



*MIUR
Ministero dell'Istruzione
dell'Università e della
Ricerca*



*Università degli Studi di
Palermo*



*Facoltà di Agraria
Dipartimento Di
Ingegneria e Tecnologie
Agro-Forestali
Sezione Idraulica*

DOTTORATO DI RICERCA IN IDRONOMIA AMBIENTALE S. S. D. AGR/08

VALUTAZIONE DELLE PERDITE DI CARICO LOCALIZZATE NELLE ALI GOCCIOLANTI INTEGRALI

TESI PER IL CONSEGUIMENTO DEL TITOLO

Dottorando
Dott. Raffaele Leone

Coordinatore:
Ch.mo Prof. Giuseppe Giordano

Tutor:
Ch.mo Prof. Domenico Pumo

Ch.mo Prof. Giuseppe Provenzano

Palermo - Dicembre 2010

Desidero ringraziare il Prof. Ing. Domenico Pumo ed il Prof. Ing Giuseppe Provenzano per i loro preziosi consigli.

Un ringraziamento particolare va all'Ing. Pietro Di Dio, per il sostegno e la collaborazione fornitami durante lo svolgimento del Dottorato.

Indice:

1. Premessa	1
2. Impianti irrigui per la microirrigazione.....	4
2.1. Generalità.....	4
2.2. Schema di un impianto di microirrigazione	7
2.3. Vantaggi e svantaggi della microirrigazione	10
3. Gli apparecchi erogatori	15
3.1 Caratteristiche, funzionamento e tipologie degli apparecchi erogatori	15
3.2 Caratteristiche di funzionamento idraulico degli erogatori	22
3.3 Valutazione della qualità dell'erogatore	24
3.4 Uniformità di erogazione	28
4. Dimensionamento idraulico delle ali erogatrici.....	35
4.1 Introduzione.....	35
4.1. Valutazione delle perdite di carico continue	37
4.2 Valutazione delle perdite di carico localizzate	41
5. Articolazione dell'indagine e metodologia sperimentale	50
5.1 Introduzione.....	50
5.2 L'indagine sperimentale	52
6. Risultati e discussioni	58
7. Conclusioni.....	90
Bibliografia.....	92
Elenco dei simboli utilizzati	96
Allegato 1: Dati geometrici ed idraulici dei gocciolatori e risultati delle prove sperimentali.....	99

1. Premessa

Il termine “Rivoluzione verde” è usato per descrivere un vertiginoso boom della produttività agricola nel mondo in via di sviluppo tra il 1960 e il 1990. È nata soprattutto perché i governi dei paesi industrializzati e in via di sviluppo hanno investito in maniera consistente nella ricerca agricola. La scienza moderna è stata utilizzata per trovare sistemi per incrementare la produzione alimentare e questo ha rivoluzionato le tradizionali pratiche agricole.

Inizialmente, la rivoluzione è stata vista come un successo senza precedenti. All’aumento della popolazione e della richiesta di cibo corrispondeva la crescita degli approvvigionamenti alimentari e i prezzi degli alimenti rimanevano stabili.

Ma sin dagli anni '90 ci siamo resi conto che l’impennata produttiva della Rivoluzione Verde veniva pagata a caro prezzo.

Gli input energetici richiesti dalle nuove pratiche hanno impoverito notevolmente le risorse naturali disponibili e in particolare la “risorsa acqua”; infatti, le tecniche agricole legate alla “Rivoluzione Verde” hanno richiesto una massiccia irrigazione e questo ha seriamente intaccato le risorse idriche mondiali.

Siamo di fronte ad un pericolo, molto realistico, di una crisi idrica qualitativa e quantitativa. Per evitarla, è necessario ripensarne a fondo la gestione. A partire da quelli che sono oggi i principali impieghi innanzitutto in agricoltura, cui è destinata fino all’80 per cento dell’acqua disponibile e poi nei settori civili ed industriali.

Negli ambienti aridi o semiaridi come quello siciliano, caratterizzati da limitate disponibilità d’ acqua, si impone sempre più spesso di destinare minori risorse idriche o talvolta, risorse di peggiore qualità all'agricoltura, al fine di salvaguardare le esigue risorse disponibili per soddisfare i crescenti fabbisogni idrici destinati all'uso potabile.

La limitata disponibilità di risorse idriche impone dunque la necessità di gestire con la massima attenzione l'irrigazione, eliminando qualunque fonte di spreco, sia attraverso il contenimento dei consumi che il miglioramento dell'efficienza d'uso.

L'aumento dell'efficienza idrica può essere conseguita attraverso la scelta oculata di appropriati metodi di irrigazione caratterizzati da elevati valori dell'efficienza irrigua.

Attualmente sono disponibili metodi irrigui che riducono i consumi d'acqua rispetto ai metodi tradizionali. Essi fanno ricorso generalmente ad un'elevata automazione e a tecniche impiantistiche all'avanguardia, per essere il più possibile efficienti sia nella distribuzione che nella gestione dell'acqua e per potersi adattare alle tecniche agronomiche più attuali. Questi metodi sono quelli che prevedono una distribuzione localizzata dell'acqua (microirrigazione o irrigazione a goccia).

Il ricorso a tale metodo di irrigazione, definito anche irrigazione localizzata a bassa pressione, rappresenta notoriamente una pratica sempre più diffusa, sia per le colture arboree che per le colture erbacee, soprattutto negli ambienti dove l'entità delle risorse da destinare all'agricoltura è limitata.

I metodi di microirrigazione, adeguatamente concepiti e realizzati, contribuiscono ad un migliore sfruttamento delle risorse idriche limitando gli sprechi d'acqua e riducono anche, entro certi limiti, gli effetti negativi dovuti all'uso di acque salmastre.

Affinché un impianto irriguo a goccia sia però efficiente, è necessario che venga dimensionato in modo tale da assicurare un'erogazione idrica il più possibile uniforme a tutte le piante servite. Tale condizione può essere ottenuta soltanto mantenendo entro limiti prefissati, e comunque di modesta entità, la variazione di portata tra i diversi erogatori presenti nell'impianto. Pertanto, per poter affrontare in maniera adeguata il problema di progetto, si deve conoscere da una parte la relazione funzionale che definisce la portata

erogata in funzione del carico $Q(h)$ e dall'altra disporre di accurate procedure di stima delle perdite di carico, sia di tipo continuo che localizzato.

Per tali condotte erogatrici le procedure di stima delle perdite di carico devono tenere conto sia delle dimensioni delle tubazioni, che della presenza dei gocciolatori i quali, riducendo la sezione idrica della corrente, sono responsabili delle perdite di carico localizzate. In relazione alle ridotte interdistanze dei gocciolatori ed al loro elevato numero, possono rappresentare un'aliquota non trascurabile delle perdite di carico complessive in condotta (Howell & Hiler, 1974; Keller & Karmeli, 1975; Howell & Barinas, 1980; Bagarello et al., 1997).

In relazione al notevole interesse applicativo che la problematica in esame riveste, l'attività di ricerca ha riguardato la misura delle perdite di carico continue e localizzate in linee erogatrici munite di apparecchi erogatori coestrusi (linee gocciolanti integrali) che hanno avuto una sempre maggiore diffusione in relazione agli indubbi vantaggi che le stesse presentano, rispetto alle classiche linee gocciolanti munite di gocciolatori in-line o on-line.

Nella prima parte della presente tesi, dopo avere descritto le caratteristiche peculiari del metodo irriguo ed elencato i componenti di un impianto di microirrigazione, vengono illustrate le caratteristiche di funzionamento idraulico delle diverse tipologie di apparecchi erogatori. Vengono successivamente esaminati i contributi reperiti in letteratura inerenti il problema del dimensionamento idraulico delle ali erogatrici, soffermandosi sulle principali formulazioni proposte per la valutazione delle perdite di carico continue e di quelle localizzate causate dalla presenza, lungo l'ala erogatrice, degli apparecchi erogatori.

Attraverso l'indagine condotta è stata quindi approfondita, con riferimento alle linee gocciolanti integrali, ossia munite di erogatori saldati all'interno della tubazione, la problematica relativa alla valutazione delle perdite di carico localizzate. L'indagine sperimentale è stata condotta utilizzando differenti tipologie di linee gocciolanti, sia di tipo

leggero che pesante.

Le elaborazioni effettuate hanno tenuto conto anche dei risultati delle prove precedentemente condotte da Provenzano et al., (2005).

L'indagine ha permesso di valutare gli effetti indotti sulle perdite di carico complessive, dalla presenza degli erogatori ed ha consentito di individuare un criterio di stima delle perdite di carico localizzate che tiene conto, oltre che della geometria del sistema condotta-gocciolatore, del numero di Reynolds (Re).

Nel corso delle prove sperimentali si è proceduto alla caratterizzazione idraulica degli apparecchi erogatori esaminati, attraverso la determinazione della relazione portata pressione $Q(h)$ e del coefficiente di variazione tecnologico (CVT).

Le prove condotte hanno permesso quindi di individuare un criterio generale di dimensionamento idraulico delle ali erogatrici che tenga anche conto delle perdite di carico localizzate.

2. Impianti irrigui per la microirrigazione

2.1. Generalità

L'irrigazione è una pratica antichissima e di fondamentale importanza nell'agricoltura.

Essa comprende quell'insieme di conoscenze e tecniche finalizzate all'incremento della produttività di un terreno agricolo tramite la maggior quantità d'acqua resa disponibile alle colture.

Nel corso degli ultimi decenni l'irrigazione ha assunto un ruolo primario nelle scelte imprenditoriali, sviluppandosi sempre di più sia in base alle esigenze di mercato sia in base al

concetto di salvaguardia delle risorse ambientali. In questo modo si è passati da un agricoltura che utilizzava tecniche irrigue poco efficienti quali l'irrigazione per sommersione, per scorrimento e per solchi, alla microirrigazione.

L'efficienza di distribuzione dell'acqua, strettamente dipendente dal metodo irriguo impiegato, ma anche dalla bontà dell'impianto realizzato, esprime il rapporto percentuale tra il volume d'acqua utile alla coltura (W_u) e il volume di acqua impiegato (W_i):

$$E_i = \frac{W_u}{W_i} \cdot 100 \quad (1)$$

La tabella 1 mostra come la peggiore efficienza di distribuzione è attribuita ai metodi “a gravità”, come la sommersione, lo scorrimento e l'infiltrazione laterale da solchi. Viceversa, una migliore efficienza è normalmente conseguita dai metodi che fanno uso di reti di distribuzione in pressione, ossia i metodi per aspersione ed a goccia che prevedono, per mezzo di dispositivi (irrigatori, gocciolatori, spruzzatori), la distribuzione al suolo dell'acqua.

Metodo	Efficienza massima di distribuzione
Sommersione	Meno del 25%
Scorrimento	30-40%
Infiltrazione laterale da solchi	50-60%
Aspersione	70-80%
Microirrigazione (a goccia o a spruzzo)	85-90%

Tabella 1: Valori orientativi di efficienza dei metodi di irrigazione (fonte: ERSAF Lombardia)

La microirrigazione a goccia si distingue nettamente sia dai metodi tradizionali (sommersione, infiltrazione, scorrimento), sia dai metodi ad aspersione (pioggia), in quanto consente un notevole risparmio energetico e idrico oltre che vantaggi economici, in relazione alla ridotta risorsa idrica utilizzata a parità di superficie.

La microirrigazione consiste nel somministrare modesti, ma frequenti adacquamenti attraverso apparecchi erogatori con portate generalmente comprese tra 0,6 a 15 l/h installati in prossimità dell'apparato radicale delle piante.

L'acqua arriva agli erogatori disposti su condotte laterali (o ali erogatrici) attraverso una rete di tubazioni principali e secondarie. Ciascun erogatore distribuisce una modesta portata, ed è quindi possibile controllare i volumi idrici che arrivano al terreno; inoltre si possono fornire al terreno fertilizzanti e/o nutrienti necessari alla crescita, direttamente nella zona radicale della pianta, dove acqua e nutrienti penetrano nel suolo, in virtù delle forze combinate di gravità e capillarità.

I tempi relativamente lunghi di adacquamento (alcune ore) ed i ristretti turni di adacquamento (alcuni giorni) consentono di mantenere nel terreno un contenuto idrico generalmente ottimale per la crescita e lo sviluppo delle piante, grazie all'effetto combinato della localizzazione dell'acqua somministrata e della ridotta evaporazione dalla superficie del suolo, specie quando si utilizzano erogatori a goccia.

Altro aspetto fondamentale di tale metodo è la possibilità di utilizzare, con opportuni accorgimenti, le risorse idriche non convenzionali quali acque reflue urbane e acque salmastre.

Infatti, per le acque reflue, i rischi di contaminazione dei prodotti dovuti alla presenza di patogeni nell'acqua sono ridotti, specie se la condotta erogatrice è posta a livello del suolo,

per le acque salmastre l'elevato potenziale osmotico è compensato dal basso potenziale matriciale dovuto all'elevato valore dell'umidità media del terreno.

Le aziende del settore negli ultimi anni hanno molto investito in questa tecnica al fine di rendere gli impianti irrigui sempre più efficienti ed economicamente convenienti.

Si è passati dall'impiego iniziale per le sole colture arboree (impianti irrigui stanziali) a quello per colture ortive di pieno campo (impianti mobili), grazie alla produzione di ali erogatrici integrali di limitato spessore ed alla diffusione di macchine bobinatrici.

La microirrigazione comprende sistemi d'irrigazione che impiegano diverse tipologie di dispositivi di erogazione, manichette preforate, manichette porose, gocciolatori (in-line ed on-line) spruzzatori ed ali gocciolanti integrali. Queste ultime, o dripline rappresentano attualmente le ultime novità tecnologiche proposte dalle industrie del settore irriguo ed il loro impiego è sempre più frequente, grazie alla loro praticità ed economicità.

2.2. Schema di un impianto di microirrigazione

Per attuare la puntuale localizzazione delle erogazioni, tipica del metodo a microportata, gli impianti di irrigazione richiedono una fitta rete di linee gocciolanti, generalmente organizzate in settori, che possono essere messi in funzione uno alla volta, in ciclica successione.

Un impianto di microirrigazione (Fig. 1) è costituito da una testata di comando e di controllo posta solitamente a valle del gruppo di consegna o dell'impianto di sollevamento aziendale e una condotta principale o adduttrice che alimenta più condotte secondarie, dislocate una per ogni settore irriguo, ciascuna delle quali alimenta numerose linee gocciolanti sulle quali sono inseriti gli apparecchi erogatori. Inoltre ogni condotta secondaria è preceduta da un gruppo di regolazione e controllo del settore che comprende anche dei filtri (a rete o a disco), al fine di

un ulteriore controllo a valle della filtrazione primaria dell'acqua.

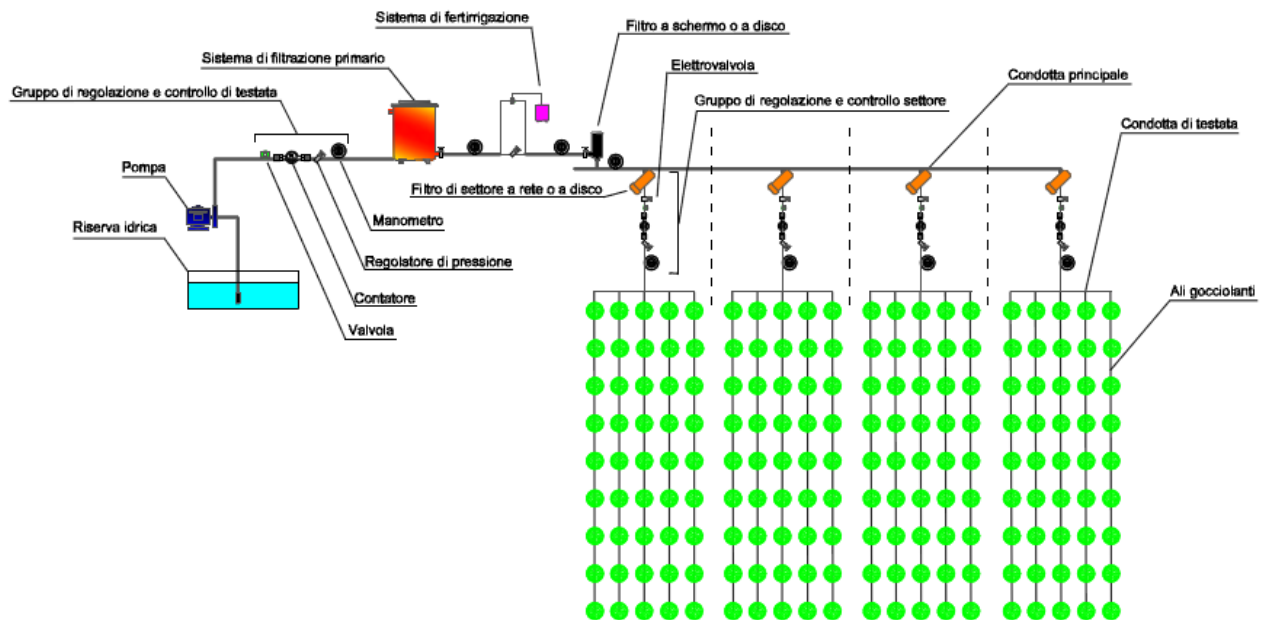


Figura 1: Schema di un impianto di microirrigazione

La testata di controllo è costituita da tutte le apparecchiature che regolano il funzionamento dell'impianto; in particolare effettua la filtrazione primaria dell'acqua, l'eventuale aggiunta di sostanze fertilizzanti, la misura delle portate erogate e della pressione di funzionamento dell'impianto e regola i tempi necessari per gli adacquamenti. A valle della testata di controllo è posta una condotta principale che si dirama all'interno dell'azienda da irrigare e che alimenta i diversi settori irrigui. In derivazione ad essa sono posizionate le condotte secondarie e quindi le ali erogatrici.

Le condotte principali e secondarie possono essere fisse o mobili e generalmente sono realizzate con materiali plastici (PVC, polietilene, etc.) o più raramente in acciaio zincato, nel caso di vecchi impianti irrigui mobili per aspersione, adattati per la microirrigazione. Le ali

erogatrici sono costituite da tubazioni di PEbd di diametro nominale variabile tra 12 e 25 mm, sulle quali sono installati gli apparecchi erogatori. Le varie tipologie di erogatori disponibili in commercio si differenziano tra loro: in base al modo con cui vengono montati sull'ala erogatrice (gocciolatori del tipo in-line, on-line o dripline), per l'attitudine degli stessi ad erogare portate costanti o variabili al variare del carico idraulico (gocciolatori autocompensanti o comuni), ovvero per il regime di moto della corrente idrica che li attraversa (gocciolatori a regime laminare o turbolento).

In particolare, i gocciolatori del tipo on-line sono inseriti in derivazione rispetto alle ali erogatrici, quelli in-line sono coassiali ad esse e vengono inseriti in condotta mediante taglio delle stesse, mentre quelli dripline vengono saldati ed inseriti dal produttore direttamente sulla parete interna delle linee gocciolanti o in modo coassiale alla tubazione o su una porzione longitudinale della stessa, a interdistanza prefissata cosicché dall'esterno sono visibili soltanto i fori di uscita dell'acqua. In questo caso il gocciolatore è coestruso alla condotta e si parla di linee gocciolanti integrali; gli erogatori di tipo autocompensante sono generalmente realizzati con dispositivi mobili o parti deformabili che modificano le sezioni di passaggio al variare del carico idraulico in modo da mantenere costante la portata erogata; gli erogatori funzionanti in regime laminare (microtubi, gocciolatori a spirale) sono invece caratterizzati da condotti con sezioni molto piccole (1-3 mm) e di lunghezza elevata (anche dell'ordine del metro), mentre gli erogatori funzionanti in regime turbolento (orifizi a vortice, tubazioni a doppia camera, gocciolatori a labirinto) hanno sezioni di passaggio generalmente più ampie.

2.3. Vantaggi e svantaggi della microirrigazione

Considerando che circa il 70-80 % della risorsa idrica complessiva prelevata dall'ambiente viene utilizzata dall'agricoltura per l'irrigazione, il primo evidente vantaggio della microirrigazione, come sopra accennato, è il risparmio idrico.

A seconda del campo di applicazione e della tecnica utilizzata, la microirrigazione permette un abbattimento del fabbisogno idrico che va dal 30 fino al 70% rispetto ai metodi a sommersione, ad infiltrazione ed a scorrimento.

Il risparmio del sistema a goccia è evidente: a piccoli volumi corrispondono modeste portate e pressioni di esercizio ridotte, il che significa che vengono utilizzate modeste quantità idriche e di conseguenza viene consumato un minor quantitativo di energia.

Un altro dei principali vantaggi legati all'impiego della microirrigazione è rappresentato dalla bassa pressione di esercizio (tra 1 e 2 bar), che non rende necessarie pompe ad elevata prevalenza, come invece spesso accade negli impianti per aspersione, cosicché è possibile ridurre i costi energetici, tenuto conto che l'intero volume irriguo deve essere sollevato di circa 10-20 metri.

Tutto ciò comporta ovviamente un notevole abbattimento dei costi in quanto si riducono i costi d'impianto e di esercizio.

Inoltre, poiché le portate in circolo sono modeste, un'accurata progettazione dell'impianto consente di contenere anche il costo delle tubazioni.

I punti di erogazione sono localizzati in prossimità dell'apparato radicale della coltura in modo che sia massimo l'assorbimento dell'acqua. Questo consente di avere un'elevata efficienza irrigua in quanto viene inumidito un minor volume di terreno, che si traduce in minori volumi d'adacquamento.

Con questo sistema il fabbisogno idrico della coltura, ovvero il volume stagionale d'acqua richiesto per potersi sviluppare nelle migliori condizioni, può essere pienamente soddisfatto senza sprechi.

Inoltre sotto l'aspetto agronomico, poiché normalmente non viene bagnato l'interfilare delle piante, vengono agevolate le operazioni colturali quali fresature, erpicature, trattamenti, che possono essere così realizzate su terreno asciutto.

Il volume ridotto di terreno bagnato limita notevolmente lo sviluppo delle infestanti ed anche lo sviluppo di funghi e malattie è fortemente impedito, in quanto la microirrigazione mantiene l'apparato fogliare asciutto perché la parte epigea della pianta non è interessata dall'irrigazione.

Mediante i sistemi microirrigui è possibile mantenere entro valori prefissati e praticamente costanti il contenuto idrico nel terreno.

Inoltre la microirrigazione ha reso sfruttabili dall'agricoltura aree improduttive in relazione alla loro morfologia, in quanto è possibile installare la rete su pendii scoscesi, (con pendenze comunque non superiori al 15÷20%), che sarebbero difficilmente irrigabili con altri metodi, ed evitando la costosa sistemazione del terreno, necessaria invece per i sistemi d'irrigazione tradizionali.

I sistemi di microirrigazione rappresentano una buona soluzione sia per i terreni fortemente argillosi che per quelli sabbiosi.

Nei terreni argillosi caratterizzati da basse velocità d'infiltrazione, le modeste portate erogate si infiltrano completamente nel terreno senza che si verifichi scorrimento superficiale. Inoltre, un adeguato calendario irriguo ed erogazioni di breve durata evitano problemi di ristagno.

Di contro nei terreni sabbiosi, caratterizzate da elevati valori della velocità d'infiltrazione, i metodi irrigui tradizionali pongono problemi di perdite irrigue per percolazione profonda, e pertanto l'uso del metodo microirriguo può rappresentare una valida alternativa.

Gli elevati valori dell'efficienza irrigua dell'irrigazione a goccia sono imputabili alla possibilità di ridurre o eliminare le perdite dovute a deflusso superficiale, a percolazione profonda e ad evaporazione dal suolo. Non ci sono poi fenomeni di erosione e costipamento del terreno.

La localizzazione dell'acqua permette anche la distribuzione localizzata dei fertilizzanti (fertirrigazioni), con aumento della loro efficacia produttiva: il fertilizzante sciolto nell'acqua e distribuito con la stessa, permette una migliore ed uniforme distribuzione degli elementi nutritivi all'apparato radicale delle colture. Allo stesso modo è possibile anche effettuare la distribuzione di fitofarmaci al terreno. I coltivatori possono applicare direttamente le sostanze necessarie nella zona delle radici delle piante senza preoccupazioni per l'impatto ambientale del percolato e della lisciviazione, nella maggior parte delle situazioni.

Uno dei principali vantaggi dato dalla microirrigazione è che con tale metodo irriguo si realizza una notevole economia di manodopera, dato che l'impianto di microirrigazione di tipo fisso si può automatizzare completamente con apparecchiature e strumenti elettronico-idraulici, con i quali si può controllare il regime idrico nel terreno, alla profondità considerata, così da intervenire al momento opportuno.

Altri vantaggi connessi all'irrigazione microportata derivano dalla possibilità di effettuare l'irrigazione anche in presenza di vento, caratteristica non trascurabile in particolari condizioni climatiche.

Infine, grazie alle modeste portate richieste, questo sistema consente di sfruttare anche pozzi o sorgenti in grado di erogare piccole portate, senza dover ricorrere a costosi accumuli idrici.

Nell'esame delle peculiarità connesse al metodo della microirrigazione occorre considerare anche alcuni svantaggi, primo fra tutti il rischio d'intasamento degli erogatori.

I sistemi microirrigui sono caratterizzati da un elevato numero di erogatori con orifizi facilmente ostruibili da diverse tipologie di agenti, presenti all'interno delle acque utilizzate a scopo irriguo.

Gli agenti che determinano l'occlusione possono essere di natura chimica, fisica o biologica in relazione alla fonte di approvvigionamento idrico utilizzata.

L'occlusione biologica può essere causata da particelle organiche quali colonie batteriche o formazioni algali, microrganismi, piccoli insetti; quella chimica da precipitati di natura minerale dovuti alla qualità dell'acqua o a reazioni chimiche legate all'uso di fertilizzanti idrosolubili mentre quella fisica dalla presenza di minerali in sospensione (sabbia, limo ecc.) o materiale organico indecomposto.

L'intasamento può essere anche provocato da un'interazione dei diversi fattori, il che rende difficile trovare soluzioni efficaci.

Tale problema può essere in parte prevenuto scegliendo erogatori a flusso turbolento anziché a flusso laminare. Questi ultimi infatti sono caratterizzati da basse velocità della corrente (< 2 m/s) che facilitano la sedimentazione di particelle fini come sabbia finissima, limo e argilla all'interno degli erogatori.

Inoltre occorre dotare l'impianto di filtri adeguati e, a volte, è necessario anche intervenire con trattamenti chimici adeguati.

Nel caso di utilizzo di acque caratterizzate da elevati valori della salinità, si possono manifestare alte concentrazioni saline in corrispondenza del fronte umido. In tale circostanza può verificarsi che le precipitazioni del periodo successivo alla stagione irrigua siano

sufficienti per la lisciviazione dei sali. In carenza di precipitazioni occorre fornire un surplus di acqua di irrigazione che costituisce il cosiddetto fabbisogno di lisciviazione.

Gli alberi da frutto irrigati fin dal loro impianto con la microirrigazione presentano il sistema radicale meno profondo e con una ridotta espansione laterale. In alcuni casi, come conseguenza di questa circostanza, sono stati osservati fenomeni di sradicamento dovuti al forte vento. Questo inconveniente può essere superato, nel caso degli arboreti, ad esempio posticipando l'esecuzione dell'impianto di microirrigazione di almeno cinque anni dal trapianto permettendo la radicazione profonda dell'albero.

Nelle aziende che ricadono all'interno di comprensori irrigui con esercizio alla domanda, spesso risulta difficile conciliare il momento dell'irrigazione con la consegna dall'acqua da parte dell'ente gestore. Questo problema può essere superato realizzando, a livello aziendale, delle riserve idriche (vasche di accumulo, laghetti, ecc.).

Un altro inconveniente della microirrigazione è costituito dalla impossibilità di utilizzare l'acqua per la distribuzione di antiparassitari e anticrittogamici o nell'irrigazione antigelo, pigmentante e climatizzante, in quanto la distribuzione dell'acqua non interessa la parte epigea della pianta.

Per installare un buon impianto di microirrigazione è importante, pertanto, conoscere esattamente le condizioni climatiche e la situazione pedologica, idraulica e agronomica dei terreni da irrigare, oltre che la qualità chimico-fisica dell'acqua da utilizzare.

3. Gli apparecchi erogatori

3.1 Caratteristiche, funzionamento e tipologie degli apparecchi erogatori

Il buon funzionamento di un impianto microirriguo dipende essenzialmente da una corretta progettazione delle diverse componenti che lo costituiscono.

I gocciolatori sono tra i componenti più importanti di un impianto di microirrigazione e devono possedere specifiche caratteristiche che permettano di rispondere efficacemente alle diverse necessità che si presentano e che possono cambiare a seconda della coltura, della qualità dell' acqua, del tipo di suolo.

Tra i requisiti richiesti, un buon erogatore dovrebbe erogare una portata pressoché costante al variare della pressione e della temperatura ed essere caratterizzato da sezioni di passaggio ampie, in modo da ridurre il pericolo di ostruzione. Inoltre si chiede che essi siano facilmente installabili, economici e di lunga durata.

In pratica, la maggior parte degli erogatori possiedono solo alcuni di questi requisiti, e pertanto è necessario analizzare caso per caso quali tra queste qualità sono indispensabili, in relazione al possibile utilizzo.

Ad esempio, la resistenza all'intasamento può essere estremamente desiderabile nel caso di prelievi d'acqua superficiale (da laghetti o corsi d'acqua) ricche di sostanza organica, ed essere invece relativamente poco importante nel caso si utilizzi acqua proveniente da pozzi o sorgenti.

Analogamente, gli apparecchi autocompensanti possono essere necessari su terreni scoscesi o ad elevata pendenza, mentre non sono assolutamente necessari in presenza di un impianto di microirrigazione adeguatamente progettato su terreni pressoché pianeggianti o poco pendenti.

In commercio esiste una vasta gamma di gocciolatori. Essi sono realizzati in materiale plastico e generalmente sono installati su tubazione in polietilene di piccolo diametro.

Negli erogatori a regime laminare la corrente idrica muove a bassa velocità. In questo caso le perdite di carico che si determinano all'interno dell'erogatore sono soltanto di tipo continuo. I dispositivi a flusso laminare regolano il flusso idrico dissipando il carico disponibile mediante perdite di carico dovute alla scabrezza delle pareti del condotto idrico; quanto più stretto o più lungo è il condotto, tanto maggiori saranno le perdite di carico continue all'interno dell'erogatore e minore è la portata erogata.

I dispositivi a flusso laminare sono dunque caratterizzati da condotte con sezioni di piccolo diametro (1-2 mm) e di lunghezza dell'ordine di qualche metro; in questo modo si producono le perdite di carico necessarie a garantire che la portata erogata sia quella prevista. Esempi di dispositivi a flusso laminare sono i gocciolatori a spirale ed i microtubi capillari (Fig.2).

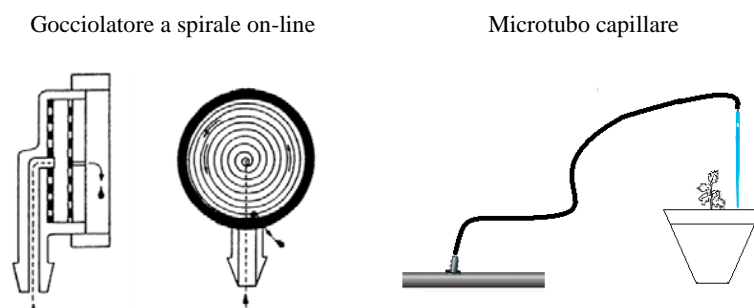


Figura 2: Esempi di erogatori a flusso laminare

I dispositivi a flusso laminare sono semplici, affidabili e poco costosi.

Gli inconvenienti di questi dispositivi sono rappresentati dal fatto che presentano una certa sensibilità alle variazioni di pressione (la loro portata può variare, anche di molto, con il variare della pressione) e che inoltre sono più soggetti ad intasamento, a causa delle basse velocità della corrente idrica e dei diametri delle sezioni di passaggio. Gli erogatori a flusso

laminare sono sensibili anche alla viscosità dell'acqua, e pertanto la loro portata può variare al variare della temperatura dell'acqua circolante in condotta.

Negli erogatori funzionanti in regime turbolento (orifizi, tubazioni a doppia camera, gocciolatori a labirinto) le particelle di fluido si spostano rapidamente con movimenti irregolari e con frequenti cambi di direzione (Fig.3). I dispositivi a flusso turbolento regolano il flusso idrico, dissipando il carico fornito sotto forma di perdite di carico continue e localizzate. Rispetto ai gocciolatori a regime laminare, i gocciolatori a labirinto hanno sezioni di passaggio più ampie e questo è un fattore utile ai fini della resistenza all'intasamento. Inoltre, se un gocciolatore è realmente a flusso turbolento, la portata erogata sarà meno sensibile alle variazioni di pressione rispetto ai gocciolatori a flusso laminare e non sarà influenzata dalla temperatura dell'acqua.

