo è stato equipaggiato con 141 aghi ipodermici 25g-25mm installati su appositi supporti luer-lock ad un interasse costante di 2.5cm ottenendo così una densità complessiva di circa 1600 aghi/m^2 e un totale di 17000 aghi per l'intero sistema di gocciolamento. Uno strato di teflon garantisce la tenuta idraulica tra supporto e tubo evitando potenziali perdite e/o malfunzionamenti. Al fine di produrre un sufficiente numero di gocce di diametro superiore ai 2.5mm, gli aghi del piano inferiore di gocciolamento sono stati equipaggiati con dei copri-ago forati (vedi Figura 39). La scelta di optare per un sistema di gocciolamento è legata alla necessità di garantire un elevato range di intensità nonché un preciso controllo di quest'ultime, compito impossibile per un sistema in pressione. In aggiunta, tali sistemi tendono a generare gocce via via più piccole al crescere dell'intensità prodotta, in totale contrapposizione con quanto accade in natura.

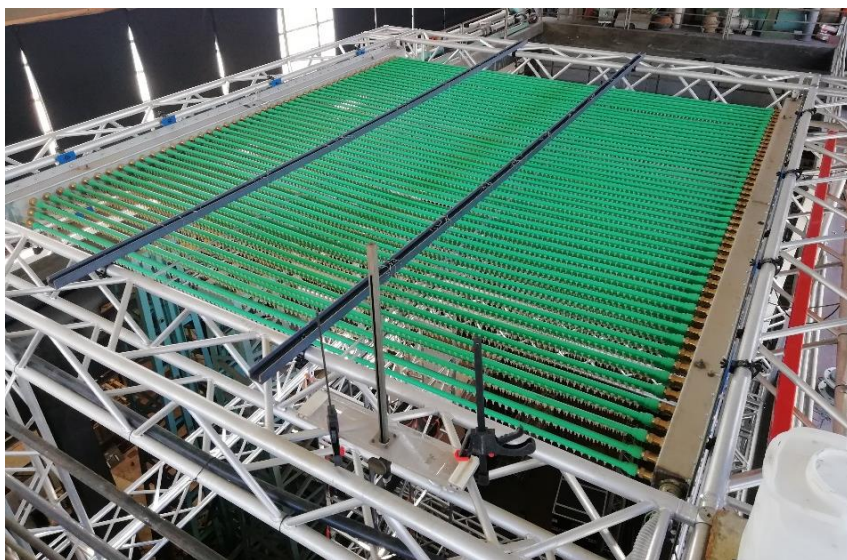


Figura 38: Vista dall'alto del modulo pioggia installato.



Figura 39: Piano inferiore di gocciolamento equipaggiato con sistema di copri-aghi.

Un serbatoio da 2m³ posto al suolo in prossimità della torre funge da volume di accumulo per l'alimentazione del sistema. Una pompa multistadio alimenta un serbatoio di carico da 0.9x1x1m³ posto in corrispondenza della sommità della torre con una portata costante pari a 45l/min. Il serbatoio di carico è equipaggiato con uno sfioratore a parete sottile di dimensione 45x45cm² e altezza 15cm connesso ad un sistema di sollevamento a vite gestito da un motore passo-passo (vedi Figura 40).

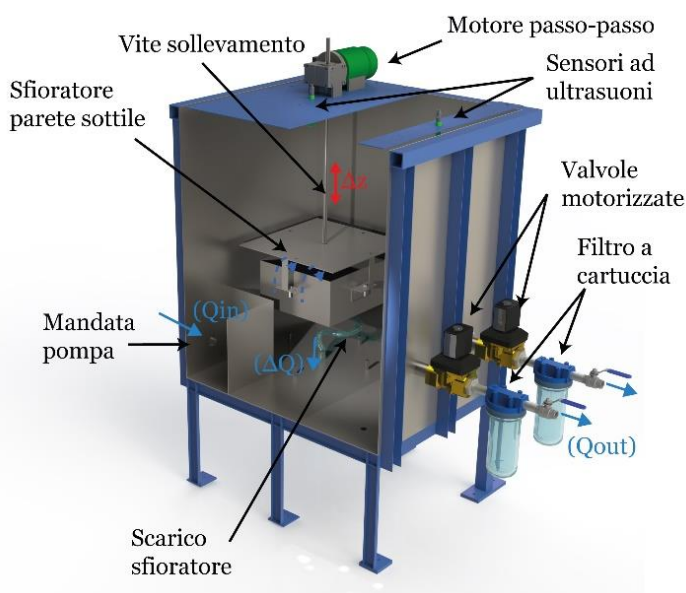


Figura 40: Rendering di una vista in sezione del serbatoio di carico.

Il sistema di controllo del livello nel serbatoio si basa sul principio di “parziale ricircolo delle portate in eccesso” secondo il quale:

$$\Delta Q = Q_{in} - Q_{out}, \quad (29)$$

in condizioni stazionarie con $dV/dt = 0$.

Definendo Q_{in} la portata in ingresso prodotta dalla pompa e Q_{out} la portata indirizzata verso il sistema di gocciolamento, ΔQ rappresenta la quota di portata da sfiorare e rimuovere al fine di mantenere costante il livello nel serbatoio. A tale scopo lo sfioratore ha il compito di convogliare la portata in eccesso e indirizzarla verso il serbatoio di terra. Un tubo spiralato di diametro 25mm collega lo scarico dello sfioratore ad uno scarico posto sul fondo del serbatoio (vedi Figura 40). Da qui un ulteriore tubo spiralato riporta l'acqua al serbatoio.

Lo sfioratore è stato appositamente dimensionato per essere in grado di derivare portate superiori a quelle attualmente in ingresso al sistema nell'ipotesi futura di impiegare differenti tipologie di aghi e portate in ingresso maggiori. L'equazione (30) riporta la formula impiegata per il dimensionamento di una bocca a stramazzo a parete sottile:

$$Q_s = \mu b \sqrt{2gh} h^{3/2} \quad (30)$$

dove, Q_s è la portata sfiorata, b è la larghezza dello sfioro, h è il carico a monte e μ è il coefficiente di efflusso definito come:

$$\mu = \left(0.405 + \frac{0.003}{h}\right) \left(1 + \frac{0.55 h^2}{H^2}\right) \quad (31)$$

con, H l'altezza complessiva a monte dello sfioro. Nel caso dello sfioratore, approssimando la larghezza "b" con il perimetro dello sfioratore si può facilmente constatare che lo sfioratore è in grado di derivare una portata ben superiore alla massima prodotta dalla pompa con un carico di soli 2cm:

$$Q_s = 0.56 \cdot 0.180 \sqrt{2 \cdot 9.81} \cdot 0.02^{\frac{3}{2}} = 75.6 \text{ l/min} \quad (32)$$

In modo analogo si può dimostrare che tale portata può essere trasportata al suolo dal tubo spiralato $\Phi 25\text{mm}$ applicando la formulazione di Colebrook-White:

$$Q_t = A_t \sqrt{\frac{2gDJ}{\lambda}}, \quad (33)$$

dove, A_t e D sono rispettivamente l'area e il diametro del tubo, J è la cadente piezometrica e λ è il coefficiente di resistenza adimensionale. Sostituendo in (33) le caratteristiche del tubo impiegato e nota la cadente piezometrica $J = 10/15 = 0.667$ si ricava:

$$\begin{aligned} Q_t &= \pi \cdot 0.0125^2 \sqrt{\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 0.025 \cdot 0.667}{0.035}} \\ &= 90.04 \text{ l/min} > Q_s \end{aligned} \quad (34)$$

Il sistema di sollevamento è in grado di garantire un'escursione massima di 50cm. La velocità di spostamento è di circa 10cm/min, garantendo un'elevata precisione nella scelta della quota dello sfioratore. Due valvole motorizzate regolano il flusso e mettono in comunicazione il serbatoio di carico con uno dei due collettori (vedi Figura 40). Un sistema di filtri a cartuccia posti sulla linea di adduzione al collettore filtra eventuali impurità depositatesi nel serbatoio rimuovendo tutte le particelle con diametri superiori ai $9\mu\text{m}$. La linea di mandata sul serbatoio di carico è stata appositamente posizionata ad una quota leggermente inferiore a quella del modulo di pioggia. In questo modo, abbassando lo sfioratore al di sotto di tale livello è

possibile svuotare rapidamente il sistema di gocciolamento al termine degli esperimenti. Due valvole di sfiato poste all'estremità dei collettori permettono la completa eliminazione dell'aria presente nel sistema durante le fasi di riempimento. La pressione all'interno del modulo di gocciolamento è monitorata da 6 sensori di pressione WIKA A-10 (vedi Figura 41), 3 per ciascun collettore, installati alla base del collettore stesso garantendo la misura del livello d'acqua all'interno del sistema in tutte le condizioni di carico.



Figura 41: Immagine di un sensore WIKA A-10 impiegato.

L'intero sistema è gestito elettricamente da quadro di controllo. Quest'ultimo è equipaggiato con una scheda d'acquisizione National Instrument c-RIO Connessa ad un desktop PC, che attraverso il software LabVIEW permette il monitoraggio di tutti i parametri del sistema nonché il controllo di tutti gli organi di movimento. Ai fini della sicurezza, qualora dovesse verificarsi un malfunzionamento nel sistema di controllo informatico, il setup può essere controllato in ogni momento anche per via manuale con appositi controlli installati sul pannello frontale del quadro.

Un telaio in ferro con dimensioni $3.3 \times 3.8 \text{m}^2$, dotato di un lato scorrevole (vedi Figura 42), permette l'installazione di differenti tipologie di rete e la loro messa in tensione. Un sistema di 4 pulegge e 4 argani ne permette il sollevamento nonché la precisa gestione della

distanza tra piano di gocciolamento e rete. La rete di redistribuzione ha il preciso scopo di intercettare le gocce in caduta interagendo con loro producendo una redistribuzione dei diametri sull'intero spettro di pioggia, generando una condizione di pioggia simile a quella reale in termini di distribuzione dei diametri. Come analizzato all'interno del Capitolo 3, l'interazione tra goccia e rete non ha il solo effetto di produrre una rottura delle gocce distribuendole nei diametri sottostanti a quello di partenza. L'accumulo di piccole particelle d'acqua sulla rete favorisce il distacco di gocce di dimensioni anche superiori a quelle originali permettendo di coprire l'intero range di diametri reali.

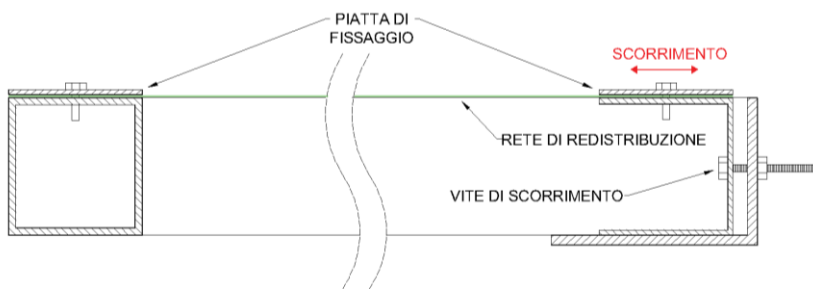


Figura 42: Sezione esemplificativa del telaio impiegato per l'installazione e messa in opera della rete di redistribuzione.

A terra nove vasche di raccolta da $1.1 \times 1.3 \text{ m}^2$ appositamente realizzate al fine di favorire il deflusso superficiale verso i punti di scarico permettono di raccogliere l'acqua al suolo agevolando lo svolgimento di analisi volumetriche ed eventuale campionamento delle acque precipitate. Tutte le vasche confluiscono in un successivo serbatoio di raccolta dotato di pompa sommersa con galleggiante che restituisce l'acqua al serbatoio di alimentazione del simulatore (Figura 34). Un ulteriore sistema di filtraggio a cartuccia posto sulla linea della pompa sommersa garantisce la pulizia dell'acqua restituita al sistema evitando potenziali rischi di intasamento degli aghi. Tutta l'acqua impiegata all'interno del simulatore è ottenuta da un sistema di ultrafiltrazione Milli-Q al fine di evitare fenomeni di ostruzione degli aghi.

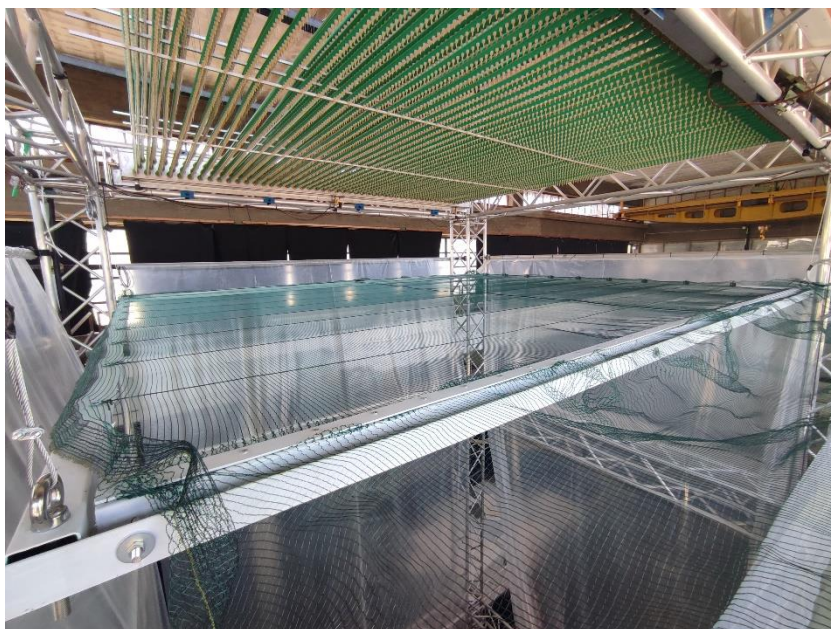


Figura 43: Rete di redistribuzione installata al di sotto del piano di gocciolamento.

4.1.2. Procedura di calibrazione

Le procedure di calibrazione sono state condotte allo scopo di caratterizzare con precisione la pioggia prodotta al suolo. I test possono essere suddivisi in due macrocategorie:

- test senza rete di redistribuzione;
- test con rete di redistribuzione.

