



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Corso di Laurea in:

TUTELA DEL TERRITORIO E RIASSETTO DEL
PAESAGGIO

Curr. Riassetto del territorio

**MISURE IDROLOGICHE ED IDRAULICHE PRESSO
IL RAIN GARDEN SPERIMENTALE DI AGRIPOLIS
(LEGNARO, PD)**

Relatore:

Prof. Vincenzo D'Agostino

Correlatore:

Dott. Francesco Bettella

Laureando:

Francesco Cavinato

Matricola n.
583513

ANNO ACCADEMICO

2013 - 2014

INDICE

RIASSUNTO	III
ABSTRACT	V
GLOSSARIO	VII
CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 2 – OBIETTIVI DELLA TESI	7
CAPITOLO 3 – MATERIALI E METODI	9
3.1 – Il Rain Garden di Agripolis	9
3.2 – Misure di permeabilità	16
3.2.1 – Lo strumento utilizzato: il permeometro di Guelph	16
3.2.2 – Metodi utilizzati per le misure di permeabilità	27
3.3 – Misure di portata	46
3.3.1 – Lo stramazzo del Rain Garden	46
3.3.2 – Equazioni attualmente utilizzate per il calcolo della portata	51
3.3.3 – Taratura dello stramazzo	52
3.3.3.1 - Verifica di perdite dal sistema rain garden	52
3.3.3.2 – Taratura dello stramazzo e determinazione di una nuova equazione empirica per il calcolo della portata	55

CAPITOLO 4 - RISULTATI E DISCUSSIONE	59
4.1 – Risultati delle misure di permeabilità	59
4.2 – Risultati delle procedure di verifica di perdite dal sistema	66
4.3 - Risultati della taratura dello stramazzo	69
CAPITOLO 5 – CONCLUSIONI	81
BIBLIOGRAFIA	85
ALLEGATO I – MISURE DI PERMEABILITA’	87

RIASSUNTO

Negli ultimi decenni la forte urbanizzazione ha messo in evidenza non pochi problemi nella gestione delle acque meteoriche. Laddove il cemento sovrasta il terreno naturale, l'azione di assorbimento è drasticamente diminuita. In recenti episodi di pioggia intensa l'azione antropica ha dimostrato ancora una volta di essere in contrasto con il naturale ciclo dell'acqua. I danni che si sono verificati sono dovuti ad una erronea gestione delle acque meteoriche che oltre tutto, non tiene conto di quanto preziosa sia questa risorsa. L'acqua infatti non è un bene equamente ripartito e in alcune regioni della Terra si può tranquillamente affermare che è un lusso. In ogni caso, sia che sia scarsa o abbondante, l'acqua deve essere gestita con un'ottica mirata al risparmio e alla sostenibilità. Lo spreco è un vizio che l'uomo ripagherà molto duramente nel tempo. Sulla base di queste considerazioni sarebbe sbagliato affermare che non esistono metodi alternativi di gestione delle acque piovane. Questi metodi esistono e in alcuni Paesi sono già largamente diffusi. Già a partire dagli anni 90, negli Stati Uniti d'America, sono stati sviluppati i cosiddetti LID (Low Impact Development); Si tratta di strutture e metodi che cercano di ricreare il naturale ciclo idrologico in ambienti antropizzati. Tra queste pratiche di gestione sostenibile o integrata, vi fanno parte anche i cosiddetti giardini pluviali o "rain gardens". Questi giardini sono delle particolari aiuole costituite da una depressione superficiale e da un substrato altamente poroso, coltivato con specie vegetali; il tutto per favorire l'infiltrazione dei deflussi d'acqua piovana provenienti da superfici pavimentate e filtrare gli inquinanti. È bene ricordare che, per lo meno nel nostro Paese, la gestione delle acque piovane è compito del sistema fognario e dei tombini stradali, che molto spesso si intasano. I giardini pluviali possono anche essere posizionati a bordo strada, sulle isole spartitraffico, sulle rotonde e via dicendo conferendo allo stesso tempo una maggiore percezione del verde e un'azione di filtraggio degli inquinanti presenti nell'atmosfera che vengono riportati a terra dalla pioggia. Questo tipo di soluzione tecnica dalla gestione dell'acqua è stato progettato e costruito, a fini sperimentali, nel campus di Agripolis presso la facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Padova. La struttura comprende due "rain gardens", uno di 10,5 m² l'altro di 21 m², posizionati e dimensionati per ricevere i deflussi provenienti da una copertura di 220 m². La struttura ha già tre anni di vita e nel corso di questo periodo di tempo ha subito alcune modifiche strutturali. In particolare è stato deciso di rendere effettivamente funzionante solo il rain garden più piccolo collegandolo ad una porzione di tetto più ristretta pari a 67 m². L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato, alla luce di alcune problematiche riscontrate nel sistema di rilevamento dei deflussi, quello di perfezionare la strumentazione e

di rendere più efficiente e preciso il metodo di stima dei deflussi che finiscono sul rain garden e quello di valutare la permeabilità del terreno dei giardini pluviali e di quello naturale. La stima delle conducibilità idrica a saturazione di campo (K_{fs}) o semplicemente permeabilità del terreno, ha permesso di poter valutare come la percolazione dell'acqua vari con la tessitura del terreno e come agisca sull'evoluzione della struttura interna nel corso del tempo. Al termine di questo lavoro infine è stata dunque determinata una nuova equazione per la stima delle portate defluenti dallo stramazzo.

ABSTRACT

In recent decades the strong urbanization has highlighted quite a few problems in the management of stormwater. Where the cement above the natural terrain, the action of absorption is dramatically diminished. In recent episodes of intense rain, anthropic action has proven once again to be at odds with the natural water cycle. The damages that occurred due to an erroneous stormwater management that, over all, takes no account of how precious this resource. In fact, water is not a commodity equally distributed and in some regions of the earth you can safely say that is a luxury. In any case, whether it is poor or rich, the water must be managed with a targeted approach to saving and sustainability. The waste is a vice that man will pay back very hard. Based on these considerations, it would be wrong to say that there are no alternative methods of stormwater management. These methods exist and in some countries are already widespread. Already starting from 90, in the United States of America, were developed the so-called LID (Low Impact Development); It's structures and methods that attempt to recreate the natural hydrological cycle in anthropogenic habitats. Among these practices sustainable management or integrated, there are also the so-called rain gardens. These gardens are the particular flower consisting of a shallow depression with a highly porous substrate grown with plant species; To facilitate the infiltration of rain water runoff from paved surfaces and filter pollutants. Remember that, at least in our country, stormwater management is the responsibility of the sewer and drains, which very often become clogged. Rain gardens can also be placed on the road, on the islands, traffic on roundabouts islands and so on giving at the same time a greater perception of green and the filtering action of the pollutants in the atmosphere and that are reported on the ground from the rain. This type of technical solution to water management has been designed and built, for experimental, in the Agripolis campus at the Faculty of Agriculture, University of Padua. The structure includes two rain gardens, one of 10,5 m² to 21 m², positioned and sized to receive runoff from a cover of 220 m². The structure has three years and during this period of time has undergone some structural modifications. In particular, it was decided to only make actually working rain garden smaller by connecting it to a roof narrower portion equal to 67 m². The objective of this thesis was, in light of some problems encountered in flow detection system, to bring forward the improvement of the hardware, to make more efficient and precise method of estimation of runoff that ends up on the rain garden and to evaluate the permeability of the soil of rain gardens and natural ground. Estimating water conductivity to saturation (K_{fs}) or simply soil permeability, has made it possible to assess how the various water percolation

through the soil texture and how to act on the evolution of the internal structure over time. At the end of this work finally was therefore given a new equation for estimating flow flowing out from the spillway.

GLOSSARIO

Parametro o simbolo	Significato
a	Raggio del pozzo (cm).
C	Fattore di forma, dipende principalmente dal rapporto H/a.
C_1, C_2	Fattori di forma C corrispondenti rispettivamente a H_1/a e H_2/a .
H_1, H_2	Carico idraulico rispettivamente per la prima e seconda procedura (cm).
K	Conducibilità idraulica (cm/s).
K_{fs}	Conducibilità idraulica alla saturazione di campo (cm/s).
$K(\varphi)$	Relazione tra conducibilità idraulica con la pressione del carico idraulico per flusso insaturo.
R	Tasso di caduta dell'acqua nel serbatoio (cm/min).
\bar{R}	Tasso di caduta costante (cm/min).

R_1, \bar{R}_2	Tasso di caduta costante corrispondente rispettivamente a H_1 e H_2 (cm/s).
S	Sorptivity; la tendenza di un materiale di assorbire e trasmettere acqua e altri liquidi per capillarità.
α^*	Parametro di lunghezza capillare macroscopica. Rappresenta il rapporto tra le forze gravitazionali e forze capillari (cm⁻¹).
θ_i	Contenuto volumetrico iniziale di acqua nel suolo (cm³/cm³).
θ_{fs}	Contenuto volumetrico di acqua in suolo saturo (con presenza di aria intrappolata) (cm³/cm³).
$\Delta\theta = \theta_{fs} - \theta_i$	Differenza tra suolo saturo e contenuto volumetrico iniziale (ambiente) di acqua nel terreno (cm³/cm³).
ϕ_m	Potenziale di flusso matriciale (cm²/s).
Ψ	Pressione esercitata dal carico d'acqua sul terreno, misurata in (cm) d'acqua.
α	Semiangolo dello stramazzo triangolare (Thomson)
C_d	Coefficiente di efflusso dello stramazzo
Q	Portata (l/s; m³/s)

h	Carico sulla soglia dello stramazzo (mm; cm; m)
β	Esponente equazione empirica
w	Altezza della soglia (mm; cm; m)

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

Oggi, nel luogo in cui viviamo, le risorse idriche sembrano essere un bene la cui importanza svanisce proprio nella sua costante presenza. La perpetuità dell'acqua che noi tutti i giorni utilizziamo appartiene ad una categoria di beni che è essenziale, non solo per la nostra routine quotidiana ma anche per la nostra sopravvivenza. Noi siamo organismi costituiti per il 90 % da liquidi, prima fra tutti l'acqua. Nell'epoca in cui viviamo, in molti Paesi l'acqua non è nemmeno percepita come un bene tanto è lo spreco generato dal suo utilizzo. Forse un giorno quando il problema toccherà personalmente interi gruppi di persone, la cognizione dell'acqua sarà cambiata. Per quanto possa essere evidente e preponderante la presenza dell'acqua sulla Terra, essa invece è più scarsa di quello che si possa pensare. L'acqua è un bene prezioso. La deforestazione ha creato uno squilibrio nel ciclo dell'acqua, in quanto le foreste tramite l'evapotraspirazione determinano parte delle precipitazioni in determinate aree del pianeta. Con la deforestazione non solo si è rallentato questo ciclo ma si sta portando lentamente alla desertificazione di intere aree della superficie terrestre. È bene sottolineare che i deserti sono uno dei biomi con la maggiore superficie sul nostro pianeta e probabilmente saranno destinati ad aumentare. Il ciclo dell'acqua determina l'equilibrio di un sistema ben più grande e complesso, ovvero il sistema Terra. Il riscaldamento globale è un processo in parte dovuto a questo squilibrio idrico che, oramai, nel nulla fare, diventerà irreversibile. Il clima in continuo cambiamento e la pesante antropizzazione porteranno ad un'urgente correzione di pensiero e d'uso dell'acqua. La popolazione mondiale è in continuo aumento e questo porterà ad una maggior richiesta di alimenti, accrescendo ulteriormente i fabbisogni d'acqua. Negli ultimi tempi il verificarsi di eventi piovosi eccezionali, i cosiddetti nubifragi, hanno creato la convinzione che l'acqua sia anche troppa. Eppure in molte zone del pianeta per raccogliere l'acqua appena sufficiente per soddisfare i fabbisogni giornalieri vengono percorsi decine di km a piedi. In altre zone del pianeta, l'acqua è causa di molta violenza. Sulla base di queste considerazioni è compito dell'uomo evitare la futura crisi della riserva idrica mondiale. Una delle tante azioni che l'uomo deve attuare per evitare questa futura crisi è lo studio di tecniche contro il suo spreco come ad esempio strutture per la gestione sostenibile dei deflussi di acque piovane, ossia quelle in grado di recuperare e trattare l'acqua invece di convogliarla direttamente verso le reti di drenaggio. Una di queste è il giardino pluviale detto anche rain garden. In alcuni Paesi come l'America questo tipo di drenaggio è già largamente diffuso, in altri Paesi come l'Italia è praticamente sconosciuto e poco sfruttato.

Il rain garden o “giardino pluviale” può essere concepito come una sorta di depressione superficiale formata da un substrato altamente poroso, che posa direttamente sul terreno del loco e in cui vengono messe a dimora specie vegetali. I giardini pluviali di norma sono situati vicino alla fonte di deflusso da superfici pavimentate e servono a rallentare il movimento dei volumi d’acqua, dando a questa più tempo per infiltrarsi e una minor possibilità di riprendere impeto, e quindi diminuire il suo potere erosivo. Sotto la superficie di un giardino pluviale avvengono una serie di processi naturali che imitano le azioni del ciclo idrogeologico, come all’interno di una foresta sana. Il substrato di coltivazione e le piante sono accuratamente selezionati ai fini dei processi fisici, chimici e biologici che si verificano al suo interno. In sostanza il rain garden è una sorta di bioretention, nella quale l’acqua piovana che entra nel sistema è ripulita, e il suo volume ridotto. I livelli di azoto e fosforo, i carichi di sedimenti complessivamente contenuti in queste acqua pluviali sono significativamente ridotti dall’azione sinergica di piante e substrati di coltivazione (Dietz e Calusen, 2005). Per **bioretention**, o bacini di bio-ritenzione, si intendono “delle pratiche costruttive su terra per il controllo della qualità e della quantità dell’acqua, le quali usando le proprietà chimiche, fisiche e biologiche di piante, microrganismi e substrati, cercano di rimuovere gli inquinanti dalle acque di deflusso meteorico” (Coffman e Winogradoff, 2002). Una struttura bioretention (letteralmente traducibile in “trattenimento mediante la biomassa”), è un sistema biologico atto al trattenimento di elementi nutritivi e inquinanti, all’interno del quale possono aver luogo importanti processi naturali quali la sedimentazione, l’adsorbimento di nutrienti, la filtrazione, la volatilizzazione, lo scambio ionico, la decomposizione, la fitorimediazione, e la capacità d’immagazzinamento dell’acqua. Ci sono due tipi fondamentali di bioretention: gli *under - drained* (sotto - drenati) e i *self – contained* (autosufficienti). Il rain garden rientra tra quest’ultima tipologia poiché appunto non possiedono tubi di drenaggio che scaricano direttamente su un sistema fognario e di altre guaine impermeabilizzanti artificiali che isolano completamente il sistema del terreno su cui è costruito (Endreny e Collins, 2009). La caratteristica sostanziale è che il rain garden non è isolato dall’ambiente circostante ma diviene parte integrante permettendo, attraverso di esso, l’infiltrazione e la percolazione profonda dei deflussi. La realizzazione di un giardino piovoso permette di risolvere in parte i problemi legati alla gestione delle risorse idriche in ambiente urbano e può apportare anche i seguenti vantaggi:

- riduce le prestazioni del *runoff* inquinante;
- se adottato in vasta scala, contribuisce significativamente alla riduzione delle inondazioni e allagamenti stradali, risolvendo in parte i problemi di drenaggio;

- i canali di prima derivazione e tutti i successivi effluenti, torrenti, fiumi, laghi, sono meno inondati dagli inquinanti trasportati dalle zone urbane;
- riduce i costi di rifornimento e della gestione di infrastrutture idriche;
- richiede poca manutenzione, riducendo il consumo di energia per la gestione del verde, essendo un giardino che si autosostiene per la maggior parte;
- incoraggia la tutela ambientale e l'orgoglio di una comunità;
- fornisce un habitat per la fauna selvatica, e specie vegetali autoctone;
- contribuisce a migliorare la qualità dell'aria, mitigando il microclima urbano;
- aumenta il valore immobiliare di un edificio fino al 20 % apportando una qualificazione della struttura dal punto di vista estetico ed ambientale.

Dal punto di vista costruttivo il rain garden (Figura 1.1) è composto principalmente da:

- 1) **striscia d'erba tampone:** posizionata attorno al giardino pluviale, si rende necessaria per permettere di rallentare la velocità del deflusso e di bloccare la maggior quantità di sedimenti;
- 2) **strato protettivo:** indispensabile per fornire un supporto alle attività biologiche e poter mantenere il suolo umido (*mulch*); è uno strato che agisce da filtro per le sostanze inquinanti, protegge il suolo dall'erosione e fornisce un ambiente ideale per quei microrganismi degradatori e assimilatori delle particelle inquinanti;
- 3) **vegetazione:** autoctona e/o resistente a tali condizioni;
- 4) **substrato di coltivazione:** provvede al fabbisogno nutrizionale e all'assorbimento di sostanze inquinanti e metalli pesanti;
- 5) **depressione,** o area di accumulo delle acque di deflusso: è la superficie che presenta il massimo livello di infiltrazione; sovente delimitata da uno strato di terra o da un altro materiale di tipo roccioso, detto in gergo tecnico *berm*, o trincea, che permette di trattenere il runoff all'interno della depressione.

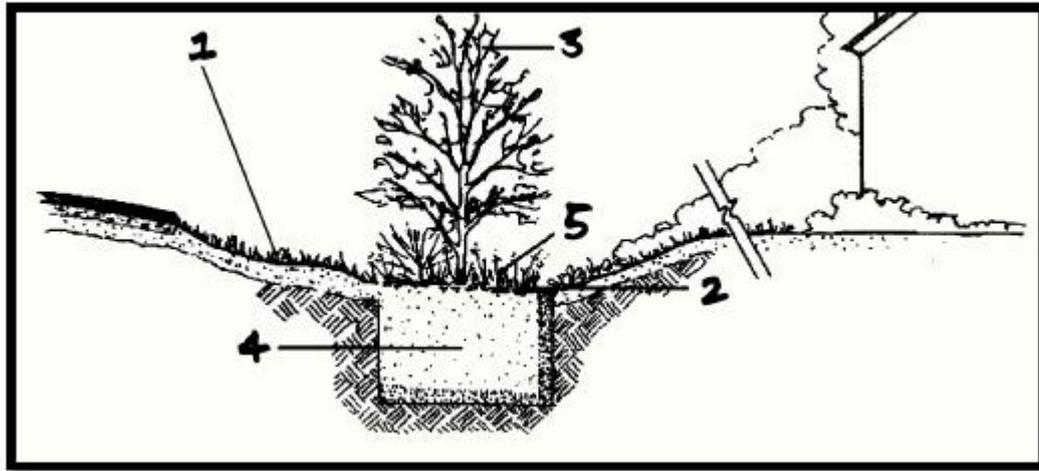


Figura 1.1 : Sezione trasversale di un rain garden tipo

Tra le molte cose, ciò che è importante per un giardino pluviale è la sua permeabilità, ovvero la capacità di condurre acqua nei substrati costitutivi. La permeabilità è un parametro che può essere facilmente determinato in campo con apposite apparecchiature, come ad esempio il permeametro di Guelph. Questo strumento è molto pratico e se utilizzato con le opportune accortezze può fornire dati precisi. In questo lavoro di tesi la permeabilità del rain garden è stata stimata con questo strumento. Esistono però altre apparecchiature come l'infiltrometro a disco o ad anello, l'infiltrometro a doppio anello e i permeametri. La permeabilità viene quindi stimata elaborando i dati ottenuti dalle misurazioni effettuate in loco, dette anche prove di permeabilità. Queste prove consentono di effettuare delle valutazioni quali - quantitative direttamente in sito circa la proprietà del suolo di condurre acqua. La capacità del suolo di condurre acqua è detta conducibilità idraulica. La conducibilità idraulica di un terreno dipende dalla geometria dei suoi pori (tessitura e struttura) nonché dalle proprietà del fluido ivi presente, soprattutto viscosità e densità. In un terreno non rigonfiabile, finché i valori del potenziale di pressione dell'acqua sono tali da mantenere il sistema saturo (pori tutti pieni d'acqua) il valore di conducibilità idrica resta costante. Questa condizione si verifica sempre nel caso di deflusso dell'acqua in falda e con buona approssimazione nella frangia capillare. Al fine di una corretta interpretazione dei risultati riveste notevole importanza la composizione granulometrica ed il grado di compattezza propri dello strato inferiore a quello indagato. Infatti, se al di sotto della zona in cui si effettuano le misurazioni vi è un orizzonte ghiaioso - sabbioso permeabile, per niente cementato e quindi ad altissima conducibilità idrica, molta parte del flusso proveniente dalla superficie sarà destinato a versarsi prima verso lo strato sottostante per poi procedere lateralmente in maniera più lenta. Al contrario, se al

disotto della zona da rilevare vi è un orizzonte compatto e poco permeabile o addirittura impermeabile, cioè a conducibilità idrica approssimativamente nulla, tutte le linee del flusso provenienti dalla superficie si dirigeranno più o meno lateralmente, incurvandosi in prossimità della zona di contatto fra i due strati. L'individuazione attraverso profili pedologici o cartografia geologica del tipo di orizzonti presenti sotto il sito di prova, può aiutare a comprendere ed a interpretare i valori di conducibilità idraulica ottenuti. Il permeametro di Guelph può essere utilizzato ovunque possa essere creato un foro nel terreno e permette di determinare la conducibilità idraulica alla saturazione di campo, il potenziale di flusso matriciale e il parametro alfa, ovvero parametro di lunghezza capillare macroscopica, che sarà descritto nel capitolo successivo. Tuttavia con questo strumento sono possibili ulteriori applicazioni, come ad esempio il monitoraggio di sistemi di irrigazione, sistemi di drenaggio, canali, serbatoi, aree di falda, aree di discarica per monitoraggio sanitario, siti rischiosi di stoccaggio rifiuti, sistemi di fossa biologica, misure e studi di suolo e idrologici. Nello studio del funzionamento di un rain garden ciò che risulta di fondamentale importanza è la conoscenza dei volumi d'acqua che vi affluiscono e quindi l'intensità dell'evento piovoso. Questi dati generalmente si possono ricavare dagli archivi degli enti meteorologici come l'ARPA (Agenzia Regionale Protezione Ambiente) ma per studi di ricerca specifici come quelli nei rain garden di Agripolis è necessario l'utilizzo di strumentazione che possa fornire dati di misure idrometriche più puntuali. È bene considerare che il dimensionamento di un rain garden è in funzione della copertura dell'edificio ivi adiacente o della copertura a cui è collegato e dalla quale l'acqua viene fatta defluire per essere convogliata nel giardino pluviale. È logico che nei casi di applicazione di questa tecnica di gestione delle acque di deflusso meteorico in ambiti urbani, l'utilizzo e la presenza di questa strumentazione non è necessario. Quindi solo per fini di studio e ricerca, la portata d'acqua che dal tetto finisce nel rain garden di Agripolis (il giardino pluviale della facoltà di Agraria di Padova) viene stimata mediante uno stramazzone triangolare e delle sonde idrometriche. La funzione dello stramazzone è quella di laminare il flusso proveniente dal tetto e di fornire una relazione tra livello idrometrico e portata. Per la misura del livello idrometrico esistono diverse apparecchiature. Quelle utilizzate per questo lavoro di tesi sono una sonda a galleggiante e una sonda piezometrica. In alcuni casi l'utilizzo dell'asta idrometrica è stato necessario per verificare i dati ottenuti con le altre due sonde. Allo stramazzone è associata un'equazione che permette di determinare, sulla base dei dati delle sonde idrometriche, la portata che defluisce dalla soglia e quindi i volumi dell'evento considerato. Per ottenere dati precisi e validi è fondamentale che la strumentazione sia ben tarata altrimenti si possono riscontrare sottostime o sovrastime degli

eventi piovosi. Il lavoro di questa tesi è stato proprio quello di taratura della strumentazione e in particolare quello di determinare un'equazione empirica che meglio stimi i valori di deflusso sullo stramazzo. L'equazione empirica si differenzia da quella teorica proprio per la sua natura sperimentale e il suo legame ad uno specifico campo di applicazione e casistica. Le misure idrometriche possono comunque avere altri campi di applicazione. Queste misure ad esempio vengono effettuate in determinate sezioni dei corsi d'acqua per poter monitorare la portata del fiume in seguito a variazioni di intensità di precipitazione e quindi per determinare la curva delle portate.