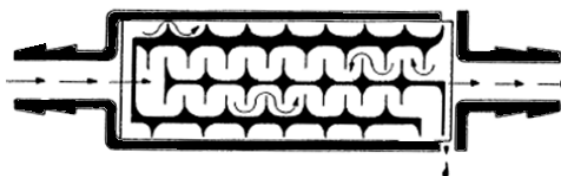


Figura 3: Erogatore a flusso turbolento

Gli erogatori autocompensanti possono essere a flusso sia laminare che turbolento. In entrambi i casi, questi dispositivi utilizzano la pressione d'ingresso per modificare dimensioni, profilo o estensione della sezione di passaggio dell'acqua attraverso la deformazione, indotta dalla pressione, di una membrana di materiale elastomerico. Con l'inserimento di tale dispositivo deformabile gli erogatori autocompensanti sono in grado di erogare una portata pressoché costante in corrispondenza di uno specifico range di valori di pressione in condotta. I materiali elastomerici che costituiscono le membrane deformabili hanno però la tendenza a

modificare, nel tempo, le loro proprietà elastiche o a deformarsi permanentemente sotto una pressione prolungata. Il cambiamento nel tempo delle proprietà degli elastomeri comporta il cambiamento delle prestazioni di autocompenso del dispositivo.

Recentemente, per ovviare a tali inconvenienti sono stati introdotti dei gocciolatori con membrana in silicone che risulta più resistente e non perde elasticità nel tempo, non assorbe acqua ed è resistente agli agenti chimici consentendo pertanto prestazioni costanti nel tempo. Poiché le sezioni di passaggio sono generalmente più piccole degli erogatori non autocompensanti di pari prestazioni, anche per tali tipi di erogatori occorre un'accurata filtrazione.

Un altro criterio di classificazione degli erogatori prende in considerazione il modo in cui questi sono montati lungo la linea gocciolante (on-line, in-line ed ali gocciolanti integrali).

Gli erogatori on-line vengono installati su tubazioni nelle quali l'agricoltore pratica dei fori nei quali sono inseriti i gocciolatori (Fig.4).

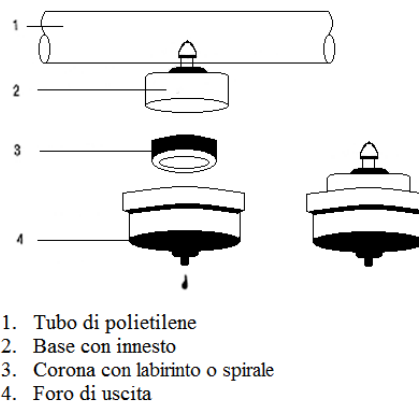


Figura 4: Gocciolatori on-line

La distanza tra i gocciolatori è condizionata dall'interdistanza tra le piante in modo tale che ad ogni pianta può corrispondere uno o più gocciolatori. Nel caso di terreni in pendenza è

preferibile utilizzare questo tipo di erogatori che hanno il pregio che le singole gocce d'acqua si distaccano dall'apparecchio e cadono in direzione verticale, bagnando l'area di terreno sottostante e corrispondente alla disposizione planimetrica degli apparecchi. Sempre nei terreni caratterizzati da elevati dislivelli, questi tipi di gocciolatori devono essere del tipo autocompensante, al fine di garantire l'uniformità della distribuzione irrigua lungo l'ala erogatrice.

I gocciolatori in-line invece sono degli erogatori collegati a tubi in polietilene, previo taglio della condotta ed inserimento del gocciolatore (Fig.5).

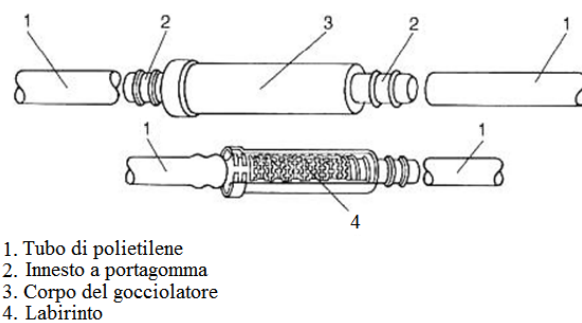


Figura 5: Gocciolatore in-line

Il vantaggio principale di questi erogatori è che il gocciolatore può essere inserito in linea esattamente dove si desidera e quindi ad interdistanze anche irregolari.

Utilizzando dei gocciolatori in-line ancorati ad un filo di sostegno posto sulla superficie dei terreni in pendenza, si corre però il rischio che le gocce aderiscano alla condotta e scivolino lungo la sua superficie esterna, distribuendosi sul terreno in modo disuniforme. Per evitare tale inconveniente risulta necessario inserire in condotta dei ganci rompitratta in corrispondenza di ciascun gocciolatore.

Un'evoluzione delle linee erogatrici con gocciolatori in-line è rappresentata dalle cosiddette linee gocciolanti integrali, costituite da tubazioni nelle quali i gocciolatori sono inseriti nel all'interno della tubazione durante la fase di estrusione dello stesso (Fig.6).

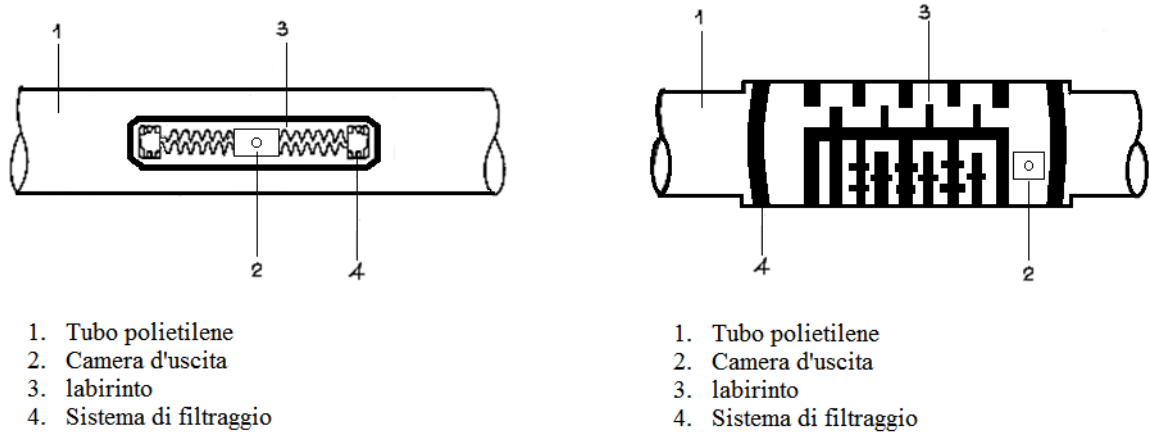


Figura 6: Linea gocciolante integrale

I gocciolatori montati all'interno della tubazione possono essere suddivisi in due categorie: gocciolatori piatti e gocciolatori coassiali (Fig.7).



Figura 7: Tipologie di gocciolatori montati nelle ali gocciolanti integrali

I primi saldati nella faccia interna della tubazione, hanno una forma parallelepipedica di sezione pressoché rettangolare. La loro presenza lungo la condotta costituisce un ostacolo, più o meno marcato a seconda della loro altezza e lunghezza, che determina la contrazione ed il

successivo allargamento della corrente idrica. I gocciolatori coassiali invece, similmente ai gocciolatori di tipo in-line provocano un restringimento della sezione della corrente in corrispondenza del gocciolatore (Fig.8).

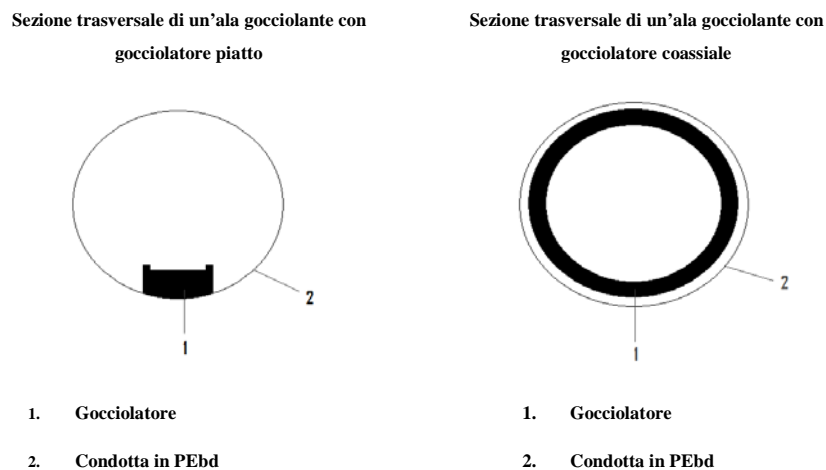


Figura 8: Sezione trasversale di un'ala gocciolante con gocciolatore piatto e coassiale

Le ali gocciolanti integrali sono realizzate in PEbd ed hanno diametri commerciali per lo più compresi fra 16 e 25 mm, con spessore della tubazione variabile da 0.15 a 1.2 mm (tubazioni flosce, semirigide e rigide).

Le ali gocciolanti integrali sono molto versatili e grazie alla possibilità di poterle stendere sul terreno, lungo i filari, consentono di adattare al meglio l'impianto irriguo alle più diversificate forme di allevamento e densità di piante.

3.2 Caratteristiche di funzionamento idraulico degli erogatori

La corretta progettazione di un impianto microirriguo non può prescindere dalla conoscenza della curva caratteristica di erogazione relativa al particolare tipo di gocciolatore che si intende utilizzare, che rappresenta il legame funzionale tra la portata erogata dall'apparecchio erogatore Q [$L^3 T^{-1}$], e l'altezza piezometrica corrispondente alla pressione di funzionamento h [L] dello stesso, e assume la forma (J. Keller, D. Karmeli 1975)

$$Q = Kh^x \quad (2)$$

in cui K ed x sono due parametri che caratterizzano il tipo di gocciolatore. Tali parametri possono ricavarsi sperimentalmente e dipendono rispettivamente dalle caratteristiche geometriche e dal regime di moto della corrente idrica all'interno del gocciolatore.

Il valore di "x" può essere compreso tra zero ed uno, secondo il tipo di erogatore; minore è il valore di "x" maggiore sarà l'attitudine del gocciolatore a erogare portate poco variabili al variare della pressione. In particolare valori di $x \approx 0$ sono propri degli erogatori autocompensanti, per i quali la portata erogata è costante entro un certo campo di pressioni di esercizio generalmente indicate dal costruttore.

Nel caso di erogatori non autocompensanti, il valore di x dipende dal fatto che il flusso degli erogatori sia a carattere di vortice, del tutto turbolento, del tutto laminare, od in qualche misura tra turbolento e laminare, cosicché si hanno valori prossimi a 0,5 nel caso di regime di moto puramente turbolento e valori tendenti ad 1 nel caso di regime di moto laminare. Talvolta, per gli erogatori nei quali si determina, al crescere della pressione, un incremento della sezione dell'orifizio, possono ricavarsi valori di x anche maggiori dell'unità.

Sperimentalmente la costante “K” e l’esponente “x” si ottengono, per una data temperatura, mediante una regressione logaritmica tra la pressione dell’apparecchio e la portata media dell’erogatore. In figura è riportato, a titolo di esempio, il confronto tra due curve caratteristiche di erogazione, ricavate sperimentalmente da Provenzano et al. (2005) relative a due diversi tipi di gocciolatori, di cui uno di tipo comune (Fig. 9) e l’altro autocompensante (Fig. 10) rispettivamente di portata nominale Q_n 1,7 e 2,3 l/h.

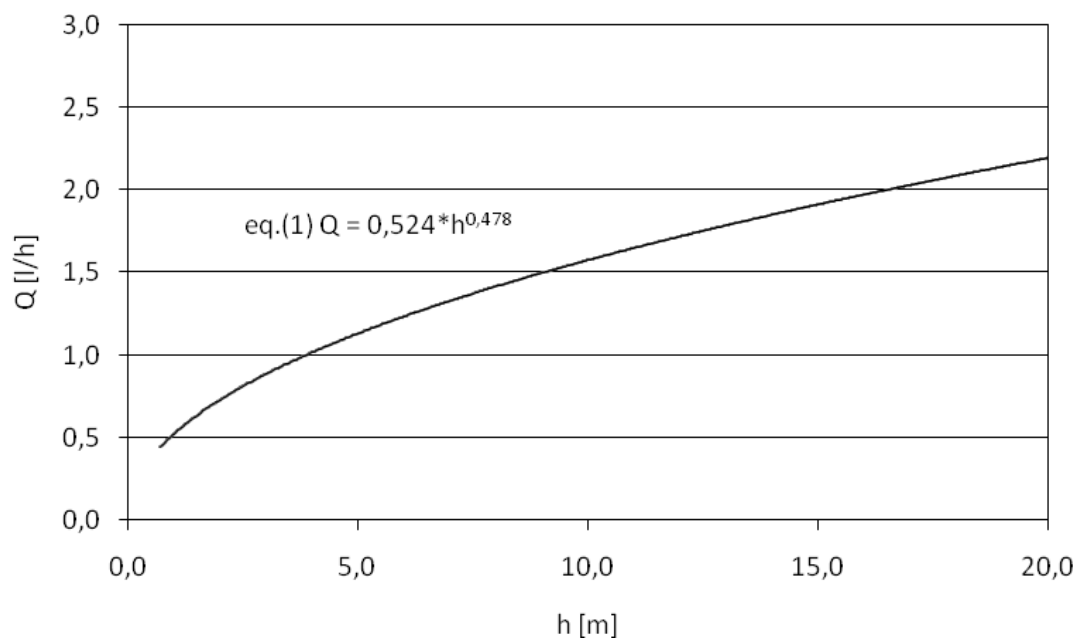


Figura 9: Caratteristica di erogazione per gocciolatore comune (Siplast junior $Q_n=1,7$ l/h)

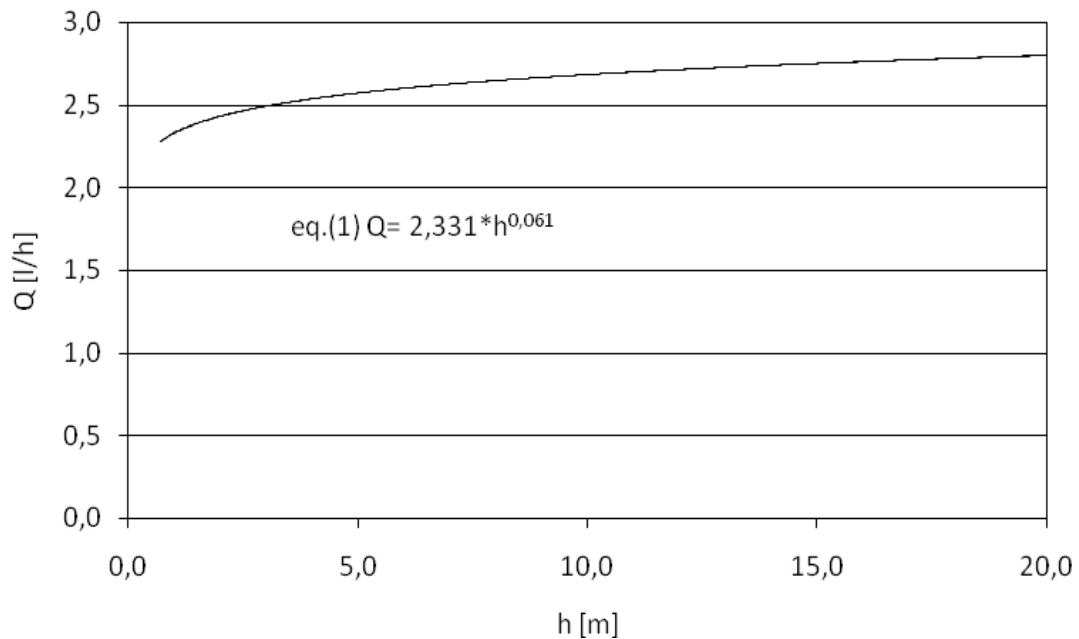


Figura 10: Caratteristica di erogazione per gocciolatore autocompensante (Netafim ram $Q_n=2,3$ l/h)

L'osservazione delle figure 9 e 10 mostra che, per i gocciolatori comuni, la portata nominale di 1.7 l/h viene erogata in corrispondenza ad un carico sul gocciolatore di 11 m, mentre invece per i gocciolatori autocompensanti, la portata è risultata, nel campo di pressione compreso tra 3m e 17m, risulta pressoché costante e pari mediamente a 2.67 l/h, valore leggermente superiore a quello nominale dichiarato dal costruttore di 2.3 l/h.

3.3 Valutazione della qualità dell'erogatore

Il funzionamento di un apparecchio erogatore dipende dalla sua struttura e dal metodo con il quale regola la portata erogata al variare della pressione di esercizio ed è fortemente influenzato dalla qualità dei materiali impiegati e dalla tecnologia di produzione adottata.

Per valutare le prestazioni degli erogatori si prende in considerazione un campione rappresentativo e su questi vengono misurate le portate effettivamente erogate in corrispondenza di determinati valori di pressione e temperatura.

In teoria, tutti gli erogatori del campione dovrebbero avere esattamente la stessa portata a parità di pressione. Nella realtà, la portata dei singoli erogatori risulta generalmente variabile, a causa di imperfezioni di fabbricazione, che inevitabilmente si verificano durante i processi di produzione dell'apparecchio.

Tali processi non consentono infatti una perfetta omogeneità tra gli erogatori prodotti a causa di difetti nella calibrazione delle luci, della qualità dei materiali plastici utilizzati, delle tecniche costruttive utilizzate, della modalità di raffreddamento dopo lo stampaggio, dell'usura degli stampi, della scarsa manutenzione degli stampi e delle variazioni di pressione e temperatura durante i processi produttivi. (Solomon, 1979).

Queste variabili determinano la qualità del prodotto finito, e di conseguenza la portata reale erogata.

La variabilità delle portate tra i singoli erogatori viene misurata, per un'assegnata pressione di funzionamento, mediante il coefficiente di variazione tecnologico (CVT), e mediante la deviazione dalla portata media (Dq).

Il coefficiente di variazione tecnologico (CVT) è una misura statistica che esprime il rapporto tra la deviazione standard delle portate erogate da un campione rappresentativo di erogatori e la portata media erogata, attraverso la seguente espressione:

$$CVT = \frac{\sigma}{Q_m} \cdot 100 \quad (3)$$

dove σ è la deviazione standard e Q_m la portata media.

In relazione al valore assunto dal CVT i gocciolatori possono essere quindi valutati sulla base della classificazione di tab. 2, proposta da Solomon (1979):

C.V.T. < 3%	Eccellenti
C.V.T. 4-7%	Buoni
C.V.T. 8-10%	Mediocri
C.V.T. 11-15%	Scarsi
C.V.T. > 15 %.	Pessimi

Tabella 2: Scala di qualità degli erogatori (Solomon, 1979)

È evidente che la disuniformità di portata erogata dagli apparecchi (per una determinata pressione di esercizio) dovuta ad un alto valore del CVT, può essere attenuata se si prevedono in fase di progetto più di un erogatore a servizio di ciascuna pianta e si consideri il CVT del gruppo di “n” erogatori. Infatti, come può dimostrarsi con considerazioni di carattere statistico, se vi sono “n” erogatori a servizio di ciascuna pianta, il coefficiente di variazione del gruppo di “n” erogatori CVT_n è legato al CVT dalla relazione:

$$CVT_n = CVT/n^{0.5} \quad (4)$$

Pertanto, potendo impiegare più erogatori per pianta (opportuno per piante di medie e grandi dimensioni) si attenuano sensibilmente gli effetti della eterogeneità tecnologica sulla uniformità di erogazione dell’acqua; è presumibile infatti che il cattivo funzionamento di qualche gocciolatore possa essere in qualche modo compensato dal buon funzionamento degli altri apparecchi, cosicché complessivamente il sistema di erogatori ha una distribuzione delle portate più uniforme.

La deviazione dalla portata media (Dq) è la differenza percentuale tra la portata nominale Q_n e la portata media Q_m effettivamente erogata da un campione rappresentativo di erogatori, quando vengono sottoposti alla pressione nominale, espressa in percento della portata nominale.

La portata nominale Q_n viene indicata dal produttore per una certa temperatura ed una pressione specifica (pressione nominale).

Dq si può esprimere attraverso la seguente espressione:

$$Dq = 100 \cdot \frac{(Q_n - Q_m)}{Q_n} \quad (5)$$

La portata media per un campione di erogatori dovrebbe coincidere con la portata nominale Q_n specificata dal produttore in corrispondenza della pressione nominale. Se la portata media è superiore od inferiore alla portata nominale in base alla quale un impianto d'irrigazione è progettato, si avranno degli ovvi effetti negativi sulle portate e sull'uniformità di erogazione.

Per una accurata progettazione gli indici Dq e CVT devono essere considerati separatamente in quanto, seppur entrambi misurano la variabilità delle portate tra i singoli apparecchi erogatori, prendendo in considerazioni variabili diverse possono fornire giudizi non univoci.

Ad esempio, supponiamo che un campione di erogatori con portata nominale di 4,2 l/h sottoposto alla pressione nominale eroghi una portata esattamente pari a 4,9 l/h, con una deviazione standard delle portate erogate pari a zero.

In tale circostanza, il campione considerato presenta un CVT pari a zero e pertanto, anche se gli apparecchi erogano la stessa portata, essa differisce in maniera significativa dal valore indicato dal produttore.

Dall'altro canto, pur risultando la portata media pari a quella nominale ($Dq=0$) può risultare un valore del CVT elevato ($>15\%$) che rappresenta una notevole variazione di portata tra i singoli erogatori.

In condizioni di esercizio, la conoscenza della relazione $Q(h)$ e del coefficiente di variazione tecnologico può risultare insufficiente a caratterizzare il funzionamento idraulico del gocciolatore a causa dell'insorgenza di differenti fenomeni che influenzano, a parità di tipologia di gocciolatore e di carico sullo stesso, l'entità delle portate erogate, in quanto possono verificarsi problemi di occlusione degli apparecchi erogatori.

Anche la variazione di temperatura dell'acqua circolante in condotta può condizionare significativamente il funzionamento idraulico dei gocciolatori. In particolare uno studio condotto da Karmeli e Keller (1975), ha evidenziato che gli erogatori più sensibili alle variazioni di temperatura dell'acqua sono quelli funzionanti in regime laminare. Per gli erogatori funzionanti in regime di transizione invece, l'effetto della temperatura sulla portata erogata si attenua e diviene trascurabile per gli erogatori funzionanti in regime turbolento.

Tale problema riveste particolare importanza considerato che le condotte solitamente utilizzate sono in polietilene di colore nero e l'azione diretta del sole può provocare variazioni complessive di temperatura, tra il tratto iniziale e finale dell'ala erogatrice, significative. Inoltre tale fenomeno risulta essere più accentuato nei tratti terminali della condotta dove le velocità della corrente risultano assai modeste (Parchomchuk, 1976).

3.4 Uniformità di erogazione

Per redigere un buon progetto di un impianto microirriguo è necessario conoscere bene le prestazioni dei materiali e delle apparecchiature che si intendono impiegare. Per valutare la

qualità di un sistema di erogazione di un impianto a goccia deve necessariamente essere presa in considerazione l'efficienza irrigua, e quindi l'uniformità di erogazione, che caratterizzano l'impianto.

Lo scopo del dimensionamento idraulico delle ali erogatrici è quello di assicurare una buona uniformità nella distribuzione della risorsa idrica a tutte le piante presenti nel campo servito dall'impianto.

L'uniformità di erogazione deve essere garantita perché, in caso contrario, si andrebbe incontro alla possibilità di provocare la presenza contemporanea di alcune aree scarsamente irrigate e di altre eccessivamente irrigate. Il risultato sarebbe quello di avere produzioni non ottimali, sia in termini quantitativi che qualitativi, nel primo caso e problemi di asfissia radicale e dilavamento dei concimi nel secondo.

L'uniformità di erogazione dipende dalla distribuzione dei carichi piezometrici nei diversi tronchi della rete e quindi dalle perdite di carico che in essi si determinano, dalla morfologia del terreno, dalla qualità e dal tipo dei gocciolatori e conseguentemente dalla relazione portata-pressione, dal numero di gocciolatori per pianta, dalla temperatura dell'acqua circolante e da eventuali fenomeni di ostruzione che si manifestano in fase di esercizio.

La misura dell'uniformità di erogazione può essere espressa utilizzando opportuni coefficienti basati su dati di progetto o su osservazioni in campo che, confrontati con scale prefissate dai diversi autori, permettono di poter esprimere un giudizio di qualità relativo all'impianto.

Di solito i coefficienti di uniformità basati sui dati di progetto prendono in considerazione solo alcuni dei parametri che influenzano l'uniformità di erogazione come, per esempio, la qualità degli erogatori o il valore minimo e massimo della pressione lungo le ali erogatrici o in corrispondenza di un determinato settore irriguo.

Di seguito sono indicati i principali metodi di calcolo di tali coefficienti.

Christiansen (1941) ha definito il coefficiente di uniformità UCC [%] delle altezze di pioggia per un impianto di irrigazione per aspersione. Sostituendo alle altezze di pioggia le portate degli erogatori, Wu et al. (1979) hanno ricavato la seguente espressione del coefficiente di uniformità per gli impianti a goccia:

$$UCC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - Q_m|}{N \cdot Q_m} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

nella quale Q_i rappresenta la portata erogata da ciascun gocciolatore, Q_m la portata media ed N il numero complessivo di gocciolatori presenti.

Keller e Karmeli (1975) hanno stabilito un coefficiente di uniformità di progetto empirico CU [%] che prende in considerazione sia la qualità degli erogatori, sia la curva caratteristica di erogazione

$$CU = \left(1 - 1.27 \cdot \frac{CVT}{\sqrt{n}} \right) \cdot \frac{Q_{\min}}{Q_m} \cdot 100 \quad (7)$$

nella quale n indica il numero di erogatori per ogni pianta, Q_{\min} indica la portata minima ricavabile dalla legge di erogazione in funzione del carico minimo, Q_m indica la portata media e CVT rappresenta il coefficiente di variazione tecnologico degli apparecchi erogatori utilizzati nell'impianto.

Il termine $(CVT/n^{0.5})$ in particolare rappresenta il coefficiente di variazione tecnologico CVT_n nel quale n rappresenta il numero di erogatori a servizio di ciascuna pianta; esso è ricavato, con considerazioni statistiche, considerando che la presenza di più erogatori per pianta

determina, come precedentemente detto, una attenuazione degli effetti della eterogeneità tecnologica sulla uniformità di erogazione dell'acqua.

E' opportuno che tale coefficiente di uniformità assuma valori non minori del 94% e comunque sempre superiori al 90%.

Nakayama et al. (1978) hanno proposto, per il coefficiente di uniformità di progetto, la seguente espressione ricavata con considerazioni statistiche:

$$CU = 100 \cdot \left(1 - 0.798 \cdot \frac{CVT}{\sqrt{n}}\right) \quad (8)$$

ed hanno indicato accettabile un campo di variazione del coefficiente di uniformità (CU), compreso tra il 90 e il 98%.

Wu e Gitlin (1974) hanno proposto un criterio finalizzato alla determinazione della massima variazione di carico piezometrico tollerabile in un'ala erogatrice o in un settore irriguo in funzione di una prefissata variazione della portata erogata.

La variazione di portata Q_{var} e la variazione di carico piezometrico h_{var} , sono definiti come:

$$Q_{var} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} \quad (9)$$

$$h_{var} = \frac{h_{max} - h_{min}}{h_{max}} \quad (10)$$

dove i termini Q_{max} e Q_{min} indicano le portate massima e minima erogate dagli apparecchi, che corrispondono rispettivamente ai carichi piezometrici massimo (h_{max}) e minimo (h_{min}), ai quali l'ala erogatrice o il settore irriguo sono sottoposti.

Gli autori hanno così ricavato la seguente relazione che lega le variazioni di portata degli apparecchi erogatori alle variazioni di carico piezometrico:

$$Q_{\text{var}} = 1 - (1 - h_{\text{var}})^x \quad (11)$$

Pertanto, imponendo la massima variazione di portata accettabile e conoscendo l'esponente x della curva caratteristica degli apparecchi erogatori, è possibile determinare la corrispondente variazione massima di carico piezometrico tra le estremità di un'ala erogatrice o tra i diversi punti di un settore irriguo.

Tra i diversi coefficienti per la stima dell'uniformità sopracitati, quelli più comunemente utilizzati sono il coefficiente di variazione CV (eq.3), il coefficiente di uniformità UCC (eq.6) e il coefficiente di uniformità di progetto CU (eq.7) che sono tra loro correlati e possono essere espressi dalle seguenti equazioni di passaggio (Wu e Irudayaraj, 1987, Wu et al., 2007):

$$UCC = 1 - 0.865CV \quad (12)$$

$$CV = -0.0095 + 0.4288Q_{\text{var}} \quad (13)$$

$$UCC = 1,0085 - 0.3702Q_{\text{var}} \quad (14)$$

$$CV = 0.77(1 - CU) \quad (15)$$

Di seguito nella tabella 3 vengono riportati i valori in percentuale dei corrispondenti valori dei coefficienti CV, UCC e CU (Wu et al., 2007)

CV (%)	UCC (%)	CU (%)
5	96	94
10	91	87
15	87	81
20	83	74
25	79	67
30	74	61

Tabella 3: Relazione tra i coefficienti CV, UCC e CU

Ogni coefficiente di uniformità può essere utilizzato indistintamente come criterio di progettazione di un impianto irriguo. Tuttavia i valori assunti da ogni coefficiente e considerati accettabili per un buon progetto sono arbitrari e possono dipendere da molteplici fattori, ad esempio per la progettazione di un sistema di irrigazione a spruzzo un coefficiente UCC (eq. 6) minore del 75% è considerato basso mentre maggiore del 85% è suggerito per colture di alto valore. Se si prende in considerazione il coefficiente Q_{var} (eq. 9) per la progettazione di un sistema di microirrigazione si deve tener presente che un valore inferiore al 10% è considerato ottimale, tra il 10 ed il 20% accettabile, maggiore del 20% inaccettabile. In realtà il criterio utilizzato per la progettazione di un impianto d'irrigazione non dovrebbe essere arbitrario, ma dettato dallo scopo che si vuole raggiungere e che può riguardare l'ottenimento del massimo rendimento, il ritorno economico, la conservazione della risorsa acqua o la protezione ambientale.

A tal proposito Wu e Barragan (2000) hanno determinato un criterio di progettazione di un impianto di microirrigazione per i coefficienti di uniformità CV, UCC e CU necessari per il

raggiungimento dell'80% o più del massimo ritorno economico totale, che comprende il costo dell'acqua, il prezzo del prodotto, la riduzione di produzione dovuta al deficit irriguo, il costo della perdita di fertilizzanti dovuta ad un surplus di irrigazione ed i costi relativi alla bonifica dovuti all'inquinamento per percolazione profonda (Tab.4).

Tale criterio è stato determinato combinando i fattori relativi ai costi della risorsa idrica Cr_1 ed i costi dovuti all'inquinamento per percolazione Cr_2 con i fattori relativi alla disponibilità della risorsa idrica ed alla protezione dell'ambiente.

I costi Cr_1 e Cr_2 sono valutati rispettivamente come $(W_m \rho_w / Y_m \rho_y)$ e $(W_m \rho_{pdp} / Y_m \rho_y)$ dove W_m è il volume stagionale di acqua di irrigazione per ottenere il massimo rendimento della coltura per ettaro [m^3/ha], ρ_w è il costo unitario di acqua [$$/m^3$], Y_m è la massima resa della coltura per ettaro [Kg/ha], ρ_y è il costo unitario di produzione [$$/Kg$], e ρ_{pdp} è il costo della perdita di concime ed il costo della bonifica per l'inquinamento ambientale provocato dalla percolazione profonda [$$/m^3$].

Il rapporto Cr_1 indica abbondanza di risorsa idrica per valori compresi tra 0 e 0.05, e limitata disponibilità idrica per valori compresi tra 0.05 e 0.10.

Il rapporto Cr_2 , indica problemi d'inquinamento ambientale quando assume valori compresi tra 1 e 10, e limitati o inesistenti problemi ambientali quando assume valori compresi tra 0 ed 1.

Valutazioni progettuali	CV (%)	UCC (%)	CU (%)
Abbondanza di acqua e nessun problema d'inquinamento ambientale ($Cr_1=0-0.05$; $Cr_2=0-1$)	30-20	75-85	60-75
Abbondanza di acqua con problemi d'inquinamento ambientale ($Cr_1=0-0.05$; $Cr_2=1-10$)	20-10	80-90	75-85
Limitata disponibilità di acqua e nessun problema d'inquinamento ambientale ($Cr_1=0.05-0.10$; $Cr_2=0-1$)	25-15	80-90	70-80
Limitata disponibilità di acqua con problemi d'inquinamento ambientale ($Cr_1=0.05-0.10$; $Cr_2=1-10$)	15-5	85-95	80-95

Tabella 4: Criterio di progettazione per l'uniformità in un sistema di microirrigazione

4. Dimensionamento idraulico delle ali erogatrici.

4.1 Introduzione

Lo scopo del dimensionamento idraulico delle ali erogatrici è quello di ottenere una elevata uniformità di distribuzione delle portate erogate dai diversi apparecchi disposti lungo l'ala; tale fine può essere raggiunto mantenendo entro limiti prefissati, ma comunque di modesta entità, le variazioni di pressione in condotta.