Nel primo caso si è proceduto alla valutazione e verifica delle curve di simulazione previste per il sistema, alla definizione dell'uniformità spaziale e temporale della pioggia riprodotta e alla caratterizzazione della distribuzione dei diametri prodotti dal modulo pioggia nonché verifica delle reali velocità di caduta delle particelle generate. I test con rete di redistribuzione avevano invece lo scopo di

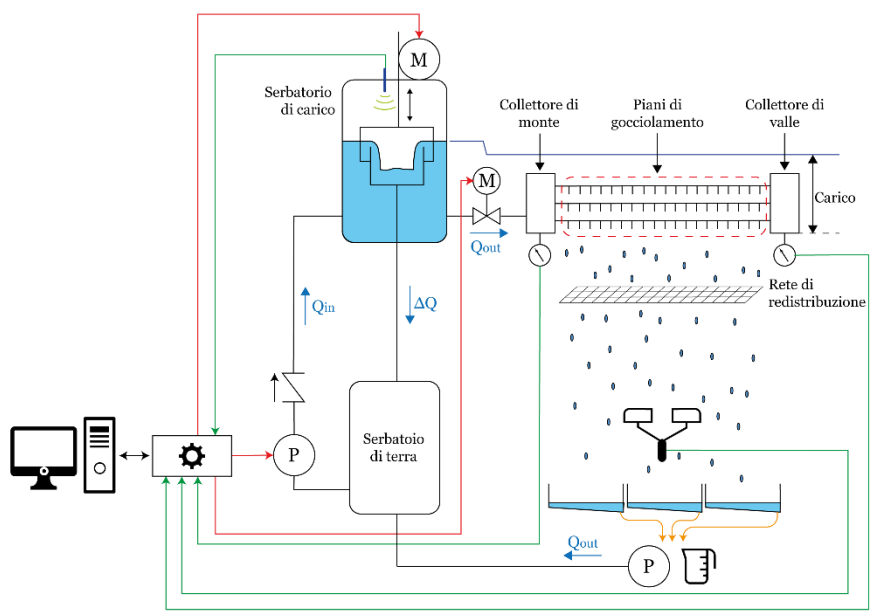
definire le proprietà della pioggia che raggiunge il suolo una volta intercettata e modificata dalla rete con particolare attenzione agli effetti di: dimensione della maglia e distanza tra rete e modulo pioggia. A tale scopo due differenti tipologie di rete sono state testate, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 15. La prima rete corrisponde a quella testata nello studio preliminare (vedi sezione 2.3.2) realizzata in materiale plastico ad alta densità (HDPE), presenta una maglia di $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ con fili di spessore 1mm producendo dunque una maglia vuota reale di $0.4 \times 0.4 \text{ cm}^2$ e un indice dei vuoti di 0.79. La seconda rete è invece realizzata in nylon intrecciato, presenta una maglia di $0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$ con fili di spessore 0.3mm, producendo dunque una maglia vuota reale di $0.77 \times 0.77 \text{ cm}^2$ e un indice dei vuoti di 0.96.

Tabella 15: Principali caratteristiche delle reti testate durante gli esperimenti.

Id	Materiale	Maglia nominale (cm)	Spessore filo (mm)	Maglia reale (cm)	IV¹
R1	HDPE	0.5	1	0.4	0.69
R2	Nylon	0.8	0.3	0.77	0.96

¹ Indice dei Vuoti

Uno schema sintetico e riassuntivo del funzionamento complessivo del setup è riportato in Figura 44. All'inizio di ciascun test, il sistema è in una condizione di quiete, il modulo pioggia è vuoto e le valvole sono chiuse, lo sfioratore è posto alla quota di fondo collettore e la pompa è spenta. Durante le operazioni di riempimento, la pompa viene accesa, le valvole aperte e il modulo pioggia viene gradualmente riempito incrementando la quota dello sfioratore fino alla completa eliminazione dell'aria all'interno del modulo favorita da una leggera inclinazione dei due collettori verso le valvole di sfiato.



LEGEND

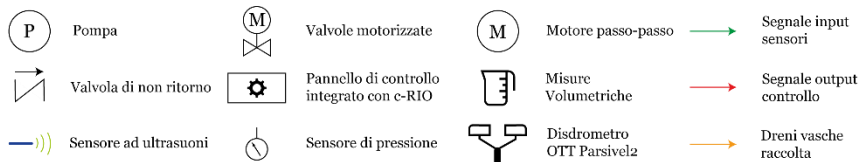


Figura 44: Schema funzionale del simulatore di pioggia.

Una volta raggiunte le condizioni stazionarie, evidenziate dall'attivazione dei piani di gocciolamento (Figura 45) e di tutti gli aghi coinvolti, si procede con l'avvio dei test. Al fine di evitare i transitori di avvio dei singoli aghi, la procedura viene svolta con un trend di decrescita dei carichi, partendo dal massimo carico previsto per la prova e diminuendolo gradualmente. Il livello d'acqua nel modulo pioggia è monitorato dai sensori di pressione permettendo di verificare l'effettivo raggiungimento delle condizioni stazionarie durante ciascuno step della prova. L'intensità di pioggia generata dal sistema così come la variabilità spaziale e il tasso di riproducibilità è misurata

al suolo mediante misure volumetriche condotte sulle nove vasche di raccolta a terra. La durata dei singoli step di misura è commisurata all'intensità prevista al suolo in modo tale da garantire la raccolta di un volume comparabile in tutte le prove. Durante ciascun test la temperatura ambientale e dell'acqua sono monitorate al fine di definire densità e viscosità dell'acqua, necessarie per il calcolo della portata Q^* secondo (17). Un disdrometro ottico (OTT HydroMet, Parsivel²), gemello di quello installato sul tetto del laboratorio misura la distribuzione delle particelle generate con una frequenza di aggiornamento di 60s. Una volta terminata la sessione di misure, lo sfioratore viene abbassato al di sotto della quota di fondo collettore favorendo lo svuotamento del modulo e interrompendo la produzione di pioggia. Siccome i test di calibrazione sono stati svolti prima dell'installazione del sistema di ricircolo delle acque, i carichi d'acqua impiegati negli esperimenti sono stati limitati ad un massimo di 24cm al fine di ridurre il consumo di acqua e assicurare lo svolgimento dell'intera sessione di misure.

Le analisi per la determinazione della distribuzione dei diametri di pioggia sono state svolte seguendo la procedura appena descritta per i test di calibrazione senza rete. I test hanno coinvolto due differenti tipologie di rete disposte a differenti distanze dal modulo pioggia.



Figura 45: Simulatore in azione durante gli esperimenti senza rete di redistribuzione.

4.1.3. Analisi dei dati

L'intensità di pioggia caduta al suolo per ciascun test è ricavata dalle misure volumetriche di ciascuna delle nove vasche di raccolta come segue:

$$i_i = \frac{V_i}{tA_v}, \quad (35)$$

dove, i_i e V_i sono rispettivamente l'intensità e il volume raccolto dell' i -esima vaschetta, t è la durata della misura e A_v è l'area della vaschetta. L'intensità della prova è poi ricavata come media delle misure:

$$\bar{i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i_i \quad (36)$$

Le singole intensità ricavate per ciascuna vaschetta sono state impiegate per determinare il coefficiente di uniformità spaziale di Christiansen [60] (UC), definito come segue:

$$UC = 100 \left(1 - \frac{\sum_1^n |i_i - \bar{i}|}{n\bar{i}} \right). \quad (37)$$

La distribuzione dei diametri di pioggia al suolo, così come le distribuzioni di diametri e velocità, sono state calcolate seguendo la procedura descritta nel Capitolo 2 (vedi sez. 3.1.2.). Le piogge simulate in ciascuna delle configurazioni sono state classificate seguendo quanto descritto in Tabella 3 e per ciascuna è stata ricavata una distribuzione media come descritto in (4).

4.2. Risultati

4.2.1. Simulazione senza rete di redistribuzione

Sulla base dei dati raccolti nei test preliminari condotti sul singolo ago (vedi Capitolo 2) e della configurazione geometrica del modulo di pioggia (vedi sez. 4.1.1) è possibile definire una curva di funzionamento prevista del sistema. Il contributo di ciascun piano di gocciolamento (p_i) è ottenuto dall'equazione (20). Per via della loro suddivisione su tre differenti livelli, l'area di interesse di ciascun ago è pari a $25 \times 75 \text{mm}^2$. Come evidenziato nell'equazione (38) la curva di sistema può essere dunque descritta come la somma dei successivi contributi dei singoli piani di gocciolamento. Quando l'acqua all'interno del modulo pioggia raggiunge la quota di attivazione dell' i -esimo piano (vedi Figura 46) quest'ultimo inizia a gocciolare contribuendo all'intensità complessiva al suolo. Tale attivazione concorre a generare un trend discontinuo nella curva di applicazione del sistema come evidenziato in Figura 47.

$$\begin{cases} i^* = p_1 & 5\text{cm} \leq h < 10\text{cm} \\ i^* = p_1 + p_2 & 10\text{cm} \leq h < 15\text{cm} \\ i^* = p_1 + p_2 + p_3 & 15\text{cm} \leq h \end{cases} \quad (38)$$

La Figura 47 mostra i risultati relativi alla relazione tra intensità misurata al suolo (i^*) e carico agente sul sistema. In figura sono riportati gli andamenti attesi (linee continue) descritti dall'equazione (38) come riferimento per i dati misurati (cerchi bianchi) ottenuti come descritto in (36).

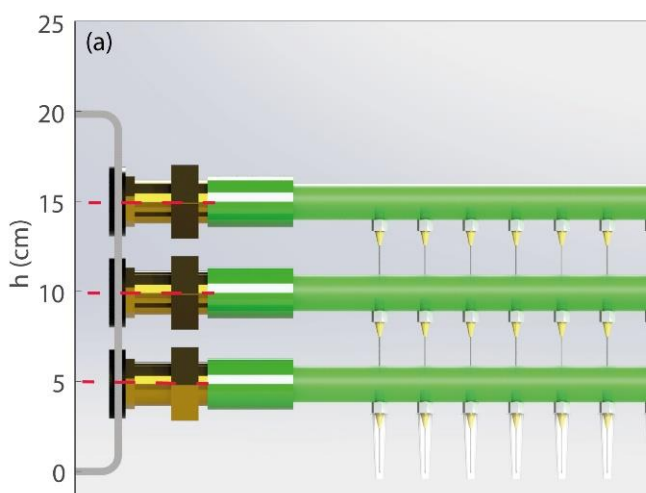


Figura 46: Vista in sezione del modulo pioggia. Le quote di attivazione di ciascun piano di gocciolamento sono evidenziate con una linea tratteggiata rossa. A sinistra, l'asse delle ordinate riporta le quote rispetto al sistema di riferimento già indicato in Figura 37.

Come si può notare, i risultati mostrano un'ottima coerenza tra valore atteso e intensità misurata al suolo. Si può altresì notare un andamento leggermente più smorzato, tendente ad una variazione lineare, in corrispondenza delle quote di attivazione dei singoli piani di gocciolamento. Tale comportamento è imputabile a potenziali imperfezioni geometriche dei piani di gocciolamento, attriti viscosi e forze di tensione superficiale che giocano un ruolo cruciale quando il carico d'acqua sul piano di gocciolamento è molto basso.

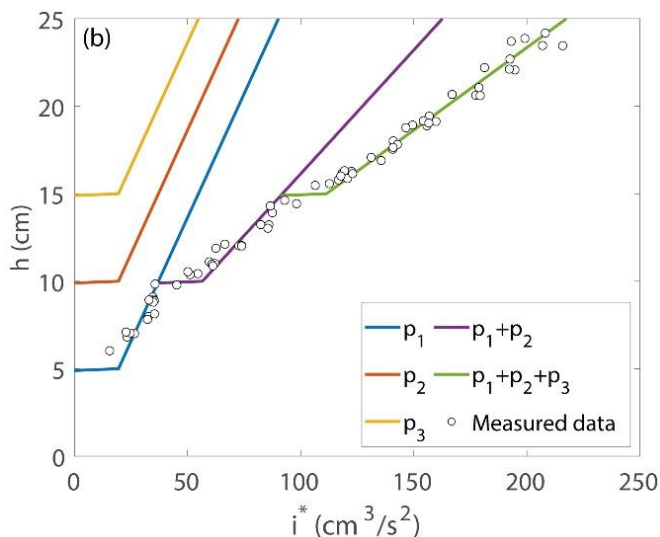


Figura 47: Intensità della pioggia simulata in funzione del carico d'acqua agente sul sistema. Le linee continue rappresentano le curve teoriche mentre i cerchi bianchi rappresentano i dati misurati al suolo. Le curve p_1, p_2, p_3 sono rispettivamente le curve teoriche per il piano di gocciolamento inferiore, medio e alto.

Il coefficiente di uniformità di Christiansen (UC) è stato definito per ciascuno dei 54 test basandosi sui volumi raccolti nelle nove vasche di raccolta al suolo come descritto dall'equazione (37). In accordo con la classificazione proposta dall'American Society of Agricultural Engineers [61], la pioggia simulata mostra un'eccellente uniformità spaziale, con valori di UC compresi tra 97.7% e 99.5% via via maggiori al crescere dell'intensità simulata come evidenziato in Figura 48. Questi risultati evidenziano un'elevata omogeneità spaziale, garantendo una riproduzione fedele e omogenea sull'intera area di simulazione.

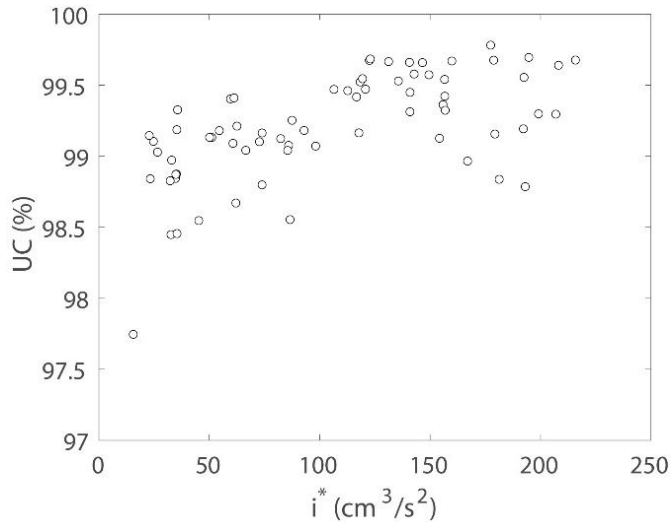


Figura 48: Coefficiente di uniformità di Christiansen in funzione dell'intensità simulata (i^*).