CAPITOLO 2 – OBIETTIVI DELLA TESI

Questo lavoro di tesi ha come oggetto di esame la strumentazione utilizzata nella gestione dei deflussi meteorici di un particolare tipo di bioretention, chiamato rain garden o giardino pluviale. Questo giardino è situato nei pressi del Campus di Agripolis, la sede della facoltà di Agraria e Medicina Veterinaria dell'Università degli Studi di Padova e fa parte di un progetto molto più ampio iniziato nel 2011. I giardini pluviali di Agripolis sono due, uno che ha il compito di ricevere e laminare l'acqua proveniente dalla copertura dell'edificio "Centrale tecnologica", mentre l'altro riceve solo l'acqua piovana che direttamente cade su di esso; in questo modo è possibile eseguire un confronto sul comportamento delle specie vegetali soggette a due regimi idrici differenti. Nel corso di questi anni, i due rain garden sono stati sottoposti ad una serie di studi e valutazioni sulle sue capacità di gestione delle acque piovane. Durante queste analisi, la fase di calibratura della strumentazione per la misura degli afflussi idrici ha riscontrato alcune problematiche: difficoltà nell'ottenere un perfetto bilancio tra afflussi, misurati tramite pluviometro, e deflussi, misurati tramite uno stramazzo in parete sottile. Per questo motivo, uno degli obiettivi della tesi è stato quello di tarare la strumentazione utilizzata per le misure idrometriche: sonde per la misura del livello idrometrico nella vasca di calma dello stramazzo per la misura della portata. In particolare è stato ritenuto opportuno determinare una nuova equazione di calibrazione dello stramazzo per la stima delle portate che defluiscono sulla soglia dello stramazzo triangolare. Un secondo obiettivo del lavoro di tesi è stata la caratterizzazione della permeabilità del suolo dei due rain garden e del suolo naturalmente presente nei terreni dell'Agripolis. La stima della conducibilità idrica alla saturazione di campo dei rain garden ha permesso il confronto con la permeabilità del terreno naturale circostante e quindi di quantificare meglio la capacità di assorbimento dei giardini pluviali. Questo secondo lavoro è stato svolto mediante l'utilizzo di un permeometro di Guelph. Le prove permeametriche realizzate hanno permesso, inoltre, una valutazione dello strumento in campo e un'analisi di problematiche e relative soluzioni incontrate in fase di misura.

Riassumendo, gli obiettivi della tesi sono:

- 1) la stima della permeabilità del suolo dei rain gardens mediante permeometro di Guelph e confronto con il suolo naturale circostante;

- 2) la taratura della strumentazione per la misura dei deflussi idrici provenienti dalla copertura e la determinazione di una nuova equazione empirica per la misura delle portate con lo stramazzo triangolare in parete sottile.

Questi obbiettivi hanno l'intento più ampio di rendere più efficiente la tecnica dei giardini pluviali per la gestione sostenibile dei deflussi meteorici e dunque di apportare un contributo sperimentale alla reale applicabilità dei giardini pluviali nel nostro territorio. Nel nostro Paese, infatti, questo sistema è ancora poco conosciuto e sfruttato; l'aumento della conoscenza e la valutazione delle potenzialità di questi sistemi tramite opportune sperimentazioni scientifiche possono essere un metodo per promuovere i giardini pluviali come strumento adottabile nella progettazione del verde urbano anche nel nostro territorio.

CAPITOLO 3 – MATERIALI E METODI

Per questo lavoro di tesi sono stati utilizzati strumenti e metodi diversi a seconda dell'obiettivo perseguito. Per le misure di permeabilità si è utilizzato il permeometro di Guelph, le cui caratteristiche e metodi di utilizzo sono descritti nei paragrafi successivi; per la determinazione dell'equazione empirica per il calcolo dei volumi d'acqua che defluiscono dallo stramazzo, invece, è stata utilizzata la strumentazione del rain garden di Agripolis e strumenti e tecniche ideati *ad hoc* per la realizzazione accurata delle misure necessarie.

3.1 – IL RAIN GARDEN DI AGRIPOLIS

I rain garden dell'Agripolis fanno parte di un progetto di Ateneo molto ampio intitolato "Strutture verdi per il controllo dei deflussi in ambiente urbano". Questo progetto è iniziato nell'aprile del 2011 e ha visto l'allestimento, all'interno del campus di Agripolis (sede della Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria dell'Università di Padova), di un bacino di bioritenzione e di due rain gardens. Le prove sperimentali trattate in questo lavoro di tesi, sono state eseguite nei due rain garden e nel terreno naturale ad essi circostante. Queste due strutture sono situate nello spazio verde posto a nord dell'edificio denominato "Centrale Tecnologica" (Figura 3.1 e 3.2). La scelta del loro posizionamento è stata dettata dal fatto che in questa area nel sottosuolo non sono presenti tubazioni per il trasporto dei servizi di luce, gas, acqua o linee telefoniche.

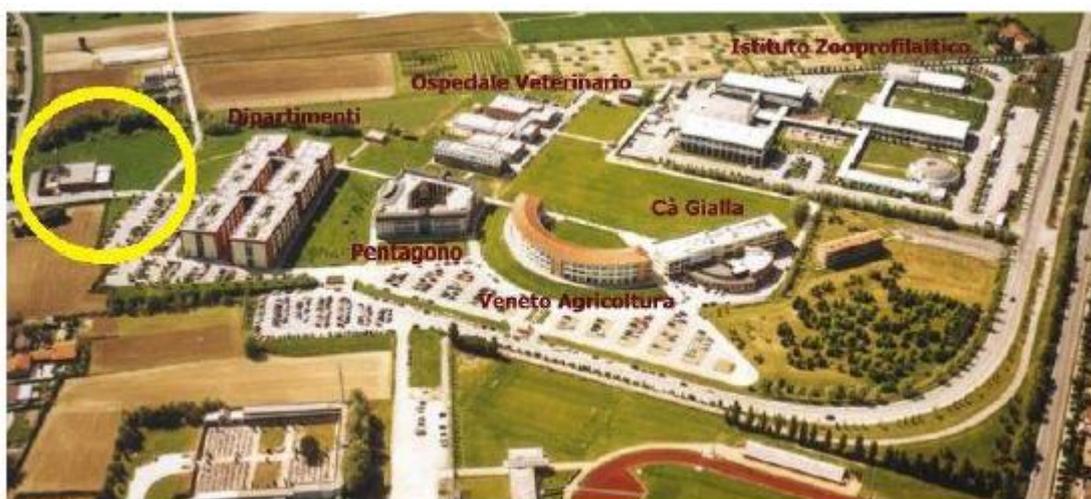


Figura 3. 1: Immagine aerea del campus di Agripolis; nel cerchio giallo la Centrale Tecnologica dove sono posizionati i rain gardens (Simionato, 2011)



Figura 3. 2: Immagine area dell'are in cui sono stati posizionati i rain gardens (Simionato, 2011)

Per quanto riguarda i dettagli progettuali e di realizzazione si rimanda a quanto riportato da Simionato (2011) nel suo lavoro di tesi. Di seguito e nei paragrafi successivi si riporta un breve descrizione degli aspetti costruttivi più importanti e della strumentazione utilizzata e presente in loco. La struttura attualmente operativa ed utilizzata nel lavoro di tesi può essere schematizzata nel modo seguente:

- 1) superficie impermeabile (“metà” del tetto 2).
- 2) 2 pluviali (gronde).
- 3) 2 scoli .
- 4) Stramazzo a “V”.
- 5) Rain garden 1 (“piccolo”)
- 6) Serbatoio di raccolta.

Nella figura seguente è riportata una planimetria della struttura (Simionato, 2011):

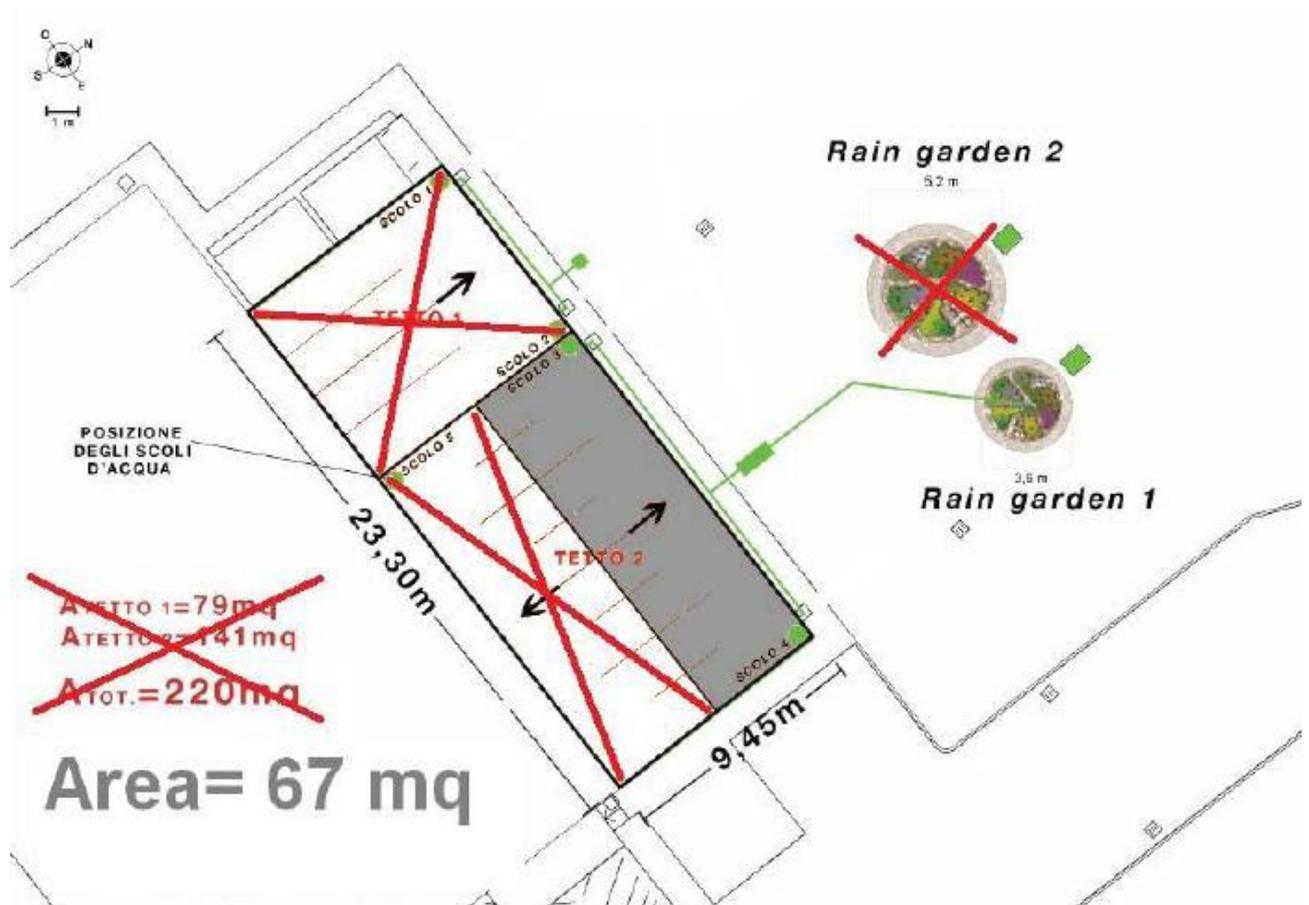


Figura 3. 3: Planimetria schematica del sistema rain garden (Brusaferrò, 2012)

Inizialmente l'intera struttura comprendeva una superficie impermeabile maggiore, ma per motivi ben spiegati nel lavoro di tesi di Brusaferrò D. (2012), attualmente solo una parte della copertura 2 è collegata al rain garden 1 (piccolo). L'area di copertura presa in considerazione è di **67 m²**. Per verificare se il rain garden piccolo possiede una superficie corretta per l'area di tetto si è effettuato il dimensionamento del giardino pluviale applicando il metodo classico secondo il quale: la superficie del rain garden si ottiene moltiplicando l'area di scolo per un coefficiente ottenuto considerando il punto di massima pendenza della zona su cui si vuole costruire il rain garden e il tipo di terreno o substrato impiegato per la realizzazione (Simionato, 2011), vedi figura 3.6. Di seguito si riporta il dimensionamento effettuato per il rain garden 1 (piccolo):

$$\text{sup. area drenaggio } 67 \text{ m}^2 \times \text{coefficiente } 0,15 = 10,05 \text{ m}^2$$

Il rain garden piccolo possiede un'area di 10,5 m² quindi la superficie è considerata compatibile. Per quanto riguarda il rain garden grande, con area di 21 m², è stato deciso di analizzare il comportamento del substrato e della vegetazione senza l'apporto dei deflussi dei pluviali per poter fare un paragone con il vero giardino pluviale, comparando in pratica i risultati ottenuti da una semplice aiuola, irrigata solo con irrigazione di soccorso, e un giardino pluviale con le medesime caratteristiche costruttive. In particolare la parte del tetto 2 considerata è di forma rettangolare ed ha due tubi di scolo (Figura 3.4 e 3.5).



Figura 3. 4: Copertura della Centrale Tecnologica (Brusaferrò, 2012)



Figura 3. 5: Sistema di gronde e vasca dello stramazzo (Brusaferrò, 2012)

	PER SITI A MENO DI 10 m DAL DOWNSPOUT			PER SITI A PIU' DI 10 m DAL DOWNSPOUT
TIPO DI SUOLO	<u>Profondo</u> <u>8-13 cm</u>	<u>Profondo</u> <u>15,5-18 cm</u>	<u>Profondo</u> <u>20 cm</u>	<u>Per tutte</u> <u>le profondità</u>
Suolo sabbioso	0,19	0,15	0,08	0,03
Suolo limoso	0,34	0,25	0,16	0,06
Suolo argilloso	0,43	0,32	0,20	0,10

Figura 3. 6: Componenti suolo rain garden e dimensionamento strati orizzontali (Simionato, 2011)

I due rain garden sono uno il doppio dell'altro e presentano le seguenti caratteristiche geometriche:

- **Rain garden 1 (piccolo):** diametro di 3,6 m, superficie di 10,5 m².
- **Rain garden 2 (grande):** diametro di 5,2 m, superficie di 21 m².

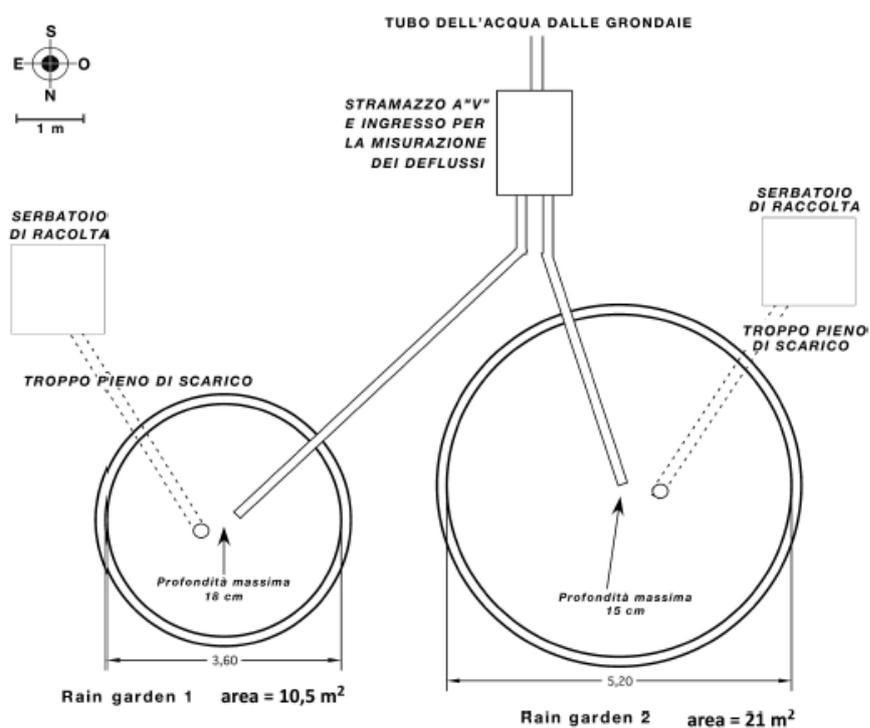


Figura 3. 7: Planimetria rain garden (Simionato, 2011)

L'acqua generata dagli eventi meteorici e che defluisce dal tetto, viene convogliata nello stramazzo a "V" tramite pluviali. Dalla seconda vasca, l'acqua di deflusso viene convogliata verso il centro del rain garden per mezzo di tubazioni. All'interno dei rain garden è presente un tubo di troppo pieno (Figura 3.8) che ha lo scopo di raccogliere l'acqua in "eccesso" in un pozzetto e poter quindi misurare i volumi di deflusso che i rain garden non sono in grado di gestire.



Figura 3. 8: Tubo del troppopieno (Brusaferro, 2012)

Per la misurazione delle variazioni di umidità all'interno del terreno del rain garden sono state installate delle sonde idrometriche e dei data logger. Per la creazione del rain garden si è deciso di asportare il terreno naturale ivi presente fino alla profondità di un metro circa e di sostituirlo con un substrato miscelato costituito nel modo seguente:

- 1) 50 % sabbia
- 2) 25 % compost (Azienda Agraria Sperimentale)
- 3) 25 % terreno naturale dello scavo

Le caratteristiche chimico – fisiche del terreno sono illustrate nella seguente tabella:

Parametro	Unità di misura	Valore
pH	-	8
Conducibilità elettrica	(mS/cm a 25°C)	1,30
Porosità totale	% V/V	51,3
Capacità di ritenzione idrica	% V/V	30,3
Porosità dell'acqua	% V/V	21
Azoto nitrico	% V/V	13,4
Azoto ammoniacale	% V/V	1,79
Fosfati	% V/V	2,51
Potassio	% V/V	108
Calcio	% V/V	17,3
Magnesio	% V/V	4,64
Sodio	% V/V	70,5

Tabella 3. 1: Caratteristiche chimico – fisiche del terreno (Simionato, 2011)

All'interno dei rain garden sono state riportate diverse specie erbacee perenni di progetto, come riportato nella seguente figura (Figura 3.9; Simionato, 2011):

SPECIE	CULTIVAR	COLORE DEL FIORE	N° DI PIANTE	
			Rain Garden piccolo	Rain Garden Grande
<i>Aster novi-belgii</i>	"White Ladies"	Bianco	5	9
<i>Bergenia purpurascens</i>	/	Rosa carminio	8	16
<i>Carex buchananii</i>	/	Poco significativo	6	12
<i>Echinacea purpurea</i>	"The King"	Rosso carminio	5	10
<i>Hemerocallis hybrida</i>	"Glittering Treasure"	Giallo	5	10
<i>Iris pseudacorus</i>	/	Giallo	5	10
<i>Lythrum salicaria</i>	"Robert"	Rosso carminio	9	18
<i>Molinia cerulea</i>	/	Brunate	3	6
<i>Rudbeckia fulgida</i>	"Goldstrum"	Giallo con centro scuro	6	12

Figura 3. 9: Componenti vegetazionali presenti nei rain gardens (Simionato, 2011)

Il motivo dell'inserimento di questo tipo di vegetazione all'interno dei rain garden esula dagli obiettivi della tesi, pertanto si rimanda ad altri testi per dettagli maggiori.

3.2 – MISURE DI PERMEABILITA'

3.2.1 – Lo strumento utilizzato: il permeometro di Guelph

Il permeometro di Guelph funziona con lo stesso principio della bottiglia di Mariotte (Figura 3.10). Tale dispositivo mantiene costante la pressione nel recipiente e la portata uscente da questo. La bottiglia di Mariotte consiste in un recipiente chiuso comunicante con l'atmosfera tramite un tubo inserito al suo interno sulla parte superiore e un orifizio presente sulla base del recipiente dal quale defluisce il liquido versato all'interno, ad esempio acqua. Una volta aperto il foro, l'acqua defluisce verso l'esterno solo se c'è la possibilità che entri aria ovvero che il volume occupato dall'acqua venga rimpiazzato dall'aria. L'utilità del tubo posto all'interno è quella di permettere il passaggio dell'aria nell'interno del recipiente e da ottenere una portata costante uscente dal foro. Quindi una volta riempito d'acqua parzialmente il recipiente e aperto l'orifizio, dopo qualche istante la portata derivata raggiunge un valore che si mantiene costante nel tempo. L'acqua defluente verrà continuamente sostituita nel recipiente dall'aria che viene aspirata tramite il tubo superiore.



Figura 3. 10: Bottiglia di Mariotte

Il permeametro di Guelph sfrutta lo stesso principio. Infatti, tramite il tubicino interno, è possibile modificare il carico idraulico agente al suo interno, come è spiegato nei paragrafi successivi. In particolare nella figura 3.11 si può comprendere cosa succede nella parte del tubo a contatto con il fondo del pozzo quando si modifica il carico idraulico.