Per poter affrontare in maniera adeguata il problema di progetto, si deve conoscere da una parte la relazione funzionale che definisce la portata in funzione del carico $Q(h)$ e dall'altra disporre di accurate procedure di stima delle perdite di carico.

Le ali erogatrici sono interessate sia da perdite di carico continue che da perdite di carico localizzate; le prime si manifestano nei tronchi di condotta compresi tra gocciolatori successivi, mentre le seconde si verificano in corrispondenza degli innesti dei gocciolatori.

Appare dunque evidente che per poter progettare in maniera corretta un impianto a goccia bisogna necessariamente conoscere due importanti aspetti: il tipo di legge di resistenza da assumere per la valutazione delle perdite di carico continue e l'influenza delle perdite di carico localizzate causate dalla presenza degli erogatori lungo l'ala. Inoltre a queste considerazioni si deve aggiungere, in riferimento alle ali gocciolanti leggere, una accurata procedura di stima della sezione della condotta in quanto, in queste particolari tipologie di manichette, la sezione cambia in funzione del carico in condotta.

Le perdite di carico localizzate, sebbene singolarmente di modesta entità, in relazione all'elevato numero di erogatori disposti lungo l'ala, possono complessivamente assumere un peso rilevante rispetto alle perdite continue e devono pertanto essere tenute in conto in un calcolo idraulico corretto.

Esse, allo stato attuale, possono essere dedotte soltanto sperimentalmente poiché è stato dimostrato che i fattori da cui dipendono sono legati alla particolare geometria dell'apparecchio erogatore, la quale non può ricondursi a legami analitici generalizzabili.

Pertanto, per il dimensionamento idraulico delle ali erogatrici, un aspetto che riveste particolare importanza è quello relativo alla stima delle perdite di carico.

La valutazione di tali perdite di carico, l'andamento altimetrico dell'ala erogatrice e la curva caratteristica di erogazione dell'apparecchio permettono di risalire, attraverso la procedura "step by step", alla distribuzione delle pressioni lungo l'ala stessa.

Ad esempio, fissata la pressione di funzionamento in corrispondenza dell'ultimo erogatore, dalla curva caratteristica di erogazione si può dedurre la portata erogata dall'ultimo apparecchio disposto lungo l'ala, che coincide ovviamente con quella che defluisce nel tronco di condotta compreso tra l'ultimo erogatore ed il precedente. Noto tale valore di portata si possono calcolare le perdite di carico complessive, ovvero continue e localizzate, che si

determinano nel tronco di condotta considerato e quindi, mettendo in conto anche i dislivelli nel tronco stesso, la pressione in corrispondenza dell'erogatore immediatamente precedente; procedendo in tal modo da valle verso monte è dunque possibile risalire alla distribuzione delle pressioni lungo tutta l'ala erogatrice.

4.1. Valutazione delle perdite di carico continue

Lungo un'ala erogatrice la portata varia tra un valore massimo all'estremità di monte, pari alla somma delle portate effettivamente erogate dai gocciolatori disposti lungo l'ala, ed un valore nullo in corrispondenza dell'estremità di valle. Allo stesso modo variano tra un valore massimo e zero la velocità della corrente ed il numero di Reynolds (Re). Si creano pertanto, nei diversi tratti di condotta, condizioni di moto permanente con regime di moto turbolento, di transizione e laminare.

In considerazione di tale circostanza, per ciascun tronco, le perdite di carico andrebbero calcolate in funzione del regime di moto della corrente.

Gli impianti microirrigui fanno solitamente uso di condotte di materiale plastico per le quali le perdite di carico continue, in regime turbolento, possono essere calcolate mediante l'equazione empirica di Hazen-Williams che si può così esprimere:

$$J = 12 \cdot 10^9 \cdot C \cdot \frac{Q^{1.852}}{D_i^{4.871}} \quad (16)$$

in cui si indica con J, espressa in m/km, la cadente piezometrica, con Q la portata [L³ T⁻¹] espressa in l/s, con D_i il diametro interno della tubazione [L], espresso in mm, e con C il

coefficiente di scabrezza che dipende anche dal diametro.

La cadente piezometrica può essere calcolata inoltre mediante la più generale equazione di Darcy-Weisbach:

$$J = f \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot D_i} \quad (17)$$

nella quale J , [LL^{-1}] rappresenta la cadente piezometrica, f [-] l'indice di resistenza, V [$L T^{-1}$] la velocità media della corrente, g [$L T^{-2}$] l'accelerazione di gravità e D_i [L] il diametro interno della tubazione.

L'indice di resistenza f viene valutato in funzione del regime di moto della corrente nella condotta, a sua volta dipendente dal numero di Reynolds (Re).

Nel caso di regime di moto laminare ($Re \leq 2000$) l'indice di resistenza può essere valutato attraverso la formula di Hagen – Poiseuille :

$$f = 64 \cdot Re^{-1} \quad (18)$$

Per valori del numero di Reynolds compresi nell'intervallo $2000 < Re \leq 100.000$ può usarsi l'equazione:

$$f = \underline{a} \cdot Re^{-0.25} \quad (19)$$

nella quale $a = 0,316$ in accordo a quanto suggerito da Blasius, ovvero 0,302, per tubazioni con diametri compresi tra 16 e 25 mm, sulla base dei risultati sperimentali ottenuti presso la sezione idraulica del Dipartimento ITAF dell'Università di Palermo (Bagarello et al.1995).

Nell'intervallo $Re \geq 100.000$ l'indice di resistenza può essere valutato attraverso la relazione suggerita da Watters e Keller:

$$f = 0.130 \cdot Re^{-0.172} \quad (20)$$

In alternativa alle eq. (18) (19) (20) per i tubi lisci l'indice di resistenza può essere valutato attraverso la formula implicita di Prandtl e Von Kàrmàn:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left(\frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}}\right) \quad (21)$$

Nel campo del moto puramente turbolento all'interno di tubi scabri l'indice di resistenza può essere espresso soltanto in funzione della scabrezza della tubazione, annullandosi l'influenza della viscosità della corrente, cosicché l'indice di resistenza può essere espresso attraverso la formula di Prandtl:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{3.71 \cdot D_i}\right) \quad (22)$$

nella quale ε [L] rappresenta la scabrezza assoluta del materiale che costituisce la tubazione.

Colebrook combinando le due equazioni ricavate per tubo scabro ha ottenuto la seguente espressione semi-empirica, valida sia nel regime di transizione che nel regime puramente turbolento

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2.51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3.71 \cdot D_i} \right) \quad (23)$$

L'utilizzazione dell'eq. (23) risulta non agevole in quanto non è esplicitabile rispetto all'indice di resistenza f , e pertanto comporta qualche difficoltà applicativa; l'indice di resistenza può essere ricavato comunque in ogni caso attraverso un procedimento iterativo, ovvero, graficamente, per mezzo dell'abaco di Moody.

I problemi connessi all'utilizzazione dell'equazione di Colebrook possono comunque essere superati se si utilizza, per il calcolo di f , l'equazione esplicita proposta da Swamee e Jainn.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.71 \cdot D_i} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (24)$$

In pratica, tenuto conto che in condizione di moto laminare la velocità della corrente è piccola e che la cadente piezometrica, che dipende linearmente dalla velocità stessa, risulta di modesta entità si conviene in generale, senza commettere apprezzabili errori, che la cadente piezometrica possa essere valutata attraverso le equazioni valide per il regime turbolento e quindi per il calcolo delle perdite di carico continue si può fare riferimento anche alle equazioni (17) e (19).

4.2 Valutazione delle perdite di carico localizzate

Lungo le ali erogatrici, in corrispondenza delle numerose connessioni tra gli erogatori e la condotta, si determinano perdite di carico localizzate che, considerando l'elevato numero di erogatori disposti lungo l'ala, possono complessivamente diventare di entità non trascurabile rispetto alle perdite di carico continue; tali perdite di carico devono pertanto essere accuratamente considerate al fine di stimare più correttamente le perdite di carico complessive (Howell, Hiler, 1974), (Keller, Karmeli, 1975), (Howell, Barinas, 1980), (Bagarello et. al., 1997).

La presenza in condotta di un gocciolatore determina, in corrispondenza dell'innesto, una strozzatura della corrente idrica, più o meno marcata in relazione alle dimensioni del gocciolatore, che causa variazioni di velocità ed un meccanismo di agitazione turbolenta della corrente ed è quindi responsabile del verificarsi di perdite di carico localizzate.

La turbolenza della corrente è mantenuta a spese dell'energia meccanica e viene gradualmente smorzata dalle azioni dissipative derivanti dalla viscosità del liquido. Il carico totale pertanto, in corrispondenza dell'ostruzione causata dal gocciolatore, subisce una riduzione che dipende, in generale, dal numero di Reynolds della corrente e dalla geometria della connessione.

In riferimento ai gocciolatori di tipo on-line è stato dimostrato (Al-Amoud, 1995) che la presenza di tali apparecchi lungo l'ala erogatrice può determinare significative perdite di carico, soprattutto con riferimento alle condotte di diametro minore. In particolare è stato evidenziato, sulla base di indagini sperimentali condotte su un'ala erogatrice lunga 50 m, munita di 45 gocciolatori on-line installati ad interdistanza di 1 m, che le perdite di carico complessive, nella condotta munita di gocciolatori, possono risultare anche il 32% in più rispetto alle perdite di carico che si determinano in una condotta di uguale diametro, senza

gocciolatori.

Un altro studio sperimentale condotto da Howell e Barinas (1980) su sei modelli di gocciolatori, di cui una di tipo in-line, ha dimostrato che le perdite di carico causate dalla presenza di gocciolatori in-line sono generalmente più elevate di quelle prodotte dai gocciolatori on-line.

Prove sperimentali condotte da Bagarello et al. (1989) su un'ala erogatrice DN 16 (Di 12,8 mm) contenente 100 gocciolatori in-line posti ad interdistanza pari a 1 m, hanno evidenziato un'incidenza delle perdite di carico causate dai restringimenti e dagli allargamenti di sezione pari al 12% delle perdite di carico continue. L'incidenza complessiva rilevata diventa di circa il 22% se si considerano anche le maggiori perdite di carico continue causate dal minore diametro, rispetto al diametro della tubazione, dei tronchetti cilindrici interni ai gocciolatori.

Nelle ali gocciolanti integrali la presenza di un gocciolatore piatto impedisce il regolare movimento della corrente idrica analogamente a quanto accade nelle condotte che montano gocciolatori in-line o on-line.

I filetti fluidi infatti convergono per un breve tratto a monte dell'innesto del gocciolatore e fino ad una sezione (contratta) di area minore di quella della condotta, nella quale ritornano ad essere rettilinei e paralleli, per poi divergere fino ad occupare di nuovo l'intera sezione della condotta (Fig. 11).



Figura 11: Schema di contrazione e susseguente allargamento della sezione idrica nel caso di un gocciolatore piatto

La zona immediatamente a monte dell'innesto del gocciolatore è occupata da liquido che non partecipa al moto generale di trasporto e che è animato da agitazione turbolenta. Una notevole agitazione delle particelle idriche si manifesta anche in un tronchetto di tubazione a valle dell'innesto la cui dimensione cresce proprio all'aumentare delle dimensioni del gocciolatore. La velocità della corrente, dopo avere raggiunto il massimo valore in corrispondenza della sezione contratta, ritorna ad essere costante nel tronco di condotta a valle del gocciolatore; quest'ultima velocità risulta ovviamente di poco inferiore a quella relativa al tronco di condotta a monte dell'innesto, in relazione alla portata erogata dal gocciolatore.

Nelle ali gocciolanti integrali munite di gocciolatori coassiali si verificano perdite di carico localizzate causate dal restringimento della sezione idrica così come avviene nelle condotte in cui sono montati apparecchi erogatori di tipo in-line.

La presenza di gocciolatori coassiali determina infatti una contrazione della sezione idrica in corrispondenza dell'imbocco del gocciolatore, a seguito della quale la corrente occupa per intero la sezione dello stesso, per poi immettersi nel tratto di condotta successivo dove la sezione idrica disponibile al deflusso subisce un successivo riallargamento (Fig.12).

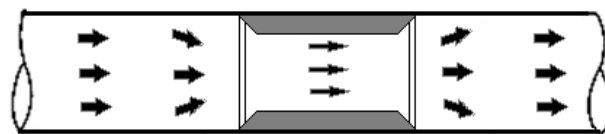


Figura 12: Schema di contrazione e susseguente allargamento della sezione idrica nel caso di un gocciolatore coassiale

Anche in questo caso ci sono due zone, all'imbocco ed allo sbocco del gocciolatore, in cui la corrente è animata da agitazione turbolenta che non partecipa al moto di trasporto ma che dissipa energia.

La perdita di carico localizzata causata dalla presenza di un gocciolatore, sia esso di tipo piatto o coassiale, lungo l'ala erogatrice è pertanto imputabile al restringimento e successivo allargamento della sezione oltre che alle maggiori perdite continue che si determinano nei tronchetti cilindrici interni ai gocciolatori a causa della minore sezione idrica disponibile, rispetto a quella della condotta.

Le perdite di carico localizzate λ_i dovute alla contrazione risultano proporzionali al quadrato della velocità della corrente, V_g , nel tratto di condotta interessato dal gocciolatore e possono essere espresse, come funzione dell'altezza cinetica della corrente, nella forma:

$$\lambda_i = \alpha'_c \frac{V_g^2}{2g} \quad (25)$$

nella quale si è indicato con α'_c un coefficiente, da determinare caso per caso, funzione della geometria della connessione.

La perdita di carico λ_s causata dall'allargamento della sezione idrica che si determina alla fine del tratto di condotta interessato dal gocciolatore (perdita di tipo Borda) può invece essere espressa nella forma:

$$\lambda_s = \alpha''_c \left(\frac{(V_g - V)^2}{2g} \right) \quad (26)$$

funzione del carico cinetico della velocità perduta $(V_g - V)$, nel passaggio dal tratto di condotta interessato dal gocciolatore avente diametro equivalente D_g e velocità pari a V_g , al tronco di condotta di diametro D_i e velocità della corrente V .

La perdita di carico localizzata complessiva, dovuta al restringimento della corrente ed al suo successivo allargamento della sezione idrica, vale pertanto:

$$\lambda = \lambda_i + \lambda_s = \alpha'_c \frac{V_g^2}{2g} + \alpha''_c \left(\frac{(V_g - V)^2}{2g} \right) \quad (27)$$

Nell'ipotesi che la portata venga erogata all'inizio del gocciolatore, la portata che transita nel tronco di condotta interno al gocciolatore è pari a quella del tronco di condotta immediatamente a valle e pertanto dall'equazione di continuità si ricava:

$$V_g = \left(\frac{D_i}{D_g} \right)^2 \cdot V \quad (28)$$

Sostituendo l'eq.(28) nell'eq. (27) si ottiene:

$$\lambda = \left[(\alpha'_c + \alpha''_c) \left(\frac{D_i}{D_g} \right)^4 - 2\alpha''_c \left(\frac{D_i}{D_g} \right)^2 + \alpha''_c \right] \frac{V^2}{2g} = \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (29)$$

nella quale il coefficiente α sintetizza l'insieme delle perdite di carico localizzate, conseguenti al restringimento ed al riallargamento della sezione idrica.

A questo termine, se si vogliono valutare le perdite continue nell'ala considerando la sua lunghezza effettiva, deve essere aggiunta un'ulteriore aliquota dovuta alle perdite di carico continue causate dal minor diametro della corrente in corrispondenza del passaggio attraverso il gocciolatore.

Anche questo ulteriore termine può essere espresso come frazione α_g del carico cinetico, se si considera standard la lunghezza del gocciolatore.

Pertanto il coefficiente complessivo da considerare per mettere in conto le tre cause sopracitate è:

$$\alpha^* = \alpha_g + \alpha \quad (30)$$

e risulta:

$$\lambda = \alpha^* \frac{V^2}{2g} \quad (31)$$

Dove α^* sintetizza sia le perdite di carico localizzate derivanti dal restringimento e successivo allargamento della sezione idrica, che le perdite di carico continue che si manifestano nel tratto di condotta in cui insiste il gocciolatore. Queste ultime naturalmente dipendono, oltre che dal rapporto tra il diametro del gocciolatore e quello della condotta (D_g/D_i), anche dal numero di Reynolds (Re) e dalla lunghezza del gocciolatore (L_g).

Karmeli e Keller (1975) hanno proposto di esprimere le perdite di carico localizzate causate dalla presenza di gocciolatori lungo un'ala erogatrice considerando la lunghezza equivalente di condotta (L_e), ossia quella lunghezza che determina una perdita di carico continua pari alla perdita localizzata causata dalla connessione.

E' possibile in pratica assimilare ad ogni perdita di carico localizzata che si verifica in un punto della condotta, una perdita di carico continua in una condotta di pari diametro e con un certo valore di lunghezza, detta appunto lunghezza equivalente. La relazione che esprime le

perdite localizzate, si converte nella relazione usata per le perdite continue, con la sola sostituzione della lunghezza equivalente.

$$\lambda = J \cdot L_e \quad (32)$$

Uno studio condotto da Provenzano et al. (2005) su quindici modelli di linee gocciolanti integrali, di cui dieci con gocciolatore piatto e cinque con gocciolatore coassiale, ha permesso di stimare il coefficiente α da attribuire all'altezza cinetica della corrente attraverso la seguente espressione che presenta un coefficiente di determinazione R^2 pari a 0.903:

$$\alpha = 0,116 \cdot \left[\left(\frac{D_i}{D_g} \right)^{13,87} - 1 \right] \quad (33)$$

Tale equazione consente di stimare α attraverso la conoscenza di un parametro di facile determinazione, quale è il rapporto tra il diametro della condotta e il diametro equivalente del gocciolatore ossia il diametro della sezione circolare equivalente alla sezione trasversale della corrente che attraversa il gocciolatore; si osserva che questa relazione permette di rispettare la condizione al contorno di $\alpha=0$ in assenza di contrazione e cioè quando il rapporto D_i/D_g è uguale a 1.

O. Rettore Neto et al. (2009) hanno condotto un esperimento su quattro linee integrali munite di gocciolatori coestrusi piatti, al fine di valutare le perdite di carico localizzate lungo le condotte. L'esperimento è stato effettuato variando la velocità della corrente in un campo di numeri di Reynolds compreso tra 7.480 e 32.597. La geometria del gocciolatore, individuata attraverso la lunghezza dell'apparecchio, il rapporto di contrazione rc e il coefficiente di

contrazione C_C più avanti definiti, è stata ottenuta attraverso un proiettore ottico ed un sensore.

Per la determinazione delle perdite di carico localizzate è stata proposta la seguente espressione, ricavata sulla base della meccanica dei fluidi e sul teorema di Bernoulli generalizzato, composta da tre termini che fanno riferimento rispettivamente alle perdite di carico all'imbocco (hf_{en}), allo sbocco (hf_{ex}) e lungo il gocciolatore (hf_{le}):

$$\lambda = hf_{en} + hf_{le} + hf_{ex} = \frac{V^2}{2g} \left(\frac{1}{C_c rc} - \frac{1}{rc} \right)^2 + \frac{0.148}{g} V_g^{1.75} \nu^{0.25} D_r^{-1.25} L_g + \left(\frac{1-rc}{rc} \right)^2 \frac{V^2}{2g} \quad (34)$$

nella quale V è la velocità della corrente nella condotta, rc il rapporto di contrazione definito come il rapporto fra l'area della corrente che attraversa il gocciolatore e l'area della condotta, V_g la velocità della corrente che attraversa il gocciolatore, D_r il diametro della sezione equivalente della corrente stessa, ν la viscosità cinematica dell'acqua, L_g la lunghezza del gocciolatore e C_c è il coefficiente di contrazione definito come il rapporto tra la sezione contratta immediatamente a valle dell'innesto e la sezione della condotta (Juana et al. 2002).

Il coefficiente C_c può essere calcolato in funzione del rapporto di contrazione rc , mediante la seguente espressione:

$$C_c = 0,907 - 0,523(1 - rc) + 0,659(1 - rc)^2 - 0,302(1 - rc)^3 \quad (35)$$

Uno studio condotto da Martì et al. (2010) utilizza un'applicazione delle reti neurali artificiali (Artificial Neural Networks - ANNs) per la stima delle perdite di carico localizzate utilizzando i dati delle prove sperimentali condotte da Provenzano e Pumo (2004).

L'ANNs è un modello semplificato del sistema nervoso umano utilizzato per risolvere problemi non lineari. È costituito da una serie di processori composti da unità singole fornite di una sorta di banca dati contenente informazioni storiche utilizzabili all'occorrenza.

Tale tecnica può essere utilizzata per diverse applicazioni specifiche, come la validazione di modelli o la classificazione di dati, effettuate attraverso processi di apprendimento.

Il modello ANNs, poiché non è lineare, è in grado di immagazzinare dati molto più complessi rispetto alle metodiche statistiche tradizionali.

Il maggiore vantaggio dell'ANNs rispetto alle tecniche tradizionali è la possibilità di utilizzarlo anche in mancanza di informazioni dettagliate riguardanti i processi fisici dei sistemi nei quali viene applicato.

Nello studio proposto, per la prima volta, l'applicazione è stata utilizzata per stimare le perdite di carico localizzate nelle ali gocciolanti integrali.

Lo studio ha dimostrato come l'indice di performance migliore (MSE) tra le perdite di carico localizzate misurate e stimate si ottenga utilizzando cinque parametri: diametro equivalente della sezione del gocciolatore (D_g), diametro interno della tubazione (D_i), lunghezza del gocciolatore (L_g), interdistanza tra i gocciolatori (I) e portata della condotta (Q).

Tuttavia l'ANNs necessita della conoscenza di sofisticati software applicativi, è di difficile applicazione e soprattutto non fornisce un'equazione generale da applicare alle diverse tipologie di linee erogatrici esistenti in commercio.

In ogni caso l'entità delle perdite di carico localizzate deve essere per ciascun tipo di gocciolatore determinata sperimentalmente, tenuto conto che la produzione di apparecchi erogatori non è unificata e che quindi tra diverse serie di gocciolatori si hanno, proprio in corrispondenza degli innesti, delle sostanziali differenze di forma.

I risultati sperimentali ottenuti nel presente studio e che verranno in seguito esaminati, evidenziano come l'equazione (33) per la stima del coefficiente α (eq. 29), non considera le maggiori perdite di carico continue causate dal passaggio della corrente attraverso il gocciolatore né il numero di Reynolds (Re). Pertanto per il calcolo delle perdite di carico continue vanno messe in conto sia quelle che si determinano nei singoli tratti di condotta privi di gocciolatori sia nei tronchi di condotta corrispondenti ai gocciolatori.

Nell'equazione (34), invece, la valutazione del coefficiente da attribuire all'altezza cinetica della corrente si basa sul coefficiente di contrazione e sul rapporto di ostruzione trascurando gli effetti dell'interferenza reciproca tra gocciolatori che dipende dall'interdistanza tra gli stessi. Inoltre la (34) non ha fornito risultati pienamente soddisfacenti in quanto in due linee integrali su quattro le differenze tra i valori misurati e quelli stimati delle perdite di carico localizzate sono risultate elevate (-21,8 % e +50%).

Fondamentale importanza assume quindi la determinazione di un criterio finalizzato all'individuazione di una procedura che consenta di valutare le perdite di carico causate dalla presenza dei gocciolatori nella condotta, considerando tutti i fattori che le influenzano.

5. Articolazione dell'indagine e metodologia sperimentale

5.1 Introduzione

L'obiettivo della ricerca è stato quello di individuare un modello per la stima delle perdite di carico (continue e localizzate) nelle linee erogatrici munite di apparecchi erogatori coestrusi, al fine di individuare un corretto criterio di dimensionamento idraulico delle stesse.

In relazione all'interesse applicativo che la problematica in esame riveste, l'indagine

sperimentale è stata effettuata con lo scopo di mettere a punto una procedura di validità generale, per la stima delle perdite di carico causate dalla presenza dei gocciolatori in condotte sia di tipo rigido che flessibile.

Tale procedura si basa sulla stima del coefficiente α^* (eq. 31) che dipende dal tipo di innesto gocciolatore-condotta, dalle caratteristiche geometriche del gocciolatore e della condotta, nonché dalle caratteristiche idrauliche della corrente.

La sperimentazione oggetto della presente tesi è stata condotta utilizzando alcune tra le più diffuse linee gocciolanti integrali leggere esistenti in commercio, in modo da estendere il campione di dati già disponibili relativi alle ali gocciolanti pesanti.

Le linee gocciolanti leggere si differenziano dalle ali pesanti in quanto vengono generalmente usate per l'irrigazione di colture stagionali estive e sono caratterizzate da basse pressioni di esercizio, comprese tra 0,4-1,2 bar e da piccoli spessori della condotta, variabili tra 0,1 e 0,3 mm. L'ingombro del gocciolatore in rapporto al diametro della condotta è decisamente minore rispetto a quello relativo ai gocciolatori installati nelle linee pesanti e ciò consente di avvolgere in bobine le ali stesse, costituite di tubi flosci.

La sperimentazione è stata articolata in diverse fasi.

Nella prima fase sono state ricavate le caratteristiche geometriche specifiche della condotta e dei gocciolatori di ogni manichetta sottoposta a prova.

Nella fase successiva sono state effettuate diverse serie di prove sperimentali al fine di valutare le perdite di carico localizzate e di conseguenza il coefficiente α^* da attribuire all'altezza cinetica della corrente; inoltre, contestualmente, sono state determinate le caratteristiche idrauliche degli apparecchi erogatori.

È stata inoltre effettuata la rielaborazione dei dati sperimentali ottenuti nelle prove condotte da Provenzano et al. 2005 al fine di tenere conto, nella procedura di stima delle perdite di

carico localizzate, dell'intero database sperimentale disponibile.

L'indagine condotta ha pertanto consentito di individuare, per le diverse tipologie di gocciolatori esaminati, il più appropriato modello di stima del coefficiente α^* .

5.2 L'indagine sperimentale

Lo studio è stato condotto utilizzando l'impianto realizzato presso il campo didattico-sperimentale del Dipartimento ITAF, il cui schema è riportato nella figura 13.

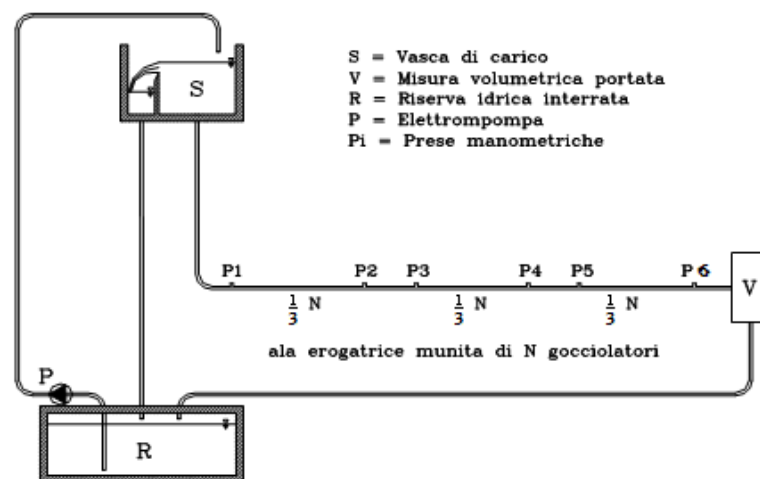


Figura 13: Schema dell'impianto sperimentale

L'impianto è costituito da un serbatoio (S) di alimentazione a carico costante del banco prova posto ad un'altezza di circa 22 m dal piano di campagna, munito di soglia sfiorante atta ad assicurare il carico costante, ed alimentata da una elettropompa previo filtraggio dell'acqua prelevata da un serbatoio interrato (R), da valvole per la regolazione della portata, da un manometro differenziale a mercurio per la misura delle perdite di carico in condotta e da un misuratore di portata.

Lungo lo sviluppo della condotta sono state installate sei prese piezometriche collegate al manometro differenziale, distribuite in modo tale da ottenere tre linee gocciolanti lunghe circa 12 m, ognuna delle quali con un numero di gocciolatori pari ad un terzo del totale. In questo modo si sono ottenuti 3 tratti di condotta delimitati dalle prese P1-P2; P3-P4; P5-P6.

Le condotte, sostenute da fili ancorati ad una struttura metallica, sono poste ad un'altezza di circa 1,60 m dal piano di campagna.

I parametri della curva caratteristica degli erogatori ed il coefficiente di variazione tecnologico (CVT) sono stati valutati utilizzando l'impianto di figura 13 opportunamente modificato, attraverso l'installazione di cinque tronchi di condotta, ognuno munito di dieci gocciolatori, prelevati dalla stessa matassa di tubazione.

A monte e a valle delle cinque linee gocciolanti sottoposte a prova sono state installate due prese piezometriche collegate al manometro differenziale, allo scopo di monitorare le perdite di carico lungo le condotte, che sono risultate comunque trascurabili in relazione alla modesta lunghezza delle linee (Fig. 14).

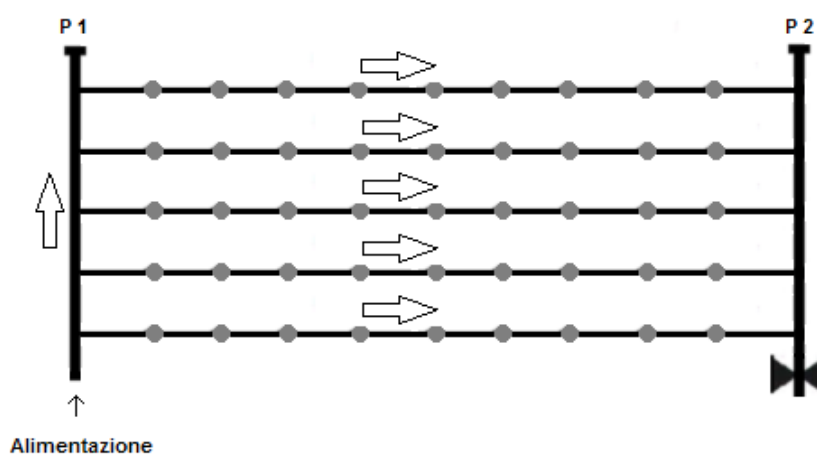


Figura 14: Schema planimetrico dell'impianto per la misura del CVT e della relazione $Q(h)$

L'indagine è stata condotta sottoponendo a prove sei diverse tipologie di ali gocciolanti

leggere di seguito denominate con le sigle L1, L2...L6; nella tabella 5 sono mostrate le ali gocciolanti esaminate e le immagini dei rispettivi gocciolatori.





SIGLA IDENTIFICATIVA	CASA COSTRUTTRICE	MODELLO	
L1	Siplast	P1 (3.8 l/h)	
L2	Plastic Puglia	Aquadrop 0.3	
L3	Siplast	P1 (1.2 l/h)	
L4	Plastic Puglia	Aquadrop	
L5	Netafim	Streamline	
L6	Siplast	P1 ultra	

Tabella 5: Linee gocciolanti leggere esaminate

La tabella 6 riporta i valori del diametro nominale D_n , dell'interdistanza I tra gli apparecchi erogatori, della portata nominale Q_n e dello spessore della condotta S_p forniti dal costruttore.

Tipo Linea	Dn [mm]	I [m]	Qn [l/h]	Sp [mm]
L1	16,0	0.15	3.8	0.20
L2	16,1	0.30	2.0	0.30
L3	16,0	0.30	1.2	0.20
L4	16,1	0.30	2.0	0.20
L5	16,0	0.30	1.5	0.20
L6	22,0	0.30	1.0	0.30

Tabella 6: Diametro nominale, interdistanza, portata nominale e spessore della condotta forniti dal costruttore

Il passo preliminare dell'indagine è stato quello di rilevare, per ciascun modello, le caratteristiche geometriche della condotta e dei gocciolatori utilizzando un calibro digitale con precisione di $\pm 0,001\text{mm}$, nonché l'interdistanza tra gli erogatori con la precisione del millimetro.

Come precedentemente accennato, le manichette leggere hanno un minore spessore della tubazione rispetto alle linee gocciolanti pesanti e ciò consente di avvolgere tali linee in bobine. Tale caratteristica fa sì che la sezione trasversale della condotta in fase di esercizio assuma una forma pressoché ellittica e variabile al variare della pressione di esercizio.

Per tale motivo i valori del diametro esterno nel corso delle prove sono stati misurati lungo le due direzioni verticale ed orizzontale al variare della pressione in condotta, considerando un range di pressioni compreso tra 0,4 ed 1 bar. La misura contestuale dello spessore delle condotta e della sezione del gocciolatore ha permesso di determinare il diametro interno equivalente medio della condotta (D_i) e il diametro interno equivalente del tratto di condotta in cui insiste l'apparecchio (D_g).

Anche la lunghezza del gocciolatore, indicata con L_g , è stata misurata utilizzando un calibro di precisione.

Per le ali gocciolanti leggere le prove sono state condotte in tre fasi mantenendo sempre i gocciolatori in funzione, in modo da considerare condizioni analoghe a quelle di esercizio.

Nelle prime due fasi si è utilizzato l'impianto schematizzato in figura 13 mentre, per la terza fase della sperimentazione, detto impianto è stato modificato in modo da ottenere lo schema riportato in figura 14.