In Figura 49 sono mostrate le distribuzioni di diametri medie in volume ($\overline{DSD_V}$) prodotte dal simulatore di pioggia e calcolate come descritto in (5). Vista la limitazione dei carichi agenti imposta durante gli esperimenti (vedi sez. 4.1.2) solamente tre delle quattro classi descritte in Tabella 3 sono state simulate. Tale range di intensità può comunque essere esteso in futuro con ulteriori test condotti con carichi superiori ma non rappresenta al momento una particolare limitazione in quanto, come descritto nel Capitolo 2, gli eventi di pioggia torrenziale rappresentano una piccolissima percentuale degli eventi di pioggia locale. Le misure condotte dal disdrometro mostrano due diametri caratteristici che ben definiscono la distribuzione di pioggia prodotta dal simulatore. Si può facilmente notare come tali diametri corrispondano ai diametri prodotti dagli aghi selezionati per il setup sperimentale durante i test preliminari (vedi sez. 2.2). Al crescere dell'intensità simulata si evidenzia una variazione delle distribuzioni in volume tra i due diametri caratteristici del sistema. Questo fenomeno è dovuto alla successiva attivazione dei piani di gocciolamento con

conseguente variazione percentuale tra gocce di diametro maggiore ($\sim 4.5\text{mm}$) e diametro inferiore ($\sim 2.2\text{mm}$). Per piogge leggere, solamente la fila inferiore, equipaggiata con copri-ago forato, è attiva pertanto il volume è costituito principalmente da gocce di diametro maggiore. Al crescere dell'intensità si verifica l'attivazione dei piani superiori, privi di copri-ago forato, con conseguente aumento della percentuale di gocce di diametro inferiore. I risultati di questa analisi sono inoltre riassunti nella prima riga della Tabella 16 dove il diametro mediano in massa (d_{50}) è riportato come valore rappresentativo della distribuzione dei diametri di pioggia.

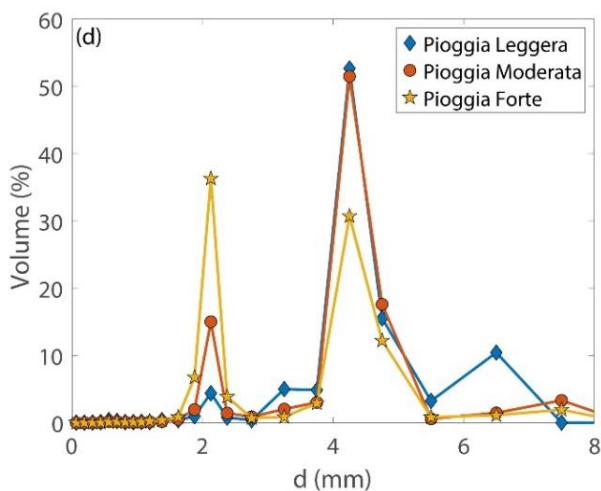


Figura 49: Distribuzione dei diametri di pioggia ($\overline{DSD_V}$) prodotta dal modulo pioggia per le tre classi di intensità simulate durante i test di calibrazione.

4.2.2. Simulazione con rete di redistribuzione

In questo paragrafo verranno presentati, descritti e commentati gli effetti di differenti reti di redistribuzione sulla distribuzione di diametri prodotta al suolo. La Tabella 16 riassume le caratteristiche e i principali risultati delle configurazioni testate. La prima riga riporta i risultati

ottenuti nella sezione precedente per la configurazione senza rete di redistribuzione. Tali risultati verranno impiegati come riferimento per valutare gli effetti della tipologia di rete impiegata e della sua distanza dal piano di gocciolamento.

Rete di redistribuzione R1

Come riassunto in Tabella 16, la presenza della rete di redistribuzione influenza in modo evidente la distribuzione dei diametri, riassunta dal parametro d_{50} . La presenza della rete di redistribuzione riduce drasticamente il diametro mediano della pioggia prodotta dal simulatore (prima riga della tabella) nonché l'energia cinetica al suolo. Nelle sei configurazioni testate (D1-D6), appare evidente un massimo locale in corrispondenza delle piogge moderate che si riduce al crescere della distanza tra rete e modulo pioggia sino a raggiungere una configurazione (R1-D6) in cui il diametro mediano risulta essere pressoché indipendente dall'intensità di pioggia prodotta. Il progressivo allontanamento della rete dal modulo di pioggia produce una riduzione del diametro mediano per tutte le classi di intensità simulate con una variazione pari a circa il 50% tra la configurazione con rete ravvicinata (D1) e quella a massima distanza (D6). Tale comportamento è imputabile all'incremento dell'energia cinetica posseduta dalle gocce al momento dell'impatto con la rete che ne favorisce la rottura in particelle più piccole. In Figura 50 sono riportate le distribuzioni dei diametri di pioggia prodotti dal simulatore con la rete di redistribuzione nelle configurazioni descritte in Tabella 16. Per facilitarne la lettura solamente quattro delle sei configurazioni sono riportate. I risultati mostrano come incrementando la distanza dal piano di gocciolamento, si produca una significativa riduzione percentuale di gocce con diametro superiore ai 2mm a favore di un incremento delle gocce con diametro ≤ 1 mm. In Figura 51 è invece riportato, per ciascuna configurazione testata, l'andamento delle distribuzioni di diametro al variare della classe di intensità. Come già mostrato in

Tabella 16, rispetto allo scenario di pioggia leggera, per ciascuna configurazione si evidenzia un incremento di gocce con diametro superiore ai 2.5-3mm per piogge moderate e forti. Una motivazione per tale fenomeno è stata trattata nella sezione 2.3 durante lo studio di interazione goccia-rete. Per piogge nel range di intensità 0-10mm/h (pioggia leggera e moderata), solamente il piano inferiore del modulo pioggia equipaggiato con i copri-aghi è attivo. Le gocce di 4.8mm prodotte dal piano tendono a rilasciare parte dell'acqua sulla rete durante l'impatto favorendo un fenomeno di accumulo d'acqua sulla rete stessa. Al crescere dell'intensità, il fenomeno di accumulo diviene via via più evidente favorendo il distacco di gocce con diametro superiore a 2.5mm (vedi Figura 52). Per intensità superiori a 10mm/h (pioggia forte), l'attivazione dei piani superiori introduce, invece, gocce di diametro inferiore (~2.5mm) che produrranno a loro volta gocce più piccole durante l'impatto con la rete. Allo stesso tempo, incrementando l'energia cinetica complessiva sulla rete di redistribuzione allontanando la rete dal piano di gocciolamento, il fenomeno di accumulazione e distacco di gocce grandi viene cancellato.

Tabella 16: Principali proprietà della pioggia simulata per le configurazioni testate con la rete R1. Il d_{50} indica il diametro mediano in volume della distribuzione mentre \overline{KE} rappresenta l'energia cinetica media della pioggia.

Test ID	Distanza Rete (cm)	d_{50} PL ¹ (mm)	d_{50} PM ² (mm)	d_{50} PF ³ (mm)	\overline{KE} PL ¹ (J/m²h⁻¹)	\overline{KE} PM ² (J/m²h⁻¹)	\overline{KE} PF ³ (J/m²h⁻¹)
NR ⁴	-	4.05	4.00	3.13	63.9	163.2	1594.9
R1 - D1	25	1.95	2.17	1.94	40.3	109.4	538.2
R1 - D2	50	2.13	2.16	1.86	50.2	107.5	536.3
R1 - D3	100	1.40	1.64	1.63	31.2	87.7	399.6
R1 - D4	200	1.15	1.27	1.22	24.7	71.3	271.4
R1 - D5	300	1.08	1.11	1.10	21.0	56.7	228.8
R1 - D6	400	1.01	1.02	1.03	20.2	51.0	202.5

¹ PL – Pioggia Leggera, ² PM – Pioggia Moderata, ³ PF – Pioggia Forte, ⁴ NR – No Rete

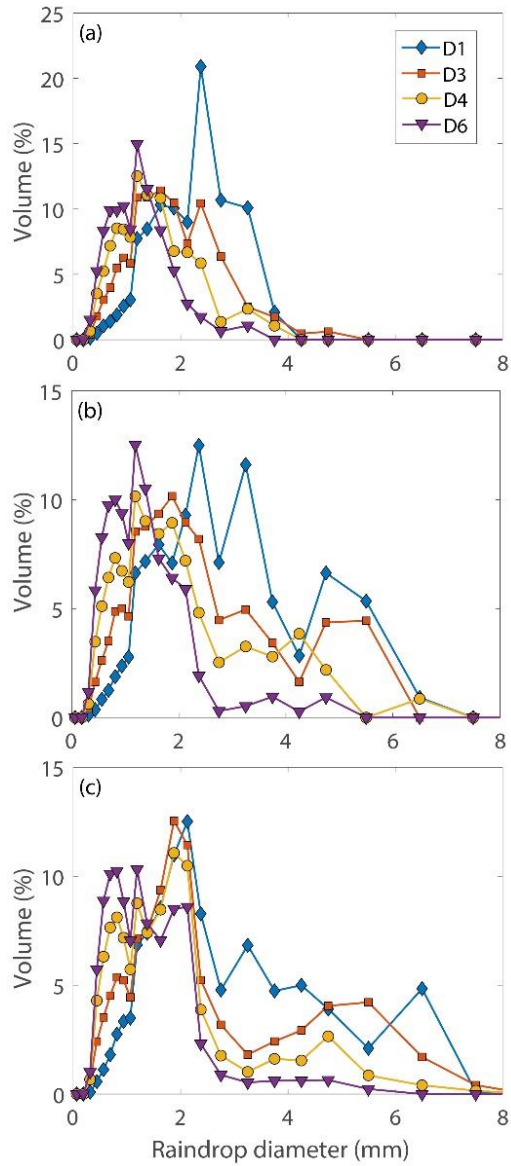


Figura 50: Distribuzione dei diametri di pioggia ($\overline{DSD_V}$) prodotta dalla rete di redistribuzione R1 per le tre classi di intensità: (a) pioggia leggera, (b) pioggia moderata e (c) pioggia forte.

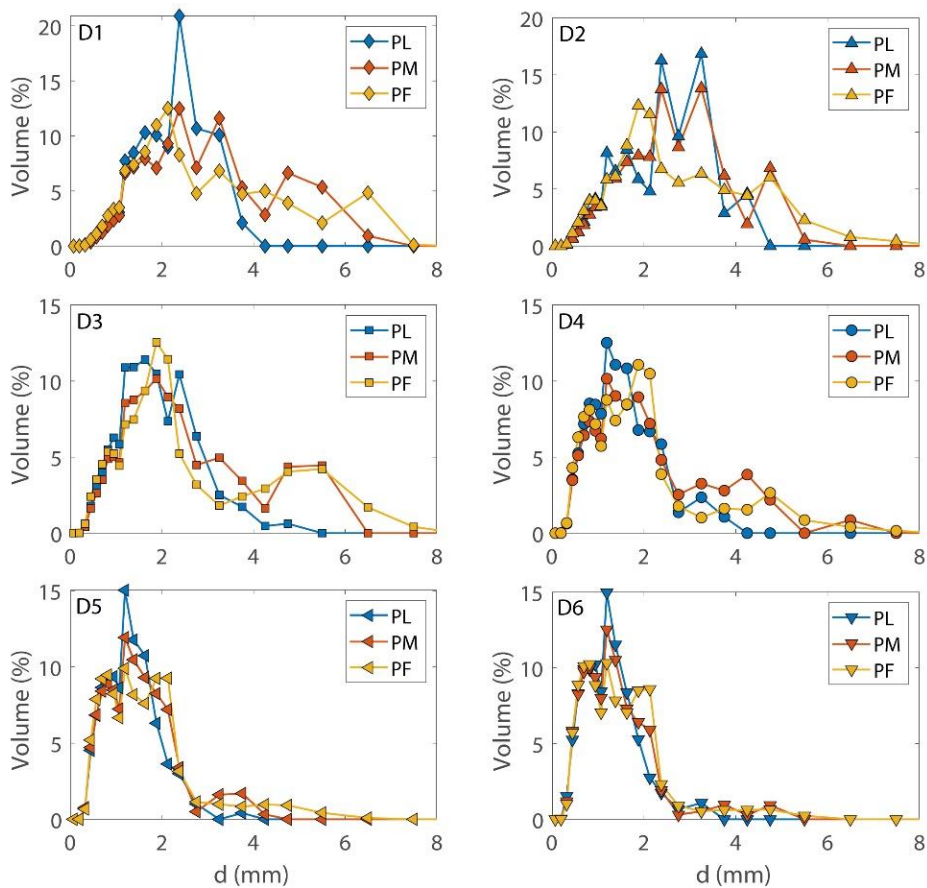


Figura 51: Distribuzione dei diametri di pioggia (\overline{DSD}_V) prodotta dalla rete di redistribuzione R1 per le differenti configurazioni testate (D1-D6) al variare dell'intensità di pioggia (PL – Pioggia Leggera, PM – Pioggia Moderata, PF – Pioggia Forte).

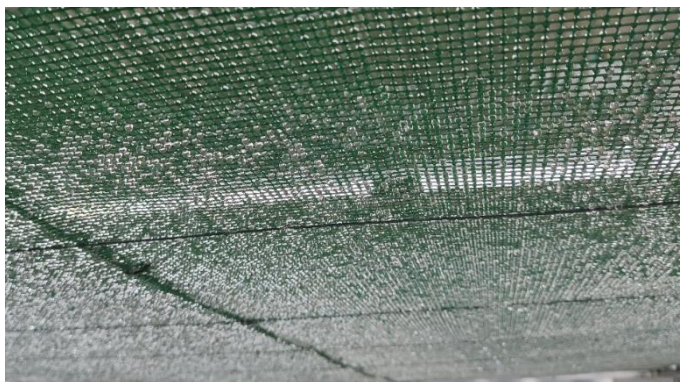


Figura 52: Fenomeno di accumulo e formazione di gocce sulla rete di redistribuzione.