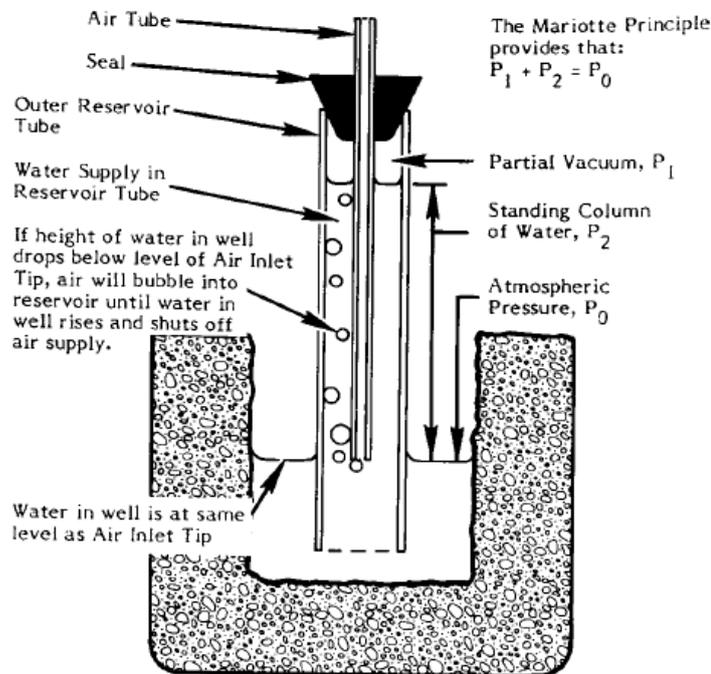


Figura 3. 11: Parte terminale del permeametro di Guelph (immagine tratta dalla guida operativa)

Guardando la figura 3.12 il livello dell'acqua nel buco è stabilito e mantenuto costante al livello della parte inferiore del tubo dell'aria regolando la posizione di quest'ultimo, che è

localizzato al centro del permeametro. Come il livello dell'acqua all'interno del serbatoio scende, uno spazio di aria è creato al di sopra dell'acqua. Questo spazio d'aria si crea perché l'aria esterna, spinta dalla pressione atmosferica, passa all'interno del tubo dell'aria, entra nel serbatoio formando bollicine e va a occupare il volume dell'acqua che defluisce dal fondo del permeametro verso il buco praticato nel terreno: quando il livello dell'acqua nel buco inizia a scendere al di sotto del foro del tubo dell'aria, le bollicine d'aria emergono dal foro e salgono nello spazio d'aria presente all'interno del serbatoio. Lo spazio d'aria si ingrandisce sempre di più andando a rimpiazzare l'acqua che dal serbatoio defluisce nel terreno. Il diametro e la geometria del foro del tubo dell'aria sono disegnati in modo tale da controllare la dimensione delle bolle d'aria per evitare fluttuazioni del livello dell'acqua all'interno del pozzetto. Quando il livello dell'acqua all'interno del pozzetto si è stabilito significa che una zona di terreno saturo, "bulbo", si è formata attorno al pozzetto. Generalmente questo processo è piuttosto rapido. Questo "bulbo" è piuttosto stabile e la sua forma dipende dal tipo di suolo, dal raggio del pozzetto e dal livello dell'acqua in esso presente. La forma del "bulbo" è inclusa nel valore del fattore "C" utilizzato nei calcoli al paragrafo 3.2.2. Una volta che la forma del "bulbo" si è stabilita, il deflusso dell'acqua dal pozzetto verso i pori del terreno circostante si mantiene costante. Questo tasso costante di flusso raggiunto, può essere misurato e utilizzato insieme al diametro del pozzetto e all'altezza dell'acqua nel pozzetto, per determinare accuratamente la conducibilità idraulica alla saturazione di campo, il potenziale di flusso matriciale, il parametro alfa (α) e la "sorptivity" ovvero la tendenza di un materiale di assorbire e trasmettere acqua e altri liquidi per capillarità.

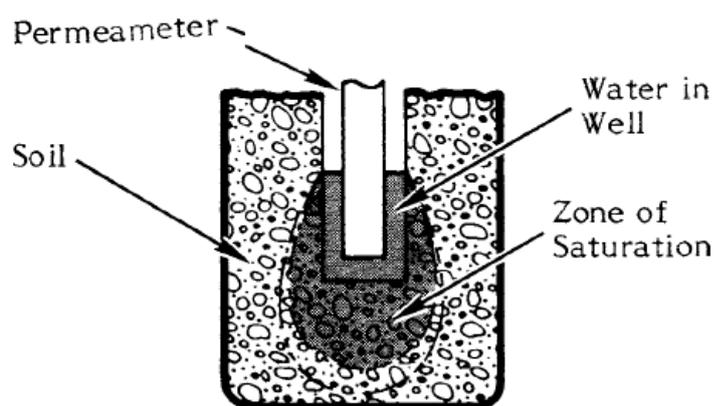


Figura 3. 12: Bulbo del terreno, zone di saturazioni in figura (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Il permeametro di Guelph è certamente lo strumento più diffuso per realizzare semplici ed accurate misure di conducibilità idraulica, assorbimento e potenziale di flusso su ogni tipo di

suolo. Lo strumento può essere assemblato da un solo operatore (trasportabile con una speciale valigia carrellata, Figura 3.13).



Figura 3. 13: Kit strumentale del permeametro di Guelph (immagine tratta dalla guida operativa)



Figura 3. 14: Permeametro di Guelph installato nel rain garden di Agripolis

Il permeametro di tipo Guelph è costituito da:

- Un tripode (Figura 3.15)
- Due cilindri coassiali (Figura 3.18)

TRIPODE.

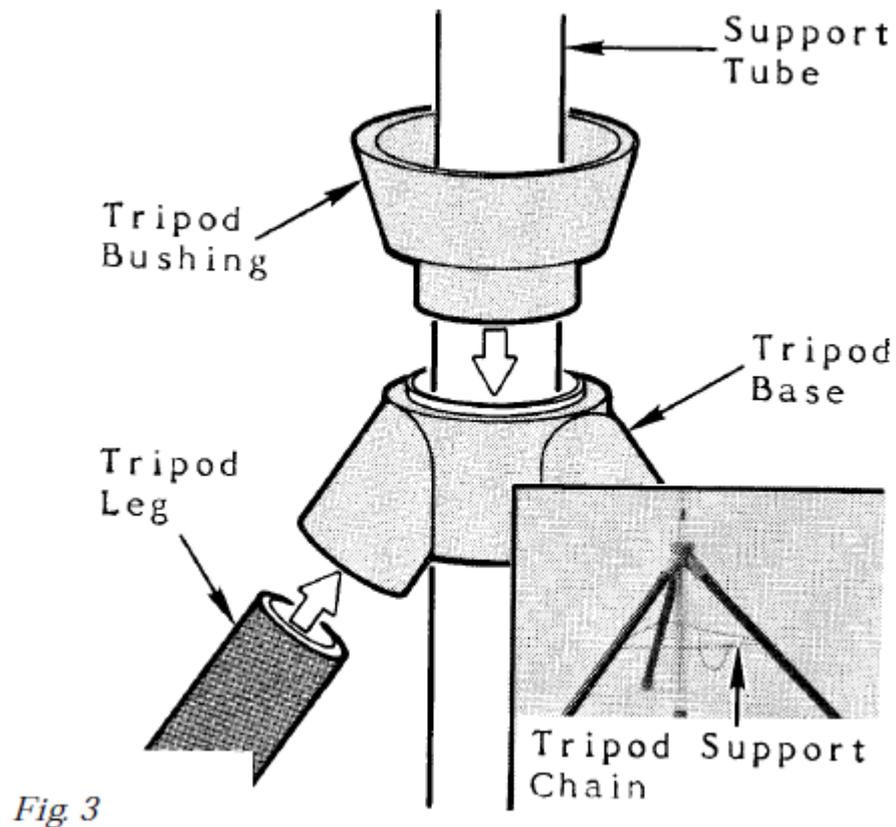


Figura 3. 15: Tripode (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Il tripode consiste in:

- 1) Base del tripode (Tripod Base).
- 2) Le gambe del tripode, 3 (Tripod Leg).
- 3) Colletto o boccola del tripode (Busching Tripod).

Le gambe e il colletto vanno inserite nella base del tripode come in figura sopra. All'interno del colletto va inserito il tubo di supporto a cui è collegato il serbatoio. La struttura del tripode serve per tenere stabile e dritto il permeametro. Eventualmente per rendere ancora più stabile il tripode si può utilizzare l'apposita catena (Tripod Support Chain).

TUBO DI SUPPORTO, TUBO INFERIORE DELL'ARIA E RELATIVI COMPONENTI.

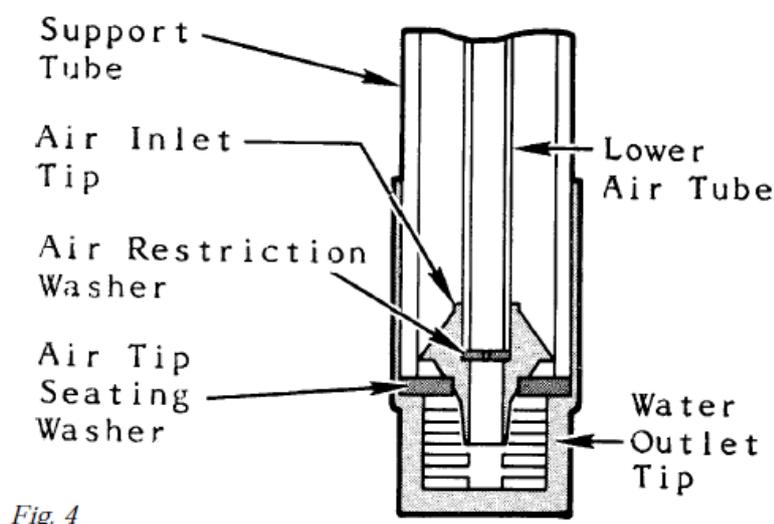


Fig. 4

Figura 3. 16: Parte terminale inferiore del permeametro (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Queste sono le componenti del permeametro che conducono l'acqua dal serbatoio al pozzo praticato nel terreno e provvedono a mantenere costante il carico idraulico all'interno del pozzo. Il tubo di supporto serve appunto a supportare il serbatoio sopra il pozzo nel terreno e a condurre l'acqua dal serbatoio al pozzo mediante i fori presenti all'estremità del tubo (Water Outlet Tip). Questi fori servono al permeametro per disperdere l'energia di efflusso dell'acqua e quindi per evitare erosioni del terreno delle pareti del pozzo. Quando il tubo dell'aria (Lower Air Tube), che appunto permette il passaggio dell'aria secondo il carico idraulico selezionato, è abbassato del tutto e aderisce completamente alla base del tubo di supporto (Air Tip Seating Washer – Air Inlet Tip) non avviene il passaggio dell'aria e quindi non vi è efflusso dell'acqua nel pozzo, questo perché viene rispettato il principio della bottiglia di Mariotte. Infatti l' "Air Inlet Tip" è collegato al "Lower Air Tube" che viene utilizzato per regolare il carico idraulico. Inoltre l' "Air Restriction Washer" è localizzato all'interno dell' "Air Inlet Tube" regola e mantiene costante il passaggio dell'aria in modo da non generare fluttuazioni. Il tubo dell'aria inferiore è connesso al tubo dell'aria intermedio (Middle Air Tube) mediante degli appositi connettori come nella seguente figura 3.17.

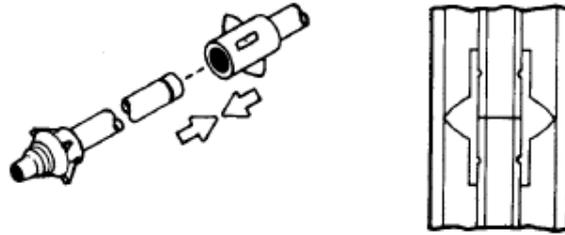


Figura 3. 17: Sistema di bloccaggio (immagine tratta dalla guida operativa strumento)

COMPONENTI DEL SERBATOIO.

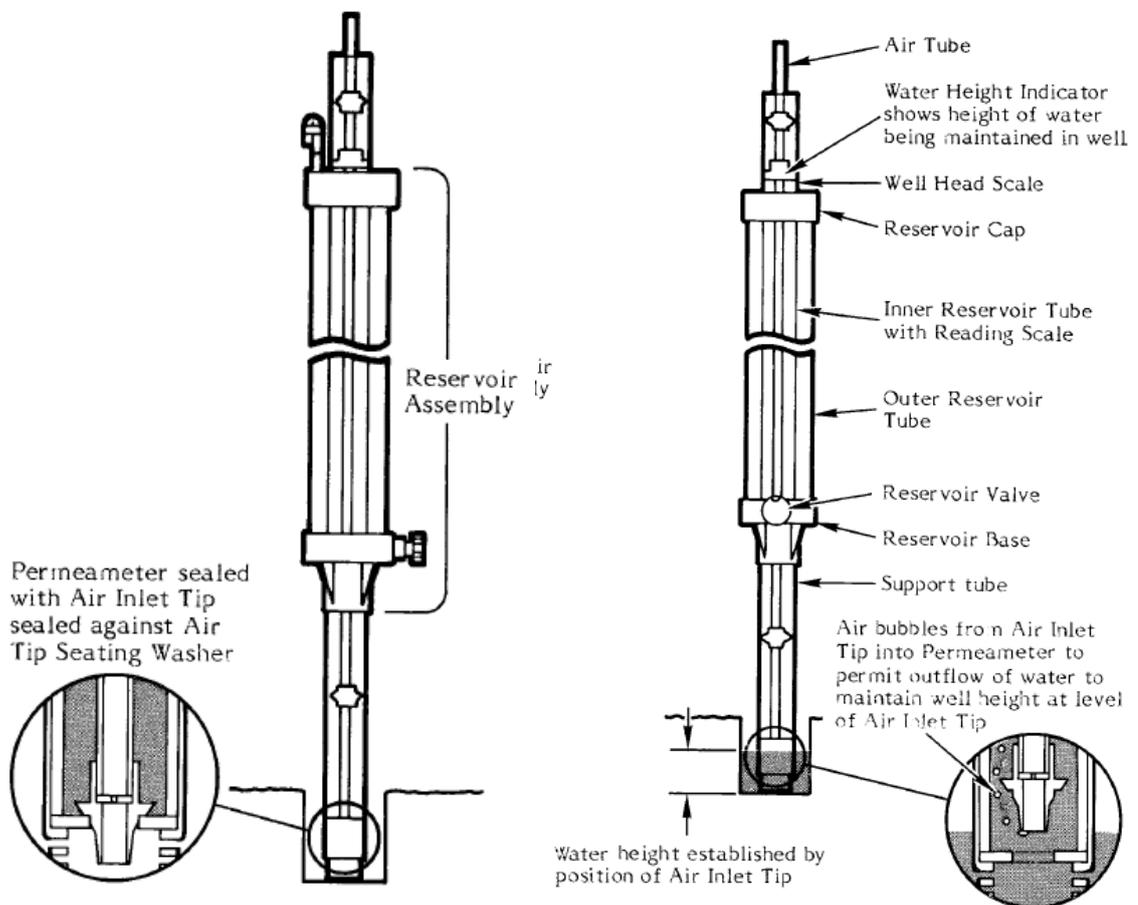


Figura 3. 18: Schema di funzionamento del permeametro (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

La parte del serbatoio è costituita da un tubo coassiale che permette di utilizzare due serbatoi. Nel serbatoio più interno passa il tubo dell'aria. Per lo studio di terreni a bassa permeabilità, ad esempio argille, è preferibile l'utilizzo del solo serbatoio interno poiché permette una maggiore chiarezza di lettura e un migliore tasso di caduta dell'acqua. Al contrario, per lo

studio di terreni con moderata e alta permeabilità del suolo, ad esempio sabbia e argilla strutturata, è preferibile l'utilizzo di entrambi i serbatoi contemporaneamente. Nel serbatoio interno (Inner Reservoir) è stampata una scala graduata in centimetri (Well Head Scale) che permette di misurare il tasso di caduta dell'acqua (Rate of fall of water) dal permeometro su entrambi i serbatoi. Nella figura 3.18 è mostrato il meccanismo che permette il passaggio dell'acqua all'interno del pozzo praticato nel terreno. Nella figura di sinistra il tubo dell'aria è spinto verso il basso in modo che aderisca con il foro praticato nel tubo di supporto. Questa operazione deve essere fatta prima di riempire il serbatoio in modo da non permettere il passaggio dell'acqua nel pozzo. Nella figura 3.18 il tubo dell'aria è alzato permettendo il passaggio dell'acqua. Questa operazione deve essere fatta per selezionare il carico idraulico e per iniziare le misure. L'altezza dell'acqua nel pozzo è stabilita dal carico idraulico selezionato come mostrato in basso nella figura di destra "Water Height established by position of Air Inlet Tip".

BASE DEL SERBATOIO.

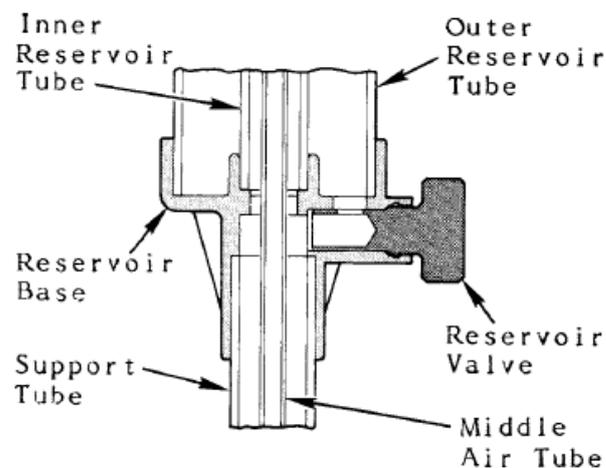


Figura 3. 19: Base del serbatoio (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

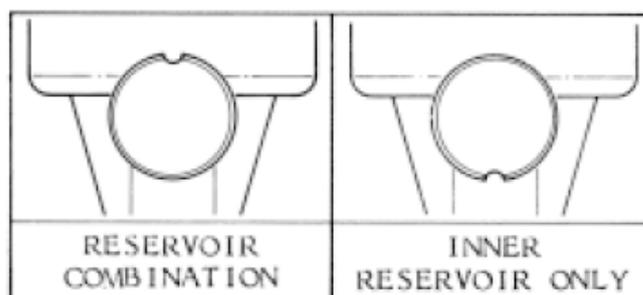


Figura 3. 20: Rubinetto del serbatoio (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

La base del serbatoio è costituita da una valvola che permette di selezionare il tipo di combinazione. Posizionando la tacca della valvola verso il basso (ore 6) il serbatoio esterno si svuota e l'acqua finisce nel serbatoio interno (Inner Reservoir Tube), come spiegato nella figura 3.20.

TAPPO DEL SERBATOIO.

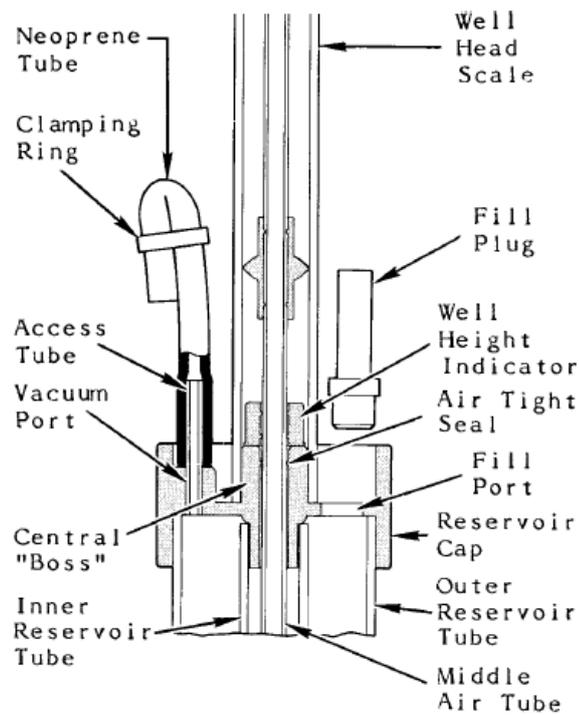


Figura 3. 21: Tappo del serbatoio (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

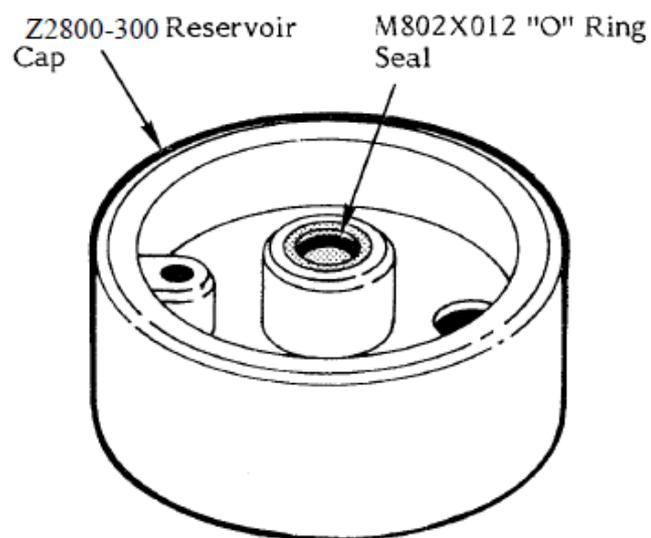


Figura 3. 22: Tappo del serbatoio (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Il tappo del serbatoio (Reservoir Cap), figura 3.21 e 3.22, è costituito da 3 fori. Un foro è utilizzato per riempire il serbatoio (Fill Port) e chiuso ermeticamente da un tappo (Fill Plug). Un altro foro (Vacuum Port) serve per svuotare il serbatoio al termine delle misure permettendo il passaggio dell'aria e quindi applicando la pressione atmosferica esterna. Questo foro deve essere chiuso prima di riempire il serbatoio tramite un tubo in neoprene (Neoprene Tube) piegato con un anello (Clamping Ring). Il foro centrale serve per inserire il tubo dell'aria (Middle Air Tube) e per fissare il tubo graduato (Well Head Scale) utilizzato per determinare il carico idraulico.

TUBO GRADUATO, TUBO DELL'ARIA SUPERIORE E RELATIVI COMPONENTI.

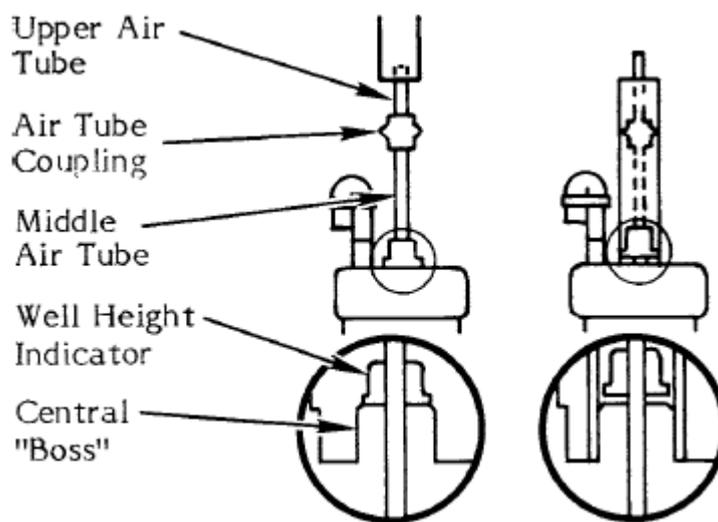


Figura 3. 23: Tubo dell'aria superiore (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Il tubo dell'aria superiore (Upper Air Tube), figura 3.23, è collegato al tubo dell'aria intermedio (Middle Air Tube) mediante un connettore (Air Tube Coupling). Per selezionare il carico idraulico bisogna far scorrere il tubo dell'aria all'interno del tubo graduato (Well Head Scale). La scala è numerata in centimetri e millimetri dal basso verso l'alto. Per selezionare il carico esatto basta posizionare la parte inferiore dell'indicatore (Well Height Indicator) sulla tacca graduata prescelta.

SPECIFICHE DELLO STRUMENTO.