Nel corso della prima fase è stata condotta una prova con portata di estremità al fine di accentuare le differenze di carico presenti all'estremità della condotta e nelle sezioni nelle quali erano installate le prese piezometriche. Durante la prova la portata di ogni singolo erogatore è stata misurata con metodo gravimetrico, pesando i volumi erogati in un intervallo di tempo di 5 minuti, per mezzo di una bilancia elettronica con una precisione del decimo di grammo. È stata altresì misurata la portata di estremità pesando il volume che fuoriusciva dall'estremità della condotta in un intervallo di tempo di 2 minuti.

Contestualmente ad ogni misura di portata è stata rilevata anche la temperatura dell'acqua, allo scopo di considerare l'effettiva densità e viscosità dell'acqua nel corso delle prove.

Infine con l'ausilio di un manometro differenziale a mercurio sono stati misurati i valori dei carichi in corrispondenza delle sei prese piezometriche.

Al fine di ridurre gli errori sperimentali, la determinazione della portata di estremità e dei carichi in corrispondenza delle prese piezometriche è stata ripetuta tre volte ed è stato assegnato un valore pari al valore medio delle tre determinazioni.

Le prove sono state effettuate nel campo di variazione delle pressioni di esercizio consigliato dal produttore.

Nel corso della seconda fase sono state misurate le perdite di carico complessive in ciascun

tratto di condotta compreso tra due prese piezometriche al variare della portata circolante in condotta, allo scopo di stimare le perdite di carico localizzate e quindi i rispettivi α^* .

La prova è stata condotta per dieci distinti valori di portata di estremità, ottenuti utilizzando la valvola di regolazione installata all'estremità dell'ala gocciolante, attraverso un criterio di selezione casuale.

Anche in questo caso la portata di estremità è stata determinata con il metodo volumetrico misurando al contempo la temperatura dell'acqua circolante in condotta.

La misura delle perdite di carico complessive durante ciascuna prova è stata effettuata utilizzando il manometro differenziale, misurando il dislivello manometrico tra la prima presa (P1) e le altre cinque prese installate lungo la linea erogatrice in modo tale da ottenere due misure, relative rispettivamente al carico iniziale e finale, per ognuno dei tre tratti di condotta che compongono la linea gocciolante. Un manometro semplice ha consentito anche la misura del carico in corrispondenza della presa piezometrica P1.

Ancora una volta, al fine di ridurre gli errori sperimentali, ciascuna misura è stata ripetuta tre volte.

Le perdite di carico localizzate, che considerano le perdite di carico d'imbocco, di sbocco e le perdite di carico continue lungo il gocciolatore, sono state stimate come differenza tra le perdite di carico totali misurate e quelle continue computate nei tronchi di condotta compresi tra erogatori successivi, stimate con l'equazione (17) nella quale l'indice di resistenza f è calcolato tramite l'equazione (19) con $\underline{a}=0,302$.

I valori del coefficiente α^* da attribuire all'altezza cinetica della corrente, che permette di valutare le perdite di carico localizzate sono stati quindi determinati nell'ipotesi di considerare tale coefficiente costante per ciascun tratto di condotta esaminata, mediante una funzione obiettivo che rende nulla la differenza tra le perdite di carico totali misurate e quelle stimate.

Al fine di valutare il CVT e la relazione portata-pressione $Q(h)$ degli apparecchi erogatori è stata utilizzata la procedura ISO 9261:2004(E) che prevede la determinazione delle portate e dei carichi per quattro valori della pressione (40 KPa, 60 KPa, 80 KPa, 100 KPa) eseguendo due ripetizioni: la prima con pressioni crescenti da 40 a 100 KPa e la seconda con pressioni decrescenti. Le perdite di carico continue e localizzate, nelle linee gocciolanti sottoposte a prova, sono state trascurate in relazione alla modesta lunghezza delle condotte.

6. Risultati e discussioni

Le ali gocciolanti leggere, confezionate in bobine, sono caratterizzate da piccoli spessori della tubazione; in condizioni di esercizio pertanto, come prima richiamato, la sezione di tali tubazioni si modifica in funzione della pressione di esercizio, passando da una forma pressoché ellittica ad una forma pressoché circolare.

Questa circostanza determina la necessità di far riferimento ad un diametro interno equivalente.

Le figure 15, 16 e 17 mostrano, a titolo di esempio, per le ali gocciolanti L2, L4 e L5 le variazioni del diametro della tubazione nelle direzioni orizzontale e verticale, misurate in funzione dei carichi in condotta.

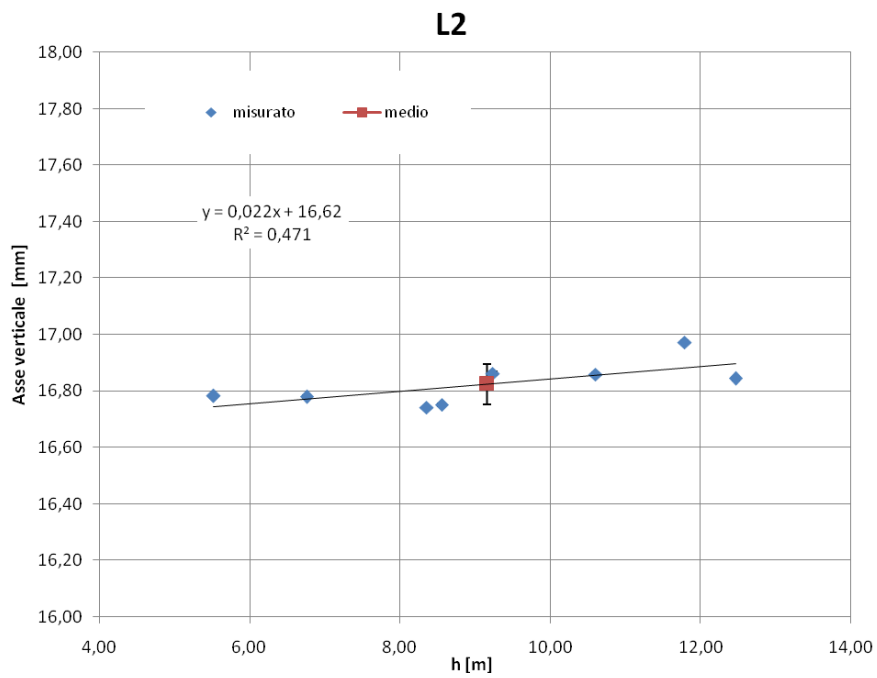
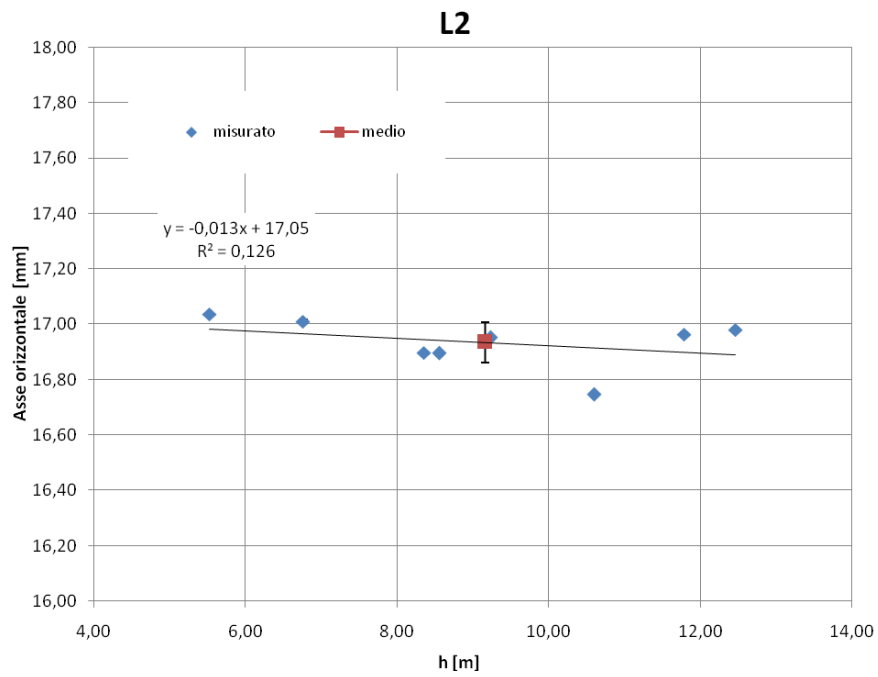


Figura 15: Valori del diametro misurato lungo gli assi orizzontale (in alto) e verticale (in basso) in funzione del carico di esercizio per l'ala gocciolante L2

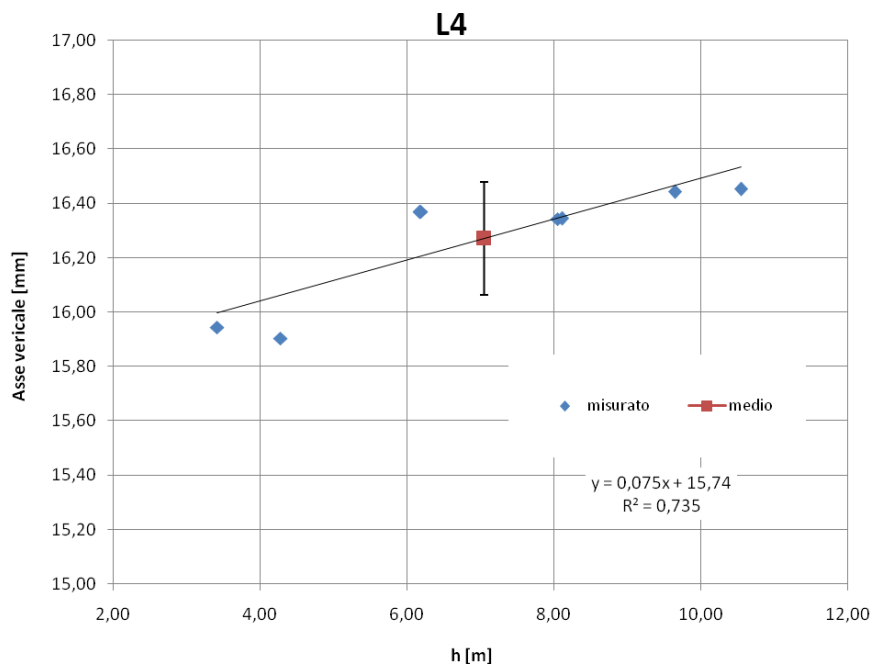
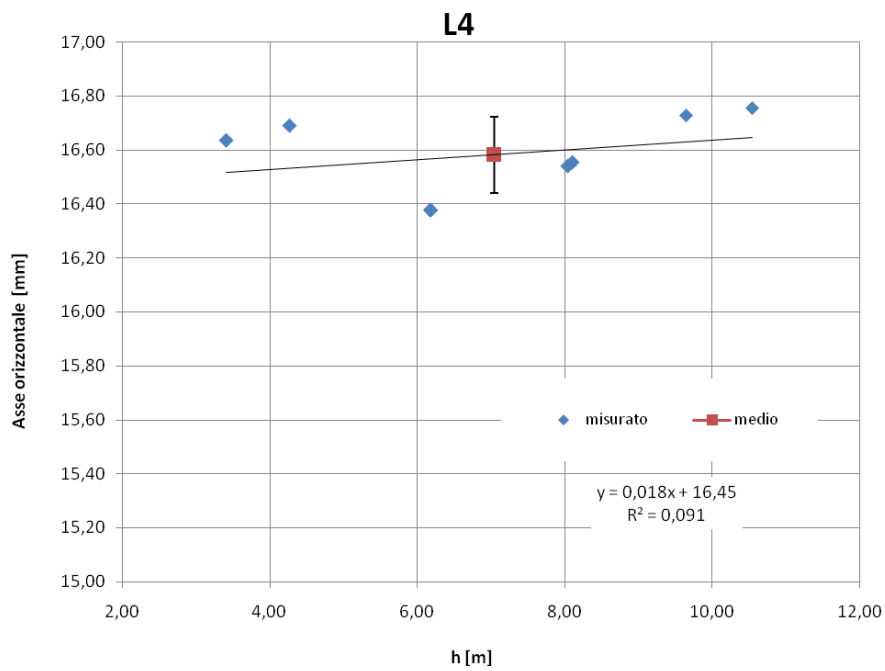


Figura 16: Valori del diametro misurato lungo gli assi orizzontale (in alto) e verticale (in basso) in funzione del carico di esercizio per l'ala gocciolante L4

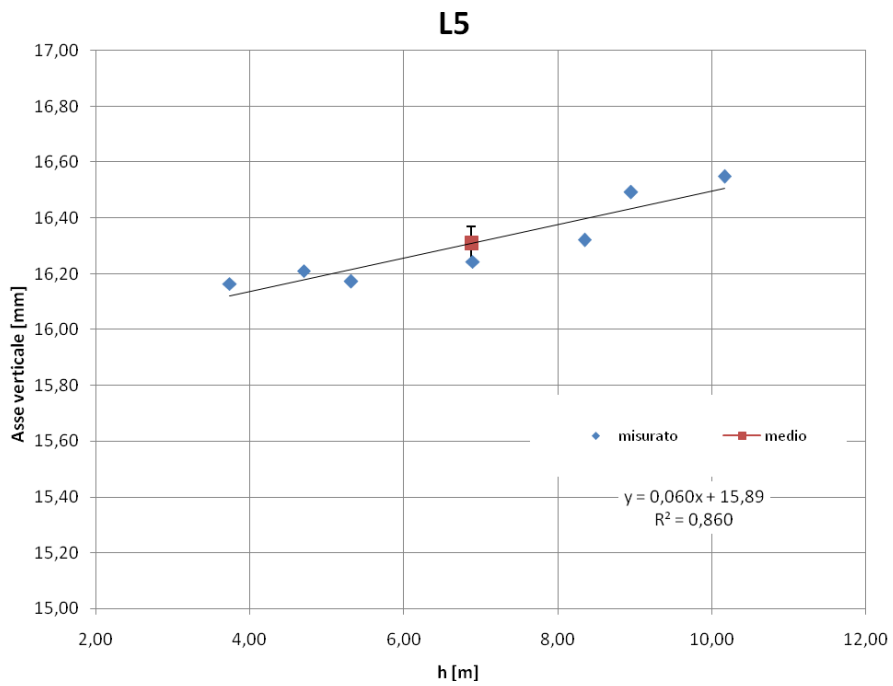
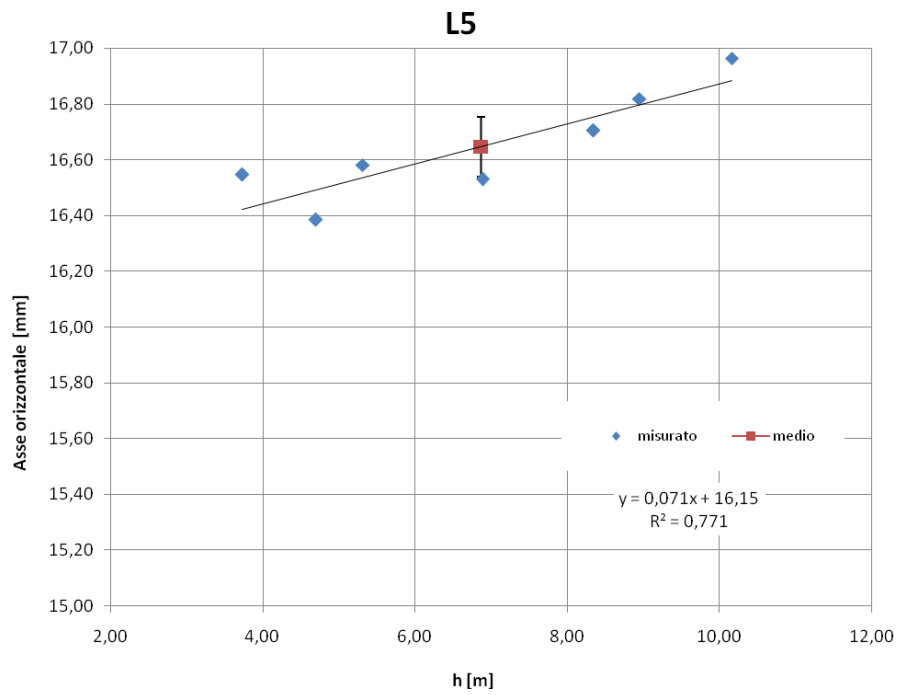


Figura 17: Valori del diametro misurato lungo gli assi orizzontale (in alto) e verticale (in basso) in funzione del carico sull'ala gocciolante L5

I grafici mostrano chiaramente una relazione tra la sezione della condotta e i carichi di esercizio ai quali la stessa è sottoposta.

Tale proprietà è meno evidente nelle ali gocciolanti che presentano uno spessore della condotta pari a circa 0.3mm (Fig.15) mentre, nelle condotte più sottili ($\approx 0.2\text{mm}$) l'influenza del carico in condotta rispetto alla sezione della tubazione risulta più marcato (Fig.16 e 17).

Poiché, come precedentemente detto, all'aumentare della pressione in condotta la sezione della tubazione assume una forma pressoché circolare, si è stabilito di assumere quale diametro interno delle tubazioni la media dei valori misurati in corrispondenza degli assi dell'ellisse, ottenuti per un valore del carico pari approssimativamente a quello medio di esercizio suggerito dal costruttore.

Le dimensioni del gocciolatore, rilevate con calibro di precisione, hanno permesso di valutare l'area della sezione idrica disponibile al deflusso e conseguentemente il diametro equivalente in corrispondenza dell'erogatore.

In tabella 7 sono riportati i dati geometrici ed idraulici ottenuti dalle linee gocciolanti sottoposte a prova.

Precisamente D_i rappresenta il diametro interno medio della condotta, D_g il diametro equivalente della condotta in corrispondenza del gocciolatore, L_g la lunghezza del gocciolatore. Nella stessa tabella 7 sono altresì indicati il coefficiente di variazione tecnologico CVT ed i coefficienti K e x della legge di erogazione.

Linea	D _i		D _g		L _g		D _i /D _g	CVT	q = kh ^x	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ			k	x
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	%		
L1	16.14	0.07	15.01	0.01	36.25	0.01	1.075	1.87	1.163	0.502
L2	16.27	0.10	15.09	0.01	22.04	0.01	1.078	4.94	0.773	0.525
L3	16.14	0.07	15.01	0.01	36.25	0.01	1.075	5.61	0.468	0.529
L4	16.00	0.24	14.80	0.01	22.04	0.01	1.081	4.85	0.801	0.521
L5	16.06	0.24	15.49	0.01	20.36	0.01	1.037	2.55	0.507	0.483
L6	22.15	0.22	21.63	0.01	29.65	0.01	1.024	5.20	0.271	0.483

Tabella 7: Dati geometrici e caratteristiche idrauliche delle linee gocciolanti sottoposte a prova

Sulla base dei valori ottenuti per il CVT è stato possibile classificare come eccellenti i modelli di erogatore L1 ed L5 e come buoni i modelli L2, L3, L4 ed L6.

Nota la geometria della condotta e dell'erogatore, nonché la relazione portata-pressione, le perdite di carico misurate attraverso la prova sperimentale a portata circolante variabile hanno permesso di valutare i valori del coefficiente α^* per la stima delle perdite di carico localizzate.

In tabella 8 sono riportati, per ciascun modello di linea gocciolante, la lunghezza della condotta L_c , il numero di gocciolatori installati N , i campi di valori di portata circolante ed il numero di Reynolds esplorati nel corso degli esperimenti.

Linea	Lc [m]	N	Campo di Q [l/h]	Campo di Re
L1	37.25	237	581-1406	7624-26682
L2	37.25	114	726-1259	12182-24536
L3	37.05	117	482-1014	9327-21361
L4	37.25	117	651-1274	5965-26654
L5	37.25	117	773-1193	11439-27185
L6	37.20	117	577-1486	9679-25179

Tabella 8: Lunghezza condotta, numero di gocciolatori, campi dei valori di portata e del numero di Reynolds esplorati nel corso degli esperimenti

Come si evince dalla tabella per ogni modello di erogatore esaminato sono state effettuate diverse prove, allo scopo di misurare le perdite di carico localizzate in un ampio range del numero di Reynolds in condotta.

La tabella 9 riporta la media, la deviazione standard, il valore minimo, massimo e mediano ricavati sperimentalmente per le ali gocciolanti leggere sottoposte a prova.

Linea	α^*				
	media	dev.st	min	max	mediana
L1	0.219	0.021	0.190	0.291	0.214
L2	0.319	0.021	0.285	0.378	0.316
L3	0.341	0.033	0.300	0.453	0.337
L4	0.247	0.028	0.212	0.327	0.241
L5	0.222	0.025	0.189	0.306	0.218
L6	0.228	0.022	0.188	0.266	0.228

Tabella 9: Valori medi, deviazione standard, minimi, massimi e mediana del coefficiente α^* per le linee gocciolanti leggere

L'esame della tabella evidenzia che i valori mediани di α^* oscillano all'interno di un campo piuttosto ristretto, compreso tra 0.214 e 0.337 in quanto il rapporto D_i/D_g risulta in tutte le ali gocciolanti piuttosto contenuto.

La figura 18 mostra i valori di α^* ricavati sperimentalmente in funzione del numero di Reynolds medio della corrente, ipotizzato costante in ciascun tratto di condotta esaminato.

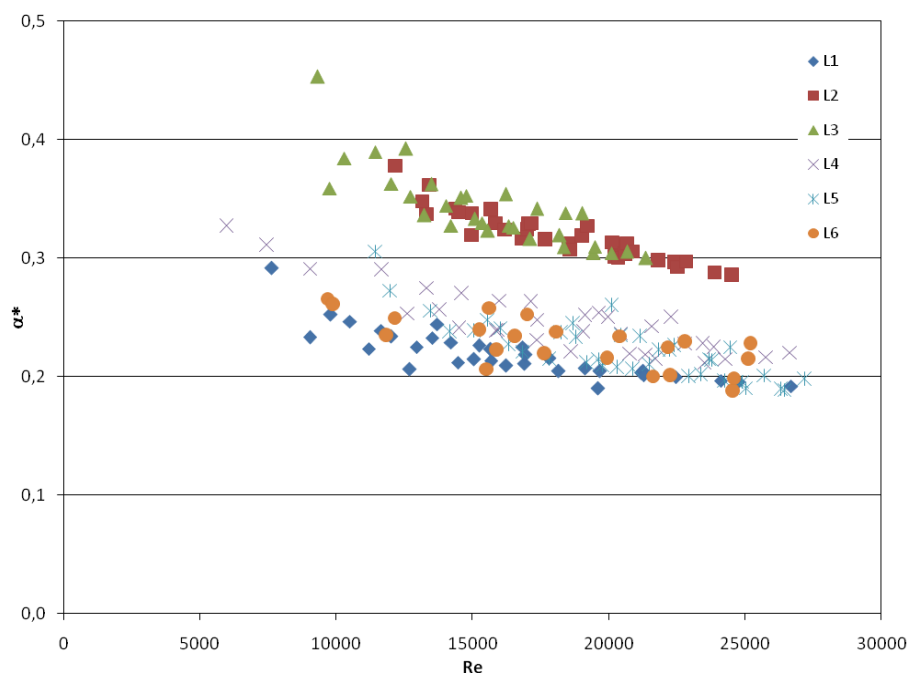


Figura 18: Coppie di valori α^* , Re determinati per le linee gocciolanti leggere sottoposte a prova

L'esame della figura evidenzia, per il campo di valori di Re investigati, che i valori di α^* tendono a diminuire al crescere di Re, sebbene siano caratterizzati da un range di variabilità non molto ampio.

Al fine di effettuare il confronto dei valori di α^* ricavati per le linee gocciolanti leggere rispetto a quelli valutabili utilizzando la relazione predittiva di stima del coefficiente α ottenuta per le linee gocciolanti pesanti (Provenzano et al., 2005) (eq.33), è stato necessario

rielaborare i dati sperimentali, a suo tempo rilevati, in modo da mettere in conto, nella stima delle perdite di carico localizzate, anche le maggiori perdite di carico continue nei tratti di condotta interessati dagli erogatori, precedentemente non considerate nella valutazione di α .

La tabella 10 riporta le caratteristiche geometriche ed idrauliche delle ali gocciolanti pesanti ricavate da Provenzano et al. (2005). Precisamente D_n è il diametro nominale, Q_n la portata nominale, I l'interdistanza fra gli apparecchi erogatori, N il numero di apparecchi installati, L_c la lunghezza della condotta, D_i il diametro interno della tubazione, D_g il diametro equivalente in corrispondenza dell'erogatore, L_g la lunghezza del gocciolatore, K e x i coefficienti della legge di erogazione.

Linea-Modello	Tipologia di gocciolatore	D_n (mm)	Q_n (l/h)	I (m)	D_i		D_g		L_g		K (l/h m ^x)	x	
					μ (mm)	σ (mm)	μ (mm)	σ (mm)	μ (mm)	σ (mm)			
A	Siplast Mono 16	Coassiali	16	4.1	1.0	12.98	0.08	12.80	0.13	63.92	0.11	1.282	0.480
B	Siplast Tandem		16	2.1	0.4	13.29	0.24	11.51	0.12	67.89	0.03	0.612	0.537
C	Rainbird Goccialin		16	2.2	0.3	13.48	0.09	12.14	0.07	68.22	0.21	0.667	0.514
D	Siplast Junior		16	1.7	1.0	13.78	0.10	12.13	0.07	32.09	0.15	0.524	0.478
E	Siplast Mono 20		20	3.8	1.0	16.90	0.08	15.82	0.10	68.60	0.03	1.022	0.492
F	Netafim Uniram (Autocompensante)	Piatti	16	2.3	0.6	13.93	0.05	11.74	0.14	43.69	0.66	2.229	0
G	Netafim Ra'am (Autocompensante)		16	2.3	0.3	13.87	0.06	11.92	0.15	42.04	1.03	2.331	0
H	Netafim Ra'am (Autocompensante)		20	2.3	0.3	16.97	0.10	15.52	0.13	42.84	0.37	2.320	0
I	Netafim Tiran 17		17	2.0	0.5	14.42	0.42	13.62	0.08	71.55	0.49	0.648	0.475
L	Netafim Tiran 20		20	2.0	0.3	17.25	0.08	16.24	0.05	71.82	0.55	0.674	0.463
M	Netafim Uniram (Autocompensante)		20	2.3	0.6	17.17	0.14	15.47	0.09	44.96	0.57	2.250	0
N	Netafim Ra'am (Autocompensante)		16	3.5	0.3	13.60	0.06	11.69	0.11	42.33	0.56	3.850	0
O	Netafim Dripline 12		12	2.5	0.3	9.76	0.03	9.35	0.06	34.82	0.48	0.672	0.471

Tabella 10: Caratteristiche geometriche ed idrauliche delle ali gocciolanti pesanti (Provenzano et al., 2005)

Gli erogatori precedentemente sottoposti a prova (Provenzano et al., 2005) sopra indicati con le lettere da A ad O, possono essere suddivisi in erogatori di tipo coassiale (A, B, C, D, E) e gocciolatori piatti (F, G, H, I, L, M, N, O). Dei modelli di erogatore sottoposti a prova cinque sono di tipo autocompensante (F, G, H, M, N).

Nella tabella 11 sono riportati, per ciascun modello di linea gocciolante pesante, la lunghezza della condotta L_c , il numero di gocciolatori installati N , i campi di valori di portata complessiva circolante ed il numero di Reynolds esplorati.

Tipo linea	L_c (m)	N	Campo di Q [l/h]	Campo di Re
A	99.4	100	110-589	6530-15501
B	47.9	120	73-681	2314-20632
C	42.0	140	101-725	2501-17971
D	96.0	96	131-643	3697-17220
E	95.1	95	205-1049	4625-22827
F	48.2	80	134-711	4111-21462
G	35.9	120	111-714	3436-21643
H	45.7	152	133-1149	2892-24321
I	49.9	100	141-884	4187-24747
L	74.3	248	182-1036	3178-18128
M	74.1	124	183-1047	3299-18885
N	35.9	120	202-666	5469-18012
O	35.5	120	211-418	7954-16458

Tabella 11: : Lunghezza condotta, numero di gocciolatori, campi dei valori di portata e del numero di Reynolds esplorati.

La tabella 12 sintetizza gli statistici relativi ai coefficienti α^* ottenuti per le diverse tipologie di ali gocciolanti pesanti esaminate.

Linea	α^*				
	media	dev.st	min	max	mediana
A	0.241	0.011	0.219	0.259	0.245
B	0.836	0.092	0.772	1.107	0.805
C	0.672	0.087	0.588	0.880	0.632
D	0.484	0.028	0.457	0.534	0.467
E	0.370	0.018	0.348	0.400	0.361
F	1.408	0.189	1.283	1.892	1.329
G	1.205	0.280	1.026	1.917	1.085
H	0.515	0.152	0.413	0.910	0.452
I	0.522	0.060	0.478	0.671	0.493
L	0.363	0.040	0.334	0.457	0.340
M	0.508	0.077	0.456	0.689	0.473
N	1.188	0.148	1.087	1.551	1.123
O	0.415	0.015	0.403	0.452	0.410

Tabella 12: Valori medi, deviazione standard, minimi, massimi e mediana del coefficiente α^* per le linee gocciolanti pesanti (dati rielaborati da Provenzano et al., 2005).

L'esame della tabella evidenzia che, con riferimento alle linee gocciolanti pesanti, il valore mediano di α^* oscilla all'interno di un campo piuttosto ampio, compreso tra 0.245 e 1.329.

La figura 19 mostra i valori di α^* ricavati sperimentalmente in funzione del numero di Reynolds medio della corrente nelle prove effettuate sulle linee gocciolanti pesanti.

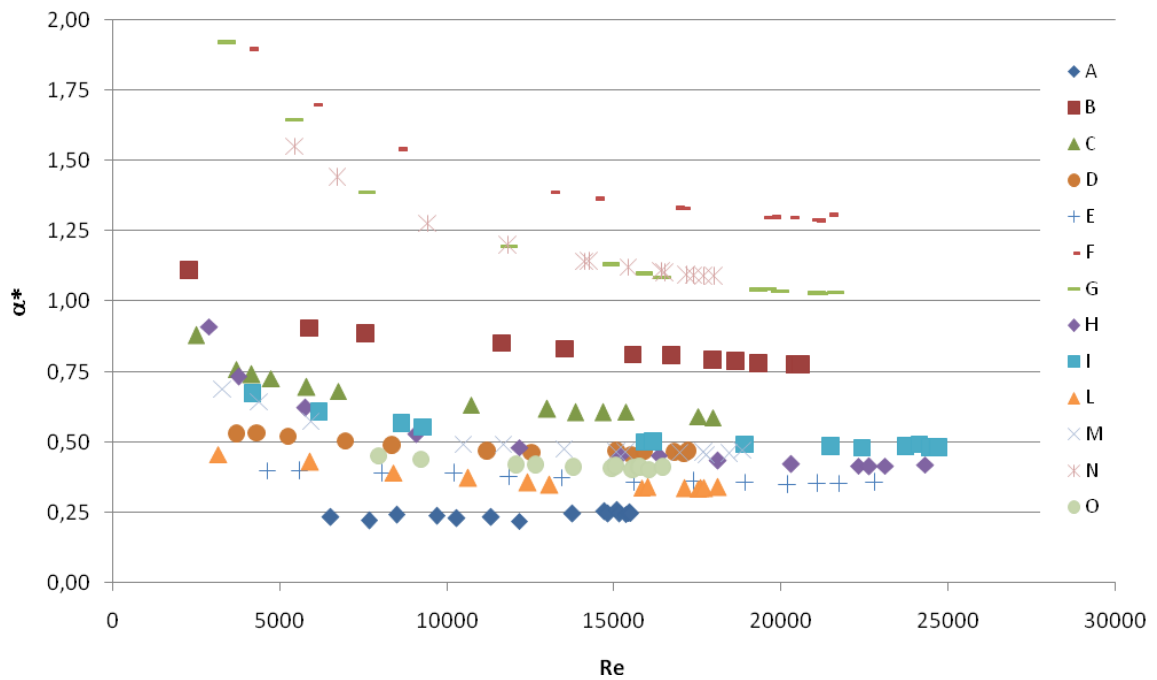


Figura 19: Coppie di valori α^* , Re determinati per le linee gocciolanti pesanti sottoposte a prova

Anche in questo caso l'esame della figura evidenzia, per il campo di valori di Re investigati, che i valori di α^* tendono a diminuire col crescere di Re anche se, a differenza delle manichette leggere, sono caratterizzati da un range di variabilità piuttosto ampio.

Sulla base dei valori di α^* ottenuti è stato quindi possibile ricalcolare i coefficienti dell'equazione (33), al fine di tenere conto anche delle perdite di carico continue all'interno del gocciolatore. La figura 20 riporta i valori mediani di α^* in funzione del rapporto D_i/D_g , ottenuti con riferimento alle linee gocciolanti pesanti, come pure la curva interpolare che presenta un coefficiente di determinazione R^2 pari a 0,957:

$$\alpha^* = 0,677 \cdot \left[\left(\frac{D_i}{D_g} \right)^{6,051} - 1 \right] \quad (36)$$

ricavata nel campo di variazione di D_i/D_g compreso tra 1.00 e 1.20 circa e che consente di rispettare la condizione al contorno di $\alpha^* = 0$ in assenza di gocciolatore, ovvero quando il rapporto D_i/D_g risulta pari a 1.