Gli spettri di pioggia generata dal simulatore per le differenti configurazioni sono riportati in Figura 53. I risultati confermano come la quota del modulo pioggia permetta di raggiungere correttamente le velocità terminali attese per l'intero spettro di pioggia prodotto. Per ciascuna configurazione è inoltre riportato per completezza il d_{50} associato alla specifica configurazione e classe di intensità. Per quanto riguarda l'energia cinetica prodotta al suolo, essendo una grandezza strettamente correlata al d_{50} , anch'essa manifesta un comportamento analogo al diametro mediano al crescere della distanza tra rete e modulo pioggia con riduzioni superiori al 50% tra la configurazione D1 e D6. Analogamente a quanto fatto per la pioggia naturale nella sezione 3.2 (vedi Equazione (12)), in Figura 54 sono riportate le relazioni tra energia cinetica e intensità per ciascuna delle configurazioni testate. Per ciascuna è inoltre riportata la legge di potenza ($\overline{KE} = ki^p$) che meglio approssima i dati sperimentali. I risultati mostrano una progressiva riduzione dell'energia cinetica al crescere della distanza rete – modulo pioggia, evidenziata dalla riduzione del coefficiente “k”.

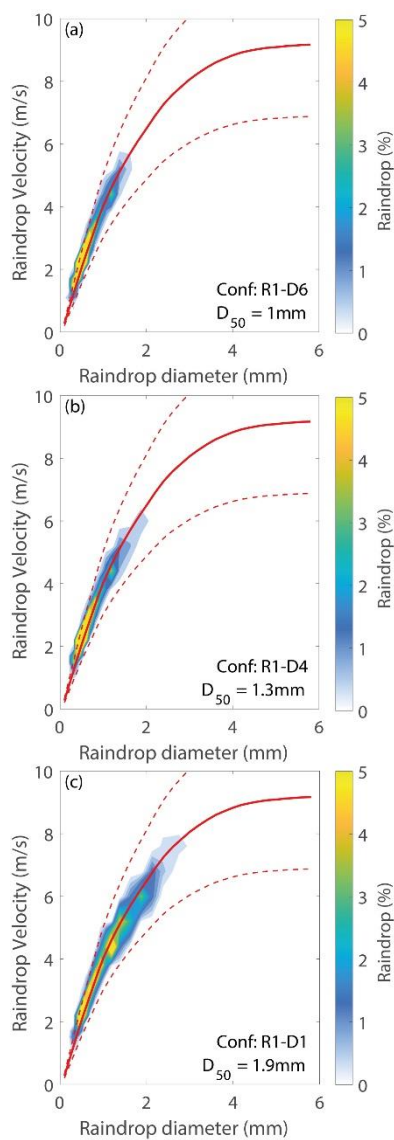


Figura 53: Spettri medi di pioggia simulata dalla rete R1 suddivisi nelle 3 classi di intensità: pioggia leggera (a), pioggia moderata (b) e pioggia forte (c). Lo spettro della configurazione che meglio approssima le condizioni naturali è mostrato per ciascuna delle tre classi di intensità.

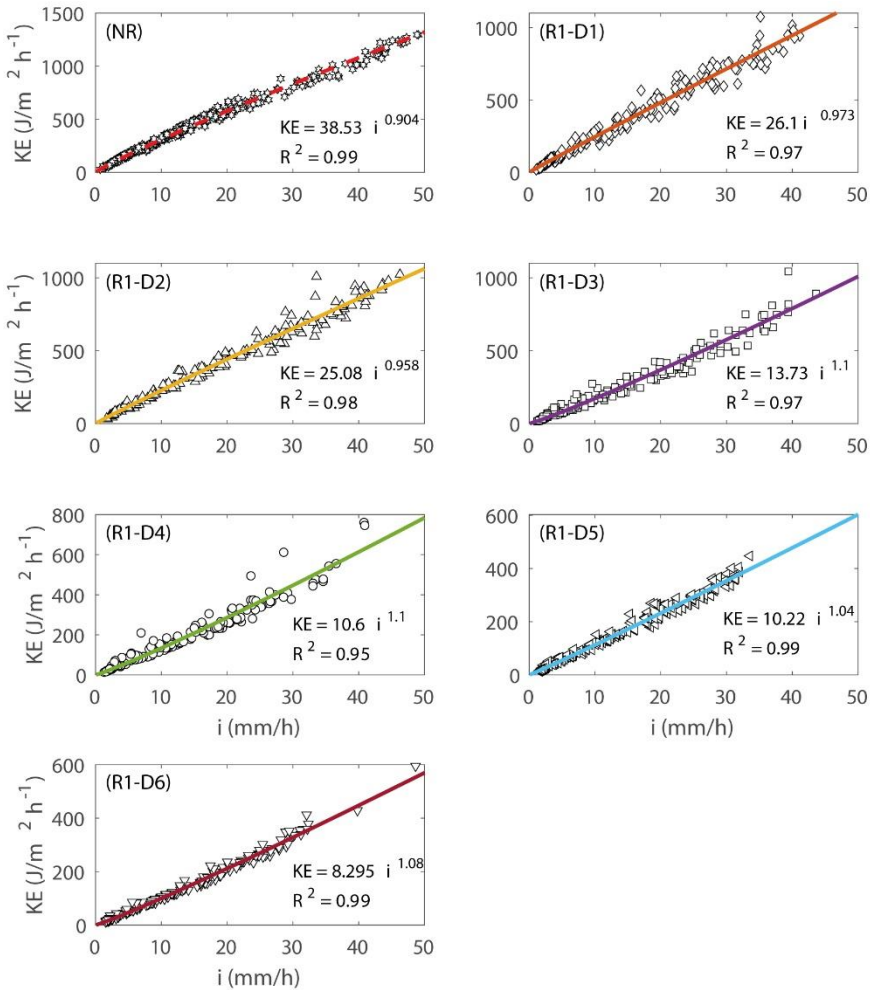


Figura 54: Relazione tra energia cinetica al suolo e intensità per ciascuna delle configurazioni della rete R1 testate. La legge di potenza che meglio approssima i dati sperimentali è inoltre riportata.

Rete di redistribuzione R2

Analogamente a quanto fatto per la rete di redistribuzione R1, in Tabella 17 sono riassunti i risultati per le configurazioni testate. La distribuzione dei diametri, riassunta dal parametro d_{50} , risulta esser influenzata dalla presenza della rete seppur in modo meno evidente della rete R1. Gli effetti sono comunque visibili sia sul diametro mediano della pioggia prodotta dal simulatore (prima riga della tabella) nonché sull'energia cinetica al suolo. In questo caso, visti gli effetti meno marcati della distanza tra rete e modulo pioggia, sono state testate solamente quattro configurazioni nel range 25-200cm.

Dai risultati si nota come il picco locale evidenziato per la rete R1 in corrispondenza della pioggia moderata non si verifichi per la rete R2. La natura geometrica della rete, dotata di una maglia reale di dimensione superiore ai 7mm e un filamento di soli 0.3mm, non permette infatti particolari fenomeni di accumulo in contrapposizione con quanto osservato per la rete R1. Il progressivo allontanamento della rete dal modulo di pioggia produce una riduzione del diametro mediano per tutte le classi di intensità simulate con una variazione pari a circa il 40% tra la configurazione con rete ravvicinata (D1) e quella a massima distanza (D4).

Tabella 17: Principali proprietà della pioggia simulata per le configurazioni testate con la rete R2. Il d_{50} indica il diametro mediano in volume della distribuzione mentre \overline{KE} rappresenta l'energia cinetica media della pioggia.

Test ID	Distanza Rete (cm)	d_{50} PL ¹ (mm)	d_{50} PM ² (mm)	d_{50} PF ³ (mm)	\overline{KE} PL ¹ (J/m²h⁻¹)	\overline{KE} PM ² (J/m²h⁻¹)	\overline{KE} PF ³ (J/m²h⁻¹)
NR ⁴	-	4.05	4.00	3.13	63.9	163.2	1594.9
R2 - D1	25	3.79	3.78	2.42	69.5	147.5	475.7
R2 - D2	50	2.69	2.28	2.00	48.6	129.3	391.9
R2 - D3	100	2.33	2.38	1.99	43.7	119.2	408.4
R2 - D4	200	2.23	2.24	1.94	38.0	113.8	346.2

¹ PL – Pioggia Leggera, ² PM – Pioggia Moderata, ³ PF – Pioggia Forte, ⁴ NR – No Rete

In Figura 55 sono riportate le distribuzioni dei diametri di pioggia prodotti dal simulatore con la rete di redistribuzione nelle configurazioni descritte in Tabella 17. La distribuzione della pioggia prodotta dal modulo di pioggia è inoltre riportata per completezza. I risultati mostrano come incrementando la distanza dal piano di gocciolamento, si produca una significativa riduzione percentuale di gocce con diametro superiore ai 4mm a favore di un incremento delle gocce con diametro inferiore. Si può inoltre notare facilmente come la configurazione D1 conservi pressoché inalterata la concentrazione delle gocce prodotte dal piano di gocciolamento inferiore, distribuendone solamente una minima percentuale su diametri inferiori. Per tutte le configurazioni si conservano piuttosto chiaramente i due picchi corrispondenti alla pioggia prodotta dal simulatore a testimonianza del fatto che il maggior indice dei vuoti, unito alle ridotte dimensioni del filamento, producono un evidente riduzione nel numero di gocce intercettate dalla rete. In Figura 56 è invece riportato, per ciascuna configurazione testata, l'andamento delle distribuzioni di diametro al variare della classe di intensità. Come già mostrato in Tabella 17, rispetto allo scenario di pioggia leggera, per le prime due configurazioni si evidenzia una riduzione delle gocce prodotte dal primo piano di gocciolamento e un progressivo aumento delle gocce nel range 1-3mm per piogge moderate e forti. Per le restanti configurazioni (D3-D4) si evidenzia invece una inversione di tendenza con un'iniziale incremento delle gocce di diametro 4mm per piogge moderate e una successiva riduzione per piogge forti.

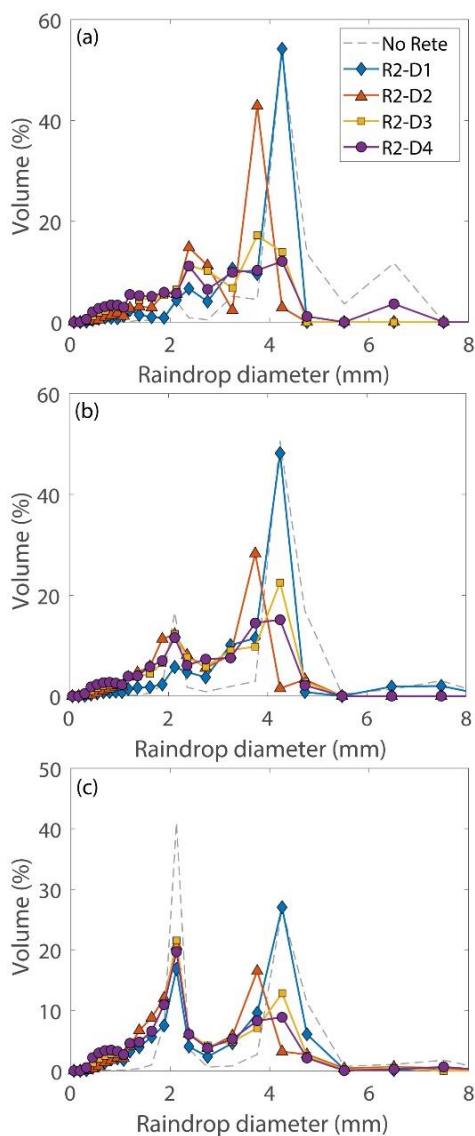


Figura 55: Distribuzione dei diametri di pioggia (\overline{DSD}_V) prodotta dalla rete di redistribuzione R2 per le tre classi di intensità: (a) pioggia leggera, (b) pioggia moderata e (c) pioggia forte. La distribuzione della pioggia senza rete è inoltre riportata come confronto.

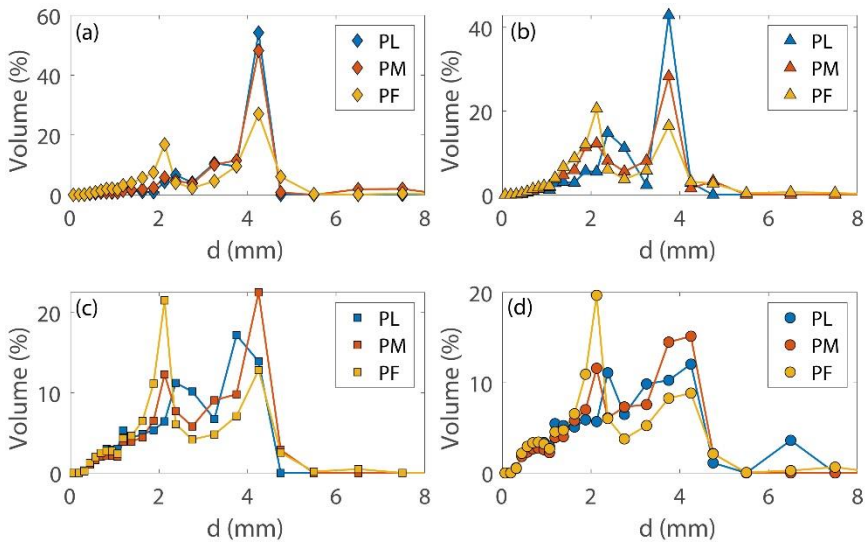


Figura 56: Distribuzione dei diametri di pioggia (\overline{DSD}_V) prodotta dalla rete di redistribuzione R2 per le differenti configurazioni testate (D1-D6) al variare dell'intensità di pioggia (PL – Pioggia Leggera, PM – Pioggia Moderata, PF – Pioggia Forte).