In particolare il modello di permeametro di Guelph utilizzato nelle misure è quello dotato del kit "2800K1". Le specifiche dello strumento sono le seguenti:

- Diametro trivella: 6,0 cm
- Intervallo di profondità ottimo di pescaggio: da 2,5 cm a 25 cm
- **Intervallo di conduttività idraulica: 10^{-4} a 10^{-7} m/sec; 10^{-2} a 10^{-5} cm/sec**
- Capacità del contenitore d'acqua smontabile: 11,36 l
- Capacità massima del permeametro: 3,18 l
- Dimensioni totali dello strumento: 132,08 cm (lunghezza) x 44,45 cm (larghezza) x 15,24 cm (profondità)
- Peso totale dello strumento: 11 Kg
- Intervallo di profondità standard: da 15 cm a 75 cm (la profondità di pescaggio può essere aumentata con dei tubi di estensione)

3.2.2 – METODI UTILIZZATI PER LE MISURE DI PERMEABILITA'

Le prove di permeabilità del terreno con il permeametro di Guelph 2800K1 sono state eseguite secondo le modalità seguenti:

- Le misure sono state eseguite sia nel rain garden piccolo sia in quello grande.
- In entrambi i rain garden sono state eseguite 2 prove: una al centro e una laterale (circa 35 cm dal bordo).
- Tutte le misure sono state eseguite ad una **profondità di circa 15 cm**, che è la minima consentita dallo strumento e pari alla lunghezza della sonda (Auger).
- Tutte le prove sono state eseguite con l'applicazione di due carichi idraulici (Two Head Analysis) **$H_1 = 5$ cm e $H_2 = 10$ cm**, secondo il metodo descritto nella scheda a pagina 44 e la procedura di seguito riportata.
- Sono state eseguite misure anche nel suolo naturale circostante i rain garden al fine di ottenere dei valori comparativi. Anche per questa analisi sono stati applicati due carichi idraulici alla profondità di 15 cm e un solo carico idraulico alla profondità di 25 cm.
- Il terreno rimosso per la creazione dei pozzetti è stato conservato in sacchetti di nylon per determinarne l'umidità iniziale tramite essiccamento in forno in laboratorio.

In totale sono state eseguite **13 misure** di permeabilità. I dati ottenuti sono riportati nel capitolo 4.



Figura 3. 24: Fase di riempimento del serbatoio del permeametro di Guelph

La metodologia di utilizzo del permeametro di Guelph (P.G.) segue una serie di fasi ben precise che possono essere riassunte in:

- A) Assemblaggio dello strumento;
- B) Preparazione del pozzo;
- C) Riempimento del serbatoio;
- D) Posizionamento del permeametro;
- E) Metodi di esecuzione delle misure.

Tutte queste fasi sono descritte di seguito.

A. Assemblaggio dello strumento.

Questa fase è stata descritta nel paragrafo 3.2.1.

B. Preparazione del pozzo.

Prima di procedere con le misure di permeabilità del terreno è necessario valutare alcune caratteristiche del sito e del tipo di suolo presente. L'operatore deve valutare la topografia, le caratteristiche generali del suolo e lo studio che intende fare. Sulla base di queste considerazioni scegliere il numero di aree ritenute rappresentative per lo studio del suolo e su cui praticare il pozzo per eseguire le misure. Il pozzo viene creato utilizzando una sonda o trivella a mano (Auger). La sonda è costituita da 3 elementi che vengono collegati come nella figura seguente (Figura 3.25):

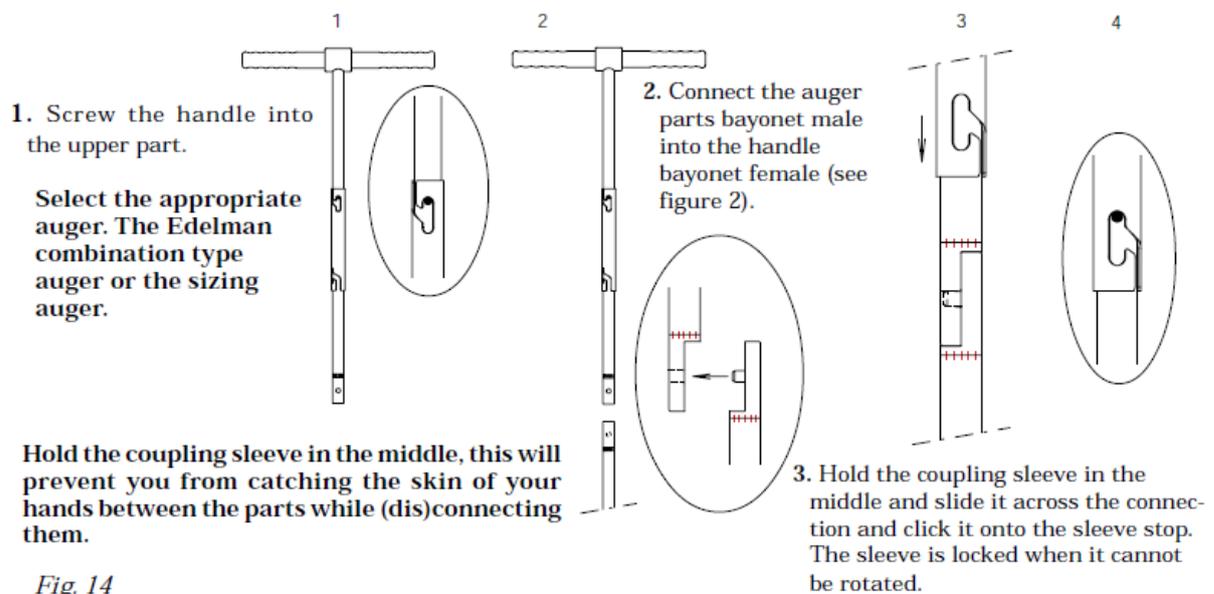


Figura 3. 25: Schema di montaggio della trivella (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Una volta montata la sonda si pratica il foro nel terreno. È possibile scegliere due tipi di sonda come mostrato nella figura seguente. Il foro viene praticato tenendo la sonda verticalmente rispetto al piano campagna e ruotando la sonda. Quando la sonda si riempie di terra è necessario estrarla dal buco e pulirla. Se si vuole approfondire il pozzo è necessario ripetere questa operazione più volte. L'importante è eseguire un foro il più possibile verticale poiché dopo deve essere inserito il tubo di supporto del permeametro. Ci sono due tipi di sonda:

- 1) La "Soil Auger" è utilizzata per rimuovere una maggiore quantità di terreno.

2) La “Sizing Auger” è utilizzata come sonda di finitura del pozzo in quanto permette di ottenere un foro di geometria uniforme (5cm di diametro) e con fondo piano.

Entrambe le sonde misurano 15 cm di altezza. Generalmente si pratica il foro inizialmente usando la “Soil Auger” e poi per rifinire il buco si utilizza la “Sizing Auger” (Figura 3.26). In ogni caso la scelta della sonda dipende dal tipo di suolo.

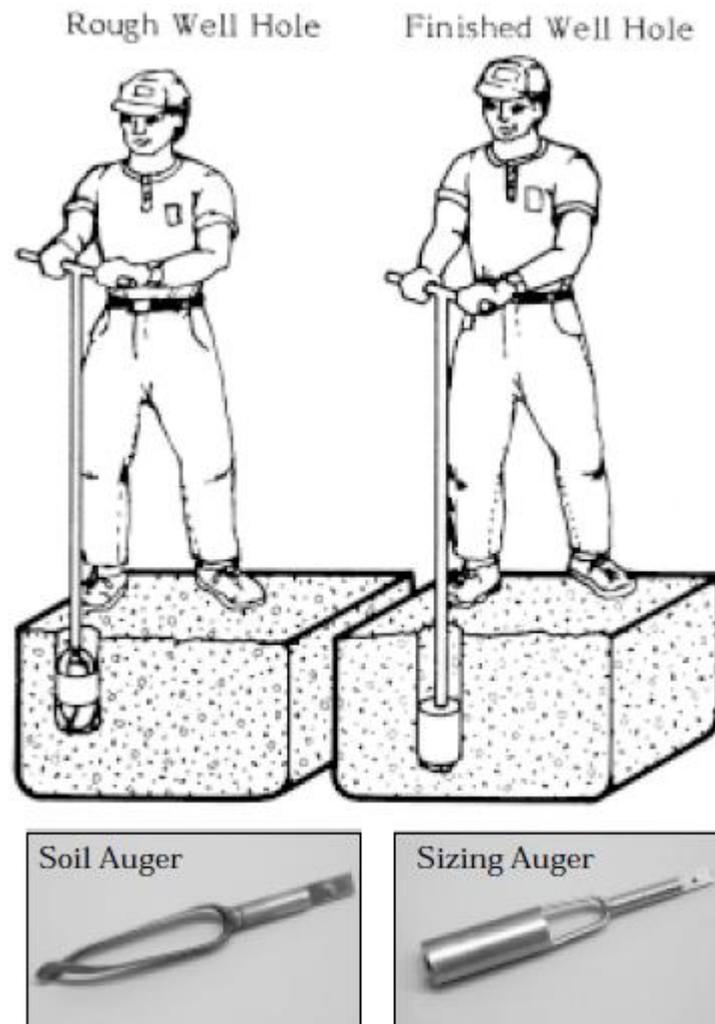


Figura 3. 26: Metodo di scavo (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Praticando il foro nel terreno utilizzando la “Sizing Auger” si potrebbe creare un eccessivo compattamento delle pareti del pozzo qualora il terreno sia molto coesivo. In questo caso, per rendere più rappresentative le misure di permeabilità, è necessario rendere meno coesive le

pareti del pozzo utilizzando una apposita spazzola (Well Prep Brush) riportata nella figura seguente.



Figura 3. 27: Sonda (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Questa spazzola (Figura 3.27) ha lo stesso diametro della sonda (5 cm) e può essere in fil di ferro o di plastica. La spazzola viene fatta scorrere all'interno del buco fino a rimuovere il primo strato coesivo delle pareti del pozzo. Questa operazione viene ripetuta generalmente 1 o 2 volte e in funzione del tipo di terreno. L'utilizzo della spazzola in maniera eccessiva può determinare il crollo delle pareti o l'asportazione di eccessivo terreno. In presenza di terreno saturi e poco coesivi questo effetto è molto frequente. L'utilizzo della spazzola è consigliabile in terreni mediamente saturi e con una certa coesione. Nella figura seguente (Figura 3.28) è riportato il metodo di utilizzo.

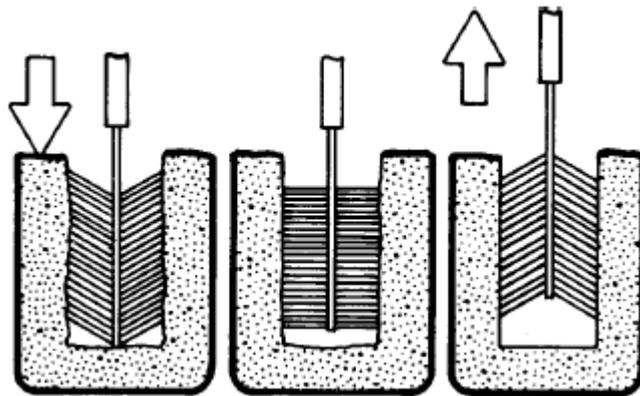


Figura 3. 28: Pulizia del pozzetto (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Artifici per migliorare le caratteristiche del pozzetto e la consistenza delle misure con il permeametro di Guelph.

Il tipo di suolo influenza molto la preparazione del pozzetto. Le caratteristiche geometriche del pozzo possono influenzare la precisione e la rappresentatività delle misure. Per migliorare la precisione bisogna standardizzare le caratteristiche del pozzetto. Alcuni autori hanno proposto delle modifiche alla procedura da seguire per la preparazione del foro di infiltrazione con lo scopo di migliorare l'attendibilità delle misure. Queste modifiche consistono in artifici ideati per ottenere, in modo pratico, una forte standardizzazione delle caratteristiche del pozzetto. Di seguito sono elencati alcuni di questi artifici (*Rienzner M., 2011*).

- 1) **Rimozione dei sassi dal foro:** in alcuni casi praticando il foro nel terreno si possono incontrare dei sassi. Se il sasso è grosso conviene praticare il foro in un'altra posizione, se i sassi invece sono di modeste dimensioni è possibile rimuoverli con un apposito strumento, figura seguente (Figura 3.29).

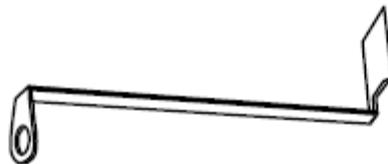


Figura 3. 29: Estrattore di sassi (Rienzner M., 2011)

- 2) **Sospensione del PG:** questo attrezzo serve a non appoggiare direttamente il PG sul fondo del pozzetto ed è costituito da una rete rigida che segue internamente il profilo del pozzetto, figura seguente (Figura 3.30). Questo artificio evita che il PG ostruisca parte della superficie di infiltrazione e che possa sprofondare, per effetto del proprio peso, nel terreno bagnato (ad esempio sabbia), causando il parziale interrimento della parte terminale del PG e quindi della griglia d'uscita dell'acqua, con la conseguente sensibile riduzione dell'infiltrazione.

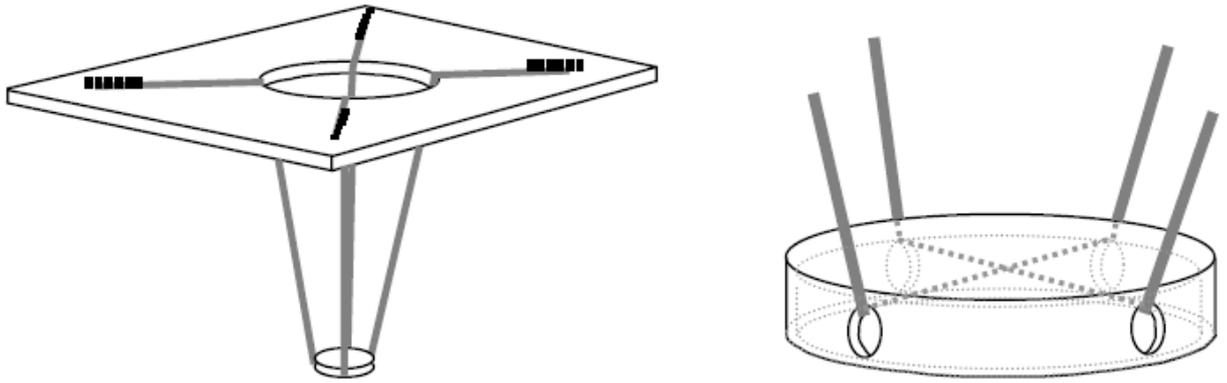


Figura 3. 30: Sospensore per GP (Rienzner M., 2011)

Come riporta l'autore dell'articolo su questi artifici: le misure effettuate con queste varianti, in posizioni vicine ed entro alcuni giorni di tempo, hanno mostrato una buona riproducibilità dei valori (scarto della media nell'ordine del 6%) (Rienzner M., settembre 2011).

C. Riempimento del serbatoio.

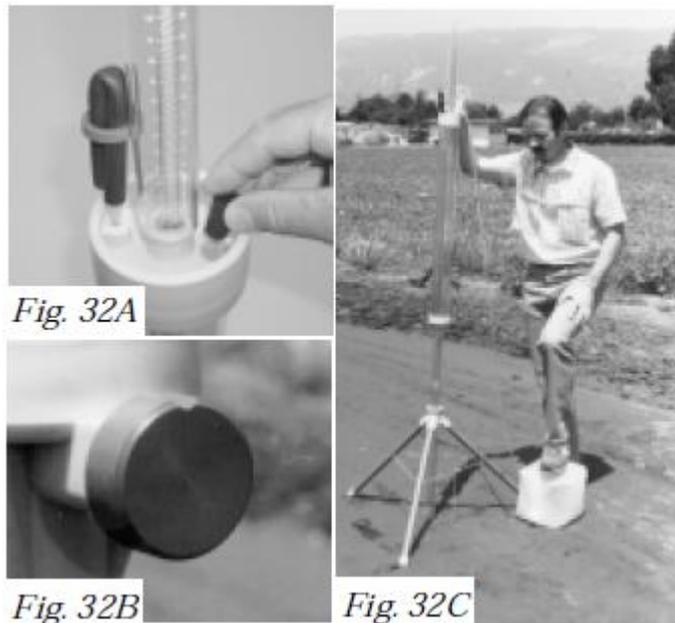


Figura 3. 31: Metodo di riempimento del serbatoio (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Una volta che il permeametro è assemblato e montato nel tripode può essere riempito. Per riempirlo si deve rimuovere il tappo nero (Fill Plug) del tappo del serbatoio (Reservoir Cap) come in figura 3.31 e girare la valvola del serbatoio (Reservoir Valve) posizionando la tacca verso l'alto (ore 12). Fatto questo il serbatoio esterno e interno sono collegati e pronti per

essere riempiti. L'acqua v'è versata, aiutandosi con un imbuto, nel foro del tappo del serbatoio. Eventualmente l'acqua può essere pompata all'interno mediante un apposito contenitore che funge anche da pompa come nella figura 3.31. E' importante riempire il serbatoio fino a che non escano bolle d'aria dal foro di riempimento. Una volta riempito chiudere il serbatoio con il tappo e assicurarsi che il tubo di gomma sia chiuso dall'anello apposito in modo da evitare il passaggio dell'aria nel serbatoio durante le misure.

D. Posizionamento del permeametro.

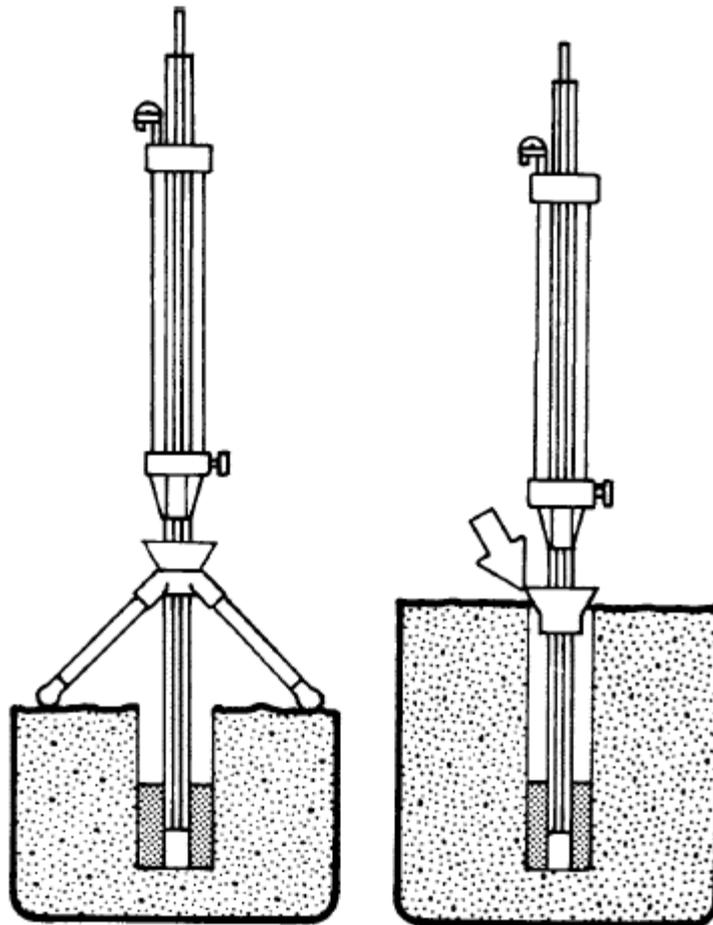


Figura 3. 32: Posizionamento del permeametro all'interno del pozzetto (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Per posizionare correttamente il permeametro bisogna semplicemente centrare il tripode sopra il buco nel terreno e abbassare lentamente il tubo di supporto (Support Tube) come in figura 3.32 facendo attenzione a non urtare le pareti del buco che potrebbero generare il distacco del terreno e sporcare la parte inferiore del tubo di supporto. Eventualmente si può non utilizzare il tripode e appoggiare direttamente la boccola del tripode sulla parte sommitale del buco praticato nel terreno come nella figura 3.32. Approssimativamente utilizzando questo tipo di

soluzione si guadagnano 38 cm di profondità, pari all'altezza del tripode. Per stabilizzare il tripode si può utilizzare la catena di supporto (Support Chain). In ogni caso bisogna fare attenzione a non provocare il crollo delle pareti del buco soprattutto in presenza di terreni poco coesivi (Rienzner M., 2011).

E. Metodi di esecuzione delle misure.

Prima di eseguire le misure bisogna essere certi che vi sia la possibilità di rifornirsi di acqua nel caso non fosse sufficiente a realizzare ulteriori prove e questo dipende dal tipo di terreno. Una volta che il permeametro è assemblato, posizionato e riempito è pronto per eseguire le misure. Le fasi da seguire sono riassunte di seguito:

STEP 1 – Procedura con un carico idraulico o due (One Head or Two Head Procedure).

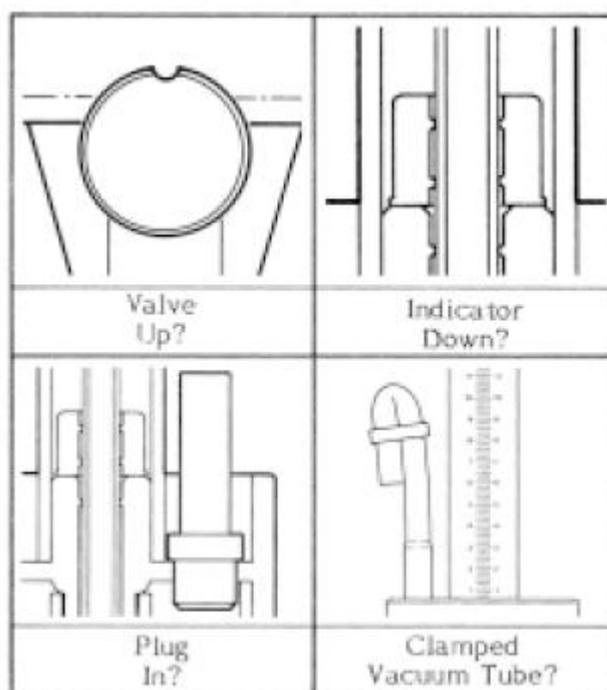


Figura 3. 33: Selezione del carico idraulico (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Verificare che entrambi i serbatoi (interno ed esterno) siano collegati. I serbatoi sono collegati quando la tacca della valvola del serbatoio è alle 12 dell'orologio. E' anche importante verificare che il "Well Height Indicator" e la "Well Head Scale" siano posizionati verso il basso in maniera aderente al tappo del serbatoio (Reservoir Cap), inoltre il tappo di chiusura del foro di inserimento dell'acqua deve essere ben chiuso e il tubicino in gomma (Vacuum Tube) deve essere chiuso con l'apposito anello come nella figura 3.33. Fatto questo, bisogna

decidere se eseguire le misure con lo stesso carico idraulico (One Head Procedure) oppure ripeterle con due carichi idraulici differenti (Two Head Procedure) ovvero “ H_1 ” e “ H_2 ”. La procedura con un solo carico generalmente viene eseguita quando la conduttività idraulica in saturazione (K_{fs}) può essere raggiunta con due prove di misura o meno. Per molte applicazioni ingegneristiche, questo livello di accuratezza è probabilmente sufficiente. La conducibilità idrica alla saturazione di campo (K_{fs}) viene determinata mediante l’equazione 3.4, descritta in dettaglio a pagina 41 e 42. La procedura con due carichi idraulici differenti è invece preferibile per misure di ricerca quando è richiesto un alto livello di precisione. Questa procedura fornisce un valore di K_{fs} per ogni carico, la K_{fs} complessiva viene calcolata applicando l’equazione 3.13 o 3.14 (per serbatoio esterno), descritta in dettaglio a pagina 41 e 42.

STEP 2 – Selezionare il carico idraulico da applicare (Well Head Height, H).