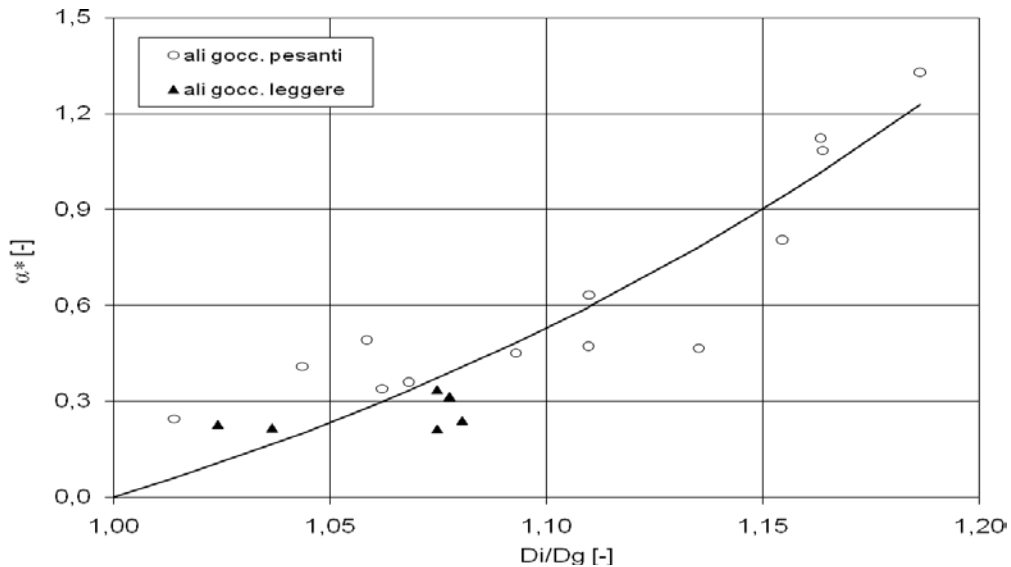


Figura 20: Andamento dei valori medi di α^* in funzione del rapporto D_i/D_g

In figura 20 sono altresì riportate le coppie α^* (D_i/D_g) sperimentalmente ottenute per le linee gocciolanti leggere. L'esame della figura evidenzia che tali coppie di valori si dispongono nell'intorno della curva interpolare ricavata per le linee gocciolanti pesanti, anche se, in relazione alle modeste dimensioni dell'ingombro del gocciolatore, si collocano in corrispondenza dei valori più contenuti del rapporto D_i/D_g .

La dispersione dei punti sperimentali potrebbe essere imputabile oltre che agli errori di misura, anche alla probabile dipendenza di α^* da altri parametri cinematici della corrente o geometrici del gocciolatore, non adeguatamente considerati nell'equazione (36).

Per tale motivo è stata condotta un'analisi statistica, unificando i dati ottenuti con riferimento sia alle manichette leggere che alle ali gocciolanti pesanti, attraverso una regressione lineare

di tipo “stepwise”, allo scopo di riconoscere i parametri che influenzano il coefficiente α^* .

Tale modello di regressione permette ad ogni passaggio successivo di introdurre una nuova variabile e verificare tutte le variabili precedentemente considerate nel passaggio precedente.

L’aggiunta di una nuova variabile può infatti rendere ridondante una o più variabili considerate in precedenza.

In accordo con lo studio condotto da Martì et al. (2010), le variabili che occorre considerare nella regressione tipo “stepwise” sono il rapporto di contrazione r_c dato dal rapporto tra la sezione idrica in corrispondenza del gocciolatore e la sezione della condotta (pari al quadrato del rapporto tra D_g e D_i), il numero di Reynolds (Re), il parametro LG pari al rapporto tra la lunghezza del gocciolatore L_g [m] ed il diametro medio equivalente del gocciolatore D_g [m] e l’interdistanza I [m] tra gli apparecchi erogatori.

In tabella 13 sono sintetizzati i risultati ottenuti tramite la regressione “stepwise”. Come variabili forzate sono state scelte il rapporto di contrazione r_c ed il numero di Reynolds Re della corrente. La scelta è ricaduta su queste variabili perché il rapporto r_c si presta bene a sintetizzare il sistema condotta-gocciolatore ed il numero di Reynolds esprime il regime di moto della corrente nella condotta che, come precedentemente detto, influenza i valori di α^* .

Statistix 8.0					
Stepwise Linear Regression of α^*					
Forced Variables	$rc = \left(\frac{D_g}{D_i}\right)^2$				
	Re				
Unforced Variables	$LG = \frac{L_g}{D_g} = L_g \sqrt{rc} \cdot D_i$				
	I				
Step	R Sq	MSE	P	R R L	C E G I
1	0.6845	0.03485		A B . .	
2	0.7193	0.03109	0.0000 +	A B C .	
3	0.7202	0.03108	0.2945 +	A B C D	
Resulting Stepwise Model					
Variable	Coefficient	VIF			
Constant	3.47600				
rc	-3.54544	1.1			
Re	-6.808E-06	1.2			
LG	0.05094	1.4			
I	0.04505	1.2			
Cases Included	361	R Squared	0.7202	MSE	0.03108
Missing Cases	0	Adjusted R Sq	0.7170	SD	0.17630

Tabella 13: Risultati della regressione tipo stepwise

I risultati ottenuti hanno permesso di stabilire che, oltre al diametro interno della condotta D_i e al diametro medio equivalente del gocciolatore D_g , per ben definire il sistema condotta-gocciolatore risulta di fondamentale importanza considerare innanzitutto il numero di Reynolds Re , poi la lunghezza del gocciolatore L_g ed infine l'interdistanza I .

Questo si può spiegare in quanto i parametri rc e LG , esplicitati in tabella 13, esprimono in maniera soddisfacente la geometria del tratto di condotta in cui insiste il gocciolatore, il numero di Reynolds considera il regime di moto della corrente nella condotta e l'interdistanza esprime l'eventuale interferenza tra i gocciolatori, dipendente ovviamente dalla loro interdistanza.

La tabella 13, inoltre, mostra chiaramente come l'introduzione delle variabili LG ed I faccia modificare leggermente l'indice di performance Mean Square Error (MSE), che si riduce da 0.0349 a 0.0311.

Inoltre, al fine di escludere legami lineari fra le variabili introdotte nel modello è stata valutata la multicollinearità attraverso il Variance Inflation Factors (VIF).

La multicollinearità si ha quando le variabili introdotte nel modello di regressione sono tra loro correlate e quindi non indipendenti. I VIF sono misure di multicollinearità che consentono di osservare quanto una variabile esplicativa risulta spiegata dalle altre esplicative dell'equazione.

Il VIF è una stima di quanto la multicollinearità aumenta la varianza di un coefficiente stimato ed è calcolato per ogni esplicativa. Un VIF uguale ad 1 significa che quella variabile non è coinvolta in nessuna situazione di multicollinearità. In generale non esiste nessun criterio universalmente riconosciuto per stabilire la grandezza di VIF che indichi una accentuata multicollinearità, tuttavia generalmente vengono considerati VIF superiori a 10 come indicativi (M. Verbeek, 2008)

I risultati mostrano una bassissima multicollinearità dei parametri presi in considerazione con un VIF prossimo all'unità.

I risultati ottenuti attraverso l'MSE e il VIF dimostrano che tutte le variabili prese in considerazione, ognuna con un peso diverso ed indipendentemente dalle altre, influiscono sulla determinazione del coefficiente α^* .

In base ai risultati forniti dalla regressione tipo "stepwise", considerato che l'utilizzo delle variabili LG ed I ha un'influenza trascurabile sul valore dell'indice MSE, è stata verificata l'utilizzabilità della seguente relazione che permette la valutazione di α^* mediante i soli due parametri r_c ed R_e .

$$\alpha^* = \left\{ -2 \log \left[\left(\frac{a}{c \operatorname{Re}} \right) + (b \sqrt{rc}) \right] \right\}^d \quad (37)$$

La relazione (37) presenta 4 costanti (a, b, c, d), che sono state determinate attraverso una regressione non lineare. Tali parametri sono stati diversificati a seconda se il gocciolatore è di tipo coassiale o piatto e sono riportati in tabella 14.

Tale suddivisione è stata resa necessaria in quanto le caratteristiche geometriche delle due tipologie di gocciolatori risultano profondamente diverse e di conseguenza anche l'ingombro da essi provocato.

COSTANTI	COASSIALI	PIATTI
a	-95236.7	-7.196
b	2064.8	0.127
c	0.385	0.370
d	8.88	14.85

Tabella 14: Valori assunti dalle costanti per le due tipologie di gocciolatore esaminate

Pertanto sostituendo i valori rispettivamente per i gocciolatori coassiali e piatti nella (37) si ottiene:

$$\alpha^* = \left\{ -2 \log \left[\left(\frac{-95236.7}{0.385 \operatorname{Re}} \right) + (2064.8 \sqrt{rc}) \right] \right\}^{8.88} \quad (37a)$$

$$\alpha^* = \left\{ -2 \log \left[\left(\frac{-7.196}{0.370 \operatorname{Re}} \right) + (0.127 \sqrt{rc}) \right] \right\}^{14.85} \quad (37b)$$

La tabella 15 riporta i valori dell'errore quadratico medio (MSE) e della radice dell'errore

quadratico medio (RMSE) tra i valori di α^* misurati ed i corrispondenti stimati attraverso l'equazione (36), ricavata dalla rielaborazione dei dati precedentemente ottenuti da Provenzano et al. (2005) e l'equazione (37) che tiene conto, oltre che del rapporto di strozzamento rc , anche del numero di Reynolds Re .

$\alpha^* = 0,677 \cdot \left[\left(\frac{D_i}{D_g} \right)^{6,051} - 1 \right]$		
Tipologia di gocciolatore	Coassiale	Piatto
MSE	0.0312	0.0246
RMSE	0.1768	0.1568
$\alpha^* = \left\{ -2 \log \left[\left(\frac{a}{c \cdot Re} \right) + (b \sqrt{rc}) \right] \right\}^d$		
Tipologia di gocciolatore	Coassiale	Piatto
MSE	0.0098	0.0111
RMSE	0.0989	0.1052

Tabella 15: MSE e RMSE in base alla tipologia di erogatore ottenuti utilizzando le equazioni (36) e (37)

L'analisi della tabella evidenzia come l'equazione (37) tiene conto anche del numero di Reynolds e fornisce sia per i gocciolatori di tipo coassiale che di tipo piatto dei valori di MSE molto bassi, pari rispettivamente a 0.0098 e 0.0111, indicando una stima abbastanza accurata dei valori di α^* , che certamente migliora quella ottenuta non considerando il numero di Reynolds della corrente.

La figura 21 mostra il confronto tra i valori di α^* stimati utilizzando l'equazione (36) ed i corrispondenti valori mediani misurati. Tali valori vengono indicati ricorrendo ad una diversa

simbologia a seconda che si faccia riferimento ad ali pesanti con gocciolatori piatti, con gocciolatori coassiali o a manichette leggere.

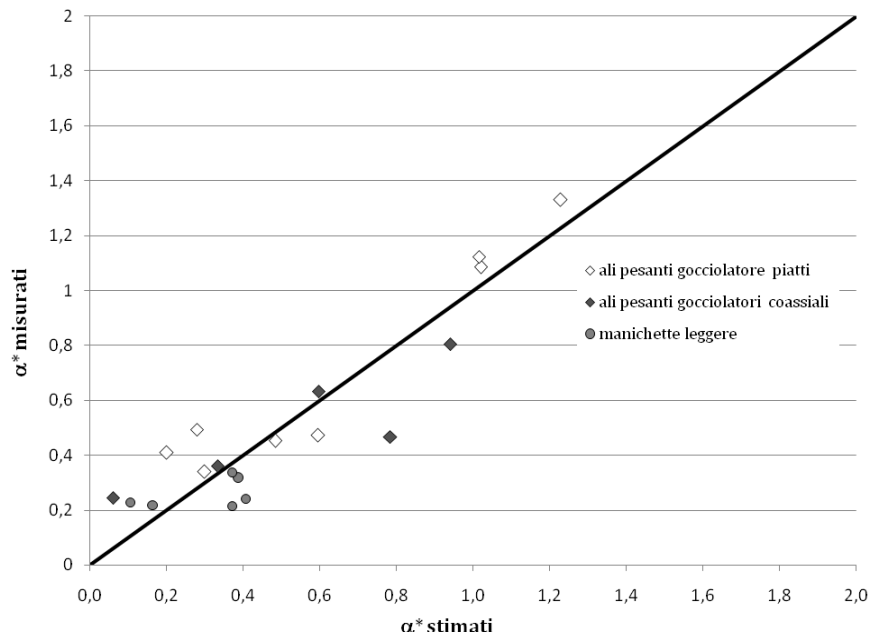


Figura 21: Confronto tra i valori di α^* stimati con l'equaz. (36) e quelli misurati per ali gocciolanti pesanti e manichette leggere

L'esame della figura evidenzia che l'equazione (36), che non considera il numero di Reynolds, sottostima, nella maggior parte dei casi esaminati, i corrispondenti valori di α^* . Inoltre si nota come le manichette leggere, che sono caratterizzate da un range di variabilità di α^* non molto ampio, sono quelle che meno differiscono dalla retta che esprime la perfetta uguaglianza tra i valori misurati e quelli stimati.

Le figure 22 e 23 mostrano il confronto tra i valori di α^* stimati utilizzando l'equazione (37) ed i corrispondenti valori puntuali misurati, rispettivamente per le ali gocciolanti pesanti con gocciolatori coassiali e per le ali gocciolanti con gocciolatori piatti.

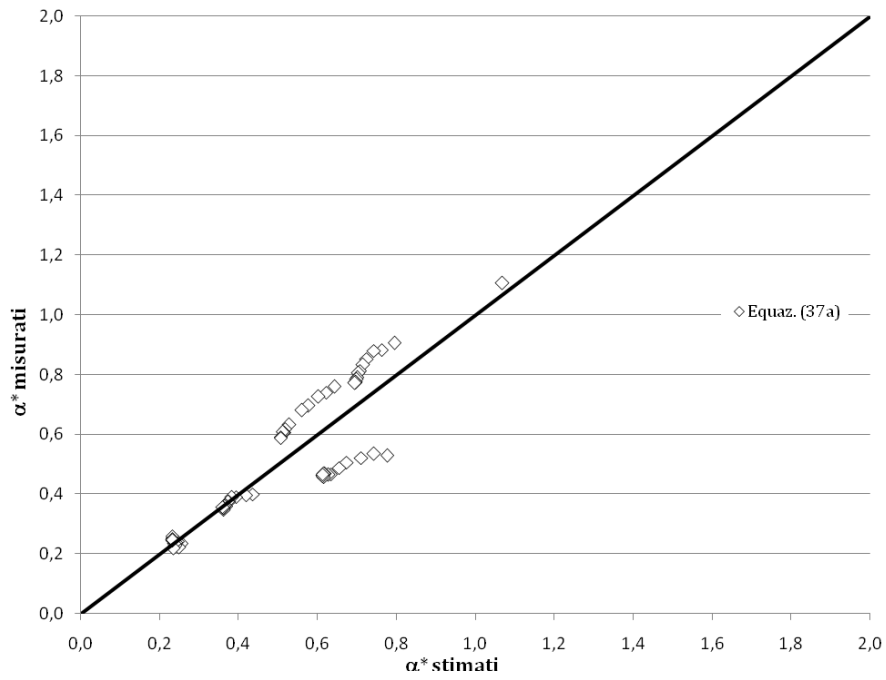


Figura 22: Confronto tra i valori di α^* stimati con l'equaz. (37a) e quelli misurati per ali gocciolanti pesanti con gocciolatori coassiali

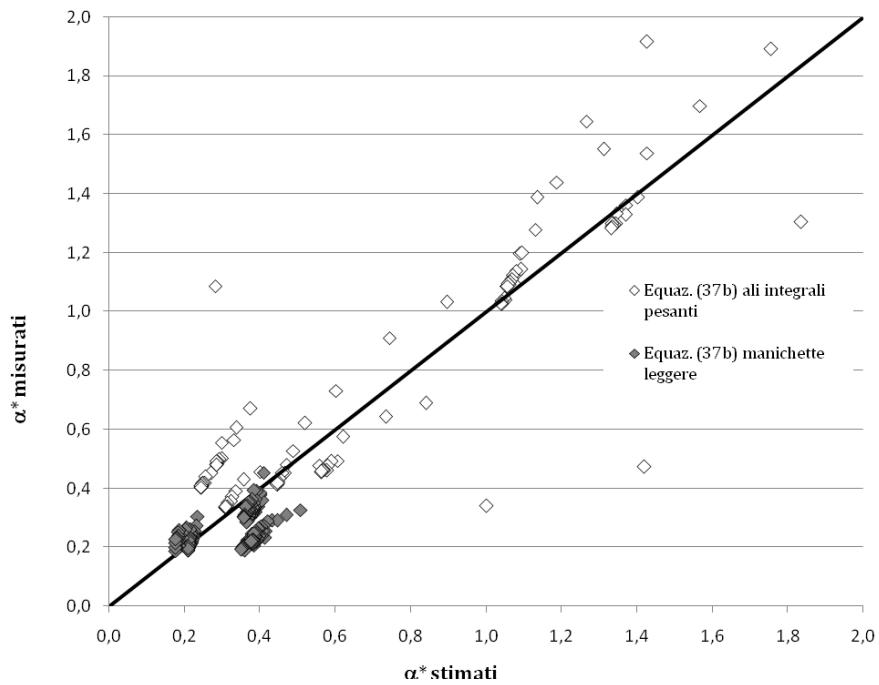
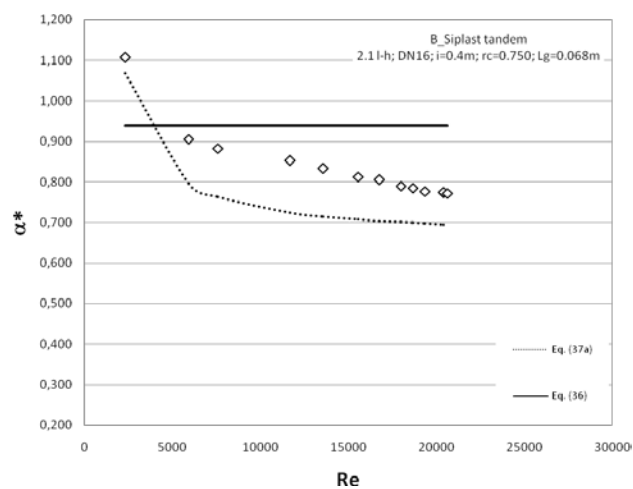
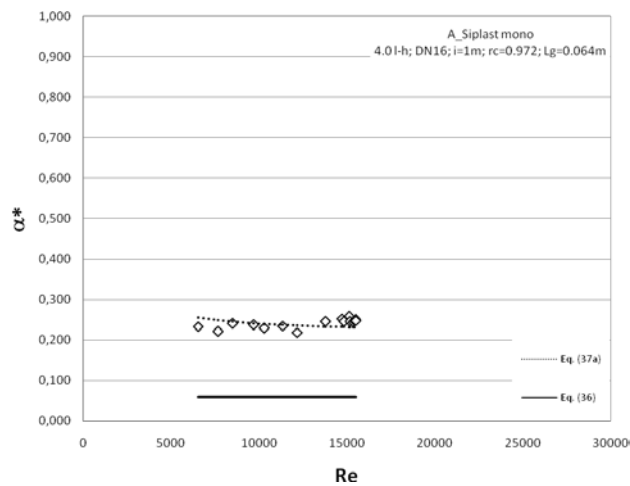
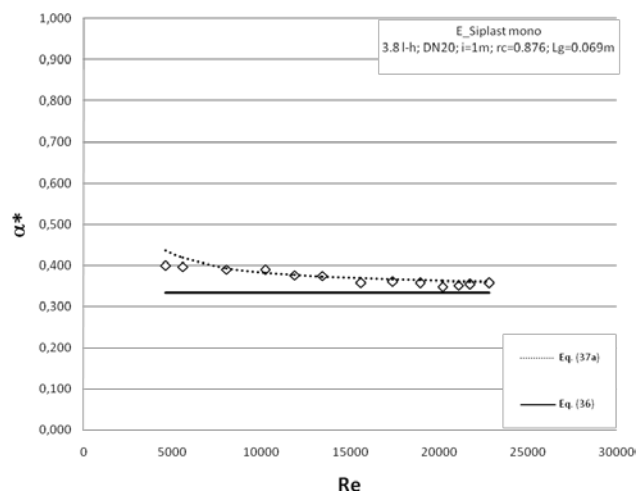
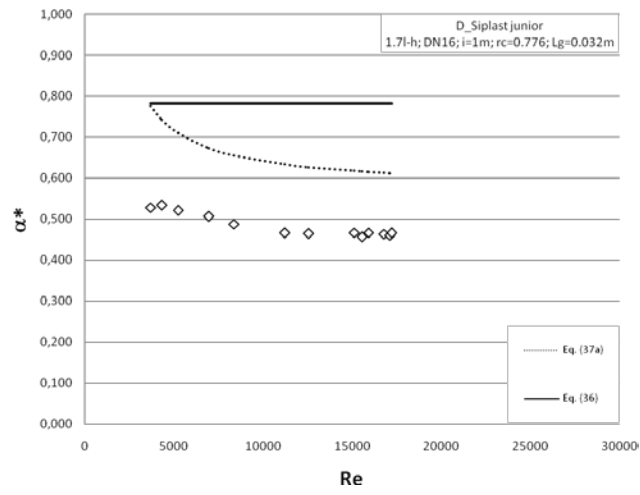
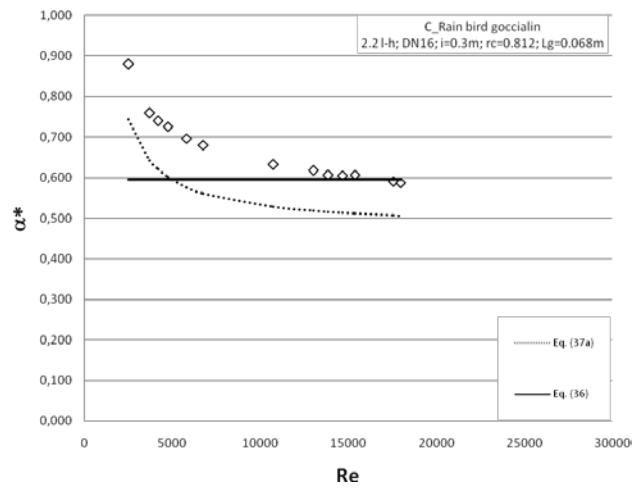


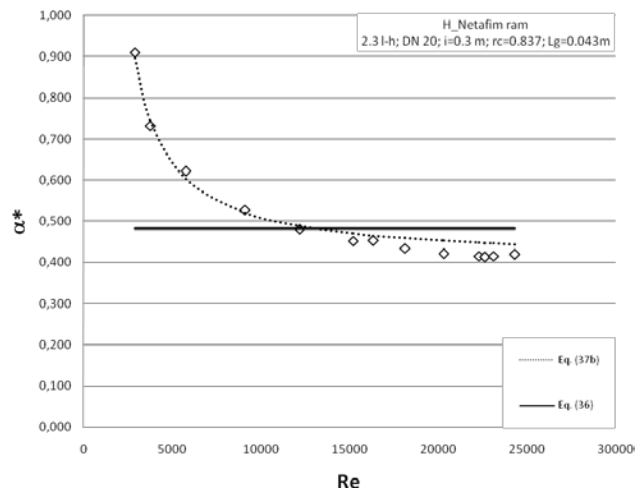
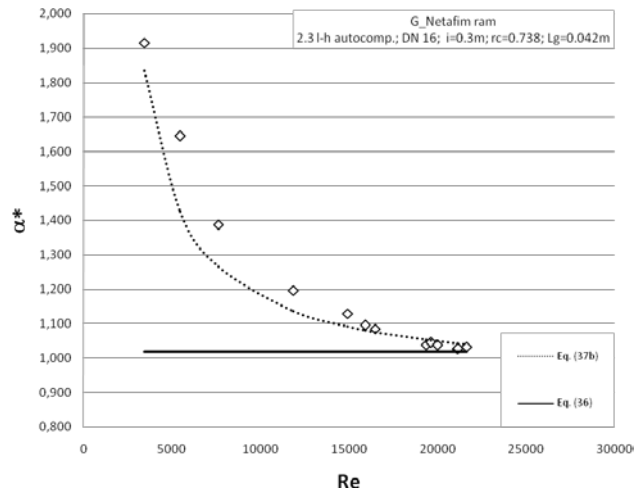
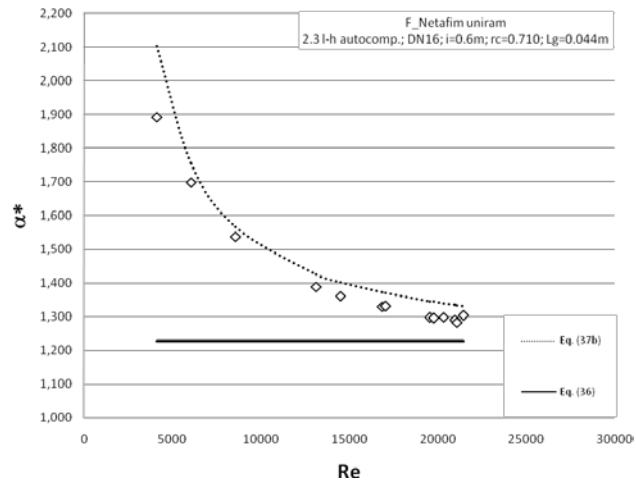
Figura 23: Confronto tra i valori di α^* stimati con l'equaz. (37b) e quelli misurati per ali gocciolanti pesanti e manichette leggere con gocciolatori piatti

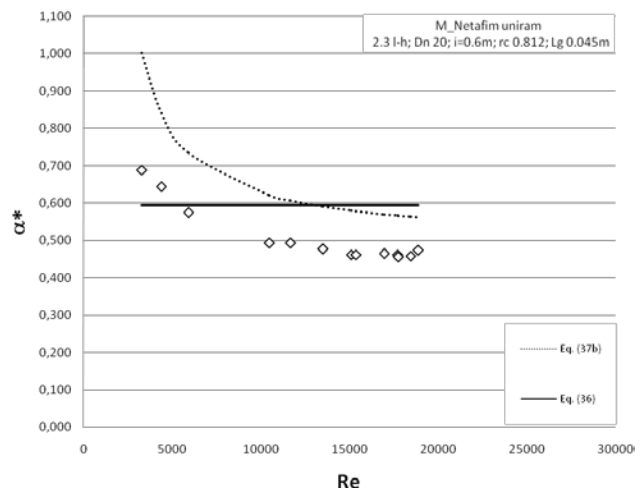
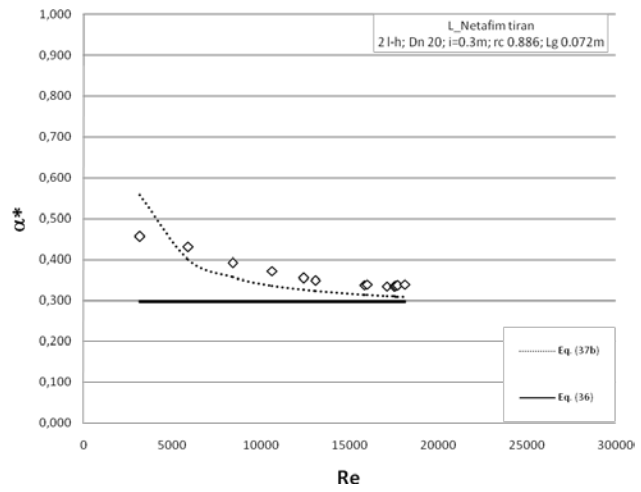
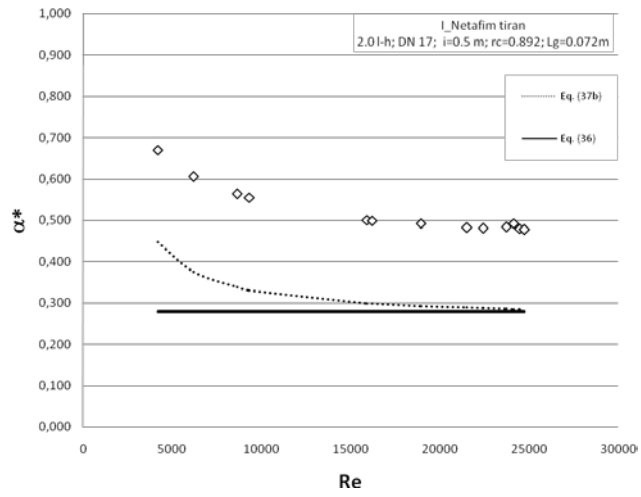
Le figure mostrano come il criterio di stima di α^* proposto (eq.37), che considera oltre al rapporto di contrazione, anche il numero di Reynolds della corrente, riesce a predire con buona accuratezza i valori di α^* misurati (Fig. 22 e 23) con differenze tra il valore assoluto di α^* stimato e quello misurato, espresso in percentuale di quest'ultimo, pari mediamente al 14% per i gocciolatori coassiali e al 27% per i gocciolatori piatti.

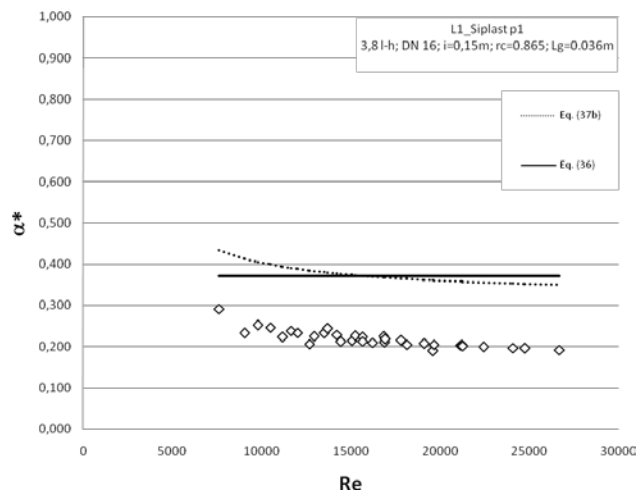
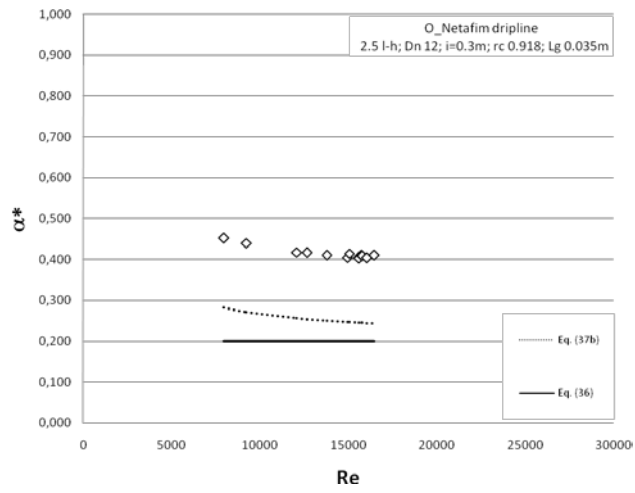
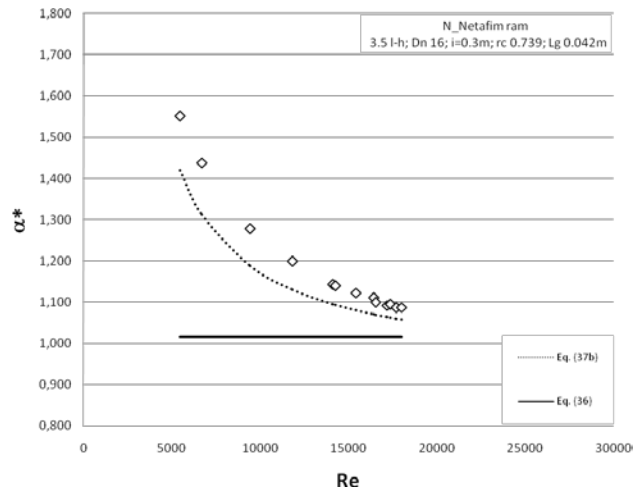
Le successive figure mostrano, per ciascun modello di ala gocciolante esaminato, il confronto, in funzione del numero di Reynolds, tra i valori di α^* misurati e quelli stimati utilizzando le equazioni (36) e (37).