Un'ulteriore considerazione che si può trarre dai dati è che la distribuzione dei diametri di pioggia nel range 0-1.5mm risulti pressoché indipendente dall'intensità prodotta. Ciò implica che la progressiva attivazione dei piani di gocciolamento che producono gocce di 2.4mm non abbia impatto su questa parte di distribuzione ossia che la rete risulti pressoché “trasparente” alle gocce di tale diametro. Gli spettri di pioggia generata dal simulatore per le differenti configurazioni sono riportati in Figura 57. Come per la rete R1, anche in questo caso i risultati confermano come la quota del modulo pioggia permetta di raggiungere correttamente le velocità terminali attese per l'intero spettro di pioggia prodotto. Per ciascuna configurazione è inoltre riportato per completezza il d_{50} associato alla specifica configurazione e classe di intensità.

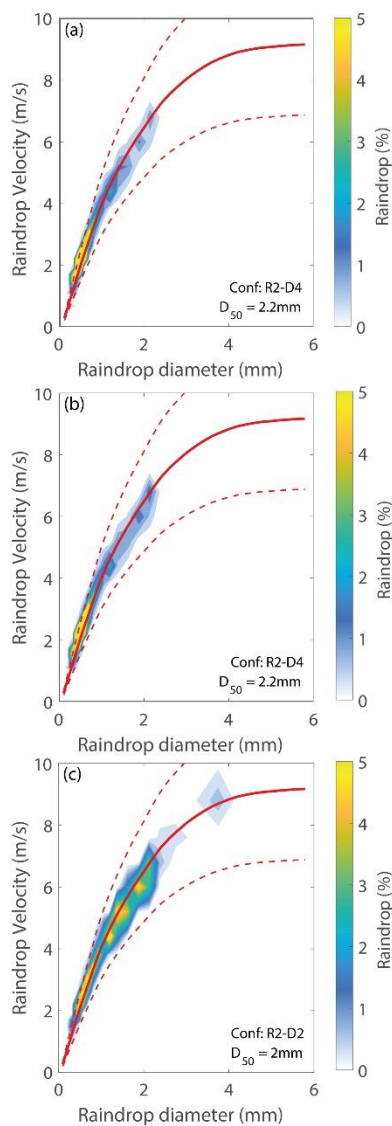


Figura 57: Spettri medi di pioggia simulata dalla rete R2 suddivisi nelle 3 classi di intensità: pioggia leggera (a), pioggia moderata (b) e pioggia forte (c). Lo spettro della configurazione che meglio approssima le condizioni naturali è mostrato per ciascuna delle tre classi di intensità.

Per quanto riguarda l'energia cinetica prodotta al suolo anch'essa manifesta un comportamento analogo al diametro medio al crescere della distanza tra rete e modulo pioggia con riduzioni pari a circa il 40% tra la configurazione D1 e D4. Come fatto per la rete R1, in Figura 58 sono riportate le relazioni tra energia cinetica e intensità delle configurazioni testate. Per ciascuna è inoltre riportata la legge di potenza ($\overline{KE} = ki^p$) che meglio approssima i dati sperimentali.

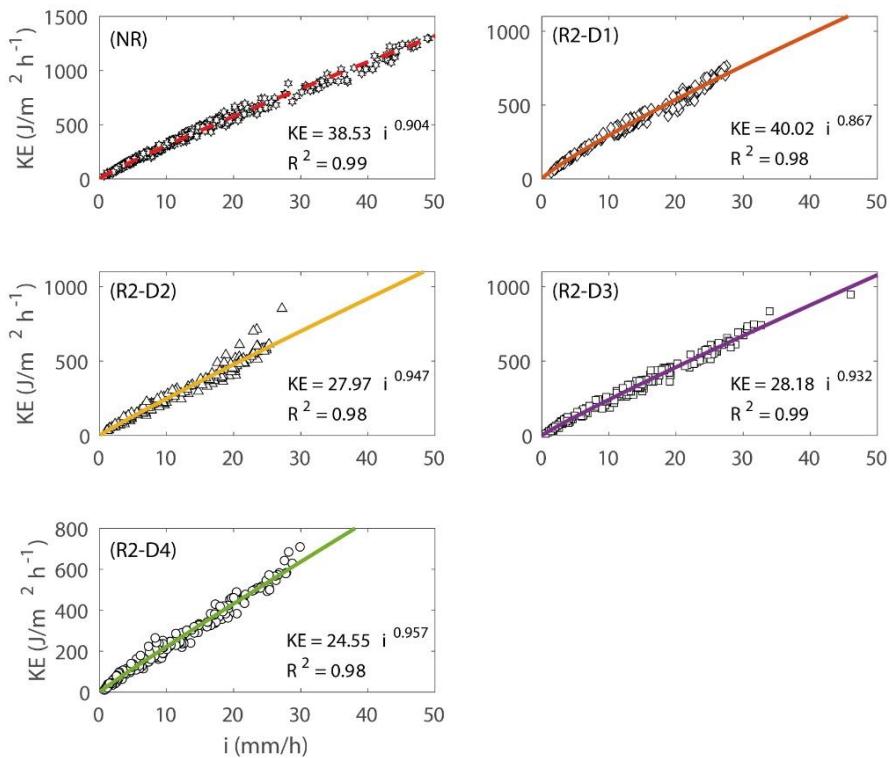


Figura 58: Relazione tra energia cinetica al suolo e intensità per ciascuna delle configurazioni testate della rete R2. La legge di potenza che meglio approssima i dati sperimentali è inoltre riportata.

Sulla base dei dati raccolti appare evidente che la rete R1 sia quella più adatta alla riproduzione delle proprietà di pioggia naturale, garantendo una maggior omogeneità e un maggior controllo dei parametri al variare di distanza e intensità di pioggia simulata.

4.2.3. Confronto tra pioggia simulata e pioggia naturale

Ai fini di validare e definire le potenzialità simulative del setup presentato, si è proceduto con un confronto tra i dati raccolti della pioggia naturale, descritti nel Capitolo 3 e i risultati del simulatore. L'uniformità spaziale raggiunta dalla pioggia simulata si attesta tra 97% e 99%. Tali valori risultano addirittura più alti di quelli riportati in letteratura per la pioggia naturale [62], garantendo dunque la riproduzione fedele delle intensità di pioggia su tutta l'area bagnata.

Per quanto concerne le proprietà della pioggia, un confronto, per ciascuna classe di intensità simulate, tra la curva di distribuzione dei diametri naturali e la sua migliore approssimazione ottenuta in laboratorio è presentata in Figura 59. Come si può notare, i risultati mostrano che le distribuzioni prodotte dalla rete di redistribuzione R1 sono piuttosto soddisfacenti. Sebbene ci siano delle discrepanze, le distribuzioni mostrano dei trend simili, come evidenziato dai valori di d_{50} riassunti in Tabella 16. Per le piogge leggere si nota un'ottima riproduzione con una leggera differenza tra i due picchi delle distribuzioni nel range 1-1.5mm.

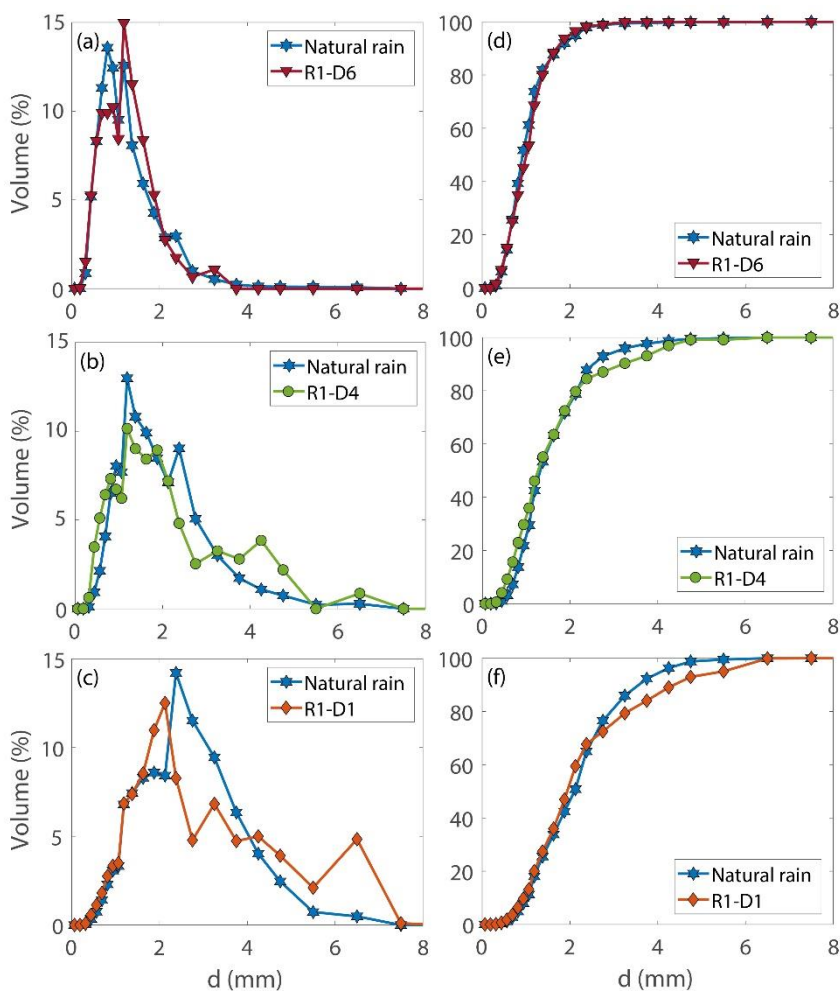


Figura 59: Confronto delle distribuzioni di diametri di pioggia naturale (PN) e simulata in termini di pdf (a),(b),(c) e cdf (d),(e),(f). Per ciascun plot è riportata la configurazione che meglio approssima i risultati naturali. (a-d) Pioggia leggera, (b-e) Pioggia Moderata e (c-f) Pioggia Forte.

Per le piogge moderate la riproduzione è buona, con una leggera discrepanza nel range 2-5mm data da un leggero deficit di pioggia simulata nel range 2.3-3.2mm ed un surplus nel range 3.2-5mm. Per concludere, la distribuzione relativa alla pioggia forte, è quella che

presenta la maggior differenza dalla pioggia naturale con un gap abbastanza evidente per diametri superiori ai 2.3mm. In particolare, si nota facilmente una sottostima del volume nel range 2.3-4mm compensata poi da una sovrastima per diametri tra 4mm e 8mm.

Tabella 18: Confronto tra i risultati ottenuti per la pioggia naturale e la sua miglior simulazione in laboratorio.

Pioggia	d₅₀ PN¹ (mm)	d₅₀ PS² (mm)
Leggera	0.92	1.01
Moderata	1.30	1.27
Forte	2.10	1.94

¹ PN – Pioggia Naturale, ² PS – Pioggia Simulata

Analogamente a quanto fatto per la distribuzione dei diametri, anche per quanto riguarda l'energia cinetica della pioggia simulata, in Figura 60 è mostrato un confronto tra le curve empiriche $\overline{KE} - i$ per pioggia naturale (vedi equazione (12)) e pioggia simulata dalla rete R1. Come si può notare, il sistema è in grado di garantire una corretta simulazione della relazione “Energia cinetica – intensità” sino ad intensità di circa 30mm/h. Superato tale valore gli effetti della rete di redistribuzione divengono evidenti per via del ridotto numero di gocce di grande diametro che possono raggiungere il suolo. Tale affermazione trova conferma nella curva relativa alla configurazione senza rete di redistribuzione che mostra sempre valori di KE superiori a quelli della pioggia naturale lungo tutto il range di intensità analizzato. Nei fenomeni naturali al crescere dell'intensità si verifica un altrettanto evidente aumento nel numero delle gocce grandi [27,47], tale fenomeno risulta invece essere vincolato e limitato dalla dimensione della maglia della rete impiegata all'interno del simulatore. Gli spettri di pioggia riportati in Figura 53 mostrano tuttavia un comportamento comparabile a quelli mostrati in Figura 9,

confermando la capacità di garantire il raggiungimento di velocità prossime a quella terminale per tutte le classi di diametro prodotte.

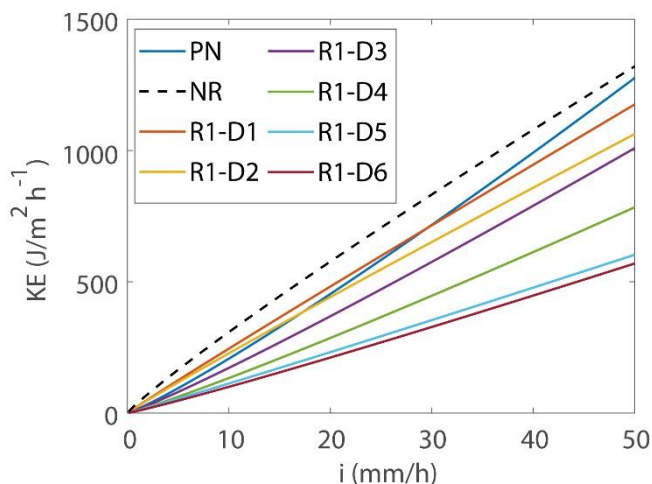


Figura 60: Confronto delle differenti relazioni empiriche KE-i tra pioggia simulata e pioggia naturale (PN). In figura è riportata anche la configurazione senza rete di redistribuzione (NR).

4.3. Discussioni

La corretta simulazione di energia cinetica e distribuzione dei diametri, nonché l'omogeneità spaziale dei risultati, sono elementi indispensabili nello sviluppo di un simulatore di pioggia. Il setup presentato in questo lavoro di tesi ha mostrato un'elevata omogeneità spaziale per l'intero range di intensità simulate. Grazie all'implementazione di un sistema di ricircolo e filtraggio delle acque precipitate, il simulatore può operare per lunghi periodi di tempo permettendo di simulare fenomeni di lunga esposizione. Il sistema di controllo del livello nel serbatoio di carico presentato in questo studio garantisce inoltre un'elevata omogeneità temporale permettendo di mantenere un carico costante all'interno del serbatoio per un desiderato periodo di tempo. La presenza di formatori ad ago specificatamente

selezionati unitamente al sistema di controllo del livello in serbatoio, garantisce un significativo vantaggio in termini di controllo delle intensità simulate rispetto ad altri sistemi presenti in letteratura [1,32,63], permettendo di simulare un vasto range di intensità con incrementi di 0.3mm/h circa. In aggiunta, la possibilità di automatizzare gli spostamenti dello sfioratore all'interno del serbatoio garantisce una grande flessibilità permettendo di seguire dei pattern desiderati alternando piogge forti a piogge leggere ma anche seguire uno specifico pattern per riprodurre un evento naturale registrato. Il posizionamento di una rete di redistribuzione al di sotto del modulo pioggia garantisce un'ottima riproduzione delle principali proprietà della pioggia naturale. In particolare, la rete R1 è risultata essere la più adatta tra quelle testate per garantire la miglior riproduzione dei fenomeni naturali.