Per selezionare il carico idraulico da applicare si deve far scorrere il tubo dell’aria superiore (Upper Air Tube) all’interno del tubo graduato (Well Head Scale) come riportato nella figura seguente (Figura 3.34).

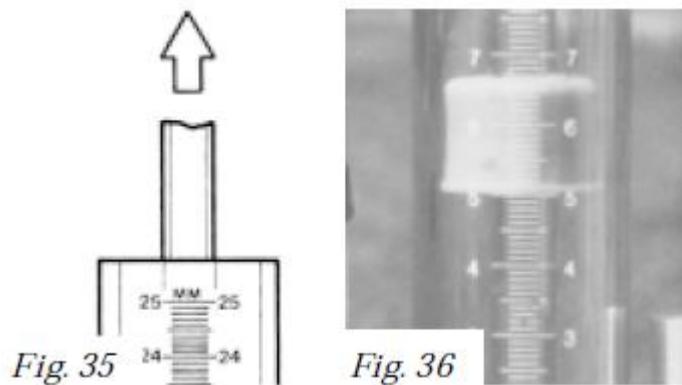


Figura 3. 34: Selezionare il carico idraulico (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Far scorrere troppo velocemente verso l’alto il tubo superiore dell’aria (Upper Air Tube) per selezionare il carico idraulico potrebbe causare dei fenomeni di turbolenza, erosione e eccessivo riempimento del pozzo praticato nel terreno in quanto l’acqua potrebbe uscire troppo velocemente dal permeametro. Nelle prove eseguite nel campus di Agripolis sono stato utilizzati due carichi idraulici: $H_1 = 5$ cm e $H_2 = 10$ cm.

STEP 3 – Selezionare il serbatoio.

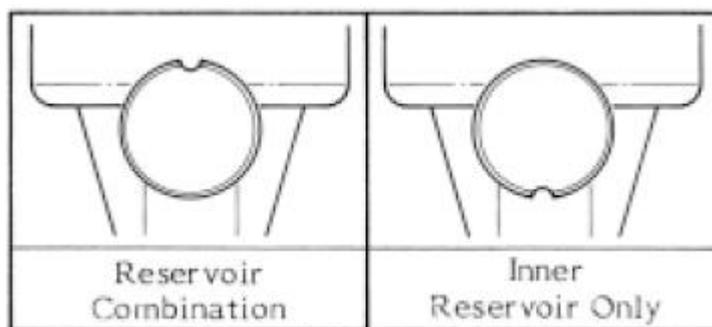


Figura 3. 35: Selezione del serbatoio (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

La selezione del serbatoio da utilizzare (interno o esterno) dipende dalle valutazioni fatte nel sito scelto per le misure. Per selezionare il serbatoio basta ruotare la valvola come riportato nella figura 3.35. Nel caso non si riesca a valutare quale serbatoio sia meglio utilizzare si può fare una prova iniziale per osservare l'intervallo di caduta dell'acqua (Rate of Fall of the Water) all'interno del serbatoio (ad esempio quello esterno). Se il tasso di caduta è troppo lento per distinguere facilmente il livello dell'acqua scendere tra due letture consecutive, generalmente un intervallo di due minuti, allora conviene utilizzare il serbatoio intero e quindi basta ruotare la valvola in modo che la tacca sia rivolta verso il basso (o alle 6 dell'orologio). Il tubo interno infatti ha un diametro inferiore per cui risulta più facile la lettura anche per piccole velocità di caduta. Una volta che è stato scelto il serbatoio è fondamentale non cambiarlo per le misure successive o durante le misurazioni. Nelle misure eseguite nel campus di Agripolis sono stati utilizzati sia il serbatoio esterno, sia quello interno in combinazione.

STEP 4 – Misura dell'efflusso dell'acqua dal permeometro con il primo carico, H_1 .

L'efflusso dell'acqua dal permeometro nel suolo è indicato dal tasso di caduta dell'acqua nel serbatoio. La procedura per realizzare la misura è la seguente:

- Prima di iniziare le misure annotare il livello iniziale del serbatoio.
- Alzare il tubo dell'aria per applicare il carico idraulico (H_1 o H_2).
- Registrare il livello dell'acqua nel serbatoio a intervalli regolari. La differenza di dislivello tra due letture consecutive divisa per l'intervallo di tempo è uguale al tasso di caduta "R" nel serbatoio. Gli intervalli di tempo sono in funzione del tipo di suolo. Generalmente si suggerisce di utilizzare un intervallo di 30 secondi, 1 o 2 minuti. Ma

per suoli poco permeabili, con un tasso di caduta molto lento, l'intervallo di un paio di minuti può non essere abbastanza lungo per riscontrare un cambiamento misurabile del livello del serbatoio. In questo caso è appropriato scegliere un intervallo di tempo più lungo, ad esempio di 15 minuti o più. Viceversa in situazioni dove il tasso di caduta è molto veloce, come ad esempio nei terreni sabbiosi, l'intervallo di tempo deve essere molto più breve anche di 15 o 30 secondi. Il tasso di caduta "R" viene calcolato sulla base dell'intervallo di tempo scelto nella prova attuale. Ad esempio, al tempo zero, si assume che il livello dell'acqua all'interno del serbatoio sia di 5,9 cm. Dopo il trascorrere del primo intervallo di tempo, pari a 2 minuti, il livello dell'acqua è di 6,5 cm. Il tasso di caduta, R, dell'acqua all'interno del serbatoio sarà dato quindi dalla seguente relazione:

$$R = (6,5 \text{ cm} - 5,9 \text{ cm}) / (2 \text{ min}) = 0,05 \text{ cm/s}$$

d) Continuare a monitorare il tasso di caduta dell'acqua nel serbatoio fin quando resta costante almeno per 3 intervalli di tempo consecutivi. Il tasso di caduta costante R è riferito alla prima misura con carico idraulico H_1 . H_1 infatti è il primo carico idraulico stabilito. In presenza di suoli argillosi pesanti, dove la conduttività idraulica è molto bassa, il permeametro può essere lasciato nel sito per lungo tempo mentre si possono svolgere altri lavori come ad esempio la preparazione di un altro pozzetto per le misure. In queste circostanze sarà dunque necessario scegliere un opportuno intervallo di tempo e può essere necessario ripetere la procedura più volte per ottenere un valore di R stabile e accurato.

e) Una volta completate le misure con il primo carico, H_1 , si procedere con le misure adottando il secondo carico, H_2 . Questo ovviamente se si ha scelto la procedura di analisi del terreno con due carichi (Two Head Procedure) alternativamente la misura è terminata.

Di seguito è riportata un esempio di scheda di rilevamento adottata nelle misure in campo, tabella 3.2:

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	10.44	3	-
2	10.45	5,3	2,3
3	10.46	7,3	2
4	10.47	9,1	1,8
5	10.48	10,8	1,7
6	10.49	12,4	1,6
7	10.50	13,9	1,5
8	10.51	15,4	1,5
9	10.52	16,9	1,5
10	10.53	18,2	1,3
11	10.54	19,5	1,3
12	10.55	20,8	1,3
13	10.56	22,1	1,3
14	10.57	23,3	1,2
15	10.58	24,4	1,1
16	10.59	25,6	1,2
17	11.00	26,7	1,1
18	11.01	27,8	1,1

Tabella 3. 2: Schema utilizzato per le misurazioni

STEP 5 – Misura dell’efflusso dell’acqua dal permeametro con il secondo carico, H₂ (Two Head Procedure).

Se si è scelta la procedura con due carichi idraulici (Two Head Procedure), si deve rieseguire la misura applicando il secondo carico stabilito. Per far questo si possono adottare due opzioni:

- 1) Al termine delle misure con il primo carico, H_1 , non toccare o modificare il permeametro e passare direttamente alle misure applicando il nuovo carico H_2 . In questo caso può verificarsi la necessità di riempire nuovamente il serbatoio, soprattutto se si è utilizzato il serbatoio interno che è più piccolo.
- 2) Al termine delle misure con il primo carico, H_1 , spostare il permeametro, svuotare il serbatoio e riempirlo nuovamente. Riposizionare il permeametro nel pozzo ed eseguire nuovamente le misure seguendo la procedura elencata per il carico H_1 .

In entrambi i casi si può utilizzare un intervallo di tempo differente, poiché l'applicazione del nuovo carico influenza il tasso di caduta dell'acqua dal serbatoio. Generalmente il secondo carico H_2 scelto è maggiore dell' H_1 pertanto l'acqua potrebbe defluire più velocemente dal permeametro. L'applicazione del nuovo carico, H_2 , viene realizzata semplicemente facendo scorrere il tubo dell'aria superiore (Upper Air Tube) all'interno del tubo graduato (Well Head Scale) posizionando l'Air Inlet Tip del tubo dell'aria sulla tacca scelta come riportato nella figura seguente (Figura 3.36).

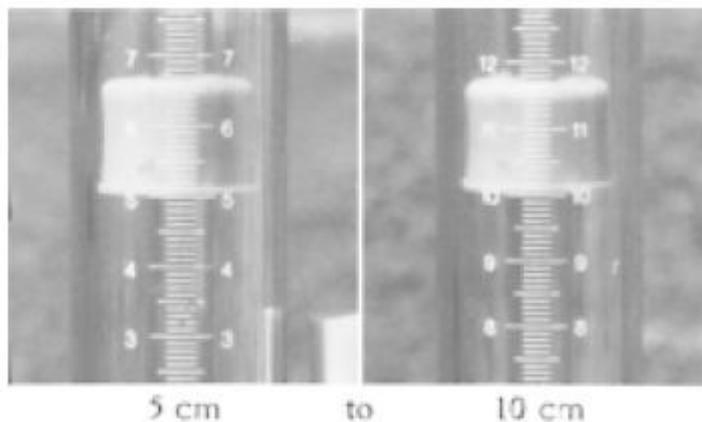


Figura 3. 36: Selezione del carico idraulico (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

Una volta terminate le misure sarà possibile calcolare i seguenti parametri:

- A) La conducibilità idraulica alla saturazione di campo, K_{fs} .
- B) Il potenziale di flusso matriciale, F_m .
- C) Il parametro alfa, α^* .

In ogni caso se al termine della procedura con l'applicazione di due carichi idraulici (Two Head Procedure) si ottengono valori negativi di α^* (o K_{fs} o ϕ_m), dunque non realistici, oppure valori al di fuori dell'intervallo $0,01 - 0,5 \text{ cm}^{-1}$, allora è necessario ripetere la procedura di

misurazione per ognuno dei due carichi (H_1 e H_2) e i valori di K_{fs} e ϕ_m saranno dati dalla media con i valori precedenti. Il calcolo della conducibilità idrica a saturazione di campo (K_{fs}) prevede la valutazione del fattore “C”, parametro che tiene conto di una serie di parametri fondamentali. L’analisi del flusso stabile dell’acqua dal pozzetto nel suolo insaturo circostante, come misurato dal permeametro di Guelph, rappresenta tutte le forze che contribuiscono al flusso tridimensionale dell’acqua nel terreno: la spinta idraulica dell’acqua nel terreno, l’effetto capillare nel terreno, la forza di gravità esercitata sul liquido in prossimità del fondo del pozzetto. Il fattore “C” è un fattore di forma che dipende dal raggio del pozzetto e dal carico idraulico all’interno del pozzetto. La figura sottostante (Figura 3.37) mostra la curva dei valori assunti da “C” per tre classi di suolo caratterizzate da tre intervalli diversi del parametro di lunghezza capillare macroscopica α^* . I valori di “C” sono calcolati tramite alcune equazioni empiriche (Zang, 1998).

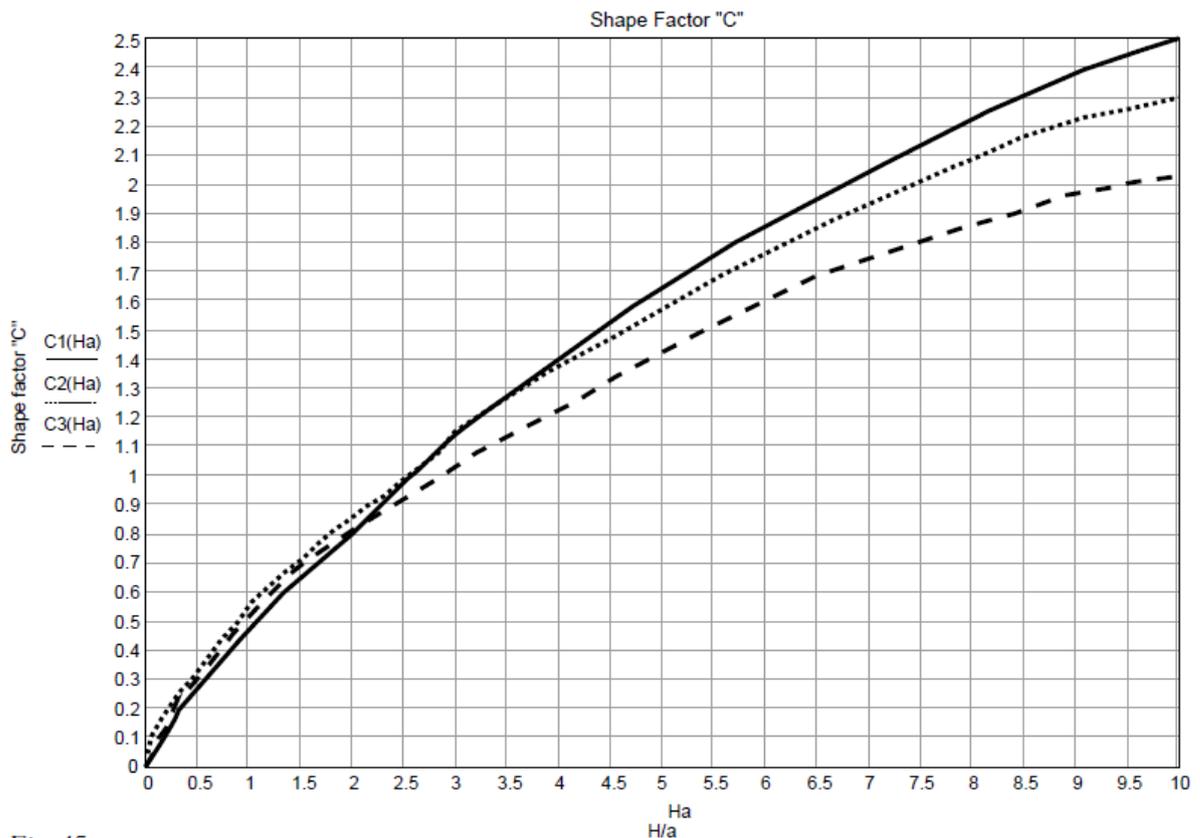


Figura 3. 347: Curve dei valori assunti dal fattore di forma “C” (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

- La curva C1 è usata per condizioni dove il valore stimato di α^* è $\geq 0,12 \text{ cm}^{-1}$ (Tabella 3.2).
- La curva C2 è usata per condizioni dove il valore stimato di α^* è $= 0,04 \text{ cm}^{-1}$.

- La curva C3 è usata per condizione dove il valore stimato di α^* è $= 0,01 \text{ cm}^{-1}$
- I valori di “C” possono essere ricavati utilizzando queste curve oppure possono essere calcolati direttamente tramite le seguenti equazioni empiriche (Zang., 1998):

$$C1 = \left(\frac{H/a}{2,074+0,093(H/a)} \right)^{0,754} \quad (3.1)$$

$$C2 = \left(\frac{H/a}{1,992+0,091(H/a)} \right)^{0,683} \quad (3.2)$$

$$C3 = \left(\frac{H/a}{2,081+0,121(H/a)} \right)^{0,672} \quad (3.3)$$

Per determinare la conducibilità idrica a saturazione di campo si possono utilizzare diverse equazioni a seconda della procedura di misurazione adottata. Le equazioni sono riportate di seguito:

D) Analisi con un carico idraulico (One Head Analysis): se le misure nel pozzetto sono state eseguite con un solo carico idraulico, l’equazione da utilizzare è la seguente:

$$K_{fs} = \frac{C_1 Q_1}{2\pi H_1^2 + \pi a^2 C_1 + 2\pi \frac{H_1}{\alpha^*}} \quad (3.4)$$

$$\phi_m = \frac{C_1 Q_1}{(2\pi H_1^2 + \pi a^2 C_1) \alpha^* + 2\pi H_1} \quad (3.5)$$

Dove α^* è ottenuto dalle analisi del sito e secondo la tabella 3.2. Inoltre $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{X}\mathbf{R}_1$ (quando si usa la combinazione di serbatoi, X) o $\mathbf{Y}\mathbf{R}_1$ (quando si usa il serbatoio interno, Y). Dove \mathbf{R}_1 è il tasso di caduta dell’acqua nel serbatoio in cm/s. con l’applicazione del carico H_1 , \mathbf{X} è la costante del serbatoio e corrisponde all’area della sezione trasversale dei serbatoio combinati espressa in cm^2 e \mathbf{Y} è la costante del serbatoio usata quando è selezionato solo il serbatoio interno (per lo strumento utilizzato $X = 35,22$ e $Y = 2,16$).

E) Analisi con due carichi idraulici (Two – Head Analysis): se le misure nel pozzetto sono state eseguite con due carichi idraulici (H_1 e H_2), l’equazione da utilizzare è la seguente:

$$K_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (3.6)$$

Dove $\mathbf{Q}_2 = \mathbf{X}\mathbf{R}_2$ o $\mathbf{Y}\mathbf{R}_2$; \mathbf{R}_2 = tasso di caduta dell'acqua con l'applicazione del carico H_2 e

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))} \quad (3.7)$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))} \quad (3.8)$$

Mentre

$$\phi_m = G_3 Q_1 - G_4 Q_2 \quad (3.9)$$

Dove

$$G_3 = \frac{(2H_2^2 + a^2 C_2) C_1}{2\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))} \quad (3.10)$$

$$G_4 = \frac{(2H_1^2 + a^2 C_1) C_2}{2\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))} \quad (3.11)$$

$$\alpha^* = \frac{K_{fs}}{\phi_m} \quad (3.12)$$

Alternativamente per la determinazione della K_{fs} con l'applicazione dei due carichi suggeriti nel manuale (5 e 10 cm) si può utilizzare la seguente equazione, che fornisce sia i valori di G_3 e G_4 .

$$K_{fs} = (0,0041)(X)(R_2) - (0,0054)(X)(R_1) \quad (3.13)$$

$$K_{fs} = (0,0041)(Y)(R_2) - (0,0054)(Y)(R_1) \quad (3.14)$$

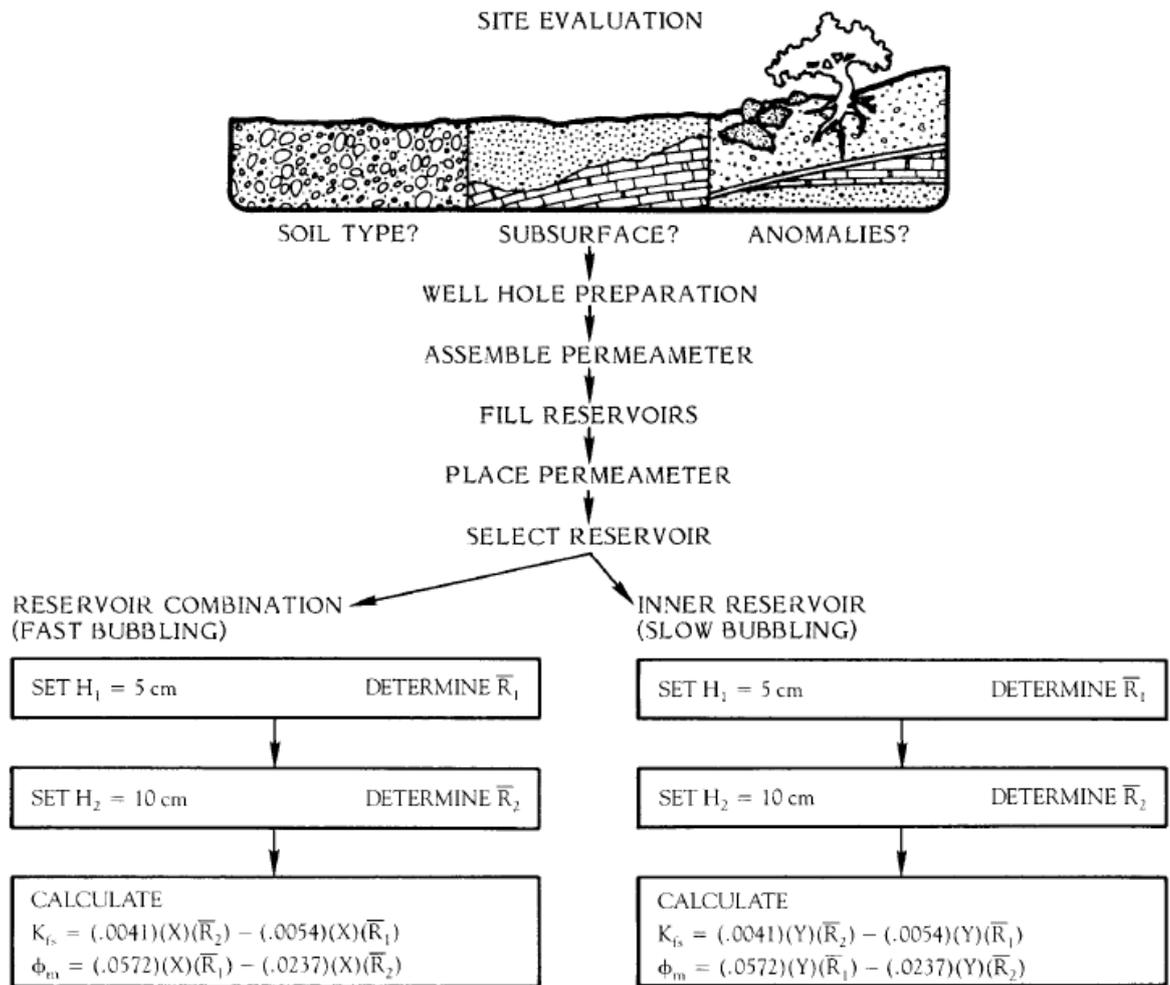
L'equazione 3.13 si usa per misure con la combinazione di serbatoi mentre la 3.14 per misure solo con il serbatoio interno (Figura 3.38).

Di seguito si riporta una tabella con i valori di α^* :

Tessitura del suolo – categorie di struttura	α^* (cm ⁻¹)
Compatto, strutturato, argilloso o materiali sedimentosi come strati interrati, sedimenti lacustri o marini etc.	0,01
Suoli con tessitura fine (argilloso o sedimentoso) e non strutturato; con possibile presenza di sabbia fine.	0,04
Suolo strutturato da terra argillosa; presenza anche di terreno medio non strutturato e sabbia fine. A questa categoria appartengono generalmente i suoli agricoli.	0,12
Sabbia grossolana e ghiaiosa; possibile presenza di suolo altamente strutturato con larghi e/o numerose fessure, macropori etc.	0,36

Tabella 3. 3: Categorie di struttura del suolo e rispettivi valori del parametro α^*

**FLOWCHART OF PROCEDURE FOR
STANDARDIZED METHOD OF MEASUREMENT USING THE GUELPH PERMEAMETER**



In the preceding flowchart, the following terms are used, and defined as follows:

- H_1 = The first head of water established in the well hole, measured in cm.
- \bar{R}_1 = The steady state rate of fall of water in the reservoir when the first head H_1 of water is established. Rate of fall expressed in cm/sec.
- H_2 = The second head of water established in the well hole, measured in cm.
- \bar{R}_2 = The steady state rate of fall of water in the reservoir when the second head H_2 of water is established. Rate of fall expressed in cm/sec.
- X = Reservoir constant, used when reservoir combination is selected, and corresponds to the cross sectional area of the combined reservoirs expressed in cm^2 .
- Y = Reservoir constant used when the inner reservoir only is selected, expressed in cm^2 .
- K_{fs} = Field-saturated hydraulic conductivity expressed in cm/sec.
- ϕ_m = Matric flux potential, expressed in cm^2/sec .