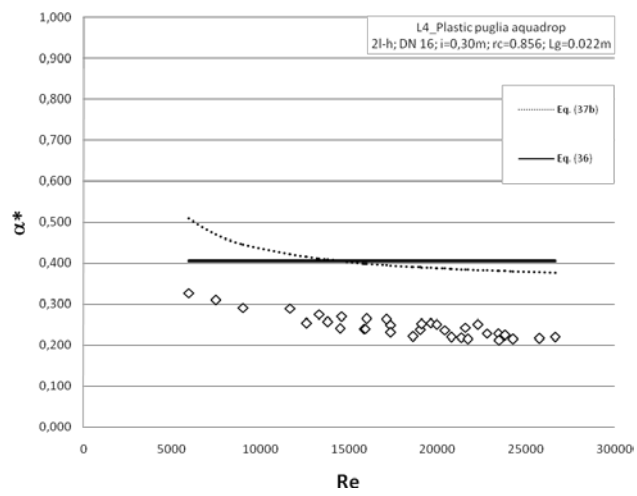
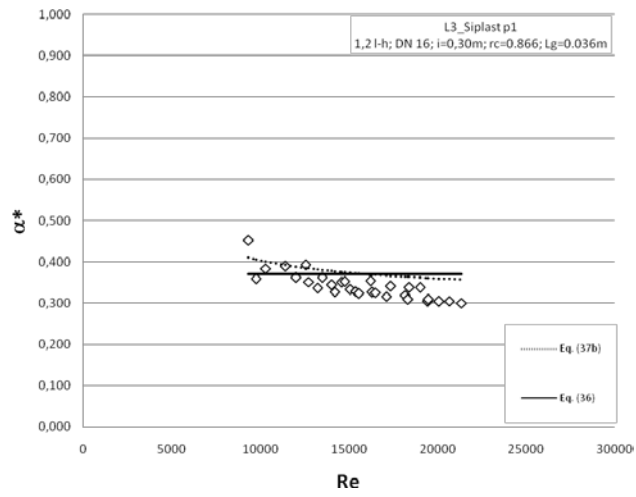
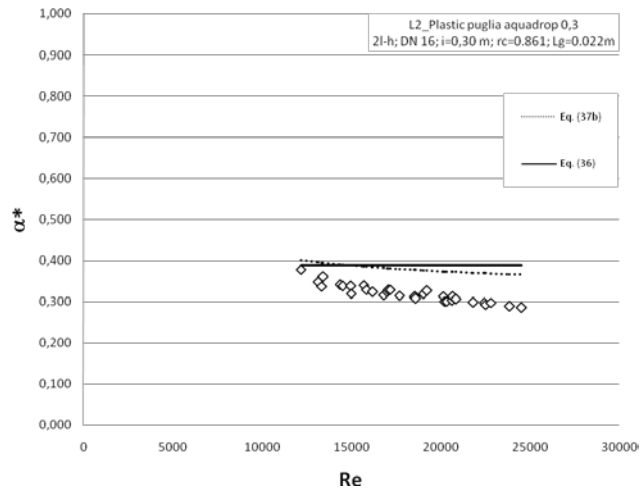












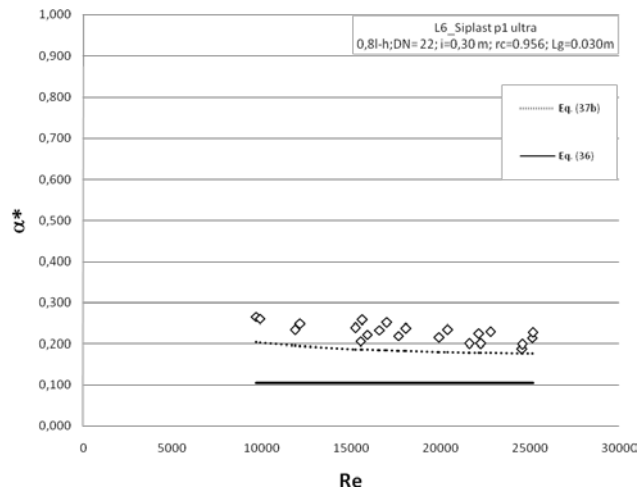
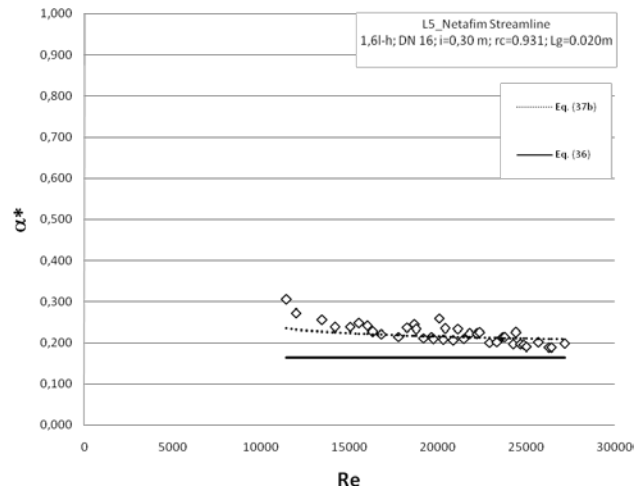


Figura 24: Valori di α^* stimati e misurati in funzione di Re

L'analisi delle figure mette in evidenza come l'equazione predittiva proposta per il calcolo di α^* riesca ad esprimere in maniera abbastanza soddisfacente l'andamento degli α^* in funzione del numero di Reynolds. Ciò risulta ancor più evidente quando si effettua il confronto tra tale equazione (37) e l'equazione (36) per la quale il valore di α^* risulta costante al variare del numero di Reynolds.

In alcune ali gocciolanti non si osserva una buona corrispondenza tra i valori stimati e quelli

misurati; ciò potrebbe essere imputabile oltre che agli errori di misura, anche alla dipendenza di α^* da altri parametri geometrici del sistema condotta-gocciolatore, non considerati nell'equazione (37).

Al fine di effettuare una ulteriore verifica del modello proposto per la stima del parametro α^* sono stati utilizzati i dati sperimentali acquisiti da Bertolacci e Megale (2000, 2003) relativi a prove condotte sulle due linee gocciolanti integrali denominate B ed L5, identiche a quelle utilizzate in questo studio.

La validazione è stata in particolare effettuata attraverso il confronto tra il valore delle perdite di carico complessive misurate sperimentalmente su ciascuna delle due linee gocciolanti, con quelle stimate attraverso l'applicazione della procedura "step by step" utilizzando, per il calcolo delle perdite di carico continue l'equazione di Darcy-Weisbach ($\lambda=0,302$), e per quelle localizzate le equazioni (36) e (37), che considerano rispettivamente α^* costante e variabile al variare del numero di Reynolds.

Sono stati a tal fine utilizzati come dati di input le grandezze geometriche relative all'ala erogatrice e al gocciolatore, la curva caratteristica degli erogatori, la temperatura dell'acqua circolante in condotta e l'altezza piezometrica in corrispondenza dell'ultimo erogatore.

La procedura "step by step", nota la geometria dell'ala erogatrice, nonché le caratteristiche geometriche della condotta e del gocciolatore, fissata l'altezza piezometrica all'estremità di valle dell'ala gocciolante, procedendo da valle verso monte, ha permesso di ricavare in corrispondenza di ciascun erogatore l'altezza piezometrica e, conseguentemente, la portata erogata dallo stesso. L'iterazione del calcolo sull'intera ala gocciolante ha permesso di determinare il valore del carico a monte e quindi delle perdite di carico complessive lungo l'ala, nell'ipotesi di trascurare le perdite di carico localizzate ovvero di stimarle attraverso le

equazioni (36) e (37). Tali valori sono stati quindi confrontati con i corrispondenti misurati sperimentalmente (Bertolacci, Megale, 2000, 2003).

Con riferimento al modello di linea gocciolante denominato B, la tabella 16 riporta i valori sperimentali del carico a monte ($h_{\text{monte, m}}$), del carico a valle ($h_{\text{valle, m}}$) e della perdita di carico complessiva (Δh_m).

Bertolacci e Megale (2003)		
$h_{\text{valle, m}}$	$h_{\text{monte, m}}$	Δh_m
[m]	[m]	[m]
12.86	30.03	17.17
10.60	25.04	14.44
8.39	20.06	11.67
7.31	17.53	10.22
6.22	15.02	8.80
5.12	12.50	7.38
4.06	10.06	6.00

Tabella 16: Valori sperimentali del carico a monte, h_m , del carico a valle, h_v , e della perdita di carico ΔH_m , misurati (Bertolacci e Megale, 2003) per il modello di ala gocciolante tipo B

La tabella 17 riporta i corrispondenti valori stimati del carico a monte ($h_{\text{monte, s}}$) e della perdita di carico totale (Δh_s), ottenuti in assenza di perdite di carico localizzate o considerando le equazioni 36 e 37 (perdite di carico localizzate rispettivamente costanti e variabili al variare del numero di Reynolds).

La tabella 17 riporta altresì l'entità delle perdite di carico continue ($Y_s = J \cdot Lc$) e localizzate (λ), nonché le differenze percentuali fra le perdite di carico stimate e misurate, espresse sia in percento di queste ultime $D_1[\%]$, che del carico a monte misurato $D_2[\%]$.

Assenza di p.c.l.					
$Y_s = J \cdot Lc$	λ_s	$h_{monte, s}$	Δh_s	$D_1[\%]$	$D_2[\%]$
[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]
11.46	0.00	24.32	11.46	-33.25%	-23.47%
9.57	0.00	20.17	9.57	-33.74%	-24.16%
7.69	0.00	16.08	7.69	-34.10%	-24.74%
6.76	0.00	14.07	6.76	-33.83%	-24.57%
5.82	0.00	12.04	5.82	-33.92%	-24.80%
4.85	0.00	9.97	4.85	-34.30%	-25.39%
3.90	0.00	7.96	3.90	-34.92%	-26.31%
P.c.l. stimate attraverso l'equazione (36)					
$Y_s = J \cdot Lc$	λ_s	$h_{monte, s}$	Δh_s	$D_1[\%]$	$D_2[\%]$
[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]
10.24	14.04	37.14	24.28	41.40%	19.14%
8.54	11.40	30.54	19.94	38.08%	18.01%
6.85	8.86	24.11	15.72	34.66%	16.78%
6.02	7.64	20.97	13.66	33.66%	16.41%
5.17	6.42	17.81	11.59	31.74%	15.68%
4.30	5.21	14.63	9.51	28.92%	14.58%
3.46	4.06	11.58	7.52	25.33%	13.12%
P.c.l. stimate attraverso l'equazione (37a)					
$Y_s = J \cdot Lc$	λ_s	$h_{monte, s}$	Δh_s	$D_1[\%]$	$D_2[\%]$
[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]
10.02	10.49	33.37	20.51	19.44%	10.00%
8.36	8.61	27.58	16.98	17.57%	9.20%
6.72	6.80	21.91	13.52	15.85%	8.44%
5.91	5.91	19.14	11.83	15.73%	8.40%
5.09	5.03	16.34	10.12	14.98%	8.07%
4.24	4.15	13.51	8.39	13.69%	7.48%
3.42	3.30	10.78	6.72	12.02%	6.69%

Tabella 17: Perdite di carico continue e localizzate, carico a monte, perdita di carico complessiva e differenze percentuali fra le perdite di carico stimate e misurate, espresse sia in percento di queste ultime $D_1[\%]$, che del carico a monte misurato $D_2[\%]$, per l'ala gocciolante tipo B

L'esame delle tabelle 16 e 17 mostra come l'equazione (37) per la stima delle perdite di carico localizzate consente di ottenere valori del carico a monte prossimi a quelli sperimentali, con differenze percentuali, rispetto al valore del carico misurato mai superiori al 10%. D'altra

parte, in assenza di perdite di carico localizzate o adottando per la stima del coefficiente α^* l'equazione (36), i valori del carico a monte risultano significativamente differenti rispetto ai corrispondenti valori misurati.

Le tabelle 18 e 19 mostrano i risultati di analoghe elaborazioni, effettuate con riferimento alla manichetta leggera L5.

Bertolacci e Megale (2000)		
$h_{\text{valle, m}}$	$h_{\text{monte, m}}$	Δh_m
[m]	[m]	[m]
3.01	8.51	5.50
2.80	8.01	5.21
2.58	7.51	4.93
2.38	7.01	4.63
2.17	6.51	4.34
1.97	6.01	4.04
1.77	5.51	3.74
1.57	5.01	3.44
1.37	4.51	3.14
1.19	4.01	2.82
1.02	3.51	2.49

Tabella 18: Valori sperimentali del carico a monte, h_m , del carico a valle, h_v , e della perdita di carico ΔH_m , misurati (Bertolacci e Megale, 2003) per il modello di ala gocciolante tipo L5

Assenza di p.c.l.					
$Y_s = J \cdot Lc$	λ_s	$h_{monte, s}$	Δh_s	$D_1[\%]$	$D_2[\%]$
[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]
4,55	0,00	7,56	4,55	-17,31%	-12,59%
4,28	0,00	7,08	4,28	-17,77%	-13,07%
4,00	0,00	6,58	4,00	-18,77%	-14,06%
3,75	0,00	6,13	3,75	-19,08%	-14,42%
3,47	0,00	5,64	3,47	-20,01%	-15,40%
3,21	0,00	5,18	3,21	-20,66%	-16,13%
2,93	0,00	4,70	2,93	-21,54%	-17,12%
2,66	0,00	4,23	2,66	-22,73%	-18,49%
2,38	0,00	3,75	2,38	-24,34%	-20,40%
2,12	0,00	3,31	2,12	-24,98%	-21,31%
1,86	0,00	2,88	1,86	-25,16%	-21,73%
P.c.l. stimate attraverso l'equazione (36)					
$Y_s = J \cdot Lc$	λ_s	$h_{monte, s}$	Δh_s	$D_1[\%]$	$D_2[\%]$
[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]
4,28	0,74	8,03	5,02	-8,67%	-5,94%
4,03	0,70	7,53	4,73	-9,29%	-6,43%
3,77	0,64	6,99	4,41	-10,54%	-7,43%
3,52	0,60	6,50	4,12	-11,01%	-7,84%
3,26	0,55	5,98	3,81	-12,18%	-8,83%
3,01	0,50	5,48	3,51	-13,04%	-9,61%
2,76	0,45	4,98	3,21	-14,16%	-10,63%
2,50	0,40	4,47	2,90	-15,63%	-12,03%
2,23	0,35	3,96	2,59	-17,58%	-13,95%
1,99	0,31	3,49	2,30	-18,48%	-14,94%
1,75	0,27	3,04	2,02	-18,89%	-15,47%
P.c.l. stimate attraverso l'equazione (37b)					
$Y_s = J \cdot Lc$	λ_s	$h_{monte, s}$	Δh_s	$D_1[\%]$	$D_2[\%]$
[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]
4,42	1,70	9,13	6,12	11,31%	6,81%
4,17	1,61	8,57	5,77	10,84%	6,58%
3,90	1,51	7,99	5,41	9,65%	5,96%
3,65	1,42	7,45	5,07	9,44%	5,87%
3,39	1,32	6,88	4,71	8,43%	5,32%
3,13	1,22	6,33	4,36	7,85%	5,01%
2,87	1,13	5,77	4,00	7,02%	4,55%
2,61	1,03	5,21	3,64	5,86%	3,87%
2,34	0,93	4,64	3,27	4,25%	2,87%
2,09	0,84	4,12	2,93	4,04%	2,76%
1,85	0,76	3,63	2,61	4,66%	3,20%

Tabella 19: Perdite di carico continue e localizzate, carico a monte, perdita di carico complessiva e differenze percentuali fra le perdite di carico stimate e misurate, espresse sia in percento di queste ultime $D_1[\%]$, che del carico a monte misurato $D_2[\%]$, per l'ala gocciolante tipo L5

Anche l'esame delle tabelle 18 e 19 evidenzia come la migliore stima del carico a monte e conseguentemente delle perdite di carico localizzate si ottiene considerando il modello di stima del parametro α^* che tiene conto, oltre che della geometria dell'erogatore, anche del numero di Reynolds della corrente (eq. 37).

Appare evidente, infatti, che i valori del carico a monte stimati attraverso l'equazione (37) siano prossimi a quelli misurati dagli AA. con differenze percentuali calcolate rispetto alle perdite di carico totali misurate $D_1[\%]$ comprese tra 4.04 e 11.31% e rispetto al carico a monte $D_2[\%]$ comprese tra 2.76 e 6.81%.

7. Conclusioni

L'indagine sperimentale condotta ha permesso di individuare un criterio di stima del parametro α^* che permette di esprimere le perdite di carico localizzate come frazione del carico cinetico della corrente.

L'indagine, condotta utilizzando diversi modelli di ali gocciolanti leggere esistenti in commercio, ha consentito in primo luogo di caratterizzare idraulicamente gli erogatori attraverso la determinazione della relazione portata pressione $Q(h)$ e del coefficiente di variazione tecnologico CVT, che ne ha permesso la classificazione.

L'indagine sperimentale condotta ha permesso inoltre di valutare sia l'entità delle perdite di carico localizzate che si determinano a causa del restringimento e del successivo allargamento della sezione idrica in corrispondenza del gocciolatore, che l'entità delle maggiori perdite di carico continue che si rilevano nel tratto di condotta lungo il gocciolatore, in relazione al suo minore diametro rispetto a quello della condotta.

E' stato individuato un criterio di stima del coefficiente α^* in funzione, oltre che della geometria dell'erogatore, anche dal numero di Reynolds della corrente.

Il modello di stima proposto necessita della conoscenza di parametri di facile determinazione,

quali il rapporto di contrazione, rc , ed il numero di Reynolds, Re , della corrente; i valori delle costanti che compaiono nel modello sono stati determinati utilizzando tecniche di regressione non lineare e sono stati diversificati per diverse tipologie di erogatore esaminate (gocciolatori coassiali o piatti), anche per tenere conto della differente geometria dell'ingombro dell'erogatore.

È stata infine utilizzata una procedura di calcolo "step by step" al fine di determinare, per alcuni modelli di linea gocciolante, sia la distribuzione delle pressioni lungo l'ala erogatrice che la conseguente distribuzione delle portate erogate dai singoli gocciolatori installati lungo la stessa. Tale procedura ha inoltre consentito di determinare le perdite di carico continue e localizzate e quindi di verificare il criterio di stima proposto, attraverso il confronto con dati sperimentali ottenuti da altri AA.

Anche i risultati di tale confronto hanno confermato come il modello di stima proposto permetta una precisa e puntuale valutazione delle perdite di carico che si manifestano lungo le condotte distributrici degli impianti irrigui a goccia.

Bibliografia

1. Al Amoud A.I. (1995), “*Significance of Energy Losses Due to Emitter Connections in Trickle Irrigation Lines*”. Journal of Agricultural Engineering Research 60, 1-5.
2. Bagarello V., Ferro V., Provenzano G., Pumo D.. (1995), “*Experimental Study on Flow-Resistance Law for Small-Diameter Plastic Pipes*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 121(5), 313-316.
3. Bagarello V., Ferro V., Provenzano G., Pumo D.. (1997), “*Evaluating Pressure Losses in Drip-Irrigation Lines*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 123(1), 1-7.
4. Bagarello V., Musacchia F., Pumo D.. (1989), “*Resistenze al Moto delle Correnti Idriche nelle Condotte Erogatrici degli Impianti Irrigui A Goccia: Risultati di prove Sperimentali*”. Rivista di Ingegneria Agraria 4, 219-226.
5. Christiansen J.E.. (1941), “*The uniformity of application of water by sprinkler systems*”. Agricultural Engineering 22, 89-92.
6. Demir V., Yurdem H., Degirmencioglu A.. (2007), “*Development of Prediction Models for Friction Losses in drip Irrigation Laterals equipped with Integrated In-line and On-line Emitters using Dimensional Analysis*”. Biosystem Engineering, 96 (4), 617-631.
7. Di Dio P., Provenzano G., Pumo D.. (2005), “*Verifica idraulica degli impianti per la microirrigazione attraverso una procedura di calcolo matriciale*”. Rivista di Ingegneria Agraria 36, 1-10.
8. Gyasi-Agyei Y.. (2007), “*Field-Scale Assessment of Uncertainties in Drip Irrigation Lateral Parameters*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133(6), 512-519.
9. Howell T.A., Barinas F.A.. (1980), “*Pressure Losses Across Trickle Irrigation Fittings and Emitters*”. Transaction of the A.S.A.E., 23(4), 928-933.
10. Howell T.A., Hiler E.A.. (1974), “*Trickle irrigation lateral design*”. Transaction of the A.S.A.E., 17(5), 902-908.
11. Juana L., Rodriguez-Sinobas L. and Losada A.. (2002), “*Determining minor head loss in drip irrigation laterals: II Experimental study and validation*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 128(6), 365-396.
12. Juana L., Rodriguez-Sinobas L., Sanchez R. and Losada A.. (2005), “*Analytical Expression for Hydraulic Calculation of Trapezoidal Drip Irrigation Units*”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(5), 420-432.

13. Keller J., Karmeli D.. (1975), "*Trickle irrigation design parameters*". Transaction of the A.S.A.E., 17(4), 678-684.
14. Martì P., Provenzano G., Royuela A. and Palau-Salvador G.. (2010), "*Integrated Emitter Local loss Prediction Using Artificial Neural Networks*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136(1), 11-22.
15. Megale P.G., Bertolacci M.. (1999), "*La microirrigazione può dare di più*". Terra e vita 12, 44-48.
16. Megale P.G., Bertolacci M.. (2000), "*Risultati delle prove funzionali su linee gocciolanti integrali*". Quaderno ARSIA 2.
17. Megale P.G., Bertolacci M.. (2002), "*Risultati delle prove funzionali su linee gocciolanti integrali e irrigatori a pioggia*" parte II. Quaderno ARSIA 3.
18. Megale P.G.. (1997), "*Ipotesi di metodo di prova per linee gocciolanti integrali*". Rivista di Ingegneria Agraria, 3, 160-164.
19. Megale P.G.. (1998), "*Metodo per la classificazione delle linee gocciolanti*". Irrigazione e drenaggio, 2, 18-20.
20. Nakayama, F.S., Bucks D.A., Clemmens A.J.. (1979), "*Assessing trickle emitter application uniformity*". Transaction of the A.S.A.E., 22(4) 816–821.
21. Palau-Salvador G., Sanchis L.H., Gonzalez-Altozano P. and Arviza-Valverde J.. (2006), "*Real Local Losses Estimation for On-Line Emitters Using Empirical and Numerical Procedures*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132(6), 522-530.
22. Parchomchuk P.. (1976), "*Temperature effects on emitter discharge rates*". Transaction of the A.S.A.E., 19(4), 690–692.
23. Provenzano G. and Palau-Salvador G.. (2006), "*Discussion of 'Comparative Analysis of Hydraulic Calculation Methods in Design of Microirrigation Laterals' by Gürol Yildirim and Necati Ağiralioglu*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132(1), 82-85.
24. Provenzano G., Palau-Salvador G. and Bralts V. F.. (2007), "*Discussion of 'Modified Hazen-Williams and Darcy-Weisbach Equations for Friction and Local Head Losses along Irrigation Laterals' by John D. Valiantzas*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133(4), 417-420.
25. Provenzano G., Pumo D., Di Dio P.. (2003), "*Valutazione delle perdite di carico nelle linee gocciolanti integrali*". Rivista di Ingegneria Agraria 4, 55-62.

26. Provenzano G., Pumo D., Di Dio P.. (2005), "*Simplified Procedure to Evaluate Head Losses in Drip Irrigation Laterals*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(6), 525-532.
27. Provenzano G., Pumo D.. (2003), "*Assessing a Local Losses Evaluation Procedure in Drip Integrated Laterals Design*". 20th ICID European Conference Montpellier, France, 17-19 September.
28. Provenzano G., Pumo D.. (2004), "*Experimental Analysis of local Pressure Losses for Microirrigation Laterals*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 130(4), 318-324.
29. Provenzano G.. (2004), "*Discussion of 'Determining Minor Head Losses in Drip Irrigation Laterals. I: Methodology' by Luis Juana, Leonor Rodriguez-Sinobas and Alberto Losada*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 130(3), 253-254.
30. Provenzano G.. (2005), "*Discussion of 'Analytical Equation for Variation of Discharge in drip Irrigation Laterals' by V.Ravikumar, C.R. Ranganathan, S. Santhana Bosu*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(3), 300-302 .
31. Rettore Neto O., Miranda J.H., Frizzone J.A., Workman S.R.. (2009), "*Local head loss of non-coaxial emitters inserted in Polythylene pipe*". Transaction of the A.S.A.B.E. 52(3) 729-738.
32. Rodriguez M.G., Rodriguez Sinobas L., Juana Sirgado L., Sanchez Calvo R., Losada Villasante A.. (2006), "*Caracterizacion de cintas de goteo a distintas presiones y temperaturas*". XXIV Congreso nacional de Rios (Aeryd).
33. Solomon K.. (1979), "*Manufacturing variation of emitters in trickle irrigation systems*". Transactions of the A.S.A.E. 22(5), 1034-1038.
34. Verbeek M.. (2008), "*A guide to modern econometrics, third edition*". John Wiley & Sons Ltd, West Sussex England.
35. Wu I.P., Barragan J., Bralts V.F.. (2007), "*Field performance and evaluation*". Developments in Agricultural Engineering 13.
36. Wu I.P., Barragan J.. (2000), "*Design criteria for microirrigation system*". Transaction of the A.S.A.E., 43(5), 1145-1154.
37. Wu I.P., Gitlin H.M.. (1974), "*Drip irrigation based on uniformity*". Transaction of the A.S.A.E., 17(3), 429-432.

38. Wu I.P., Howell T.A., Hiler E.A.. (1979), "*Hydraulic design of drip irrigation system*" Hawaii Agricultural Experiment Station Technical Bulletin 105.
39. Wu I.P., Irudayaraj J.M.. (1987), "*Evaluation of uniformity parameters for drip irrigation design*". A.S.A.E. Paper No. 87-2522.
40. Yildirim G. and Ağiralioglu N.. (2006), "*Closure to 'Comparative Analysis of Hydraulic Calculation Methods in Design of Microirrigation Laterals'*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132(1), 85-88.
41. Yildirim G.. (2006), "*Hydraulic Analysis and Direct Design of Multiple Outlets Pipelines Laid on Flat and Sloping Lands*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132(6), 537-552.

Elenco dei simboli utilizzati

a	=	fattore di moltiplicazione dell'indice di resistenza f
a, b, c, d	=	costanti
C	=	coefficiente di scabrezza
C_C	=	coefficiente di contrazione di juana
Cr_1, Cr_2	=	costo della risorsa idrica
CU	=	coefficiente di uniformità di progetto
CVT	=	coefficiente di variazione tecnologico
CVT_n	=	coefficiente di variazione ecologico del gruppo di "n" erogatori
D_g	=	diametro equivalente della sezione della corrente che attraversa il gocciolatore
D_i	=	diametro interno della tubazione
Dq	=	deviazione dalla portata media
E_i	=	efficienza di distribuzione dell'acqua
f	=	indice di resistenza
g	=	accelerazione di gravità
h	=	carico piezometrico
h_{max}	=	carico piezometrico massimo
h_{min}	=	carico piezometrico minimo
h_{var}	=	variazione del carico piezometrico
I	=	interdistanza tra gli apparecchi erogatori
J	=	cadente piezometrica
k, x	=	parametri della curva caratteristica di erogazione dell'apparecchio erogatore
LG	=	rapporto tra la lunghezza del gocciolatore L_g ed il diametro medio equivalente del gocciolatore D_g
L_c	=	lunghezza della condotta
L_e	=	lunghezza equivalente di condotta

L_g	=	lunghezza del gocciolatore
N, n	=	numero di erogatori
Q	=	portata
Q_m	=	portata media
Q_{max}	=	portata massima erogata dagli apparecchi erogatori
Q_{min}	=	portata minima erogata dagli apparecchi erogatori
Q_n	=	portata nominale dichiarata dal costruttore
Q_{var}	=	variazione di portata
rc	=	rapporto di contrazione
R	=	raggio idraulico
Re	=	numero di reynolds
Sp	=	spessore della condotta
UCC	=	coefficiente di uniformità di christiansen
V	=	velocità della corrente
V_g	=	velocità della corrente nel tratto di condotta interessato dal gocciolatore
W_i	=	volume di acqua impiegato
W_m	=	stagionale di acqua di irrigazione per ottenere il massimo rendimento della coltura
W_u	=	volume d'acqua utile alla coltura
Y	=	perdite di carico continue
Y_m	=	massima resa della coltura
α	=	coefficiente che sintetizza l'insieme delle perdite di carico localizzate, conseguenti al restringimento ed al riallargamento della sezione idrica
α_g	=	coefficiente che sintetizza le perdite di carico continue causate dal minor diametro della corrente in corrispondenza del passaggio attraverso il gocciolatore
α^*	=	$\alpha + \alpha_g$
ε	=	scabrezza assoluta del materiale che costituisce la tubazione

ν = viscosità cinematica dell'acqua

λ = perdite di carico localizzate

ρ_{pdp} = costo della perdita di concime ed il costo della bonifica per l'inquinamento ambientale provocato dalla percolazione profonda

ρ_w = costo unitario di acqua

ρ_y = costo unitario di produzione

Allegato 1

**Dati geometrici ed idraulici dei gocciolatori e
risultati delle prove sperimentali**

Casa costruttrice:	Siplast	
Modello:	P1	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento da catalogo:		
DN [mm]	16	
I [m]	0.15	
Qn [l/h]	3.8	
Spessore condotta [mm]	0.200	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento misurate:		
Di [mm]	16.14	
Dg [mm]	15.01	
Lg [mm]	36.25	
rc	0.865	
I [m]	0.15	
$q = kh^x$	K	1.163
	x	0.502
Spessore condotta [mm]	0.207	
CVT [%]	1.87	



Figura A: Gocciolatore Siplast P1 (Qn 3.8 l/h)

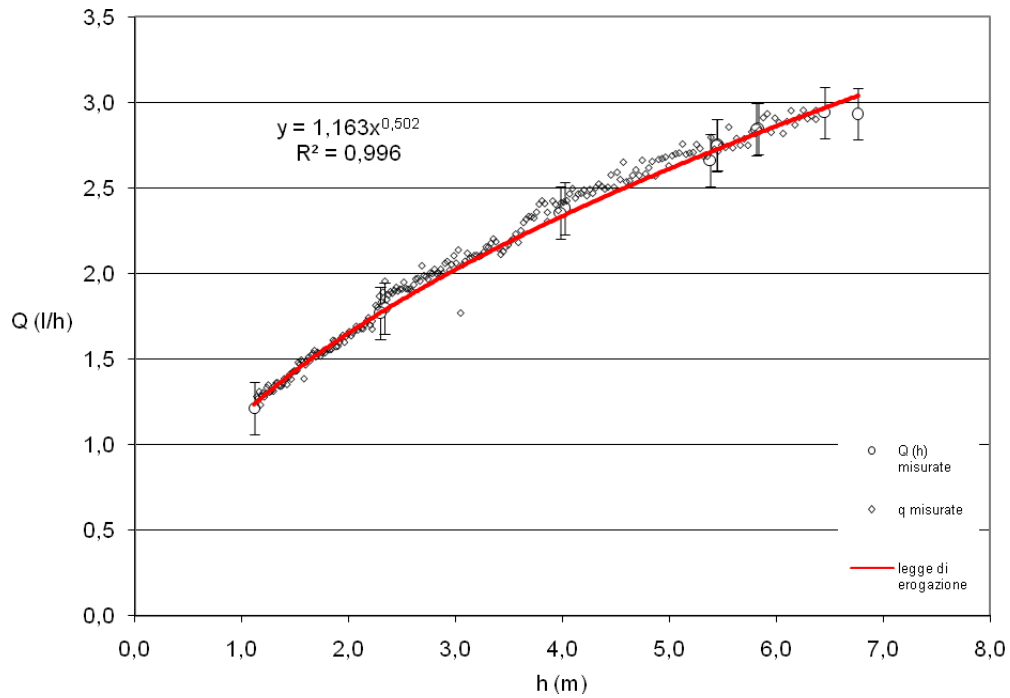


Figura B: Curva caratteristica di erogazione nella quale $Q(h)$ sono le portate misurate al variare della pressione durante la prova di caratterizzazione idraulica degli apparecchi erogatori e q (misurate) sono le portate effettivamente erogate durante la prova con portata di estremità

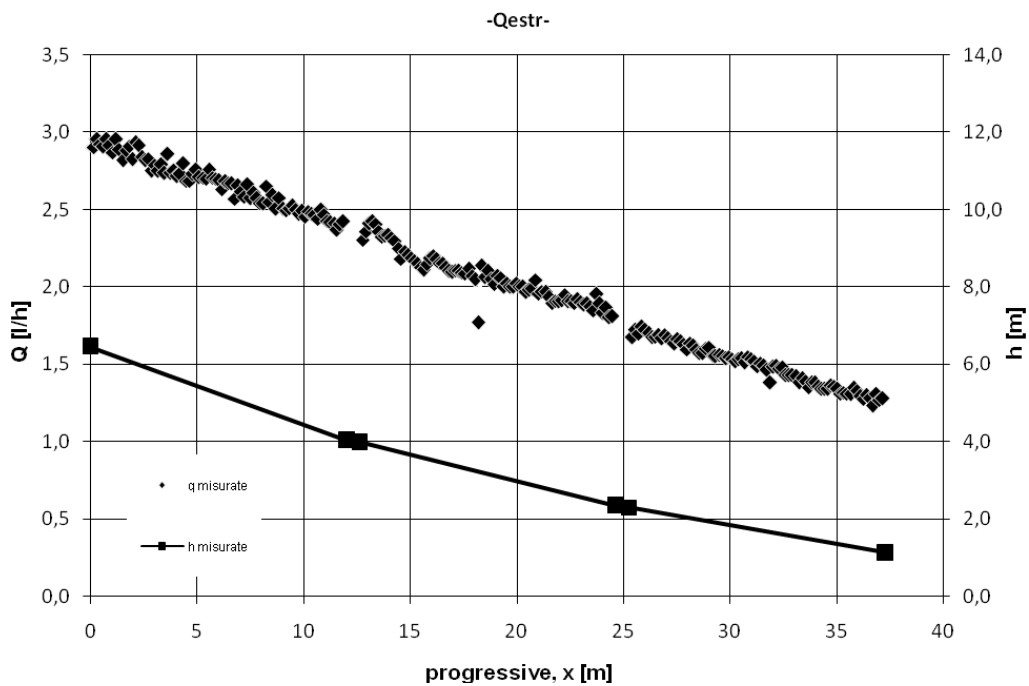


Figura C: Valori di portata e di carico rilevati e stimati nel corso della prova con portata di estremità