Il simulatore presentato in questo studio è per certo uno dei più grandi presenti in letteratura. Altri setup presentano superfici di simulazione più grandi [3,32,34] o altezze di caduta maggiori [22] ma nessuno presenta queste due caratteristiche in contemporanea, rendendo di fatto questo sistema uno strumento di ricerca unico nel suo genere. In riguardo all'energia cinetica, questo setup può riprodurre fedelmente piogge con intensità sino a 30mm/h, garantendo una corretta relazione energia-intensità. Al di sopra di queste intensità, la presenza di una rete di redistribuzione limita il numero di gocce di grandi dimensioni. Tuttavia, tale discrepanza non risulta in realtà in un'effettiva limitazione in quanto è comunque possibile simulare gli effetti di intensità superiori a tale limite semplicemente incrementando l'intensità simulata sino a raggiungere i valori di energia cinetica desiderati.

Per concludere, inoltre, l'impiego di sistemi all'avanguardia per la misura delle distribuzioni di diametri della pioggia rispetto a sistemi manuali tipo il metodo dei pallet di farina [64], garantisce una misura

accurata e precisa permettendo di confrontare i risultati ottenuti dalle due piogge (naturale e simulata), ottenendo una precisa calibrazione del setup.

4.4. Conclusioni

In questo capitolo è stato presentato il progetto e la calibrazione di un simulatore di pioggia di laboratorio su grande scala. Il setup presentato consiste in rete di redistribuzione sospesa al di sotto di un modulo pioggia alla sommità di una torre di $3.5 \times 4 \times 10.7 \text{m}^3$ alimentato da un serbatoio di carico dotato di un sistema motorizzato per il controllo dei carichi nel sistema. La simulazione della pioggia è garantita dalla presenza di 17000 aghi (25g-25mm) disposti ad un interasse costante di 25mm l'uno dall'altro. La calibrazione del sistema è stata condotta sulla base dei dati di pioggia naturale raccolti durante una campagna di misura durata 24 mesi e tutt'ora in corso. Differenti distanze tra la rete di redistribuzione e modulo pioggia sono state investigate al fine di individuare la configurazione in grado di replicare fedelmente le condizioni naturali per tre differenti classi di intensità. Le analisi si sono soffermate sulla simulazione delle intensità, dell'energia cinetica, della distribuzione dei diametri e della omogeneità spaziale e temporale.

I risultati presentati in questo studio mostrano che il simulatore di pioggia sviluppato rappresenta uno strumento di ricerca unico e particolarmente versatile grazie alle sue caratteristiche chiave che possono essere riassunte come segue:

- Riproduzione di un vasto range di intensità con un'elevata precisione sull'intensità prodotta garantendo incrementi di 0.3mm/h circa;
- Differenti formatori di gocce costituiti da aghi ipodermici (25g-25mm) e aghi accoppiati a copri-aggi cavi permettono la

produzione di gocce di 2.4mm e 4.8mm di diametro mantenendo invariato la portata effluente dagli iniettori;

- Elevata omogeneità spaziale sull'area bagnata grazie all'elevata densità di formatori di gocce, che permette di coprire un'area complessiva di 14m²;
- Ottima riproduzione delle distribuzioni di diametri della pioggia naturale modificando la distanza tra la rete di redistribuzione e il modulo pioggia;
- Elevata omogeneità temporale grazie al sistema di controllo dei carichi installato all'interno del serbatoio di carico.

Grazie alle sue caratteristiche uniche questo sistema può essere impiegato nello studio dei fenomeni di erosione dei suoli, ruscellamento e dilavamento urbano su una vasta scala con un elevato grado di precisione. In aggiunta, la possibilità di riprodurre specifiche piogge per lunghi periodi di tempo con un'elevata omogeneità temporale fornisce opportunità per numerose applicazioni nello studio accelerato degli effetti chimici e fisici sulle proprietà di suoli, pavimentazioni, materiali e superfici. La capacità di simulare fedelmente le proprietà della pioggia su un ampio range di intensità apre la strada a innumerevoli applicazioni specifiche come, per esempio, la calibrazione e i test di strumentazioni di misura delle precipitazioni e prototipi sperimentali di nuova concezione.

Capitolo 5

Conclusioni e Futuri Sviluppi

5.1. Conclusioni

Questo lavoro di tesi aveva lo scopo di descrivere nel dettaglio la realizzazione e la precisa calibrazione di un simulatore di pioggia su grande scala in grado di riprodurre fedelmente la pioggia naturale sia in termini di intensità attesa al suolo sia in termini di distribuzione dei diametri e di energia cinetica al suolo. A tale scopo il lavoro di tesi si è sviluppato attorno a quattro principali obiettivi di ricerca.

In primis vi era l'obiettivo di progettare e realizzare un setup sperimentale in grado di replicare la pioggia naturale. All'interno del Capitolo 2, un primo setup sperimentale a piccola è stato realizzato per le analisi preliminari indispensabili per l'individuazione della tipologia di iniettori più adatta al simulatore di pioggia in progetto. Tecniche di analisi delle immagini, high speed imaging e analisi volumetriche hanno garantito una misura robusta e precisa delle dimensioni delle gocce prodotte dagli aghi nonché della loro velocità di caduta al suolo. La definizione di una relazione tra portata e carico agente, indipendente

dalla temperatura dell'acqua è stata proposta e validata. L'interazione tra goccia e rete è stata analizzata su di un piccolo setup equipaggiato con disdrometro e high speed camera. Tutti i dati raccolti in questo studio preliminare sono stati impiegati in fase progettuale per la progettazione del simulatore di pioggia. All'interno del Capitolo 4 è presentato nel dettaglio tale progetto. Il sistema è costituito da una torre di 3.5m x 4m x 10.4m equipaggiata con un modulo pioggia composto da 17000 aghi e una rete di redistribuzione sospesa al di sotto di quest'ultimo. Un sistema di regolazione automatizzato dei carichi agenti sul sistema garantisce il controllo dell'intensità prodotta dal sistema garantendo un range di simulazione da 0mm/h a più di 100mm/h.

Il secondo obiettivo di ricerca era quello di misurare e quantificare correttamente le caratteristiche della pioggia prodotta dal simulatore. Le analisi volumetriche, unitamente alle misure dirette mediante disdrometro ottico hanno permesso di monitorare nel dettaglio intensità, omogeneità spaziale e temporale nonché gli spettri di pioggia prodotti. I risultati hanno confermato la coerenza della relazione portata-carico individuata nel Capitolo 2 permettendo di definire una curva di calibrazione del sistema univoca.

Il terzo obiettivo era quello di quantificare le principali caratteristiche della pioggia naturale a scala locale categorizzandole per differenti tipologie di pioggia. All'interno del Capitolo 3 tali caratteristiche sono state accuratamente analizzate grazie ai dati di pioggia raccolti dalla stazione meteo installata sul tetto del laboratorio. L'impiego di un pluviometro ed un disdrometro ottico ha garantito una misura accurata della pioggia e delle sue proprietà. I dati raccolti hanno costituito la base per definire i requisiti simulativi del setup in progetto e sono stati successivamente impiegati come riferimento per la calibrazione del simulatore di pioggia. Due leggi empiriche che

correlano diametro mediano (d_{50}) ed energia cinetica (KE) con l'intensità di pioggia sono state proposte.

Il quarto ed ultimo obiettivo era quello di validare i risultati ottenuti dal simulatore di pioggia in termini di distribuzione dei diametri, energia cinetica e omogeneità spaziale e temporale confrontandoli con quelli ricavati dai dati reali. Una precisa calibrazione del sistema è stata condotta sulla base di dati di pioggia naturale raccolti durante una campagna di misura di 24 mesi. I risultati descritti all'interno del Capitolo 4 evidenziano un'ottima riproduzione della pioggia reale all'interno del range di intensità testato. Per ciascuna delle tre classi di intensità simulate è stata individuata la configurazione della rete di redistribuzione in grado di minimizzare le differenze tra le DSD reali e simulate ottenendo un gap sempre inferiore a 0.1mm tra i diametri mediani calcolati.

5.2. Sviluppi Futuri

Il simulatore di pioggia presentato in questo lavoro di tesi si propone come un innovativo quanto unico strumento di ricerca per applicazioni sperimentali di laboratorio. L'elevato controllo di tutte le variabili in gioco nonché la possibilità di effettuare studi su ampia scala apre le strade ad innumerevoli applicazioni di ricerca. In questo paragrafo conclusivo della tesi verranno brevemente trattati i possibili sviluppi futuri di questo setup sperimentale soffermandosi su una delle principali applicazioni previste in fase di sviluppo del progetto.

5.2.1. Analisi e perfezionamento del sistema

Alla luce dei risultati ottenuti in questo lavoro di tesi è evidente come questo setup possa rappresentare un apparato di particolare importanza nel campo della ricerca sperimentale in laboratorio. Tra le principali attività che potrebbero essere oggetto di futuri studi vi sono:

- l'estensione delle analisi e delle simulazioni al range delle piogge torrenziali, andando a coprire il gap attualmente lasciato dalle analisi svolte in assenza di un sistema di ricircolo delle acque che permettesse di svolgere lunghi periodi di simulazione ad elevate intensità di pioggia.
- testare altre tipologie di rete con differenti maglie e dimensioni dei filamenti per meglio comprendere come queste contribuiscano nella redistribuzione delle gocce individuando una parametrizzazione empirica che permetta di correlare le caratteristiche geometriche della rete alla distribuzione della pioggia prodotta a valle.
- valutare l'installazione di un ulteriore fila di copri-ago cavi al fine di incrementare ulteriormente la frazione di gocce di grande diametro indispensabile per la corretta simulazione delle gocce di pioggia naturali in condizioni di pioggia forte e torrenziale.

5.2.2. Studi futuri

Come già ampiamente discusso, le applicazioni sperimentali di un simulatore di pioggia come quello presentato in questo studio sono particolarmente ampie e vaste. Tra di esse vi sono però alcune tipologie di ricerche che difficilmente potrebbero essere condotte in modo rigoroso e con misure robuste in altri simulatori di pioggia.

Ruscellamento in ambiente urbano e pavimentazioni drenanti

Lo studio dei fenomeni di trasporto e ruscellamento superficiale in ambiente urbano rappresentano un argomento di particolare interesse specialmente se connessi alle tematiche di qualità delle acque e trasporto di inquinanti [65]. L'espansione urbana, unitamente ai trend evidenziati dai cambiamenti climatici con un conseguente aumento degli scarichi, dei volumi di deflusso e delle concentrazioni di

inquinanti richiedono interventi e soluzioni sostenibili per ovviare a questi problemi. I sistemi di drenaggio urbano sostenibile (SUDS) e l'implementazione di pavimentazioni permeabili rappresentano soluzioni sempre più impiegate per rispondere a questo problema [66]. In merito alle ultime, una delle principali sfide è legata al fenomeno di intasamento prodotto dal materiale che viene trasportato dall'acqua durante le piogge con conseguente perdita di permeabilità della pavimentazione [67]. Il simulatore presentato potrebbe garantire un importante contributo nello studio di questi fenomeni grazie alla sua ampia superficie di simulazione e alla rappresentatività della pioggia simulata.

Cattura della CO₂

Nel corso degli ultimi decenni è divenuto sempre più evidente come sia indispensabile intervenire con tecniche di mitigazione per ridurre gli effetti del cambiamento climatico. Unitamente agli accordi intrapresi per il raggiungimento dell'obiettivo "zero emissioni di CO₂", numerosi studi e imprese hanno iniziato a proporre potenziali soluzioni per la rimozione e lo stoccaggio della CO₂ dispersa in ambiente. Tra le varie opzioni vi è quella dell'*Enhance Weathering* ovvero un processo che velocizza la cattura di anidride carbonica attraverso la dispersione al suolo di rocce silicee, che reagendo con la CO₂ quando vengono disciolte dalla pioggia formano carbonati disciolti che raggiungeranno nel tempo l'oceano, contrastando inoltre il fenomeno di acidificazione degli oceani e depositandosi sui fondali [68–70]. Sebbene il processo chimico e le condizioni ottimali in termini di pH del suolo affinché le reazioni abbiano luogo sono ben note, non è ancora del tutto chiara la velocità con cui il fenomeno avviene in relazione all'esposizione alla pioggia e gli effetti a lungo termine sul suolo [71]. Quantificare in modo più esteso e preciso tale fenomeno potrebbe portare ad importanti miglioramenti nell'impiego di questa tecnica favorendone

la proliferazione anche in ambito agricolo con conseguente incremento delle superfici trattabili e incremento delle quantità di CO₂ catturata.

Erosione del suolo

È ben noto come i fenomeni erosivi prodotti dalla pioggia sui suoli siano di particolare interesse in campo scientifico per poter comprendere e prevedere il comportamento di differenti tipologie di suolo durante la loro interazione con fenomeni di pioggia. Nel corso degli anni innumerevoli esperimenti sono stati condotti con l'ausilio di simulatori di pioggia portatili [4,8,9], il cui impiego sul campo garantisce sicuramente una migliore rappresentatività delle condizioni reali del suolo a discapito purtroppo della realistica della pioggia prodotta. Sebbene una potenziale difficoltà nel rappresentare correttamente le condizioni reali del suolo, lo svolgimento di test di erosione in laboratorio può garantire un maggior controllo delle condizioni esterne permettendo di variare a piacimento gran parte dei parametri che influiscono sul fenomeno erosivo come intensità di pioggia, energia cinetica e inclinazione del suolo permettendo di investigare a fondo tutti i parametri caratteristici del fenomeno. Ad oggi in letteratura sono presenti numerosi setup di laboratorio per lo studio di questi fenomeni [1,11,72,73] ma, per quanto ne sappiamo, nessuno di essi presenta caratteristiche simili al simulatore presentato in questa tesi. La vasta area a disposizione unitamente alla modularità delle vasche di raccolta garantisce la possibilità di testare differenti tipologie di suoli anche in contemporanea.