Figura 3. 358: Procedura standardizzata di utilizzo del permeametro di Guelph (immagine tratta dalla guida operativa dello strumento)

3.3 – MISURE DI PORTATA

3.3.1 – Lo stramazzo del Rain Garden

L'acqua di deflusso meteorico proveniente dalla copertura impermeabile della Centrale Tecnologica viene convogliata nei rain garden piccolo mediante la deviazione di 2 pluviali (gronde). L'acqua deviata dai pluviali viene convogliata in una vasca a stramazzo che precede i due rain garden. La vasca ha un misuratore di portata a stramazzo idraulico, e due sonde di livello collegate a un data logger per la registrazione dei dati in continuo. I volumi di deflusso che eccedono la capacità di invaso e di infiltrazione dei giardini pluviali, quindi eccedenti il sistema, vengono scaricati all'interno di un pozzetto di raccolta, con capienza di 1 m³, mediante un tubo di troppo pieno. I volumi di deflusso in entrata e in uscita dal sistema sono misurati dopo ogni evento piovoso, e l'acqua in eccesso raccolta nei pozzetti è svuotata mediante una pompa di drenaggio con contalitri. La figura 3.3 illustra la planimetria schematica delle varie parti che compongono il sistema per la misurazione dei deflussi.

Strumentazione per la misura dei deflussi.

Per la stima dei volumi di deflusso meteorico sono state allestite una serie di strutture tra loro interconnesse, quali:

- misuratore di portata a stramazzo;
- misuratore di livello a galleggiante *II-FG5*, Tecnopenta s.r.l., Teolo, PD;
- trasmettitore di livello immergibile piezoresistivo *II-BI*, Tecnopenta s.r.l., Teolo, PD;
- data logger *DI-flexLog*, Tecnopenta s.r.l., Teolo, PD ;

Di seguito vengono descritti i componenti del sistema di misura dei deflussi meteorici.



Figura 3. 369: Vasca dello stramazzo

MISURATORE DI PORTATA A STRAMAZZO: lo stramazzo utilizzato è detto anche di tipo Thomson (Figura 3.40), è in alluminio, con angolo al vertice di 60° , altezza totale 60 cm, larghezza 70 cm, carico massimo dello stramazzo pari a 25 cm, il vertice dello stramazzo è posizionato a 35 cm dalla base della vasca di calma in cui è inserito.



Figura 3. 40: Stramazzo triangolare (tipo Thomson)

Vasca di calma (Figura 3.41): in ferro zincato, altezza 60 cm, larghezza 70 cm, profondità 150 cm per un potenziale volume totale di 0,63 m³. Possiede una grata metallica di eguale altezza e larghezza per filtrare l'acqua da corpi estranei provenienti dal tetto.



Figura 3. 41: Vasca di calma

Stramazzo a “stracolmo” (Figura 3.42): in continuità con la lama stramazza vi è un secondo contenitore di ferro zincato seguito da un setto divisorio di altezza 40 cm, larghezza 50 cm (due setti da 25 cm) e lunghezza 130 cm che suddivide la portata in due quantità uguali destinate ai due rain garden.



Figura 3. 372: Particolare dello stramazzo a “stracolmo”

MISURATORE DI LIVELLO A GALLEGGIANTE II-FG5: Questo sistema è formato da un galleggiante e da un contrappeso che muove una puleggia (Figura 3.43). Questa, a sua volta, è direttamente collegata a un potenziometro di precisione multi giro, sensibile alle variazioni di livello dell'acqua, che producono l'innalzamento o l'abbassamento del galleggiante, la rotazione della puleggia e conseguentemente anche quella di un trasduttore che provvede alla misurazione. La combinazione di galleggianti e riduttori diversi permette di eseguire misurazioni in un ampio campo di escursioni di livello con vari gradi di risoluzione. L'utilizzo di cuscinetti a basso attrito e accoppiamenti di assi mediante ingranaggi frontali, conferisce allo strumento una buona sensibilità meccanica e un'elevata robustezza. Il vantaggio dell'uso di questo tipo di strumento per misure di livello rispetto a quello realizzato con trasduttori di pressione, consiste nel poter ottenere risoluzioni e precisioni elevate unite a un basso rischio di fulminazioni, e risultano anche contenute le derive termiche e quelle di lungo periodo. Questo misuratore a galleggiante è stato posizionato all'interno della vasca di calma, e collegato al data logger (Figura 3.45).



Figura 3. 383: Sonda a galleggiante (Simionato, 2011)

TRASDUTTORE – TRASMETTITORE DI LIVELLO IMMERSIBILE PIEZORESISTIVO II-B1: Il trasduttore - trasmettitore di livello immergibile piezoresistivo *II-B1* è uno strumento che permette di misurare il livello dell'acqua all'interno di piezometri, pozzi, cisterne, canali, fiumi, lagune, laghi o in mare (Figura 3.44). Presenta una custodia realizzata in acciaio inossidabile per resistere alla corrosione d'acque saline o con inquinanti di vario genere, ed è ispezionabile per permettere interventi di sostituzione o manutenzione. Il trasduttore di pressione di tipo piezoresistivo è realizzato a ponte di quattro rami di resistenze da 3,5 Kohm; inoltre il piezometro è di tipo relativo per permettere la compensazione barometrica. Il cavo di collegamento è rivestito di guaina con ottima resistenza all'idrolisi e alla degradazione microbica, e contiene il tubetto per la compensazione barometrica. Questo

trasduttore, come il precedente strumento descritto, è stato posto all'interno della vasca a stramazzo e collegato al data logger.

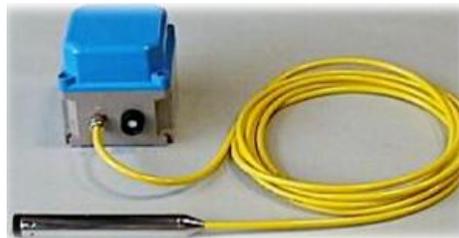


Figura 3. 394: Sonda piezometrica (Simionato, 2011)

DATA LOGGER D1-FlexLog: Un data logger, o registratore di dati, è un dispositivo elettronico che registra i dati nel tempo o in relazione alla posizione, sia con un sensore costruito all'interno dello strumento sia tramite strumenti e sensori esterni (Figura 3.45). Il data logger presente nel rain garden è il modello *D1-flexLog* ed è stato posto all'interno di una scatola a tenuta stagna, posta sopra la vasca a stramazzo, in posizione centrale e sorretta da un'asta metallica fissata al basamento su cui poggia la vasca di raccolta deflussi. Questo data logger può essere alimentato da una batteria ricaricabile a 24V, scelta in base alle esigenze dei sensori a cui fa riferimento, in precedenza descritti, poiché il data logger provvede anche alla loro alimentazione. Attualmente il sistema è alimentato a corrente continua, collegando l'alimentatore della batteria del logger a una presa di corrente all'interno di una scatola stagna. La memorizzazione dei dati è fatta su Secure Digital (SD). Le letture sono memorizzate in chiaro su file di testo formattato in colonne (CVS) su scheda SD. Ciascuna lettura riporta data e ora assolute in formato "gg/mm/aa hh:mm:ss" (Es.: 06/09/11 02:33:30). L'acquisizione dei dati avviene estraendo la scheda SD e copiando i dati direttamente su PC. È possibile quindi compiere la sostituzione periodica della scheda SD senza dover collegare un PC al data logger. Sulla scheda è necessariamente presente anche un file di configurazione che permette di riprogrammare i parametri di acquisizione senza necessità di un PC in sito. Il logger comunica con il PC tramite USB. Il collegamento via USB consente il controllo dei dati istantanei e la riprogrammazione dei parametri di acquisizione via PC.



Figura 3. 405: Data logger

3.3.2 – EQUAZIONI ATTUALMENTE UTILIZZATE PER IL CALCOLO DELLA PORTATA

I dati registrati dal datalogger, come sopra descritto, presentano la data, l'ora e il valore di tirante idrometrico registrato dalle due sonde (valore in millimetri). Una volta raccolti, i dati vengono salvati ed elaborati attraverso un programma per la produzione e gestione di fogli elettronici, nel quale si applicano due equazioni per il calcolo dei deflussi transitati attraverso lo stramazzo. Le equazioni di calcolo della portata attualmente utilizzate sono due: una teorica e una empirica. L'equazione **teorica (Gisonni e Hager, 2013)** di calcolo della portata per uno stramazzo triangolare in parete sottile :

$$Q = \frac{8}{15} C_d \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) (2gh^5)^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

Dove:

Q = portata che defluisce dallo stramazzo [m³/s]

C_d = coefficiente di deflusso [0,57 - 0,61]

h = carico dello stramazzo [m];

g = accelerazione di gravità [m/s²]

α = angolo stramazzo [in gradi, nel nostro caso pari a 60°]

L'equazione empirica fino ad ora utilizzata è invece quella determinata da Brusaferrò nel suo lavoro di tesi (2012):

$$Q = 0,00004 h_0^{2,3254} \quad (3.16)$$

Una volta determinata la portata con le due equazioni (3.15 e/o 3.16) per tutti gli istanti temporali in cui è stata discretizzata la registrazione dei valori di tirante, si calcola il volume transitato in ogni istante (dati dalla portata moltiplicata per l'ampiezza dell'intervallo temporale) e si esegue la sommatoria dei volumi rilevati in ogni istante ottenendo il volume totale dell'evento piovoso. Il confronto tra i volumi d'acqua transitati sullo stramazzo con i quantitativi di precipitazione misurati dal pluviometro installato *ad hoc* in corrispondenza dei rain garden (valori di pioggia confrontati e validati dal pluviometro della capannina meteorologica di Legnaro di ARPA Veneto) ha permesso la validazione delle equazioni per il calcolo della portata. Discrepanze tra i due dati hanno portato a rivedere le equazioni per il calcolo della portata e quindi la nuova taratura dello stramazzo oggetto di questa tesi e di seguito descritta.

3.3.3 – TARATURA DELLO STRAMAZZO

Come descritto nel paragrafo precedente, un confronto fra i volumi d'acqua derivanti dagli afflussi meteorici (misurati tramite pluviometro) e i deflussi misurati tramite lo stramazzo in parete sottile, ha mostrato che i volumi d'acqua che escono dal sistema (portata sullo stramazzo) sono inferiori ai volumi d'acqua in ingresso (precipitazioni). Questa discordanza può essere causata da due fattori:

- Perdite d'acqua dal sistema (perdite nel tetto o dai pluviali);
- Utilizzo di equazioni per il calcolo delle portate in uscita non correttamente tarate.

Errori sulla misura delle precipitazioni (volume d'acqua in input) sono stati esclusi in quanto per queste misure viene effettuato un doppio controllo utilizzando sia i dati ARPAV che quelli derivanti da un pluviometro appositamente installato in corrispondenza dei rain garden. I due problemi sono stati controllati tramite due serie di prove realizzate per ricercare la fonte della perdita di volume e descritte nei successivi due paragrafi.

3.3.3.1 VERIFICA di perdite dal SISTEMA RAIN GARDEN

Le verifiche sulle eventuali perdite di acqua dal sistema che confluisce gli afflussi meteorici al rain garden hanno posto particolare attenzione al sistema di scolo del tetto (gronde): per

ottenere delle misurazioni significative è necessario che non vi siano perdite durante il tragitto tra la copertura e il rain garden. Tutta l'acqua che arriva al tetto deve quindi essere convogliata nello stramazzo e da qui al rain garden. Le perdite si possono verificare in prossimità delle giunture delle gronde o, sul tetto, in zone dove vi sia una perdita di potenziale che comporta un ristagno dell'acqua. Questa verifica è stata realizzata innanzitutto grazie all'installazione di un sistema che permette l'apporto di una quantità d'acqua nota a tutta la superficie della copertura; il sistema è costituito da un tubo di gomma forato (un foro ogni 50 cm) posizionato lungo tutto il lato sommitale della falda del tetto e collegato a una presa d'acqua. Tra il tubo forato e la presa d'acqua è stato installato un contalitri che permette la misura del volume d'acqua che esce dalla presa, arriva al tubo forato e viene distribuito su tutta la copertura. La verifica delle perdite è stata realizzata quindi irrorando la copertura con una quantità nota di acqua (misurata dal contalitri) e misurando se la stessa quantità d'acqua arrivasse in uscita dai pluviali (acqua raccolta e misurata grazie a una tanica graduata da 500 litri, Figura 3.47). Questa verifica è stata preceduta da un controllo sull'affidabilità delle misure ottenute con il contalitri verificando (con l'utilizzo di taniche graduate) che il volume d'acqua misurato dal contalitri stesso fosse esatto. In concomitanza con queste prove sono stati registrati (con l'utilizzo di un cronometro) i tempi impiegati dalla presa d'acqua aperta al massimo a emettere una quantità nota di acqua. Questi tempi sono stati utilizzati per valutare le intensità di pioggia massime simulabili sulla copertura. Infine, lo stesso sistema è stato utilizzato per verificare l'affidabilità delle misure dello stramazzo tramite un semplice confronto tra i volumi d'acqua immessi sul tetto (misurati dal contalitri) e i volumi d'acqua misurati dallo stramazzo. Per questa prova è stata rimossa la tanica da 500 litri e i pluviali sono stati collegati alla vasca di calma dello stramazzo, secondo la configurazione di funzionamento del sistema (Paragrafo 3.1).



Figura 3. 416: Contaltri utilizzato per la misura dell'acqua durante le prove di verifica di perdite



Figura 3. 427: Tanica da 500 litri utilizzata durante le prove di verifica di perdite

Riassumendo, le fasi di verifica delle perdite dal sistema sono state le seguenti:

- 1) **Verifica del corretto funzionamento del contaltri:** confronto tra volume d'acqua misurato dallo strumento e volume d'acqua misurato tramite tanica graduata; contemporaneamente è stata valutata la portata massima uscente dalla presa d'acqua (valore utile per determinare l'intensità delle piogge simulabili) misurando il tempo impiegato per far sgorgare un volume noto di acqua.
- 2) **Verifica di perdite o ristagni sul tetto e sui pluviali:** confronto tra volume d'acqua erogato e distribuito sul tetto (misurato dal contaltri) e volume d'acqua in uscita dai

pluviali (raccolto e misurato con l'utilizzo di una tanica graduata da 500 litri). Contemporaneamente è stata nuovamente valutata la portata massima uscente dal contalitri (valore utile per determinare l'intensità delle piogge simulabili) misurando il tempo impiegato a erogare un volume noto di acqua. Questa è la stessa misura realizzata nella fase precedente, ma è stato necessario rieseguirlo per valutare le differenze di erogazione dovute a eventuali perdite di carico dovute alla maggior pressione riscontrata dal flusso di acqua per raggiungere il livello del tetto

- 3) **Verifica dell'affidabilità dello stramazzo:** confronto fra il volume di acqua erogato e distribuito sul tetto (misurato dal contalitri) e il volume di acqua misurato grazie alle sonde di livello presenti nella vasca di calma dello stramazzo. Questa verifica è stata eseguita con due prove: la prima irrorando sul tetto un volume d'acqua pari a 200,85 litri e la seconda con un volume d'acqua pari a 499,95 litri.

I risultati di queste prove sono riportati nel capitolo 4.2.

3.3.3.2 TARATURA dello STRAMAZZO E DETERMINAZIONE di una NUOVA EQUAZIONE empirica per il calcolo della portata

Le verifiche sulle perdite d'acqua dal sistema descritte nel precedente paragrafo (risultati nel capitolo 4.2) hanno evidenziato alcuni errori di stima dei volumi dallo stramazzo in parete sottile. Un'analisi più approfondita dei dati misurati dallo stramazzo in corrispondenza delle due prove a volume noto e in corrispondenza di alcuni eventi meteorici avvenuti lo scorso anno ha evidenziato che l'equazione empirica 3.16 sottostima le portate in particolare per i carichi inferiori a 2 cm che permangono per lungo tempo sullo stramazzo e influiscono considerevolmente sul volume finale dell'evento. L'elaborazione dei dati con l'utilizzo di altre equazioni (equazione teorica di Hager, 2013, equazione 3.15) ha portato a qualche miglioramento in particolare per le portate misurate in corrispondenza dei carichi maggiori, ma comunque a errori in particolare per i carichi più bassi. Pertanto, sulla base di queste considerazioni, è stato ritenuto opportuno verificare l'equazione empirica eseguendo nuove misure di portata e raffittendo i dati principalmente per carichi inferiori a 2 cm (dati mancanti nella definizione dell'equazione di Brusaferrò, 2012, che sono probabilmente la causa della sottostima).

Le prove per la taratura dello stramazzo sono state realizzate immettendo acqua nella vasca di calma dello stramazzo (utilizzo di portate di immissione diverse semplicemente regolando il

rubinetto della presa d'acqua), misurando ad intervalli regolari il livello idrometrico nella vasca di calma e il volume corrispondente uscente dallo stramazzo. Il tirante nella vasca di calma è stato misurato con le due sonde originariamente installate, piezometro e sonda a galleggiante, e da un'asta idrometrica collocata appositamente per controllare i valori registrati dalle sonde. Il volume di acqua defluente dallo stramazzo, invece, è stato raccolto in un recipiente, in corrispondenza di intervalli temporali prefissati e variabili a seconda della portata (intervalli brevi per le portate più alte e intervalli più lunghi per portate più basse) e misurato utilizzando una bilancia elettronica (sensibilità 0,01 g). Per eseguire queste misure si sono quindi utilizzati i seguenti materiali e strumenti:

- bilancia elettronica (Figura 3.48);
- bacinella per la raccolta dell'acqua defluente dallo stramazzo;
- un tubo di gomma per convogliare l'acqua dalla presa alla vasca dello stramazzo;
- cronometro;
- metro flessibile per la realizzazione dell'asta idrometrica nella vasca di calma;

Nastro isolante e cartone con i quali è stato realizzato un invito che permettesse di convogliare tutta l'acqua defluente dallo stramazzo nella bacinella; con l'utilizzo di una pistola termica si è potuto far aderire perfettamente il nastro isolante allo stramazzo e annullare le perdite di acqua nel tragitto tra lo stramazzo e il recipiente (Figura 3.50).



Figura 3. 438: Bilancia elettronica utilizzata durante le prove di taratura dello stramazzo

Le modalità di realizzazione delle prove sono riassumibili come segue:

- a) Posizionamento della strumentazione e rilevazione del livello idrometrico iniziale delle due sonde mediante PC collegato direttamente al data logger (Figura 3.49), nel caso di valori discordanti il valore iniziale è stato tarato manualmente.



Figura 3. 449: Sistema di collegamento PC – Data Logger

- b) Immissione di acqua nella vasca di calma: l'acqua fluiva direttamente all'interno della vasca di calma dello stramazzo e mediante il rubinetto della presa è stato possibile regolare il flusso e quindi i carichi sullo stramazzo. Contemporaneamente tramite PC era possibile registrare il variare del livello misurato dagli idrometri al variare del flusso immesso nella vasca.
- c) Con l'utilizzo del cronometro, l'acqua defluente dallo stramazzo veniva raccolta ad intervalli di tempo regolari di 30, 20 o 10 secondi (a seconda della portata) e pesata tramite una bilancia elettronica. Il volume d'acqua pesato diviso per l'intervallo di tempo in cui è stato raccolto ha permesso di misurare la portata defluente dallo stramazzo.



Figura 3. 50: Artifici utilizzati per le prove di pesatura

- d) Ad ogni intervallo di tempo si sono rilevati i livelli registrati dalle due sonde idrometriche e il livello idrometrico reale letto dall'asta idrometrica.

Durante la prova sono stati applicati carichi via via crescenti. Si è cominciato con una serie di misure con piccoli carichi e si è poi aumentata la portata, in maniera più o meno graduale; di conseguenza gli intervalli di tempo per la raccolta e pesatura dell'acqua defluente sono stati ridotti poiché le dimensioni contenute del recipiente permettevano di raccogliere un volume massimo di circa 10 litri. Per ogni intervallo di registrazione si è cercato di avere un carico sullo stramazzo il più possibile costante: in questo modo è stato possibile associare ad ogni portata misurata un carico (tirante nella vasca di calma) preciso.

L'analisi dei dati ottenuti da queste prove è riportata nel capitolo 4.

Come descritto nel capitolo 3, le prove di permeabilità sono state eseguite sia in entrambi i rain garden che nel circostante suolo naturale. In tutte le misure sono stati applicati due carichi (H_1 e H_2) per ottenere una misura di permeabilità più accurata. Le misure sono state realizzate nella zona centrale e nella zona laterale dei rain garden in modo da valutare eventuali effetti di compattazione del terreno e disomogeneità nelle caratteristiche del suolo. Le misure sono state realizzate per la maggior parte utilizzando i due serbatoi del permeametro in combinazione. Tuttavia durante le misurazioni sono state riscontrate delle problematiche, che hanno reso necessario l'utilizzo del serbatoio interno. In particolare nelle misure sul rain garden grande l'acqua non defluiva dal permeametro utilizzando la combinazione dei due serbatoi e un carico di 5 cm, mentre con l'applicazione del carico $H_2 = 10$ cm non si sono riscontrati problemi; probabilmente questo è dovuto alla presenza di un'inerzia iniziale che non permetteva la filtrazione dell'acqua e che non veniva superata con il carico più basso. Anche attraverso la pulizia dello strumento e la ripetizione della misura in un altro pozzo, creato nelle vicinanze del primo, il problema persisteva. Diversamente, utilizzando il solo cilindro interno il permeametro non ha riscontrato problemi. L'area più piccola su cui insiste la colonna d'acqua nel cilindro interno permette di avere pressioni maggiori e quindi, probabilmente, superare l'inerzia iniziale che ha impedito la misura con la combinazione dei cilindri (lettura sul cilindro esterno). Le misure sul rain garden grande sono state quindi realizzate effettuando la lettura sul cilindro interno. Alla luce dei dati rilevati si è deciso di utilizzare per il calcolo della conducibilità idraulica in ambiente saturo (K_{fs}) il metodo con due carichi (Two - Head Analysis) che utilizza le equazioni 3.13 e 3.14 ed è schematizzato in figura 3.38, perché fornisce un valore più preciso. Nelle misure su suolo naturale non è stato possibile applicare questo metodo in quanto le piccole differenze registrate nei tassi di caduta tra il carico H_1 e il carico H_2 non permettono l'applicazione delle equazioni 3.13 e 3.14. Di conseguenza si è deciso di utilizzare il metodo con un solo carico (One - Head Analysis), di ripetere la misura in più punti (3 punti utilizzati) e di ottenere il valore finale dalla media aritmetica delle singole misure a un carico. Di seguito sono riportate delle tabelle riassuntive con i valori del tasso di caduta misurati con i due carichi (rate of fall, R_1 e R_2) e di conducibilità idrica a saturazione di campo (K_{fs}) e i rispettivi grafici di confronto (Grafico 4.1 - 4.2 - 4.3). Maggiori dettagli sono riportati nell'Allegato 1.