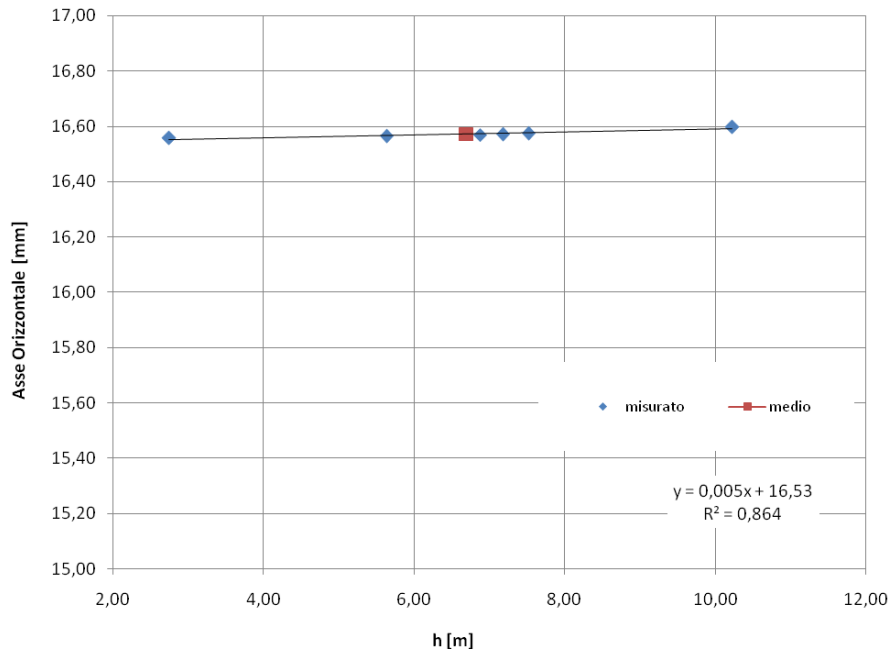


Figura D: Valori del diametro misurato lungo l'asse orizzontale in funzione del carico

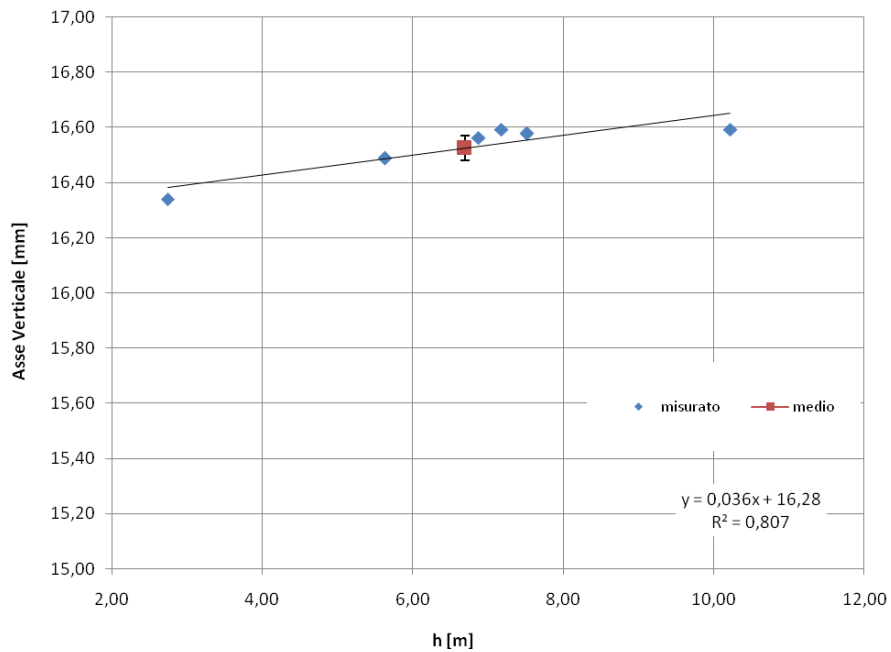


Figura E: Valori del diametro misurato lungo l'asse verticale in funzione del carico

Re	α^*
7624	0.291
9039	0.233
9794	0.252
10494	0.247
11188	0.223
11637	0.239
12020	0.234
12684	0.206
12947	0.225
13511	0.233
13711	0.244
14213	0.229
14455	0.212
15055	0.214
15239	0.226
15650	0.223
15675	0.213
16234	0.209
16832	0.225
16901	0.210
16938	0.218
17817	0.215
18160	0.205
19131	0.207
19598	0.190
19663	0.205
21171	0.203
21236	0.204
21275	0.201
22450	0.199
24100	0.196
24765	0.196
26682	0.192

Coppie di valori Re α^* misurati

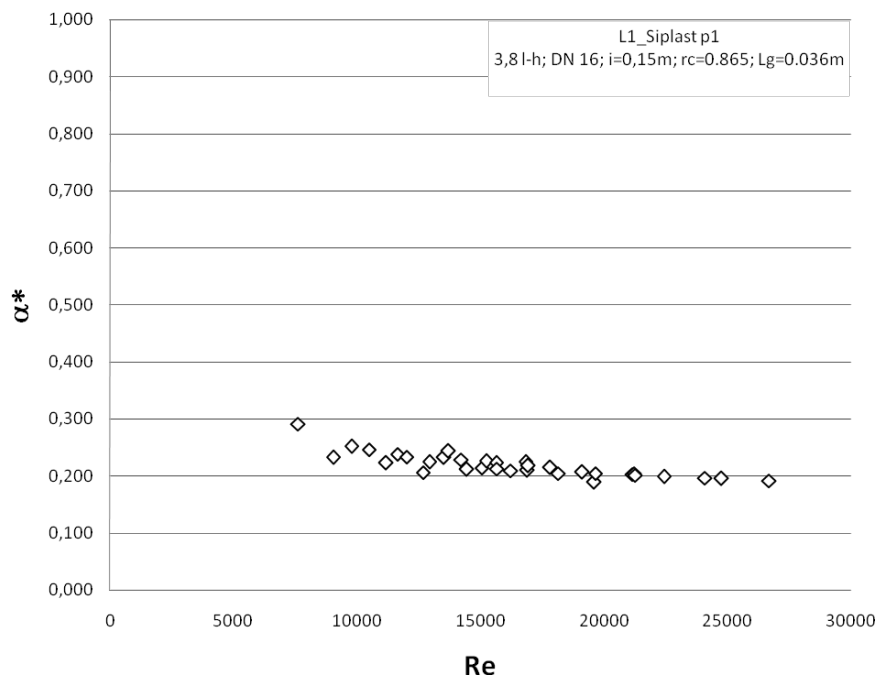


Figura F: Coppie di valori Re α^* misurati

Casa costruttrice:	Plastic Puglia	
Modello:	Aquadrop	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento da catalogo:		
DN [mm]	16.1	
I [m]	0.30	
Qn [l/h]	2.0	
Spessore condotta [mm]	0.300	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento misurate:		
Di [mm]	16.27	
Dg [mm]	15.09	
Lg [mm]	22.04	
rc	0.861	
I [m]	0.31	
q = kh ^x	K	0.773
	x	0.525
Spessore condotta [mm]	0.31	
CVT [%]	4.94	



Figura A: Gocciolatore Plastic Puglia Aquadrop (Qn 2.0 l/h)

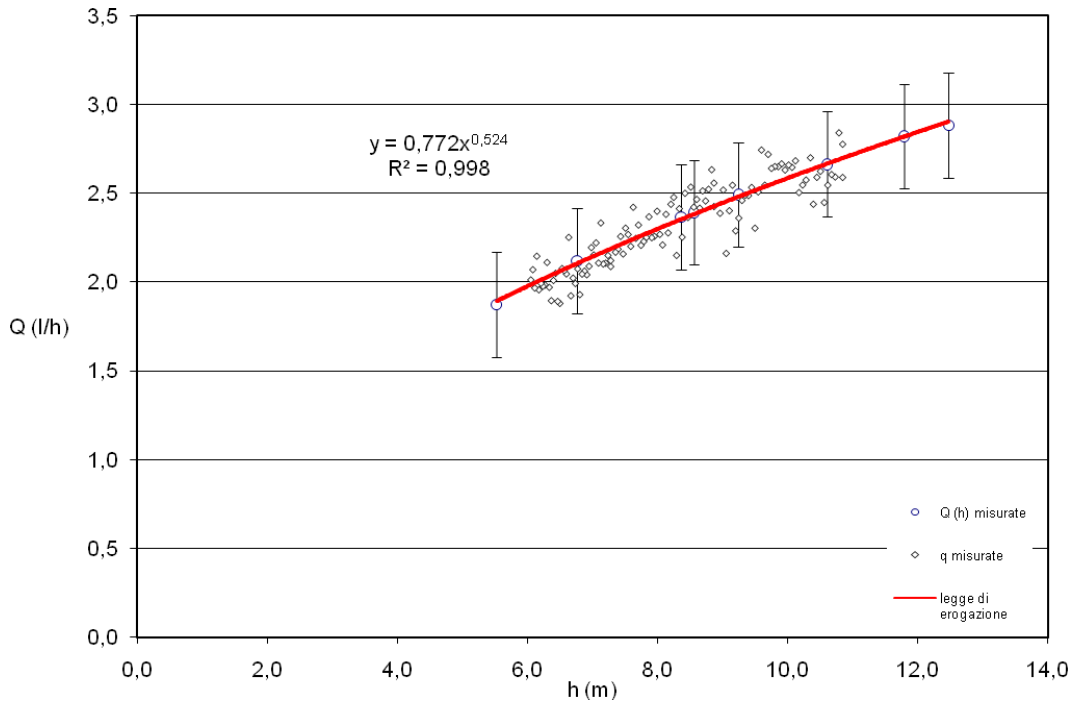


Figura B: : Curva caratteristica di erogazione nella quale $Q(h)$ sono le portate misurate al variare della pressione durante la prova di caratterizzazione idraulica degli apparecchi erogatori e q (misurate) sono le portate effettivamente erogate durante la prova con portata di estremità

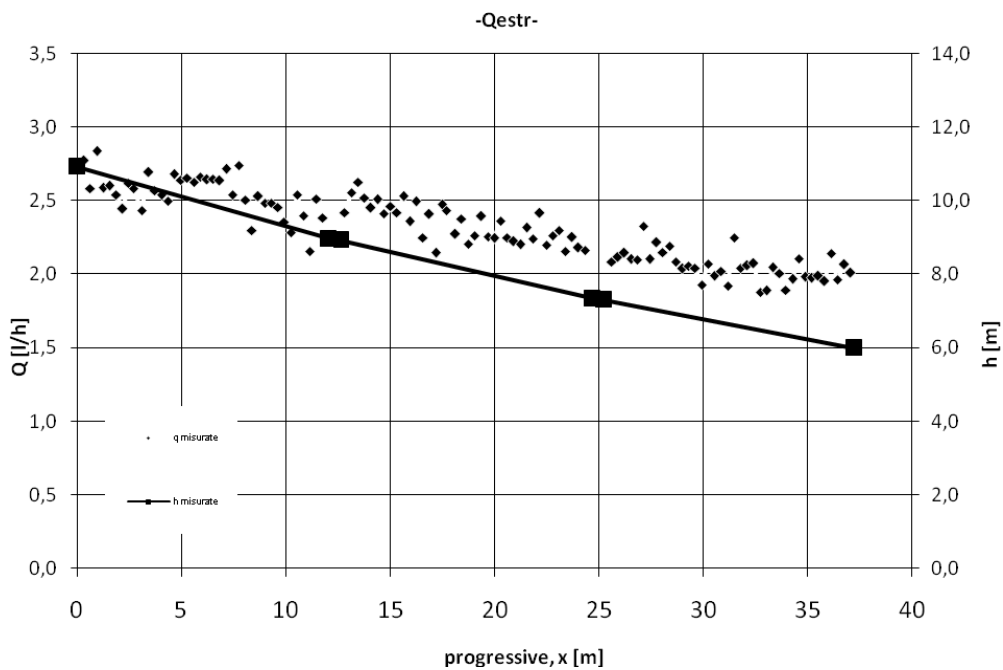


Figura C: Valori di portata e di carico rilevati e stimati nel corso della prova con portata di estremità

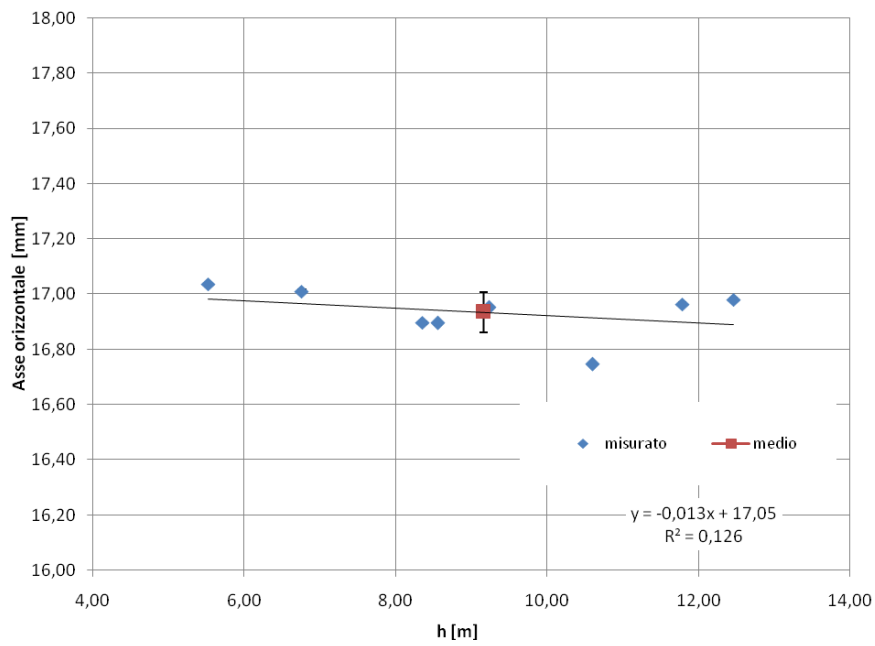


Figura D: Valori del diametro misurato lungo l'asse orizzontale in funzione del carico

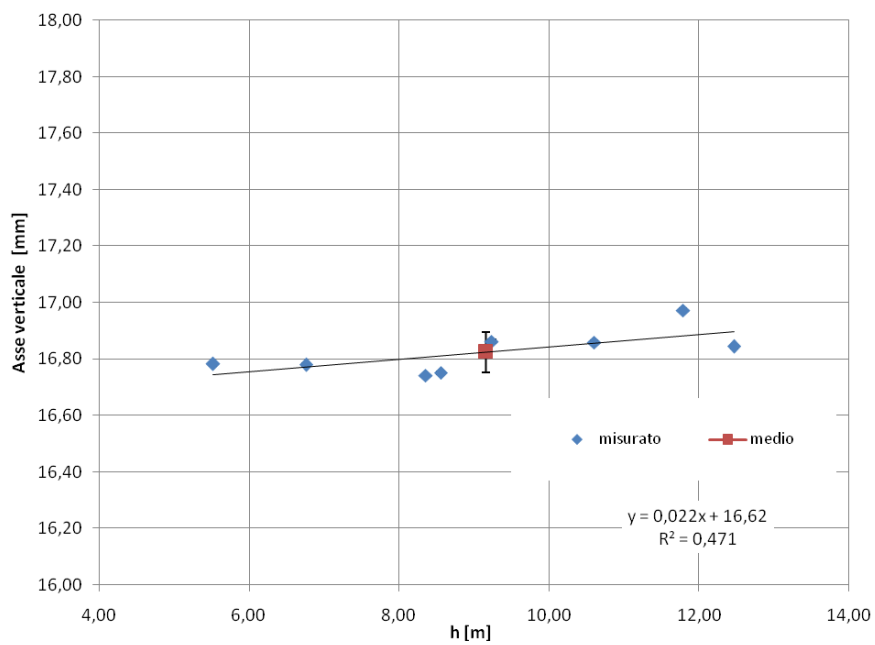


Figura E: Valori del diametro misurato lungo l'asse verticale in funzione del carico

Re	α^*
12182	0.378
13153	0.348
13338	0.337
13427	0.362
14357	0.342
14515	0.339
14974	0.338
14985	0.319
15688	0.341
15852	0.329
16199	0.324
16833	0.316
16989	0.324
17084	0.328
17172	0.330
17692	0.315
18515	0.311
18569	0.313
18602	0.307
19022	0.318
19236	0.327
20138	0.313
20242	0.301
20330	0.300
20614	0.303
20676	0.312
20863	0.306
21836	0.298
22434	0.296
22530	0.292
22819	0.297
23872	0.288
24536	0.285

Coppie di valori Re α^* misurati

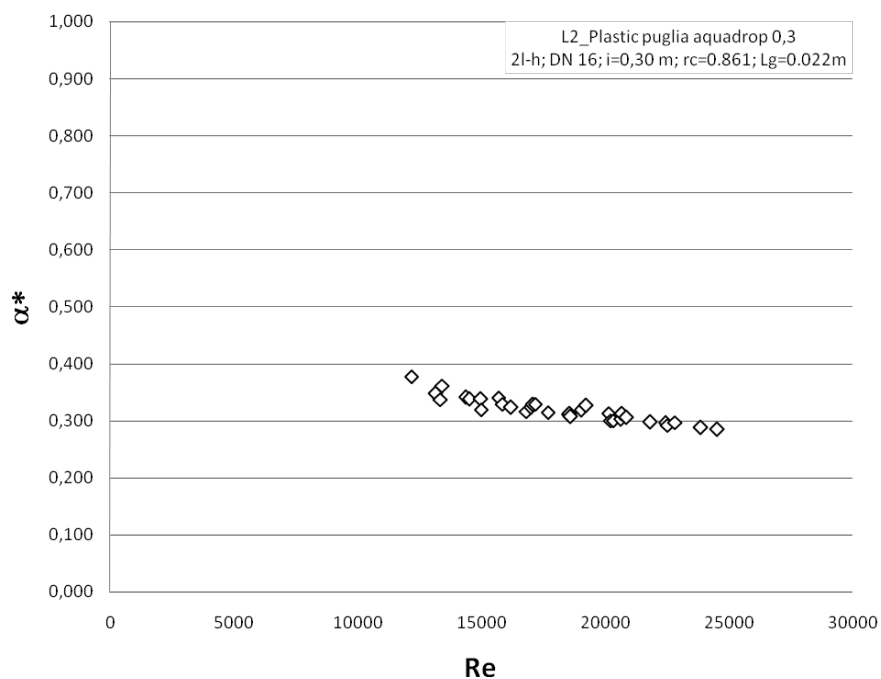


Figura F: Coppie di valori Re α^* misurati

Casa costruttrice:	Siplast	
Modello:	P1	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento da catalogo:		
DN [mm]	16	
I [m]	0.30	
Qn [l/h]	1.2	
Spessore condotta [mm]	0.200	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento misurate:		
Di [mm]	16.14	
Dg [mm]	15.01	
Lg [mm]	36.25	
rc	0.866	
I [m]	0.30	
$q = kh^x$	K	0.468
	x	0.529
Spessore condotta [mm]	0.207	
CVT [%]	5.61	



Figura A: Gocciolatore Siplast P1 (Qn 1.2 l/h)

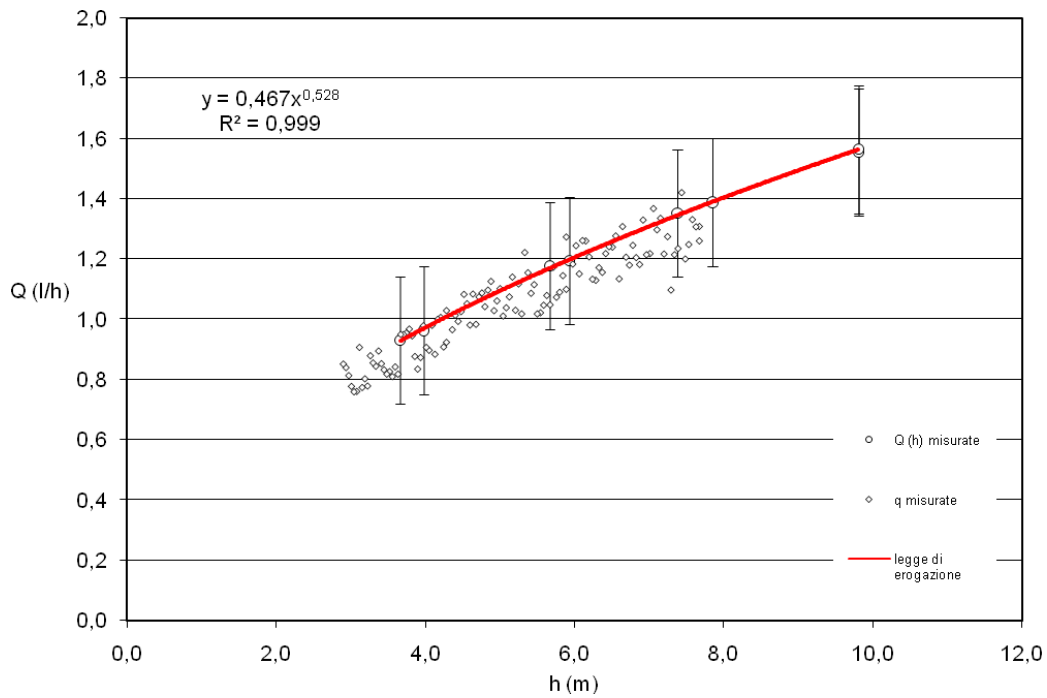


Figura B : Curva caratteristica di erogazione nella quale $Q(h)$ sono le portate misurate al variare della pressione durante la prova di caratterizzazione idraulica degli apparecchi erogatori e q (misurate) sono le portate effettivamente erogate durante la prova con portata di estremità

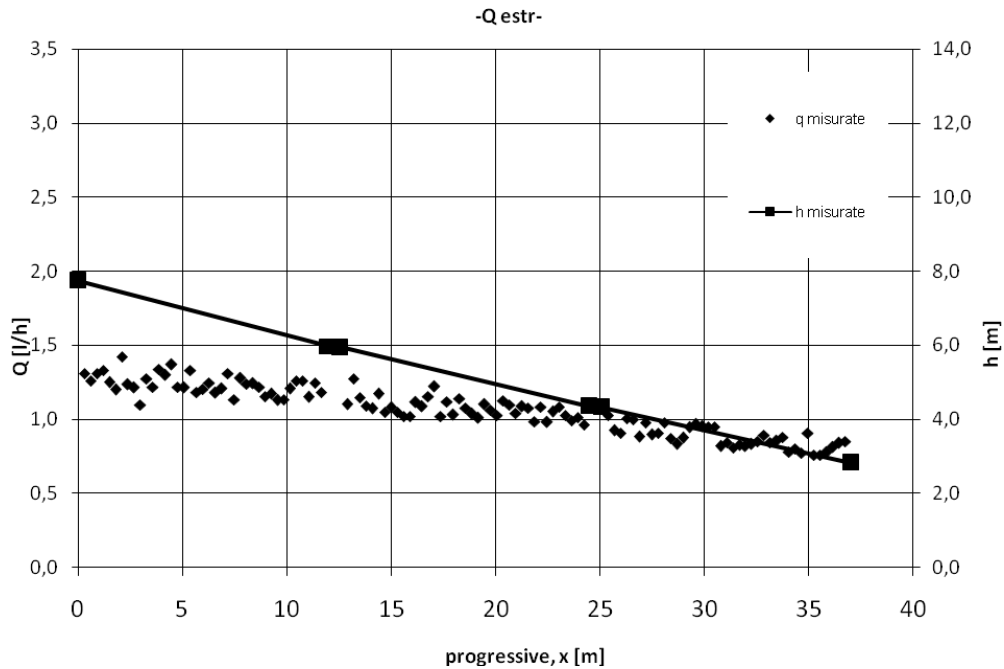


Figura C: Valori di portata e di carico rilevati e stimati nel corso della prova con portata di estremità

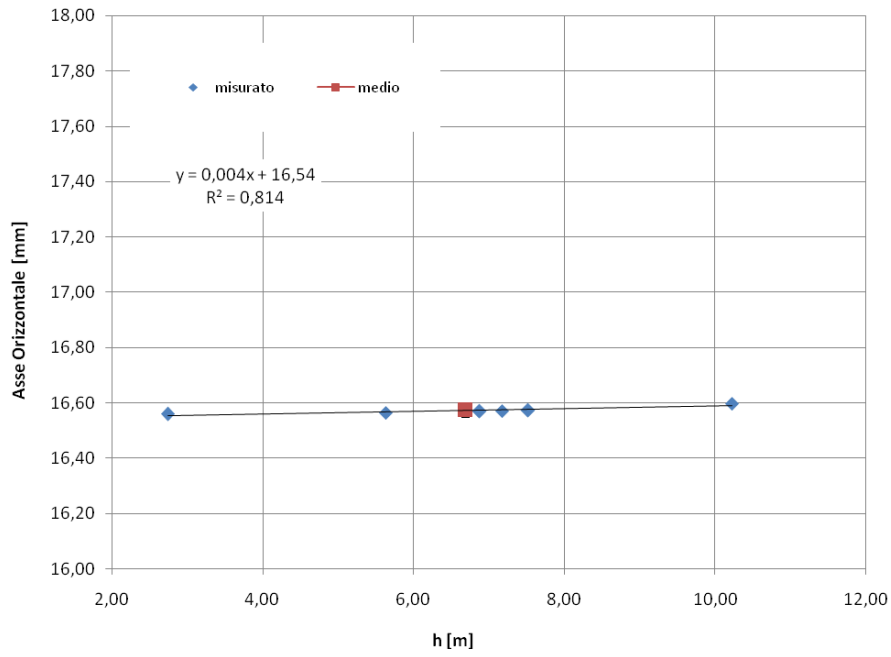


Figura D: Valori del diametro misurato lungo l'asse orizzontale in funzione del carico

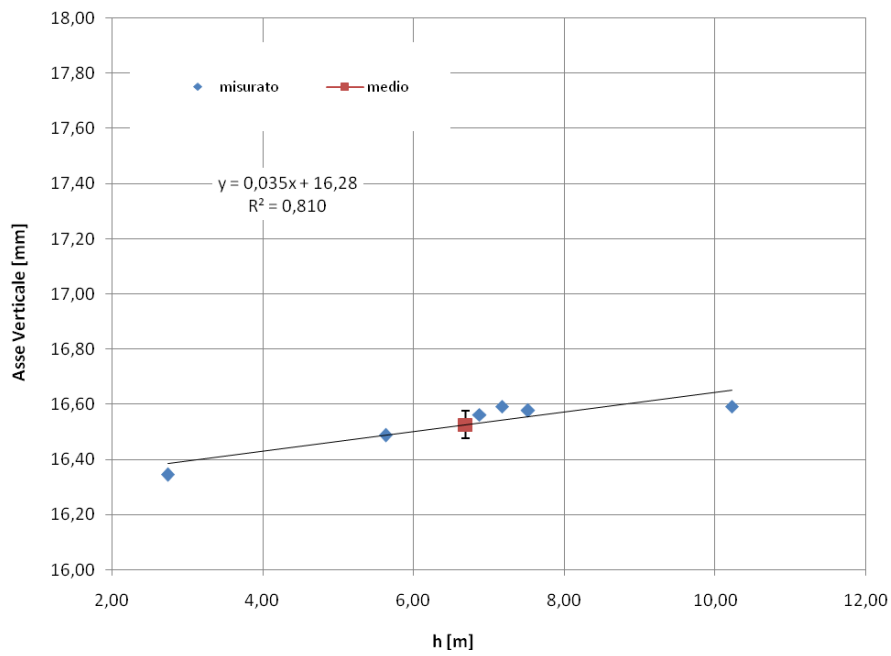


Figura E: Valori del diametro misurato lungo l'asse verticale in funzione del carico

Re	α^*
9327	0.453
9752	0.359
10297	0.384
11425	0.389
12011	0.362
12561	0.392
12727	0.352
13226	0.336
13483	0.362
14030	0.344
14206	0.327
14571	0.350
14768	0.353
15073	0.333
15365	0.329
15562	0.323
16215	0.354
16311	0.327
16497	0.326
17118	0.316
17360	0.341
18187	0.319
18334	0.309
18403	0.338
19019	0.338
19441	0.304
19483	0.309
20096	0.304
20662	0.305
21361	0.300

Coppie di valori Re α^* misurati

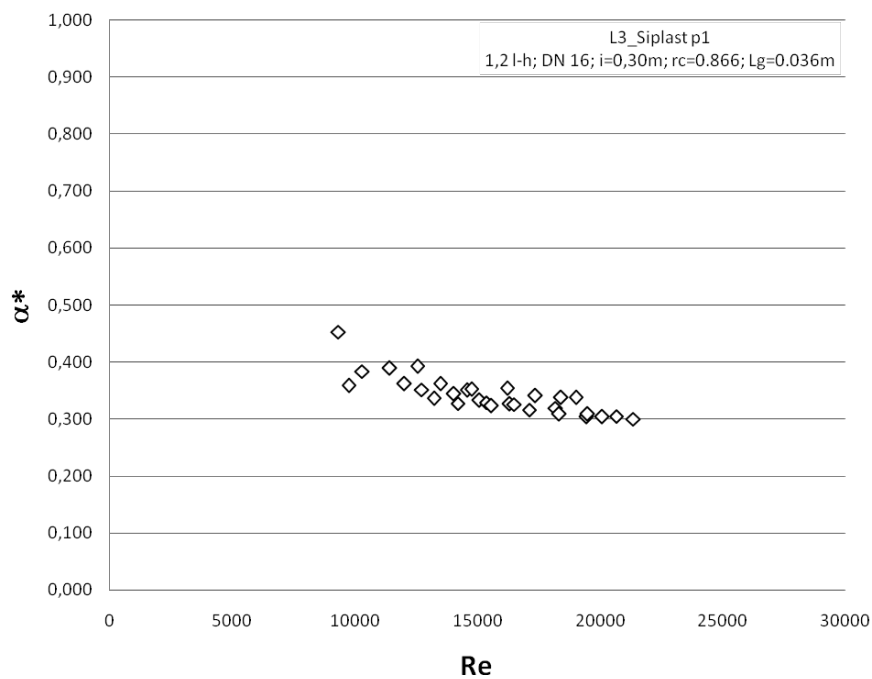


Figura F: Coppie di valori Re α^* misurati

Casa costruttrice:	Plastic Puglia	
Modello:	Aquadrop	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento da catalogo:		
DN [mm]	16.1	
I [m]	0.30	
Qn [l/h]	2.0	
Spessore condotta [mm]	0.200	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento misurate:		
Di [mm]	16.00	
Dg [mm]	14.80	
Lg [mm]	22.04	
rc	0.856	
I [m]	0.30	
$q = kh^x$	K	0.801
	x	0.521
Spessore condotta [mm]	0.213	
CVT [%]	4.85	



Figura A: Gocciolatore Plastic Puglia Aquadrop (Qn 2.0 l/h)

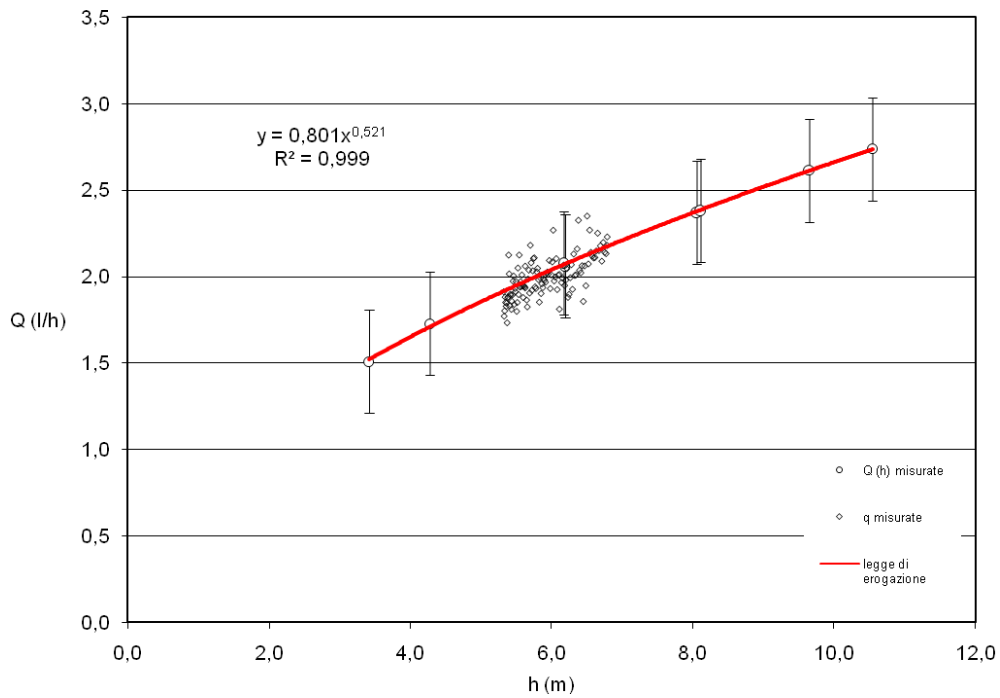


Figura B: : Curva caratteristica di erogazione nella quale $Q(h)$ sono le portate misurate al variare della pressione durante la prova di caratterizzazione idraulica degli apparecchi erogatori e q (misurate) sono le portate effettivamente erogate durante la prova con portata di estremità