Dilavamento atmosferico

L'esecuzione di analisi di dilavamento atmosferico su larga scala permettendo di isolare il fenomeno di cattura e abbattimento del particolato da parte della pioggia da forzanti ambientali come ad esempio il vento rappresenta una delle principali potenzialità del setup

descritto in questo lavoro. Ad oggi il fenomeno di abbattimento delle polveri disperse in atmosfera da parte della pioggia non è ancora del tutto chiaro. Molti studi condotti nel corso degli anni hanno permesso di comprendere e modellare gran parte dei fenomeni di interazione [74–80]. Appare però evidente come nonostante i progressi ottenuti vi siano ancora delle lacune che portano i modelli proposti a differire dal fenomeno reale [81]. Tra le principali cause evidenziate in letteratura vi è quella dei fenomeni di scia [82,83]. Ad oggi tutte le modellazioni proposte si basano su dati empirici prodotti da setup sperimentali a piccola scala che considerano i soli fenomeni di interazione goccia-aerosol [82,84,85]. La possibilità di simulare un fenomeno di dilavamento a larga scala permettendo di considerare anche eventuali effetti di “gruppo” potrebbe evidenziare lacune non ancora considerate nei setup proposti in letteratura giustificando le discrepanze ad oggi esistenti. In particolare, l’evidenza di vortici nella scia delle gocce che transitano alla loro velocità terminale [86] potrebbe favorire la collezione di particelle di aerosol alle gocce successive che transitano in coda.

Generando piogge mono disperse si potrebbe investigare la capacità di cattura (*Collection Efficiency*) di una specifica classe di diametri di pioggia tenendo conto anche di potenziali effetti di gruppo. In un secondo momento, una volta individuati i principali meccanismi e la collection efficiency per differenti diametri di pioggia, si potrebbe procedere allo studio del fenomeno di abbattimento prodotto da piogge poli disperse con distribuzioni simili a quelle naturali.

Effetti di interazione tra pioggia e turbine eoliche

La pioggia svolge un ruolo cruciale nell’alterare le prestazioni e l’efficienza delle turbine eoliche, influenzandone le caratteristiche aerodinamiche e la funzionalità complessiva. Tale interazione in termini di prestazioni era evidente già nel passato [87]. Quando le

gocce di pioggia si scontrano con le pale della turbina, creano una complessa interazione che può influire sulle forze aerodinamiche e sul processo di conversione dell'energia. Studi numerici ed esperimenti in galleria del vento hanno evidenziato come la pioggia può alterare le forze di portanza e resistenza aerodinamica sulle pale della turbina, influenzando la produzione di energia complessiva [88–90]. In aggiunta, l'accumulo di pioggia sulle superfici delle pale può portare a cambiamenti nella distribuzione dei pesi, causando potenzialmente squilibri e stress meccanico sulla struttura della turbina. Un'ulteriore problematica evidenziatasi nel corso degli anni con l'incremento del numero di turbine applicate come sistema di produzione energetica è un fenomeno di erosione delle pale con conseguente riduzione delle prestazioni aerodinamiche nonché un deterioramento meccanico dell'elemento. Ad oggi quest'ultimo fenomeno è stato ampiamente analizzato per via numerica [91,92] ma la possibilità di testare differenti tipologie di rivestimenti a cicli di pioggia forzati ed intensivi potrebbe facilitare la risoluzione di una problematica piuttosto impattante su questa tecnologia.

Test su sensoristica e prototipi

Il crescente numero di eventi temporaleschi intensi sta evidenziando la necessità di strumenti in grado di garantire accuratezza nelle misure anche in condizioni di piogge torrenziali. Il simulatore di pioggia descritto in questo lavoro rappresenta un tool ottimale per testare e validare l'accuratezza di strumenti di monitoraggio in condizioni critiche. La possibilità di testare molteplici sensori in contemporanea verificandone la precisione e confrontandone i risultati rappresenta un potenziale impiego pratico del setup. In aggiunta, il simulatore presentato rappresenta un sistema isolato che consente di testare e validare prototipi sperimentali sotto l'effetto della pioggia.

Bibliografia

1. Lassu, T.; Seeger, M.; Peters, P.; Keesstra, S.D. The Wageningen Rainfall Simulator: Set-up and Calibration of an Indoor Nozzle-Type Rainfall Simulator for Soil Erosion Studies. *Land Degrad. Dev.* **2015**, *26*, 604–612, doi:10.1002/ldr.2360.
2. Nassif, S.H. Hydrological Studies of a Laboratory Catchment Area under Rainfall Simulation. phd, University of Salford, 1973.
3. Kim, H.; Ko, T.; Jeong, H.; Ye, S. The Development of a Methodology for Calibrating a Large-Scale Laboratory Rainfall Simulator. *Atmosphere* **2018**, *9*, 427, doi:10.3390/atmos9110427.
4. Clarke, M.A.; Walsh, R.P.D. A Portable Rainfall Simulator for Field Assessment of Splash and Slopewash in Remote Locations. *Earth Surf. Process. Landf.* **2007**, *32*, 2052–2069, doi:10.1002/esp.1526.
5. Nearing, M.A.; Bradford, J.M.; Holtz, R.D. Measurement of Force vs. Time Relations for Waterdrop Impact. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1986**, *50*, 1532–1536, doi:10.2136/sssaj1986.03615995005000060030x.
6. Mermut, A.R.; Luk, S.H.; Römken, M.J.M.; Poesen, J.W.A. Soil Loss by Splash and Wash during Rainfall from Two Loess Soils. *Geoderma* **1997**, *75*, 203–214, doi:10.1016/S0016-7061(96)00091-2.
7. Sharma, P. p.; Gupta, S. c.; Rawls, W. j. Soil Detachment by Single Raindrops of Varying Kinetic Energy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1991**, *55*, 301–307, doi:10.2136/sssaj1991.03615995005500020001x.
8. Battany, M.C.; Grismer, M.E. Development of a Portable Field Rainfall Simulator for Use in Hillside Vineyard Runoff and Erosion Studies. *Hydrol. Process.* **2000**, *14*, 1119–1129,

doi:10.1002/(SICI)1099-1085(20000430)14:6<1119::AID-HYP8>3.0.CO;2-O.

9. L. D. Meyer; W. C. Harmon Multiple-Intensity Rainfall Simulator for Erosion Research on Row Sideslopes. *Trans. ASAE* **1979**, *22*, 0100–0103, doi:10.13031/2013.34973.
10. Fernández-Raga, M.; Campo, J.; Rodrigo-Comino, J.; Keesstra, S.D. Comparative Analysis of Splash Erosion Devices for Rainfall Simulation Experiments: A Laboratory Study. *Water* **2019**, *11*, 1228, doi:10.3390/w11061228.
11. Aksoy, H.; Unal, N.E.; Cokgor, S.; Gedikli, A.; Yoon, J.; Koca, K.; Inci, S.B.; Eris, E. A Rainfall Simulator for Laboratory-Scale Assessment of Rainfall-Runoff-Sediment Transport Processes over a Two-Dimensional Flume. *CATENA* **2012**, *98*, 63–72, doi:10.1016/j.catena.2012.06.009.
12. Abudi, I.; Carmi, G.; Berliner, P. Rainfall Simulator for Field Runoff Studies. *J. Hydrol.* **2012**, *454–455*, 76–81, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.056.
13. Boulange, J.; Malhat, F.; Jaikaew, P.; Nanko, K.; Watanabe, H. Portable Rainfall Simulator for Plot-Scale Investigation of Rainfall-Runoff, and Transport of Sediment and Pollutants. *Int. J. Sediment Res.* **2019**, *34*, 38–47, doi:10.1016/j.ijsrc.2018.08.003.
14. Naves, J.; Anta, J.; Suárez, J.; Puertas, J. Hydraulic, Wash-off and Sediment Transport Experiments in a Full-Scale Urban Drainage Physical Model. *Sci. Data* **2020**, *7*, 44, doi:10.1038/s41597-020-0384-z.
15. Silburn, D.M. Characterising Pesticide Runoff from Soil on Cotton Farms Using a Rainfall Simulator. Thesis, University of Sydney, 2003.
16. Zhang, X.C.; Norton, D.; Nearing, M.A. Chemical Transfer from Soil Solution to Surface Runoff. **1997**.
17. Stašek, J.; Krása, J.; Mistr, M.; Dostál, T.; Devátý, J.; Středa, T.; Mikulka, J. Using a Rainfall Simulator to Define the Effect of Soil

- Conservation Techniques on Soil Loss and Water Retention. *Land* **2023**, *12*, 431, doi:10.3390/land12020431.
18. Macák, M.; Galambošová, J.; Kumhála, F.; Barát, M.; Kroulík, M.; Šinka, K.; Novák, P.; Rataj, V.; Misiewicz, P.A. Reduction in Water Erosion and Soil Loss on Steep Land Managed by Controlled Traffic Farming. *Land* **2023**, *12*, 239, doi:10.3390/land12010239.
 19. Alves, M.A.B.; de Souza, A.P.; de Almeida, F.T.; Hoshide, A.K.; Araújo, H.B.; da Silva, A.F.; de Carvalho, D.F. Effects of Land Use and Cropping on Soil Erosion in Agricultural Frontier Areas in the Cerrado-Amazon Ecotone, Brazil, Using a Rainfall Simulator Experiment. *Sustainability* **2023**, *15*, 4954, doi:10.3390/su15064954.
 20. García-Haba, E.; Naves, J.; Hernández-Crespo, C.; Goya-Heredia, A.; Suárez, J.; Anta, J.; Andrés-Doménech, I. Influence of Sediment Characteristics on Long-Term Hydrology and Water Quality Behaviour during the Clogging Process of a Permeable Asphalt. *J. Water Process Eng.* **2023**, *53*, 103658, doi:10.1016/j.jwpe.2023.103658.
 21. Rodríguez, I.; Ortiz, A.; Caldevilla, P.; Giganto, S.; Búrdalo, G.; Fernández-Raga, M. Comparison between the Effects of Normal Rain and Acid Rain on Calcareous Stones under Laboratory Simulation. *Hydrology* **2023**, *10*, 79, doi:10.3390/hydrology10040079.
 22. T. P. Regmi; A. L. Thompson RAINFALL SIMULATOR FOR LABORATORY STUDIES. *Appl. Eng. Agric.* **2000**, *16*, 641–647, doi:10.13031/2013.5380.
 23. Kavian, A.; Mohammadi, M.; Cerda, A.; Fallah, M.; Abdollahi, Z. Simulated Raindrop's Characteristic Measurements. A New Approach of Image Processing Tested under Laboratory Rainfall Simulation. *CATENA* **2018**, *167*, 190–197, doi:10.1016/j.catena.2018.04.034.
 24. Hignett, C.T.; Gusli, S.; Cass, A.; Besz, W. An Automated Laboratory Rainfall Simulation System with Controlled Rainfall

- Intensity, Raindrop Energy and Soil Drainage. *Soil Technol.* **1995**, 8, 31–42, doi:10.1016/0933-3630(95)00004-2.
25. Nielsen, K.T.; Moldrup, P.; Thorndahl, S.; Nielsen, J.E.; Duus, L.B.; Rasmussen, S.H.; Uggerby, M.; Rasmussen, M.R. Automated Rainfall Simulator for Variable Rainfall on Urban Green Areas. *Hydrol. Process.* **2019**, 33, 3364–3377, doi:10.1002/hyp.13563.
 26. R. A. Kohl Drop Size Distribution from Medium-Sized Agricultural Sprinklers. *Trans. ASAE* **1974**, 17, 690–693, doi:10.13031/2013.36938.
 27. Laws, J.O.; Parsons, D.A. The Relation of Raindrop-Size to Intensity. *Trans. Am. Geophys. Union* **1943**, 24, 452, doi:10.1029/TR024i002p00452.
 28. Bryan, R.B.S. *Surface Crusts Formed under Simulated Rainfall on Canadian Soils*; Pisa : Industria tipografica C. Corsi, 1973.; ISBN IT.
 29. Bowyer-Bower, T.A.S.; Burt, T.P. Rainfall Simulators for Investigating Soil Response to Rainfall. *Soil Technol.* **1989**, 2, 1–16, doi:10.1016/S0933-3630(89)80002-9.
 30. Swanson, N.P.; Dedrick, A.R. Soil Particles and Aggregates Transported in Water Runoff Under Various Slope Conditions Using Simulated Rainfall Available online: <https://doi.org/10.13031/2013.39645> (accessed on 17 September 2022).
 31. Morin, J.; Goldberg, D.; Seginer, I. A Rainfall Simulator with a Rotating Disk Available online: <https://doi.org/10.13031/2013.39599> (accessed on 17 September 2022).
 32. Naves, J.; Anta, J.; Suárez, J.; Puertas, J. Development and Calibration of a New Dripper-Based Rainfall Simulator for Large-Scale Sediment Wash-Off Studies. *Water* **2020**, 12, 152, doi:10.3390/w12010152.