RAIN GARDEN	Misura	R ₁ (cm/s)	R ₂ (cm/s)	K _{fs} (cm/s)	K _{fs} (mm/ora)
R.G. GRANDE	punto centrale*	0,117	0,592	0,0039	139,6
	punto laterale*	0,020	0,126	0,0009	31,7
R.G. PICCOLO	punto centrale	0,011	0,017	0,0004	14,8
	punto laterale	0,011	0,022	0,0011	40,3

Tabella 4. 1: Misure di permeabilità realizzate sui rain garden con metodo 'Two-Head Analysis' (* misure realizzate con lettura sul cilindro interno): valori del tasso di caduta misurati con i due carichi (R₁ e R₂) e valori di conducibilità idrica a saturazione di campo (K_{fs})

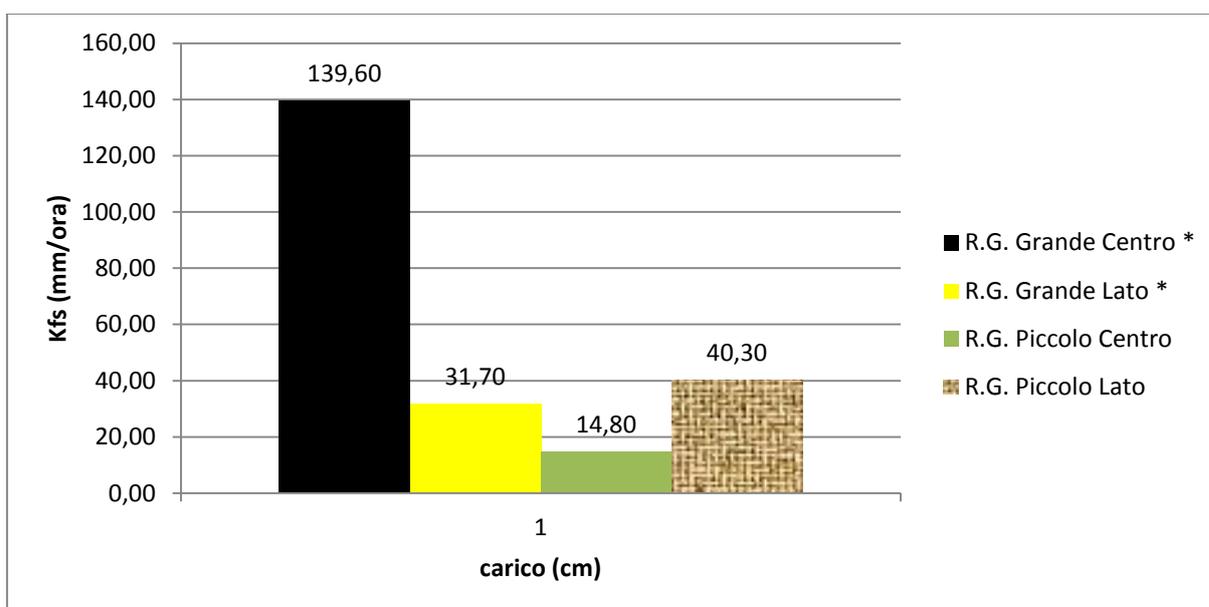


Grafico 4. 1: Misure di permeabilità realizzate sui rain garden con metodo 'Two - Head Analysis' (* misure realizzate con lettura sul cilindro interno)

POZZO	Carico	R (cm/s)	K_{fs} (cm/s)	K_{fs} (mm/ora)
1	5 cm	0,009	0,0006	21,1
2	5 cm	0,004	0,0002	9,0
3	5 cm	0,034	0,0022	79,2
	10 cm	0,027	0,0010	37,1
			Valore medio	36,6

Tabella 4. 2: Misure di permeabilità realizzate su suolo naturale con metodo ‘One-Head Analysis’: valori del tasso di caduta (R) e valori di conducibilità idrica a saturazione di campo (K_{fs})

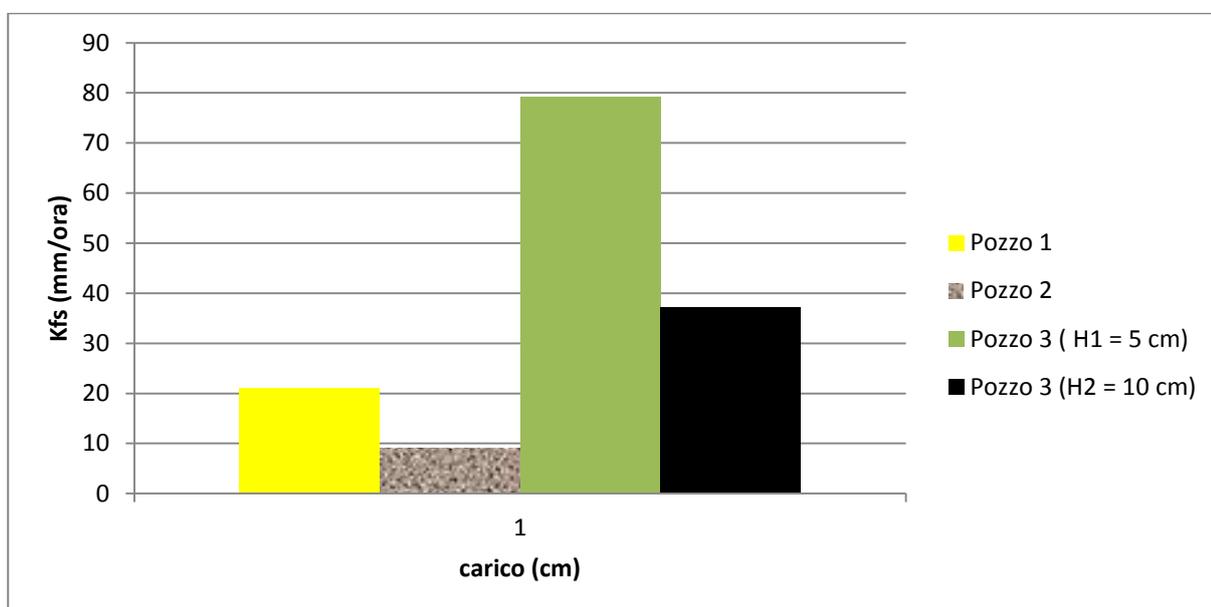


Grafico 4. 2: Misure di permeabilità realizzate su suolo naturale con metodo ‘One-Head Analysis’

Osservando i dati riportati nel grafico 4.1 si nota che:

- Le misure effettuate collocano i suoli analizzati in classi di conducibilità idraulica satura da media (R.G. Piccolo) ad alta (R.G. Grande Centro).
- Il rain garden grande è mediamente più permeabile del rain garden piccolo e del suolo naturale, vedi grafico seguente (Grafico 4.3).

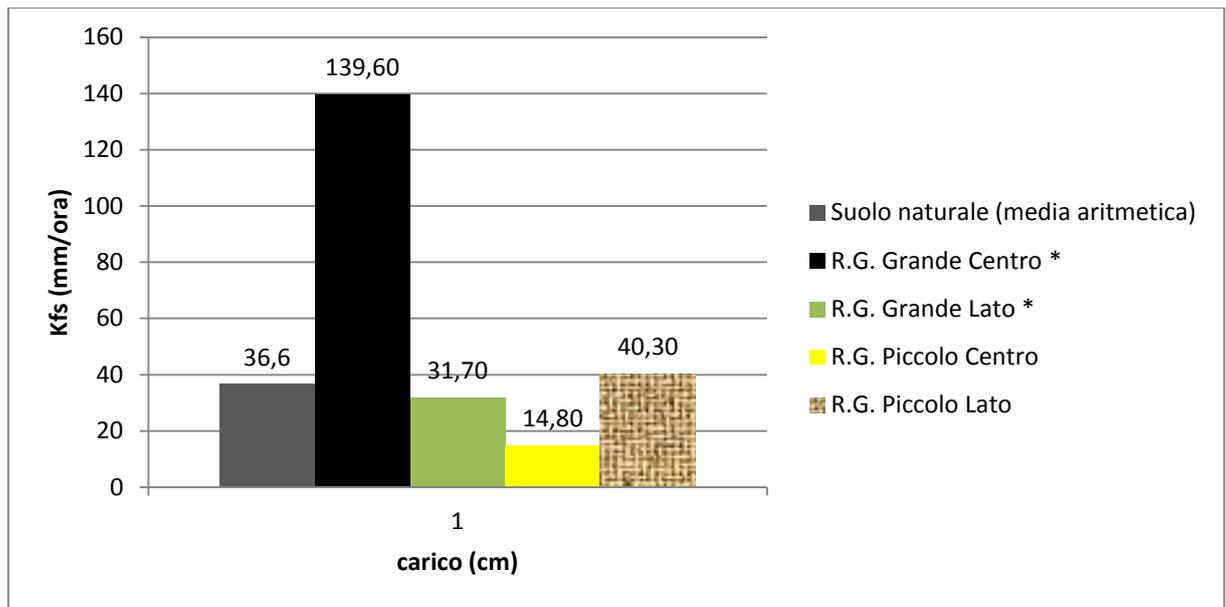


Grafico 4. 3: Misure di permeabilità realizzate su suolo naturale con metodo ‘One-Head Analysis’ a confronto con le misure di permeabilità realizzate sui rain garden con metodo ‘Two - Head Analysis’ (* misure realizzate con lettura sul cilindro interno)

- c) Il rain garden piccolo e suolo naturale hanno valori di conducibilità idraulica satura mediamente molto simili.

In generale dai dati emerge che per il rain garden piccolo (quello attivo al quale vengono confluente le acque provenienti dalla copertura) i valori di permeabilità riscontrati al centro sono più bassi rispetto a quelli nel punto laterale, viceversa avviene nel rain garden grande (non attivo, riceve solo la pioggia che cade direttamente sul rain garden stesso). Questo fatto può essere dovuto all’acqua che defluisce dallo stramazzone e viene scaricata nel punto centrale dei rain garden che ha portato ad un maggiore compattamento del suolo, maggiore saturazione e quindi minore permeabilità rispetto alla zona laterale. Questo non si verifica nel rain garden grande che non ha ricevuto afflussi dalla copertura. Nonostante il rain garden grande non sembra abbia aver subito fenomeni di compattazione, alcuni problemi si sono riscontrati nella realizzazione della misura nel punto centrale. Si ricorda che il permeametro funziona bene per un intervallo di conducibilità idrica compreso tra 0,01 – 0,00001 cm/s (vedi caratteristiche tecniche), nel quale ricadono tutti i dati rilevati e quindi i problemi non possono essere ricondotti all’intervallo di funzionamento dello strumento. I problemi riscontrati possono quindi essere ricondotti a una locale struttura del suolo che necessitava di un valore iniziale minimo di pressione per permettere l’inizio della filtrazione. Il problema è stato risolto, come descritto in precedenza, utilizzando il cilindro centrale del permeametro di Guelph. Per quanto

riguarda il suolo naturale, il valore medio di permeabilità ottenuto è in contrasto con le aspettative poiché tale valore dovrebbe essere molto più basso rispetto a quello dei rain garden: il suolo dei rain garden presenta una componente sabbiosa (aggiunta appositamente in fase di realizzazione per facilitare l'infiltrazione ed evitare ristagni idrici) molto più alta del suolo naturale circostante che dovrebbe aumentarne considerevolmente la permeabilità. Infatti come descritto all'inizio del capitolo, il terreno naturale circostante i rain garden è stato classificato come suolo franco – limoso con bassa conducibilità idrica a differenza del suolo sabbioso dei rain garden. Differenze si notano comunque tra il rain garden grande, permeabilità media 85,65 mm/ora (valore medio tra punto centrale e laterale) e il suolo naturale, con permeabilità media pari a 36,6 mm/ora. Nella situazione originaria (rain garden appena costruito) si può ipotizzare che la permeabilità del terreno dei rain garden fosse maggiore di quella del terreno circostante. L'apporto continuo di acqua, molto elevato nel rain garden piccolo, ha quindi alterato la struttura del terreno riportando la permeabilità a valori simili a quelli del suolo naturale circostante (conducibilità idrica a saturazione media del rain garden piccolo pari a 36,6 mm/ora). Ad integrare i dati delle prove di permeabilità, si è eseguita un'analisi dell'umidità iniziale del terreno. I campioni analizzati sono quelli prelevati dal suolo naturale e dal rain garden durante l'esecuzione del pozzetto di misura per il permeometro di Guelph. I campioni sono stati conservati dentro sacchetti di nylon, chiusi ermeticamente e poi seccati in laboratorio in stufa a 110°C per 24 ore. L'utilizzo della stufa ha permesso di far evaporare tutta l'acqua presente all'interno dei campioni di terreno permettendo di determinare il peso del suolo secco. Tramite poi la relazione 3.18 si è determinata l'umidità relativa di ogni campione di suolo. I valori ottenuti sono riportati nella seguente tabella (Tabella 4.8).

CAMPIONE	Sito		Peso suolo umido (g)	Peso suolo secco (g)	Umidità (%)
1	<i>Rain garden grande</i>	<i>punto centrale</i>	251,58	219,96	12,57
2	<i>Rain garden grande</i>	<i>punto laterale</i>	424,93	363,83	14,38
3	<i>Rain garden piccolo</i>	<i>punto centrale</i>	561,85	481,06	14,38
4	<i>Rain garden piccolo</i>	<i>punto laterale</i>	430,6	374,24	13,09
5	<i>Suolo naturale (pozzo 3)</i>	<i>tra i due rain garden</i>	362,7	282,16	22,21

Tabella 4. 3: Umidità iniziale del terreno analizzato

L'umidità relativa in percentuale è ottenuta mediante la seguente relazione:

$$Umidità \% = \frac{Peso\ suolo\ umido - Peso\ suolo\ secco}{Peso\ suolo\ umido} \times 100 \quad (4.1)$$

Come si può notare dai dati ottenuti l'umidità relativa del terreno naturale è maggiore rispetto a quella del terreno presente nei rain garden. Questo dovrebbe aver contribuito alla determinazione di una minore permeabilità e quindi minore conducibilità idrica nel suolo naturale rispetto a quello dei rain garden. Il suolo dei rain garden, invece, essendo costituito prevalentemente da sabbia (Figura 3.6), presentano valori minori di umidità in quanto l'acqua percola in profondità più velocemente. Bisogna sottolineare che nei rain garden può verificarsi una possibile risalita di umidità dal terreno più profondo in quanto il rain garden è una sorta di piccolo bacino di assorbimento. Studi più approfonditi sono stati eseguiti in altri lavori di tesi mediante l'utilizzo delle sonde di umidità (Simionato, 2011; Brusaferrò 2012).

4.2 – RISULTATI DELLE PROCEDURE DI VERIFICA DI PERDITE DAL SISTEMA

Le prove di verifica di perdite dal sistema hanno messo in evidenza, innanzitutto, un aspetto interessante che andrà considerato nelle future prove e simulazioni di pioggia sui rain garden. Questo aspetto è l'influenza della quota di erogazione dell'acqua sulla portata in uscita dalla presa d'acqua: la portata in uscita dalla presa d'acqua passa da un valore di 0,78 l/s a un valore di 0,70 l/s se la quota di erogazione passa dal livello della presa stessa alla parte sommitale del tetto. Questo comporta che le massime intensità di pioggia simulabili sul tetto saranno di 37,6 mm/ora. In secondo luogo, l'obiettivo principale di queste prove è stato raggiunto identificando nelle equazioni di taratura dello stramazzo le perdite di volume d'acqua nel bilancio tra afflussi (piogge che cadono sulla copertura) e deflussi (portata sullo stramazzo) del sistema rain garden. La presenza di perdite dal tetto e dai pluviali è stata, infatti, realizzata *ad hoc* per questa verifica (punto 2 del paragrafo 3.3.3.1). Si sono infatti distribuiti sul tetto 250 litri d'acqua che sono stati raccolti in una tanica da 500 litri in uscita dai pluviali. Tutto il volume d'acqua immesso è arrivato alla tanica escludendo quindi perdite e ristagni nel tetto o nei pluviali. Poiché non vi sono perdite nel sistema di scolo, il problema è quindi da ricercarsi nella strumentazione dello stramazzo per la misura delle portate in uscita. La verifica del problema è stata perseguita attraverso le prove descritte al punto 3 del paragrafo 3.3.3.1. Come descritto, sono state realizzate 2 prove, una erogando sulla copertura 200,85 l e l'altra erogandone 499,95 l. Il volume immesso è stato misurato tramite il conta litri la cui precisione è stata verificata tramite le prove al punto 1 del paragrafo 3.3.3.1. Per le due prove i dati di tirante registrati dalle due sonde presenti nella vasca di calma (piezometro e galleggiante) dello stramazzo sono stati raccolti ed elaborati mediante foglio di calcolo elettronico (Excel) determinando la portata mediante la formula empirica attualmente utilizzata (equazione 3.15). Le portate totali calcolate mediante la formula sono riassunte nelle tabelle seguenti (Tabella 4.4 e 4.5).

	prova con 200 litri	
	I1-B1(mm) PIEZOMETRO	I1-FG (mm) GALLEGGIANTE
portata totale Q (l/s)	108,42	91,61

Tabella 4. 4: Valori di portata registrati dalla sonda a galleggiante e dal piezometro

	prova con 500 litri	
	I1-B1(mm) PIEZOMETRO	I1-FG (mm) GALLEGGIANTE
portata totale Q (l/s)	375,51	340,17

Tabella 4.5: Valori di portata registrati dalla sonda a galleggiante e dal piezometro

I grafici 4.4 e 4.5 riportano il confronto delle portate registrate dalle due sonde idrometriche durante la prova.

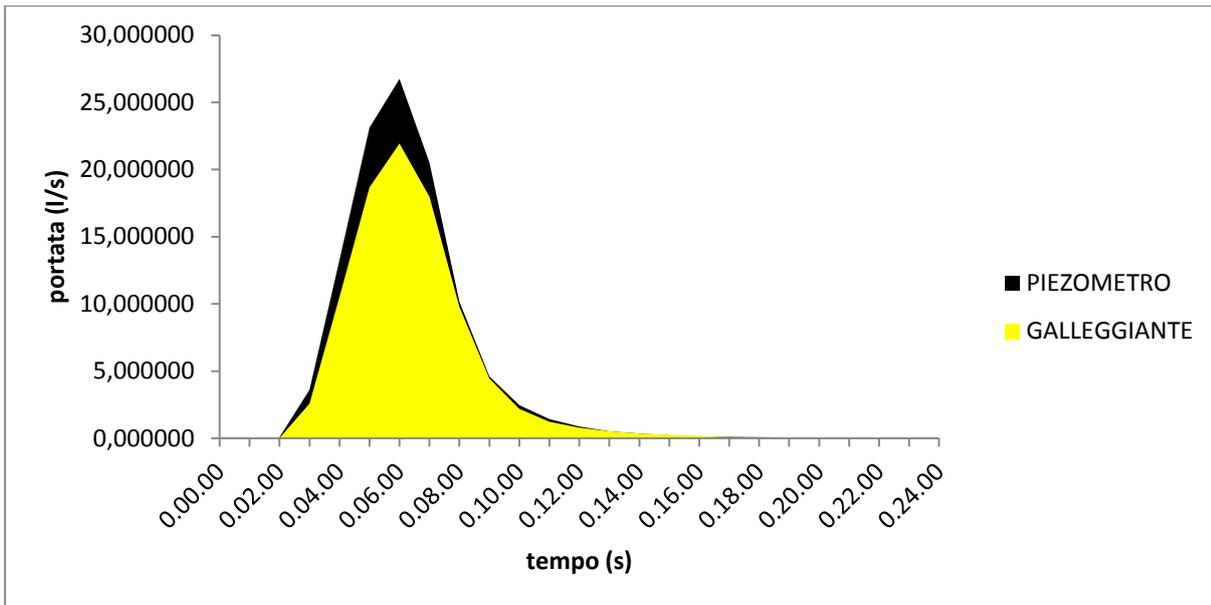


Grafico 4. 4: Piezometro e galleggiante a confronto (prova con 200 litri)

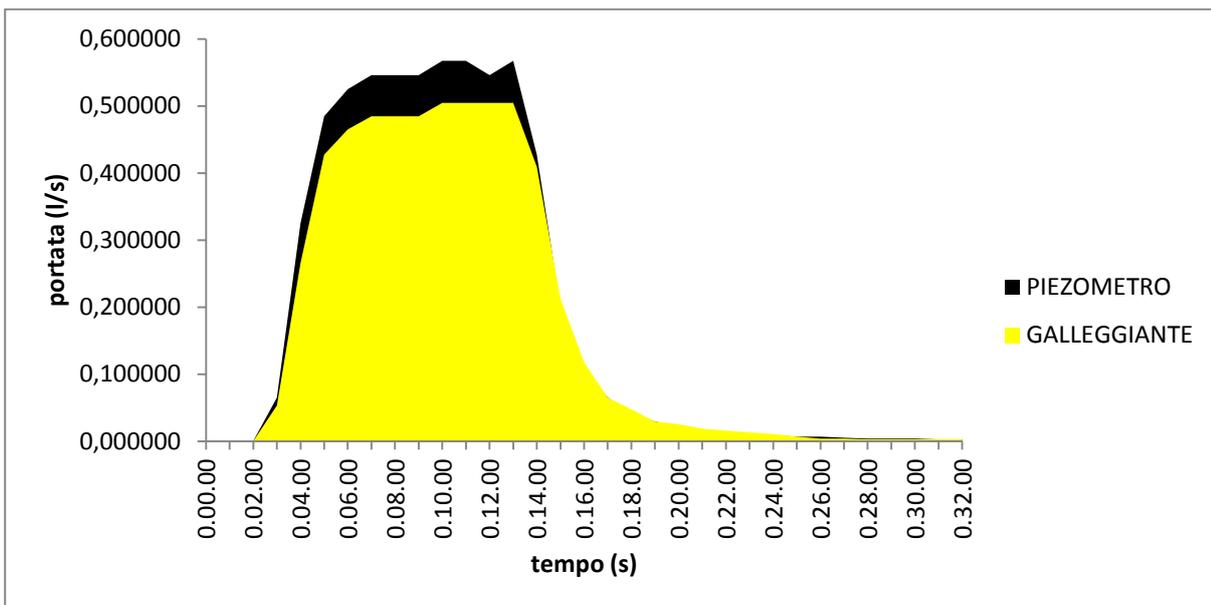


Grafico 4. 5: Piezometro e galleggiante a confronto (prova con 500 litri)

Dai valori di volume totale mostrati nelle tabelle 4.4 e 4.5 si può notare come l'equazione attualmente utilizzata sottostimi di molto i valori reali di portata transitata. Di seguito è riportata una tabella con la percentuale dei litri sottostimati (Tabella 4.6):

	Sottostima %	
	I1-B1(mm) PIEZOMETRO	I1-FG(mm) GALLEGGIANTE
200,85 litri	46,02	54,39
499,95 litri	24,89	31,96

Tabella 4.6: Valori percentuali di litri d'acqua sottostimati dalla sonda piezometrica e da quella a galleggiante durante la prova di verifica di perdite del sistema

Inoltre, dai grafici 4.4 e 4.5 si osserva che il galleggiante fornisce valori inferiori rispetto alla sonda piezometrica. Questo è dovuto al fatto che il piezometro è influenzato dalla pressione dell'acqua in movimento verso lo stramazzo. Errori di possibile sottostima della sonda a galleggiante non sono comunque da escludere. Le evidenze ottenute da questi risultati hanno portato quindi alla luce la necessità di una ritaratura dell'equazione empirica utilizzata per il calcolo delle portate con lo stramazzo. I risultati di questa taratura sono evidenziati nel paragrafo successivo.