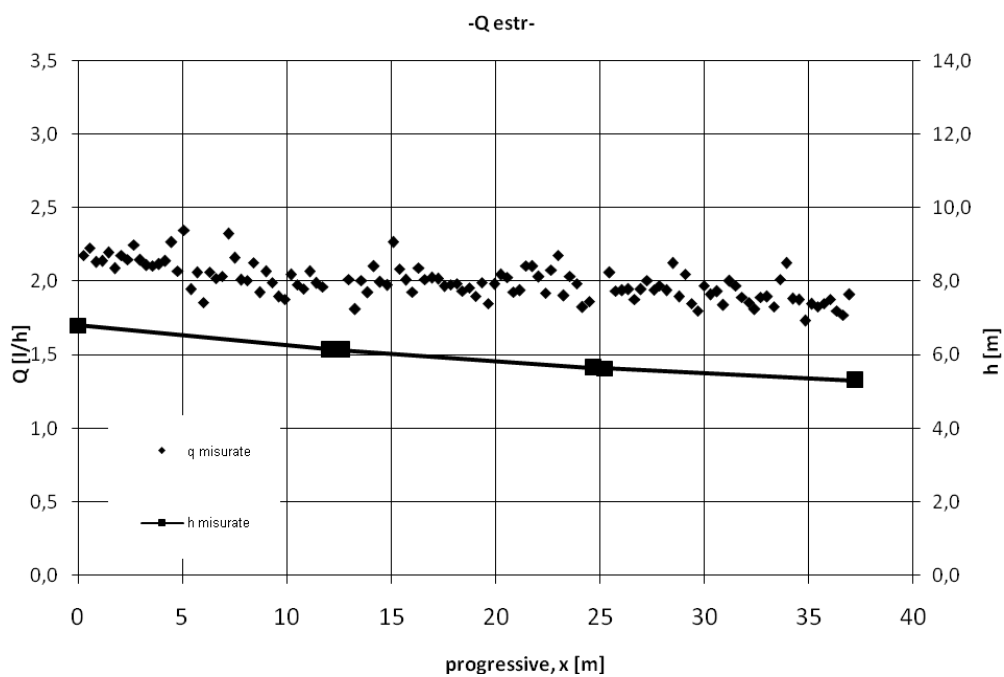


Figura C: Valori di portata e di carico rilevati e stimati nel corso della prova con portata di estremità

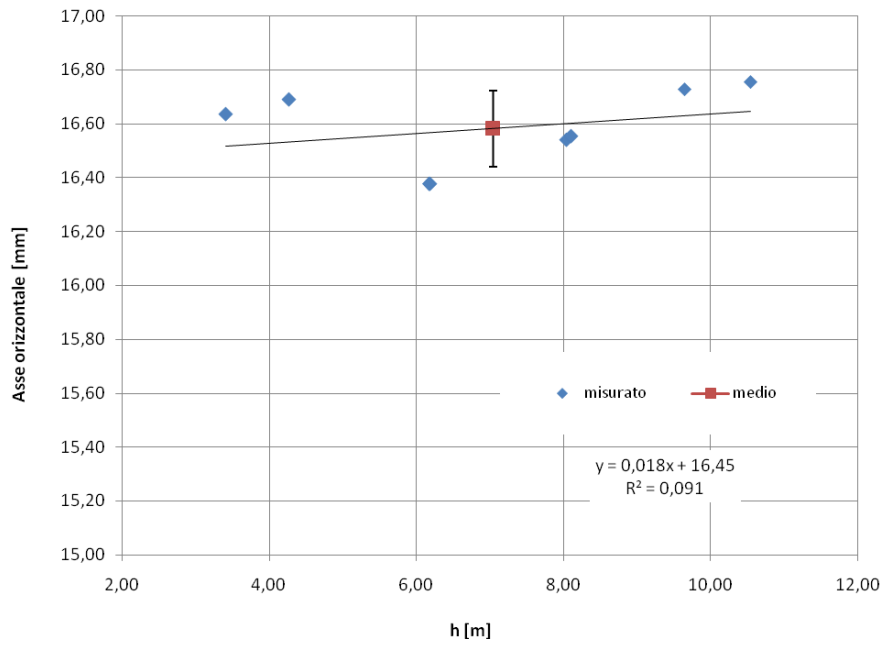


Figura D: Valori del diametro misurato lungo l'asse orizzontale in funzione del carico

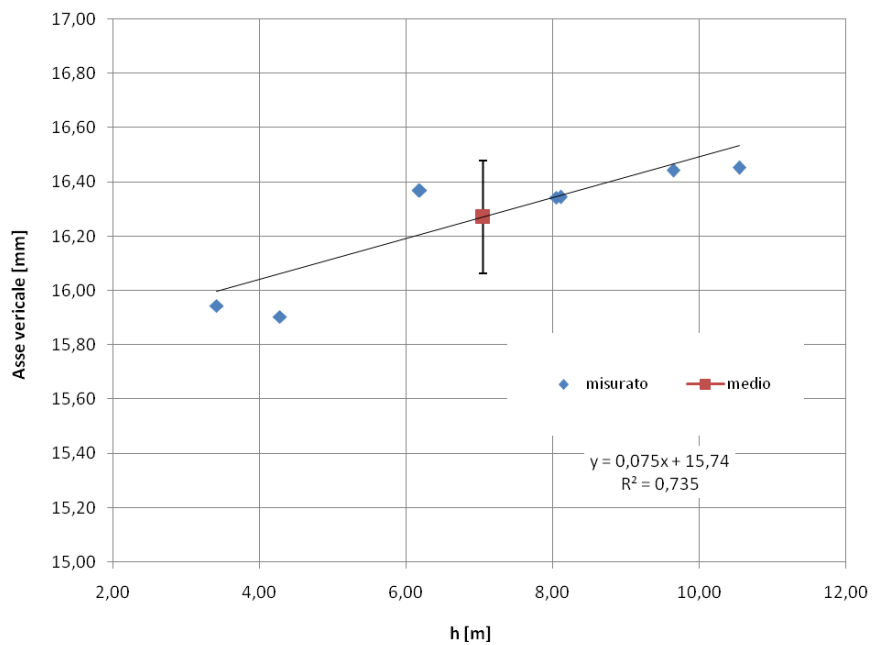


Figura E: Valori del diametro misurato lungo l'asse verticale in funzione del carico

Re	α^*
5965	0.327
7473	0.311
9026	0.291
11679	0.290
12620	0.253
13331	0.275
13799	0.256
14498	0.241
14605	0.270
15848	0.238
15915	0.240
15992	0.264
17125	0.263
17368	0.248
17370	0.231
18625	0.221
19045	0.238
19115	0.251
19628	0.254
19965	0.250
20436	0.237
20791	0.219
21360	0.219
21595	0.243
21725	0.215
22299	0.250
22806	0.228
23438	0.228
23501	0.212
23835	0.225
24283	0.215
25782	0.217
26654	0.220

Coppie di valori Re α^* misurati

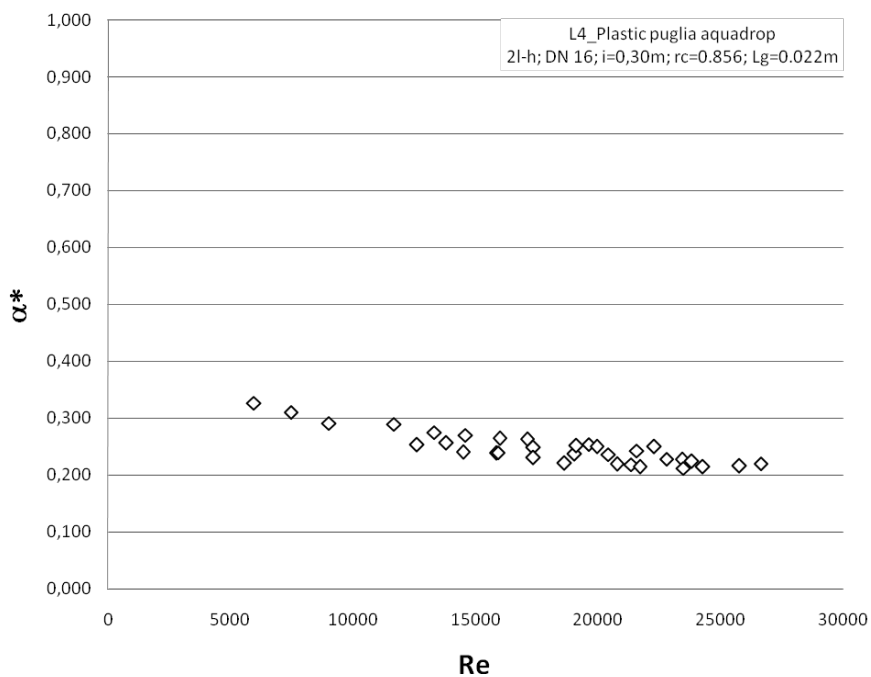


Figura F: Coppie di valori Re α^* misurati

Casa costruttrice:	Netafim	
Modello:	Streamline	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento da catalogo:		
DN [mm]	16	
I [m]	0.30	
Qn [l/h]	1.5	
Spessore condotta [mm]	0.200	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento misurate:		
Di [mm]	16.06	
Dg [mm]	15.49	
Lg [mm]	20.36	
rc	0.930	
I [m]	0.30	
$q = kh^x$	K	0.507
	x	0.483
Spessore condotta [mm]	0.209	
CVT [%]	2.55	



Figura A: Gocciolatore Netafim Streamline (Qn 1.5 l/h)

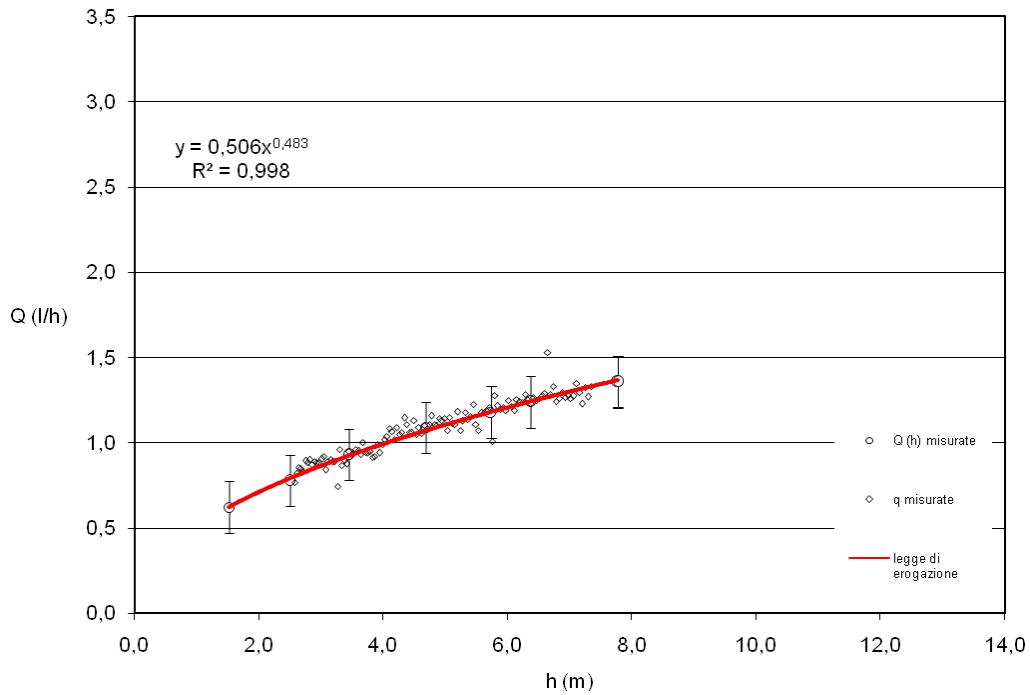


Figura B: : Curva caratteristica di erogazione nella quale $Q(h)$ sono le portate misurate al variare della pressione durante la prova di caratterizzazione idraulica degli apparecchi erogatori e q (misurate) sono le portate effettivamente erogate durante la prova con portata di estremità

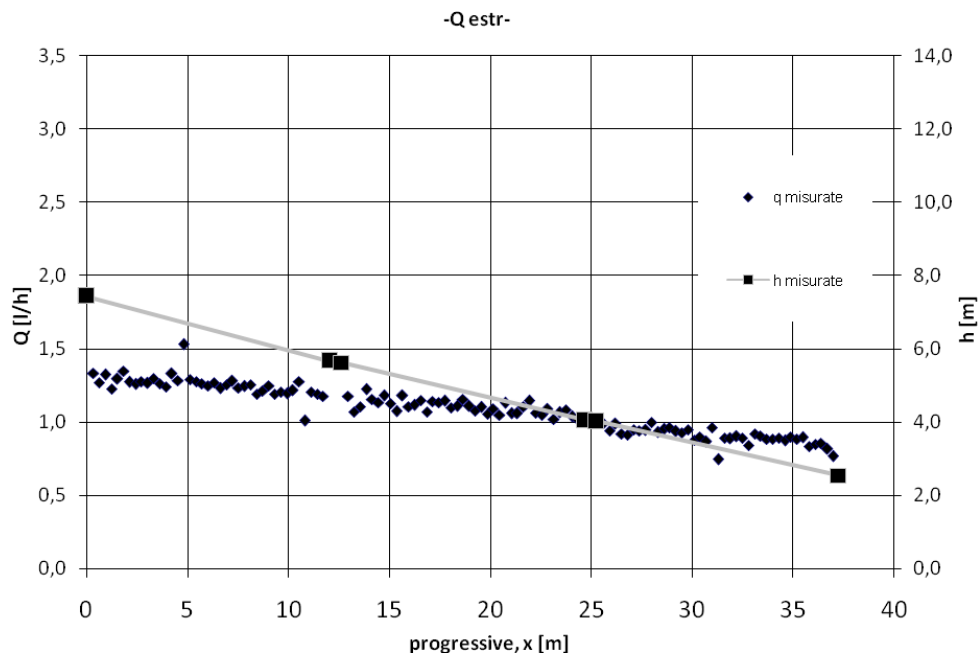


Figura C: Valori di portata e di carico rilevati e stimati nel corso della prova con portata di estremità

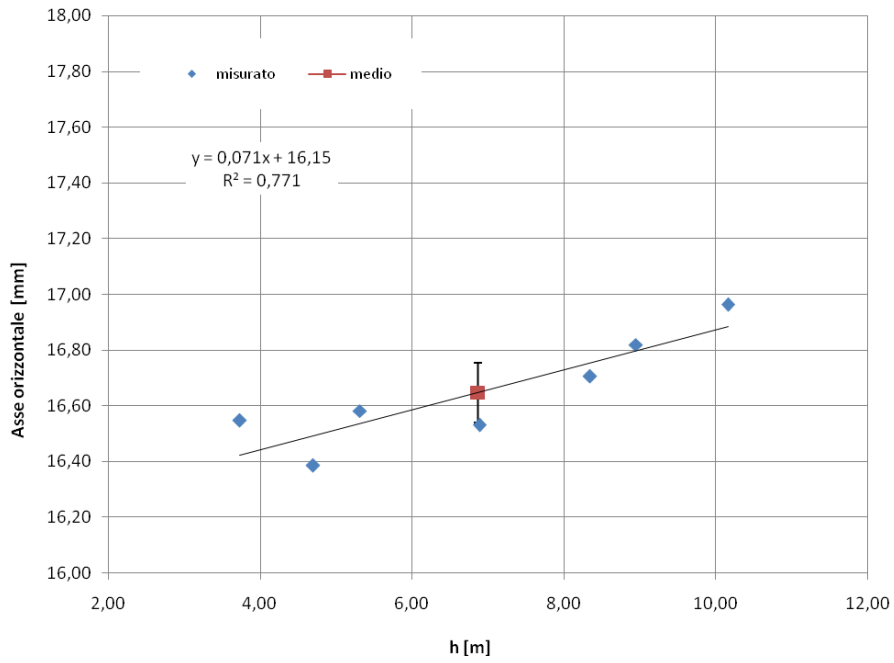


Figura D: Valori del diametro misurato lungo l'asse orizzontale in funzione del carico

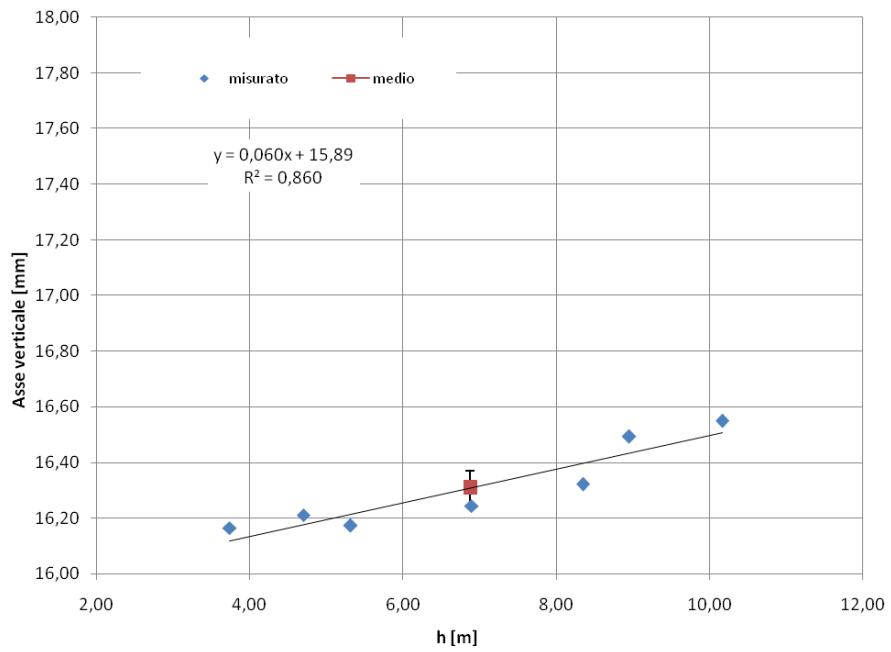


Figura E: Valori del diametro misurato lungo l'asse verticale in funzione del carico

Re	α^*
11439	0.306
11981	0.273
13458	0.256
14185	0.238
15036	0.239
15548	0.248
16007	0.241
16338	0.227
16825	0.221
17795	0.215
18264	0.237
18684	0.245
18784	0.233
19206	0.212
19644	0.215
19752	0.209
20087	0.260
20314	0.208
20429	0.234
20890	0.206
21149	0.234
21484	0.210
21818	0.222
22214	0.222
22392	0.226
22947	0.200
23362	0.202
23668	0.215
23789	0.214
24262	0.196
24443	0.225
24700	0.196
24884	0.196
25013	0.190
25712	0.201
26299	0.189
26435	0.189
27185	0.197

Coppie di valori Re α^* misurati

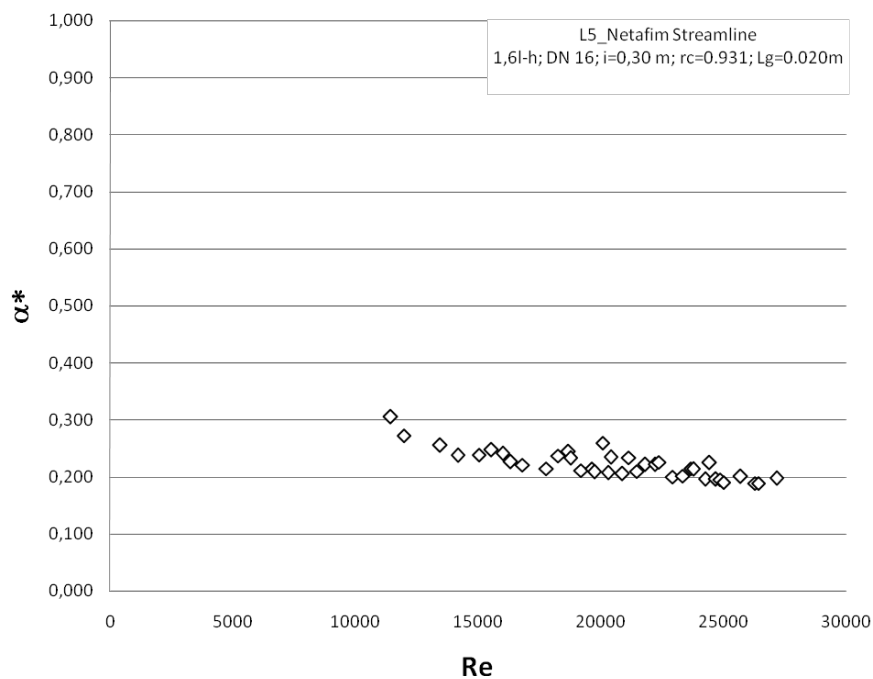


Figura F: Coppie di valori Re α^* misurati

Casa costruttrice:	Siplast	
Modello:	P1 Ultra	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento da catalogo:		
DN [mm]	22	
I [m]	0.30	
Qn [l/h]	1.0	
Spessore condotta [mm]	0.300	
Caratteristiche costruttive e di funzionamento misurate:		
Di [mm]	22.15	
Dg [mm]	21.63	
Lg [mm]	29.65	
rc	0.956	
I [m]	0.30	
$q = kh^x$	K	0.271
	x	0.483
Spessore condotta [mm]	0.300	
CVT [%]	5.20	



Figura A: Gocciolatore Siplast P1 Ultra (Qn 1.0 l/h)

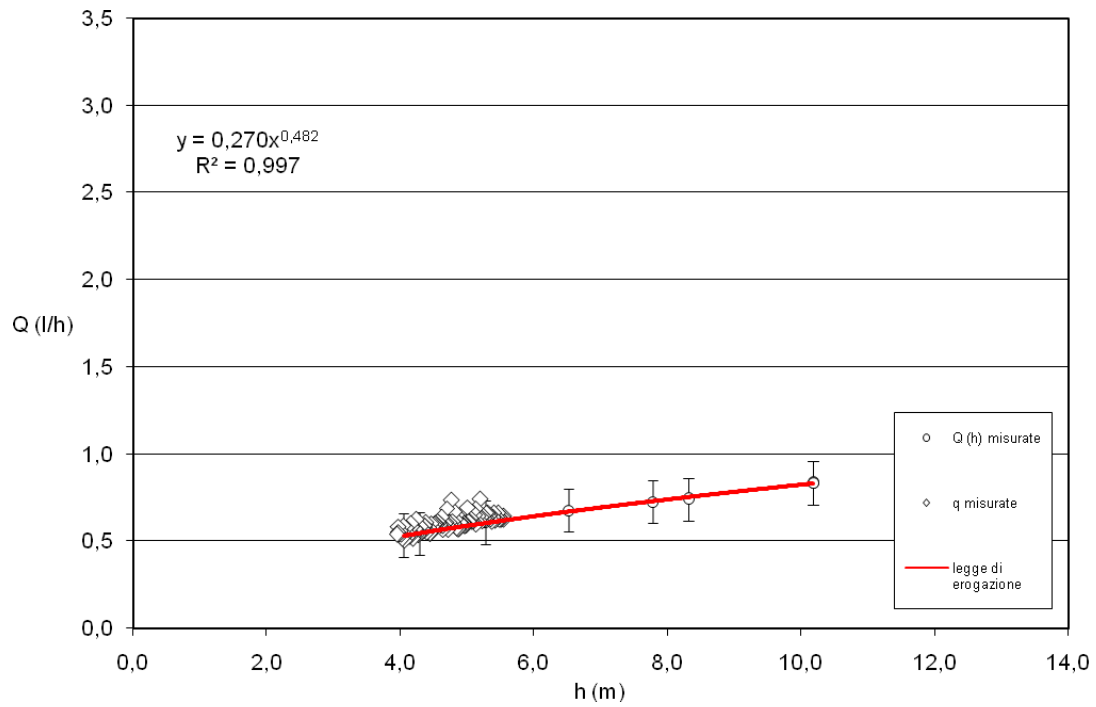


Figura B: : Curva caratteristica di erogazione nella quale $Q(h)$ sono le portate misurate al variare della pressione durante la prova di caratterizzazione idraulica degli apparecchi erogatori e q (misurate) sono le portate effettivamente erogate durante la prova con portata di estremità

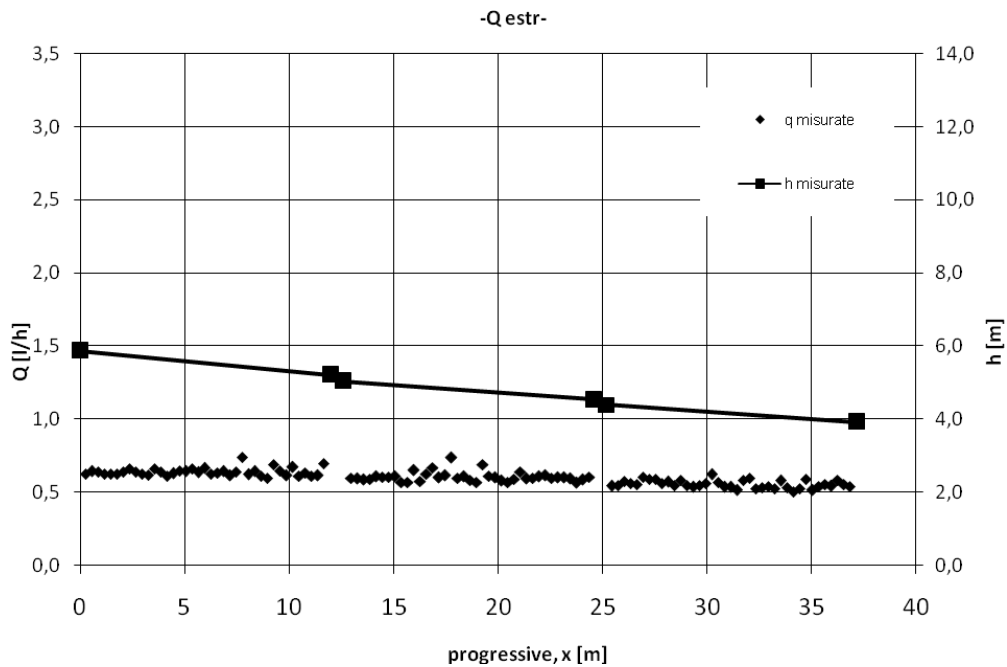


Figura C: Valori di portata e di carico rilevati e stimati nel corso della prova con portata di estremità

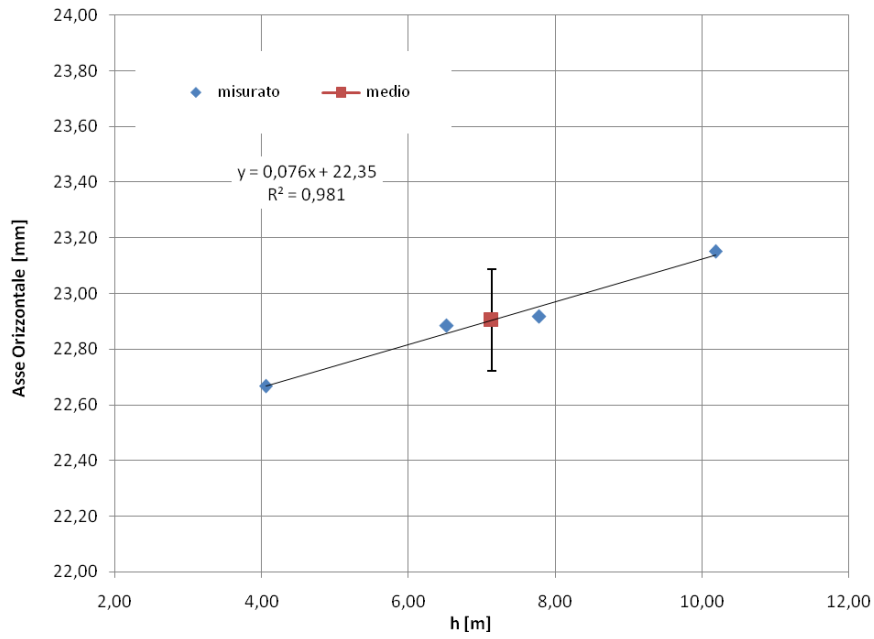


Figura D: Valori del diametro misurato lungo l'asse orizzontale in funzione del carico

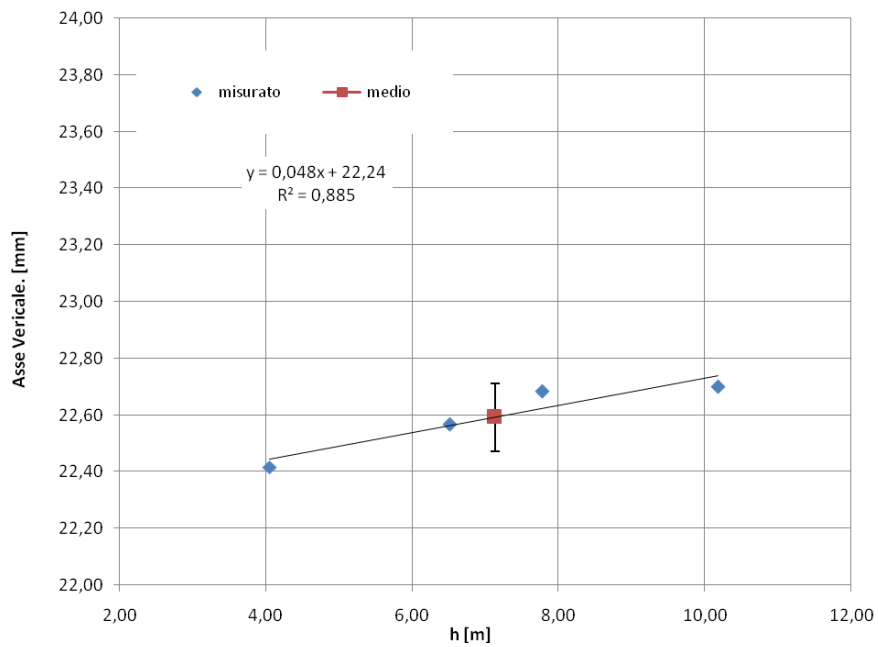


Figura E: Valori del diametro misurato lungo l'asse verticale in funzione del carico

Re	α^*
9679	0.266
9899	0.261
11851	0.235
12136	0.249
15231	0.239
15533	0.207
15622	0.258
15899	0.222
16579	0.234
16985	0.253
17648	0.219
18080	0.238
19929	0.215
20416	0.234
21618	0.200
22145	0.225
22259	0.200
22802	0.229
24553	0.188
24583	0.199
25143	0.214
25179	0.228

Coppie di valori Re α^* misurati

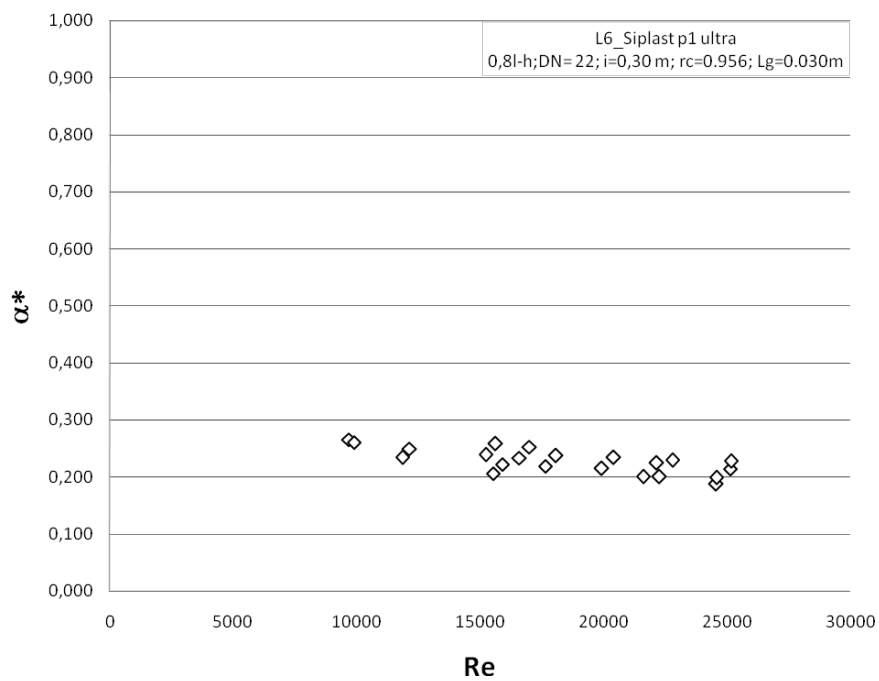


Figura F: Coppie di valori Re α^* misurati