33. Chevone, B.I.; Yang, Y.S.; Winner, W.E.; Storks-Cotter, I.; Long, S.J. A Rainfall Simulator for Laboratory Use in Acidic Precipitation Studies. *J. Air Pollut. Control Assoc.* **1984**, *34*, 355–359, doi:10.1080/00022470.1984.10465755.
34. Chow, V.T.; Harbaugh, T.E. Raindrop Production for Laboratory Watershed Experimentation. *J. Geophys. Res. 1896-1977* **1965**, *70*, 6111–6119, doi:10.1029/JZ070i024p06111.
35. Tokay, A.; Wolff, D.B.; Petersen, W.A. Evaluation of the New Version of the Laser-Optical Disdrometer, OTT Parsivel2. *J. Atmospheric Ocean. Technol.* **2014**, *31*, 1276–1288, doi:10.1175/JTECH-D-13-00174.1.
36. MANOBS - Manual of Surface Weather Observations. **2013**.
37. Jaffrain, J.; Berne, A. Experimental Quantification of the Sampling Uncertainty Associated with Measurements from PARSIVEL Disdrometers. *J. Hydrometeorol.* **2011**, *12*, 352–370, doi:10.1175/2010JHM1244.1.
38. Gunn, R.; Kinzer, G.D. THE TERMINAL VELOCITY OF FALL FOR WATER DROPLETS IN STAGNANT AIR. *J. Atmospheric Sci.* **1949**, *6*, 243–248, doi:10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2.
39. Kinnell, P. i. a. Rainfall Intensity-Kinetic Energy Relationships for Soil Loss Prediction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1981**, *45*, 153–155, doi:10.2136/sssaj1981.03615995004500010033x.
40. Rosewell, C.J. Rainfall Kinetic Energy in Eastern Australia. *J. Clim. Appl. Meteorol.* **1986**, *25*, 1695–1701.
41. Smith, J.A.; De Veaux, R.D. The Temporal and Spatial Variability of Rainfall Power. *Environmetrics* **1992**, *3*, 29–53, doi:10.1002/env.3170030103.
42. NW, H. The Influence of Rainfall Mechanics on Soil Erosion. *MSc Thesis Cape Town South Afr.* **1965**.
43. Salles, C.; Poesen, J.; Sempere-Torres, D. Kinetic Energy of Rain and Its Functional Relationship with Intensity. *J. Hydrol.* **2002**, *257*, 256–270, doi:10.1016/S0022-1694(01)00555-8.

44. Torres, D.S.; Salles, C.; Creutin, J.; Delrieu, G. Quantification of Soil Detachment by Raindrop Impact: Performance of Classical Formulae of Kinetic Energy in Mediterranean Storms. *IAHS Publ* **1992**, *210*, 115–124.
45. Atlas, D. Optical Extinction by Rainfall. *J. Atmospheric Sci.* **1953**, *10*, 486–488.
46. Nanko, K.; Moskalski, S.M.; Torres, R. Rainfall Erosivity–Intensity Relationships for Normal Rainfall Events and a Tropical Cyclone on the US Southeast Coast. *J. Hydrol.* **2016**, *534*, 440–450, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.022.
47. Best, A.C. The Size Distribution of Raindrops. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **1950**, *76*, 16–36, doi:10.1002/qj.49707632704.
48. Brandt, C.J. The Size Distribution of Throughfall Drops under Vegetation Canopies. *CATENA* **1989**, *16*, 507–524, doi:10.1016/0341-8162(89)90032-5.
49. Willis, P.T. Functional Fits to Some Observed Drop Size Distributions and Parameterization of Rain. *J. Atmospheric Sci.* **1984**, *41*, 1648–1661, doi:10.1175/1520-0469(1984)041<1648:FFTSOD>2.0.CO;2.
50. Azevedo Coutinho, M.; Pereira Tomás, P. Characterization of Raindrop Size Distributions at the Vale Formoso Experimental Erosion Center. *CATENA* **1995**, *25*, 187–197, doi:10.1016/0341-8162(95)00009-H.
51. van Dijk, A.I.J.M.; Bruijnzeel, L.A.; Rosewell, C.J. Rainfall Intensity–Kinetic Energy Relationships: A Critical Literature Appraisal. *J. Hydrol.* **2002**, *261*, 1–23, doi:10.1016/S0022-1694(02)00020-3.
52. Lu, J.-Y.; Su, C.-C.; Lu, T.-F.; Maa, M.-M. Number and Volume Raindrop Size Distributions in Taiwan. *Hydrol. Process.* **2008**, *22*, 2148–2158, doi:10.1002/hyp.6814.
53. Zanchi, C.; Torri, D. Evaluation of Rainfall Energy in Central Italy. *Eval. Rainfall Energy Cent. Italy* **1980**, 133–142.

-
54. Meshesha, D.; Tsunekawa, A.; Haregeweyn, N. Influence of Raindrop Size on Rainfall Intensity, Kinetic Energy, and Erosivity in a Sub-Humid Tropical Area: A Case Study in the Northern Highlands of Ethiopia. *Theor. Appl. Climatol.* **2019**, *136*, doi:10.1007/s00704-018-2551-0.
 55. Steiner, M.; Smith, J.A. Reflectivity, Rain Rate, and Kinetic Energy Flux Relationships Based on Raindrop Spectra. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **2000**, *39*, 1923–1940, doi:10.1175/1520-0450(2000)039<1923:RRRAKE>2.0.CO;2.
 56. Fernández-Raga, M.; Cabeza-Ortega, M.; González-Castro, V.; Peters, P.; Commelin, M.; Campo, J. The Use of High-Speed Cameras as a Tool for the Characterization of Raindrops in Splash Laboratory Studies. *Water* **2021**, *13*, 2851, doi:10.3390/w13202851.
 57. Chowdhury, M.N.; Testik, F.Y.; Hornack, M.C.; Khan, A.A. Free Fall of Water Drops in Laboratory Rainfall Simulations. *Atmospheric Res.* **2016**, *168*, 158–168, doi:10.1016/j.atmosres.2015.08.024.
 58. Karbaschi, M.; Taeibi Rahni, M.; Javadi, A.; Cronan, C.L.; Schano, K.H.; Faraji, S.; Won, J.Y.; Ferri, J.K.; Krägel, J.; Miller, R. Dynamics of Drops — Formation, Growth, Oscillation, Detachment, and Coalescence. *Adv. Colloid Interface Sci.* **2015**, *222*, 413–424, doi:10.1016/j.cis.2014.10.009.
 59. Beard, K.V.; Bringi, V.N.; Thurai, M. A New Understanding of Raindrop Shape. *Atmospheric Res.* **2010**, *97*, 396–415, doi:10.1016/j.atmosres.2010.02.001.
 60. Christiansen, J.E. *Irrigation by Sprinkling*; University of California Berkeley, 1942; Vol. 4;.
 61. Design and Installation of Microirrigation Systems.
 62. Kathiravelu, G.; Lucke, T.; White, R.; Nichols, P.W.B. Review on Design Requirements of a Rainfall Simulator for Urban Stormwater Studies. 13.

63. Fernández-Raga, M.; Rodríguez, I.; Caldevilla, P.; Búrdalo, G.; Ortiz, A.; Martínez-García, R. Optimization of a Laboratory Rainfall Simulator to Be Representative of Natural Rainfall. *Water* **2022**, *14*, 3831, doi:10.3390/w14233831.
64. Bentley, W.A. Studies of Raindrops and Raindrop Phenomena. *Mon Weather Rev* **1904**, *32*, 450–456.
65. Hengren, L.; Goonetilleke, A.; Sukpum, R.; Silva, D.Y.D. Rainfall Simulation as a Tool for Urban Water Quality Research. *Environ. Eng. Sci.* **2005**, *22*, 378–383, doi:10.1089/ees.2005.22.378.
66. Jato-Espino, D.; Charlesworth, S.; Bayon, J.; Warwick, F. Rainfall–Runoff Simulations to Assess the Potential of SuDS for Mitigating Flooding in Highly Urbanized Catchments. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2016**, *13*, 149, doi:10.3390/ijerph13010149.
67. Sansalone, J.; Kuang, X.; Ying, G.; Ranieri, V. Filtration and Clogging of Permeable Pavement Loaded by Urban Drainage. *Water Res.* **2012**, *46*, 6763–6774, doi:10.1016/j.watres.2011.10.018.
68. Schuiling, R.D.; Krijgsman, P. Enhanced Weathering: An Effective and Cheap Tool to Sequester Co₂. *Clim. Change* **2006**, *74*, 349–354, doi:10.1007/s10584-005-3485-y.
69. te Pas, E.E.E.M.; Hagens, M.; Comans, R.N.J. Assessment of the Enhanced Weathering Potential of Different Silicate Minerals to Improve Soil Quality and Sequester CO₂. *Front. Clim.* **2023**, *4*.
70. Andrews, M.G.; Taylor, L.L. Combating Climate Change Through Enhanced Weathering of Agricultural Soils. *Elements* **2019**, *15*, 253–258, doi:10.2138/gselements.15.4.253.
71. Rinder, T.; Von Hagke, C. *The Potential of Carbon Dioxide Removal through Enhanced Weathering of Basalt on Agricultural Land in Austria*; pico, 2021;
72. Cheraku, S.; Swathi, P.; Sushmitha, Y.; Praneetha, D.; Srivalli, C.R. Fabrication and Study of Laboratory Scale Rainfall

- Simulator for Soil Erosion Assessment: Rainfall Simulator for Soil Erosion Assessment. *J. AgriSearch* **2021**, *8*, 139–142, doi:10.21921/jas.v8i2.7298.
73. Mhaske, S.N.; Pathak, K.; Basak, A. A Comprehensive Design of Rainfall Simulator for the Assessment of Soil Erosion in the Laboratory. *CATENA* **2019**, *172*, 408–420, doi:10.1016/j.catena.2018.08.039.
74. Slinn, W.G.N. Precipitation Scavenging: Some Problems, Approximate Solutions and Suggestions for Future Research Available online: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1026375/> (accessed on 25 April 2022).
75. Andronache, C.; Grönholm, T.; Laakso, L.; Phillips, V.; Venäläinen, A. Scavenging of Ultrafine Particles by Rainfall at a Boreal Site: Observations and Model Estimations. *Atmospheric Chem. Phys.* **2006**, *6*, 4739–4754, doi:10.5194/acp-6-4739-2006.
76. Blanco-Alegre, C.; Castro, A.; Calvo, A.I.; Oduber, F.; Alonso-Blanco, E.; Fernandez-Gonzalez, D.; Valencia-Barrera, R.M.; Vega-Maray, A.M.; Fraile, R. Below-Cloud Scavenging of Fine and Coarse Aerosol Particles by Rain: The Role of Raindrop Size. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **2018**, *144*, 2715–2726, doi:10.1002/qj.3399.
77. Blanco-Alegre, C.; Calvo, A.I.; Castro, A.; Oduber, F.; Alonso-Blanco, E.; Fraile, R. Scavenging of Submicron Aerosol Particles in a Suburban Atmosphere: The Raindrop Size Factor. *Environ. Pollut.* **2021**, *285*, 117371, doi:10.1016/j.envpol.2021.117371.
78. Hampl, V.; Kerker, M. Scavenging of Aerosol by a Falling Water Droplet. Effect of Particle Size. *J. Colloid Interface Sci.* **1972**, *40*, 305–308, doi:10.1016/0021-9797(72)90021-5.
79. Wang, X.; Zhang, L.; Moran, M.D. Development of a New Semi-Empirical Parameterization for below-Cloud Scavenging of Size-Resolved Aerosol Particles by Both Rain and Snow. *Geosci. Model Dev.* **2014**, *7*, 799–819, doi:10.5194/gmd-7-799-2014.

80. Zhou, B.; Liu, D.; Yan, W. A Simple New Method for Calculating Precipitation Scavenging Effect on Particulate Matter: Based on Five-Year Data in Eastern China. *Atmosphere* **2021**, *12*, 759, doi:10.3390/atmos12060759.
81. Quérel, A.; Monier, M.; Flossmann, A.I.; Lemaitre, P.; Porcheron, E. The Importance of New Collection Efficiency Values Including the Effect of Rear Capture for the Below-Cloud Scavenging of Aerosol Particles. *Atmospheric Res.* **2014**, *142*, 57–66, doi:10.1016/j.atmosres.2013.06.008.
82. Querel, A.; Lemaitre, P.; Monier, M.; Porcheron, E.; Flossmann, A.I.; Hervo, M. An Experiment to Measure Raindrop Collection Efficiencies: Influence of Rear Capture. *Atmospheric Meas. Tech.* **2014**, *7*, 1321–1330, doi:10.5194/amt-7-1321-2014.
83. Lemaitre, P.; Querel, A.; Monier, M.; Menard, T.; Porcheron, E.; Flossmann, A.I. Experimental Evidence of the Rear Capture of Aerosol Particles by Raindrops. *Atmospheric Chem. Phys.* **2017**, *17*, 4159–4176, doi:10.5194/acp-17-4159-2017.
84. Hampl, V.; Kerker, M.; Cooke, D.D.; Matijevic, E. Scavenging of Aerosol Particles by a Falling Water Droplet. *J. Atmospheric Sci.* **1971**, *28*, 1211–1221, doi:10.1175/1520-0469(1971)028<1211:SOAPBA>2.0.CO;2.
85. Ladino, L.; Stetzer, O.; Hattendorf, B.; Günther, D.; Croft, B.; Lohmann, U. Experimental Study of Collection Efficiencies between Submicron Aerosols and Cloud Droplets. *J. Atmospheric Sci.* **2011**, *68*, 1853–1864, doi:10.1175/JAS-D-11-012.1.
86. Saylor, J.R.; Jones, B.K. The Existence of Vortices in the Wakes of Simulated Raindrops. *Phys. Fluids* **2005**, *17*, 031706, doi:10.1063/1.1874192.
87. Corrigan, R.; DeMiglio, R. *Effect of Precipitation on Wind Turbine Performance. (Final Report)*; 1985; p. DOE/NASA/20320-64, NASA-TM-86986, 5801463;
88. Al, B.C.; Klumpner, C.; Hann, D.B. Effect on Rain on Vertical Axis Wind Turbines. *Renew. Energy Power Qual. J.* **2011**, 1263–1268, doi:10.24084/repqj09.618.

89. Arastoopour, H.; Cohan, A. CFD Simulation of the Effect of Rain on the Performance of Horizontal Wind Turbines. *AIChE J.* **2017**, *63*, 5375–5383, doi:10.1002/aic.15928.
90. Wu, Z.; Cao, Y.; Nie, S.; Yang, Y. Effects of Rain on Vertical Axis Wind Turbine Performance. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **2017**, *170*, 128–140, doi:10.1016/j.jweia.2017.08.010.
91. Verma, A.S.; Castro, S.G.P.; Jiang, Z.; Teuwen, J.J.E. Numerical Investigation of Rain Droplet Impact on Offshore Wind Turbine Blades under Different Rainfall Conditions: A Parametric Study. *Compos. Struct.* **2020**, *241*, 112096, doi:10.1016/j.compstruct.2020.112096.
92. Cohan, A.C.; Arastoopour, H. Numerical Simulation and Analysis of the Effect of Rain and Surface Property on Wind-Turbine Airfoil Performance. *Int. J. Multiph. Flow* **2016**, *81*, 46–53, doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.01.006.