4.3 – RISULTATI DELLA TARATURA DELLO STRAMAZZO

Prima di effettuare la taratura dello stramazzo tramite la raccolta di dati di portata e carico secondo le modalità descritte nel paragrafo 3.3.3.2, si è verificata l'applicabilità di due equazioni teoriche:

- L'equazione teorica (**Gisonni e Hager, 2013**) per il calcolo della portata per uno stramazzo triangolare in parete sottile con coefficiente di efflusso C_d costante pari a 0,6:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) (2gh^5)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

- L'equazione teorica (**Gisonni e Hager, 2013**) con coefficiente di efflusso calcolato in funzione del tirante secondo l'equazione identificata da Hager (1990) sulla base di una dettagliata analisi di dati disponibili in letteratura:

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[1 + \left(\frac{h^2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{3B(h+w)} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{0,66}{h^{3/2} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] = f(h) \quad (4.3)$$

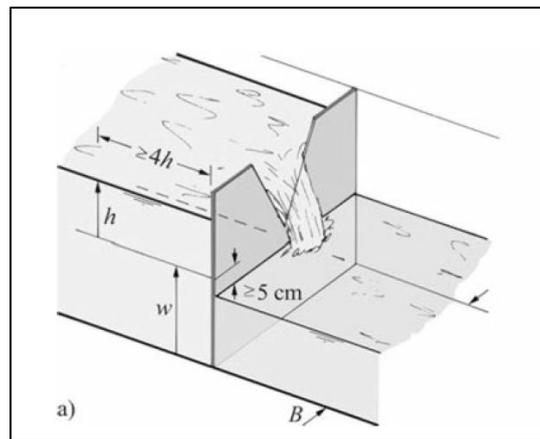


Figura 4. 2: Parametrici geometrici dello stramazzo

Nel primo caso il coefficiente di efflusso è assunto pari a un valore costante mentre nel secondo caso è in funzione del carico sullo stramazzo e si determina mediante la formula sopra riportata dove **w** è l'altezza del vertice dello stramazzo (Figura 4.2), **h** è il carico sulla soglia, **α** è l'angolo al centro dello stramazzo, che in questo caso è di 60°. Le due equazioni teoriche sono state applicate ai dati registrati nella prova con 200,85 e 499,95 litri. I risultati sono riassunti in Tabella 4.7 e 4.8:

	prova con 200 litri		
	C_d = 0,60	C_d = f(h)	
I1-B1(mm) PIEZOMETRO	184,1	200,2	Volume totale (l)
I1-FG(mm) GALLEGGIANTE	178,3	188,7	

Tabella 4.7: Volumi totali calcolati tramite le equazioni teoriche 4.2 e 4.3

	prova con 500 litri		
	$C_d = 0,60$	$C_d = f(h)$	
I1-B1(mm) PIEZOMETRO	488,1	502,4	Volume totale (l)
I1-FG(mm) GALLEGGIANTE	460,9	466,4	

Tabella 4.8: Volumi totali calcolati tramite l'equazione di Hager

Come si può notare l'applicazione delle equazioni teoriche ha portato a un netto miglioramento nel bilancio dei volumi di acqua, anche se, nel particolare, la sonda a galleggiante continua a sottostimare i volumi totali rispetto alla sonda piezometrica. Dall'analisi dei dati mediante foglio di calcolo elettronico (Excel) si è notato che:

- a) L'equazione empirica (Brusaferro, 2012) attualmente utilizzata (equazione 3.16) sottostima la portata e il volume finale. In particolare analizzando le prove che sono state realizzate da Brusaferro per la taratura dell'equazione si è notato che i carichi analizzati erano maggiori di 2 cm. Si è dedotto che l'equazione sottostima quindi la portata per carichi inferiori e in particolare per quelli inferiori a 1 cm, che permangono per lungo tempo nello stramazzo e influiscono considerevolmente sul calcolo del volume finale.
- b) L'idrometro a galleggiante sottostima il volume finale rispetto al piezometro probabilmente perché registra con difficoltà le piccole variazioni di tirante (anche millimetriche) che comunque hanno una grande influenza sui volumi finali d'evento.
- c) L'altezza della soglia misurata dallo strumento ad inizio prova e selezionata come zero idrometrico influisce molto sulla misura del volume finale. In particolare una variazione di 1 mm comporta una sottostima di più di 20 litri sul volume finale nella prova con 500 litri totali. Una soluzione potrebbe essere quella di utilizzare il valore

minimo di altezza registrato dallo strumento nelle 2 ore che precedono l'inizio della prova.

- d) Gli stramazzi triangolari sono ottimizzati per misure di portata per carico compreso tra 5 e 60 cm. Il fatto che nelle prove si abbiano tiranti inferiori a 5 cm influenza sicuramente la precisione della misura.

Per un'analisi più approfondita si sono confrontate le diverse equazioni: in particolare le curve generate dall'interpolazione dei dati di portata stimati dalle diverse equazioni per variazioni crescenti di 1 mm di tirante fino ad un massimo di 10 cm. I valori di portata (l/s) ottenuti in funzione del tirante sulla soglia dello stramazzo sono stati interpolati graficamente per valutare l'andamento delle curve d'equazione. Il grafico ottenuto è il seguente (Grafico 4.6):

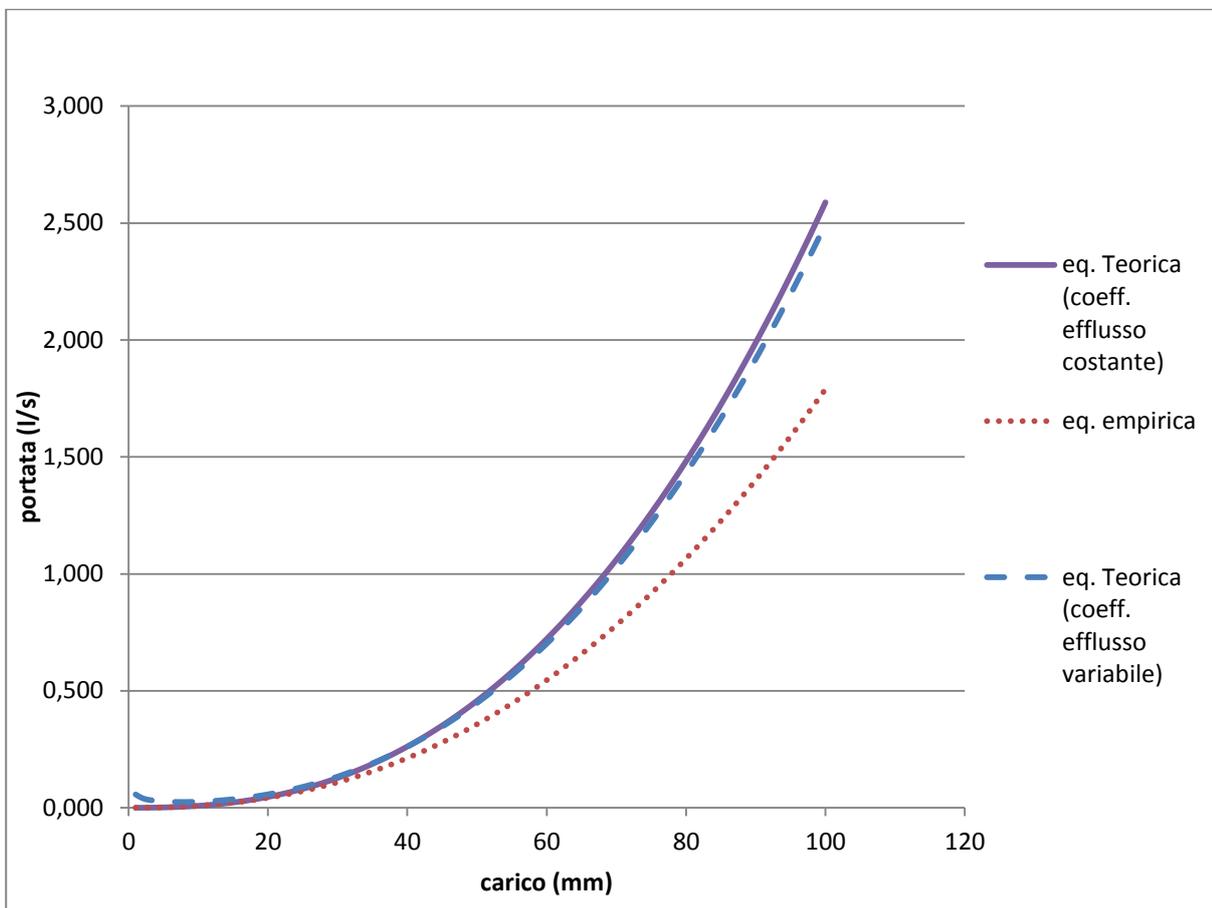


Grafico 4. 6: Curve di portata a confronto per carichi compresi tra 0 e 10 cm

In ascissa c'è il carico sulla soglia che va da 0 a 12 cm che corrisponde all'incirca al tirante massimo che si può verificare per eventi piovosi eccezionali. In ordinata la portata in (l/s)

calcolata tramite le equazioni riportate in legenda. Le curve a confronto mettono in evidenza la differenza di stima della portata delle diverse equazioni. In particolare si nota che:

- L'equazione empirica sottostima molto i valori di portata per carichi superiori ai 1,5 – 2 cm rispetto alle due equazioni teoriche (Grafico 4.6).
- Per carichi inferiori al centimetro l'equazione teorica con coefficiente di efflusso variabile sovrastima la portata defluente dallo stramazzo.
- Per carichi superiori ai 3,5 – 4 cm le due equazioni teoriche non presentano grosse differenze di stima delle portate defluenti dallo stramazzo.
- Intorno a carichi di 4 cm le due equazioni teoriche si intersecano.

Sulla base di queste considerazioni, si può affermare che l'equazione empirica attualmente utilizzata non è affidabile, mentre le equazioni teoriche possono fornire valori corretti in particolare per carichi maggiori a 3,5 - 4 centimetri. Per i carichi inferiori, dove la tensione superficiale e i fenomeni di coesione giocano un ruolo importante, è necessario valutare l'adozione di una equazione empirica basata su dati reali. L'equazione è stata quindi determinata seguendo le modalità descritte nel paragrafo 3.3.3.2. Il tirante da applicare nelle equazioni teoriche, è stato calcolato effettuando una media tra quelli misurati tramite la sonda a galleggiate, quella piezometrica e la misura sull'asta idrometrica. Le variazioni tra le tre letture sono state comunque minime, con valori medi di circa 3 mm (massima differenza pari a 6,5 mm). Non si è applicato direttamente il valore letto dall'asta idrometrica in quanto anche questo soggetto ad errori di lettura (visibilità della scala non sempre ottimale per rifrazione sul pelo dell'acqua, effetti ondulatori ecc.) e in quanto utilizzato solo in un secondo momento per verificare le letture delle sonde e perché, per tiranti bassi la variazione di tirante non era facilmente rilevabile ad occhio nudo con questo strumento. I dati ottenuti durante la prova sono riportati nella seguente tabella (Tabella 4.9):

n° misura	tempo (sec.)	piezometro (mm)	galleggiante (mm)	asta (cm)	volume (kg)
–	0	233	233	–	0
1	30	260,5	258		3,17
2	30	263	260		2,14
3	30	263,5	260		2,24
4	30	255,5	258		1,74
5	30	253,5	255		1,56
6	30	252	253		1,24
7	30	250	252		1,05
8	30	249	250		0,97
9	30	247	249		0,82
10	30	246	248		0,72
11	30	246	248		0,67
12	30	245,5	247		0,56
13	30	245	246		0,53
14	30	244,5	246		0,44
15	30	243,5	245		0,39
16	30	243,5	245		0,28
17	30	243	244		0,28
18	30	241	242		0,19
19	30	240,5	242		0,18
20	30	240	242		0,17
21	30	240	241		0,17
22	30	250	245		1,84
23	30	259	253		3,56
24	30	261	256		4,25
25	30	264	258		4,77
26	30	264	259		5,25
27	20	274	268		6,07
28	20	282	276		8,57
29	20	286,5	278,5	40,8	9,73
30	20	287	279	40,8	9,62
31	20	284,5	279	40,7	9,41
32	20	283	278	40,3	7,51
33	20	282,5	277	40	7,45
34	20	282	277	40	7,39
35	20	267,5	264	38,65	3,27
36	20	263,5	260,5	38,35	2,66
37	20	261	257,5	38,05	2,02
38	30	255	251,5	37,55	1,78
39	30	251	247	37,05	1,02
40	30	246,5	243,5	36,65	0,53
41	30	244	240,5	36,35	0,26
42	30	242	238	36,125	0,12
43	30	240,5	236	35,95	0,04

Tabella 4.9: Valori di livello idrometrico registrati dalla sonda a galleggiante, dal piezometro e dall'asta idrometrica durante la prova con la bilancia elettronica e, volumi rispettivi volumi d'acqua

Sono state eseguite un totale di 43 misure, scegliendo un intervallo di campionamento pari a 30 secondi per le portate inferiori e tiranti bassi, mentre per portate più grandi si è scelto un

intervallo di 20 secondi. L'intervallo di 20 secondi è stato adottato perché permetteva di raccogliere l'acqua che finiva nella bacinella senza che traboccasse.

Con i dati ottenuti si è calcolato inizialmente il carico sulla soglia misurato dalle sonde e dall'asta considerando che l'altezza reale del vertice dello stramazzo è pari a 0,355 m mentre le altezze rilevate dagli altri strumenti ad inizio prova sono riportate nella tabella seguente:

w_{reale} (m)	0,355
$w_{piezometro}$ (m)	0,237
$w_{galleggiante}$ (m)	0,233
w_{asta} (m)	0,357

Tabella 4. 10: Valori di carico sulla soglia a confronto

Poi si è determinato il tirante medio come media aritmetica dei valori misurati dalla strumentazione e si sono calcolati i volumi transitati (pari al peso dell'acqua raccolta ad ogni intervallo temporale considerato) e la portata in l/s (volume dell'acqua raccolta in metri cubi diviso per l'ampiezza dell'intervallo temporale in secondi), come riportato nella tabella seguente (Tabella 4.11):

				PORTATA MISURATA
Tirante medio (m)	Volume transitato (l)	Volume transitato (m³)	Intervallo di tempo (s)	Portata (l/s)
0,025	3,17	0,0032	30	0,106
0,027	2,14	0,0021	30	0,071
0,027	2,24	0,0022	30	0,075
0,022	1,74	0,0017	30	0,058
0,020	1,56	0,0016	30	0,052
0,018	1,24	0,0012	30	0,041
0,017	1,05	0,0011	30	0,035
0,015	0,97	0,0010	30	0,032
0,014	0,82	0,0008	30	0,027

0,013	0,72	0,0007	30	0,024
0,013	0,67	0,0007	30	0,022
0,012	0,56	0,0006	30	0,019
0,011	0,53	0,0005	30	0,018
0,011	0,44	0,0004	30	0,015
0,010	0,39	0,0004	30	0,013
0,010	0,28	0,0003	30	0,009
0,009	0,28	0,0003	30	0,009
0,007	0,19	0,0002	30	0,006
0,007	0,18	0,0002	30	0,006
0,006	0,17	0,0002	30	0,006
0,006	0,17	0,0002	30	0,006
0,013	1,84	0,0018	30	0,061
0,022	3,56	0,0036	30	0,119
0,024	4,25	0,0043	30	0,142
0,027	4,77	0,0048	30	0,159
0,027	5,25	0,0053	30	0,175
0,037	6,07	0,0061	20	0,304
0,045	8,57	0,0086	20	0,429
0,049	9,73	0,0097	20	0,487
0,049	9,62	0,0096	20	0,481
0,048	9,41	0,0094	20	0,471
0,046	7,51	0,0075	20	0,376
0,045	7,45	0,0075	20	0,373
0,044	7,39	0,0074	20	0,370
0,031	3,27	0,0033	20	0,164
0,027	2,66	0,0027	20	0,133
0,024	2,02	0,0020	20	0,101
0,019	1,78	0,0018	30	0,059
0,014	1,02	0,0010	30	0,034
0,010	0,53	0,0005	30	0,018
0,007	0,26	0,0003	30	0,009
0,005	0,12	0,0001	30	0,004
0,003	0,04	0,0000	30	0,001

Tabella 4. 11: valori di portata misurata durante la prova con la bilancia elettronica

I dati ottenuti sono stati riportati nel grafico 4.7 ed interpolati attraverso una linea di tendenza di tipo ‘potenza’. Nello stesso grafico sono state riportate le curve per il calcolo della portata con le equazioni teoriche e quella empirica ottenuta mediante i dati di Brusaferrò (2012). Questi ultimi sono riportati nella tabella seguente (Tabella 4.12):

Prove tesi Brusaferrò	
Carico (m)	Portata (l/s)
0,021	0,048
0,036	0,196
0,056	0,503
0,061	0,582
0,078	1,030
0,098	1,669
0,100	2,016
0,104	2,151

Tabella 4. 12: Valori di carico e rispettiva portata calcolati e utilizzati da Brusaferrò (2012) per la determinazione dell’equazione empirica per il calcolo della portata che defluisce dallo stramazzo

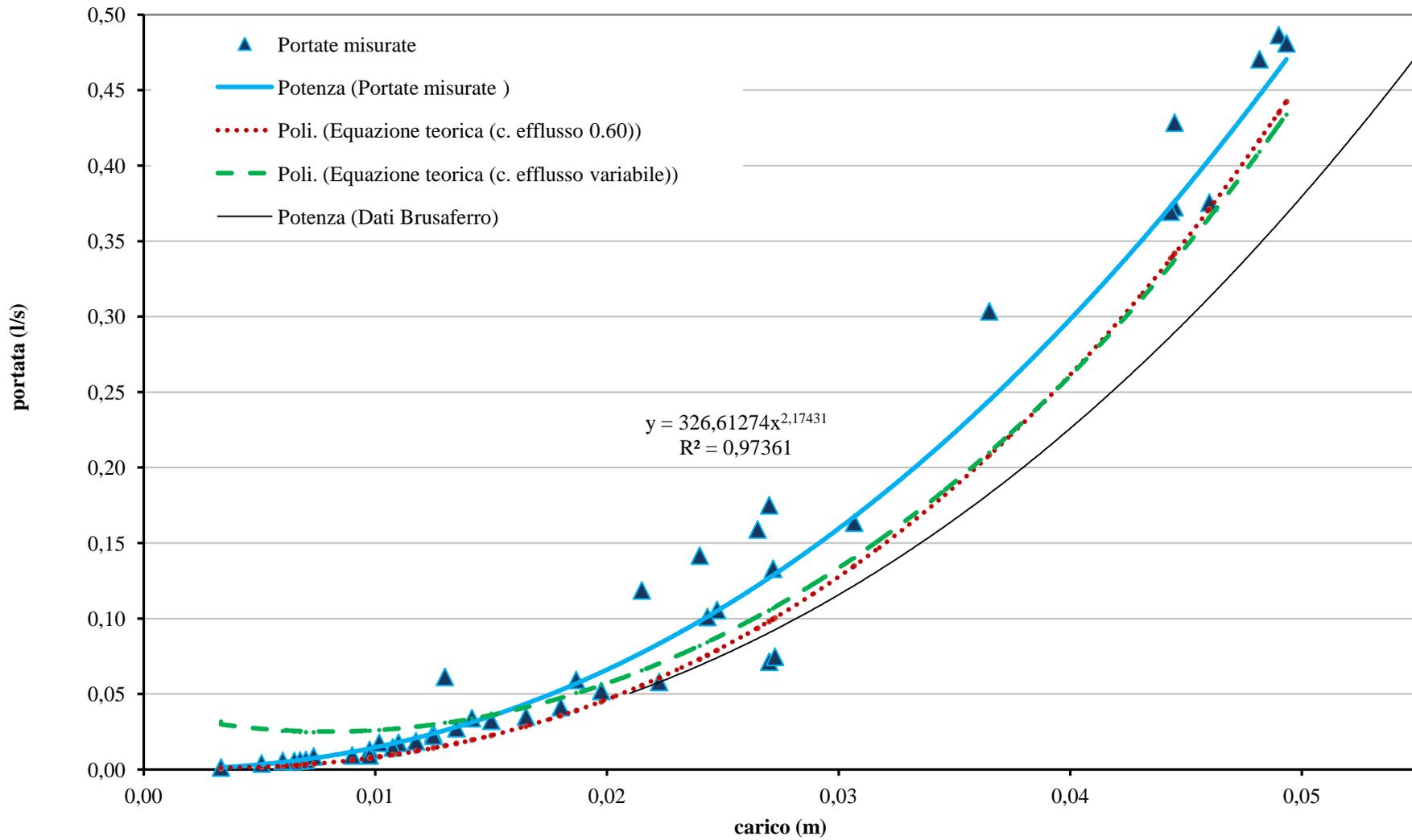


Grafico 4. 11: Curve interpolatrici a confronto

L'equazione della curva interpolante i dati sperimentali è la seguente:

$$Q = 326,61h^{2,17} \quad (4.4)$$

dove Q (l/s) è la portata che defluisce dallo stramazzo per un carico pari a h (m). L'equazione ottenuta spiega bene i dati sperimentali in quanto il coefficiente di determinazione è prossimo a 1. Come si può notare l'equazione teorica con coefficiente di efflusso variabile (equazione numero 4.3) calcola delle portate non verosimili per carichi inferiori a 1,5 cm: portata che aumenta al diminuire del tirante; pertanto questa equazione non è ritenuta idonea per il calcolo della portata in questo intervallo di carichi. Invece, si osserva che la curva interpolante i dati sperimentali (equazione 4.4) si colloca:

- sempre al di sopra dell'equazione empirica ottenuta da Brusafello (2012);
- tra l'equazione teorica con $C_d = 0,6$ e l'equazione teorica con C_d variabile fino a carichi di circa 1,5 cm;
- al di sopra delle due equazioni teoriche per carichi compresi tra 1,5 cm e 6,0 cm circa;
- al di sotto delle equazioni teoriche per carichi maggiori a 6 cm (intervallo di carichi non indagato dalle prove sperimentali realizzate).

Seguendo queste considerazioni, l'equazione più veritiera e precisa per il calcolo delle portate che defluiscono dallo stramazzo del rain garden di Agripolis deve essere composta sia dall'equazione empirica 4.4, che fornisce i valori più realistici per tiranti minori di 6 cm, che dall'equazione teorica, che modella meglio il comportamento della portata stramazzone per tiranti maggiori a 6 cm. Quindi, per l'equazione definitiva è stato ritenuto opportuno specificare in modo preciso l'intervallo di applicazione delle due equazioni e quindi per quale carico va applicata l'una o l'altra. Per determinare tale intervallo o valore discriminante si è identificato il punto di intersezione tra le due curve. Si è deciso di utilizzare questo punto in modo da non avere 'gradini' nella curva ottenuta dall'insieme delle due equazioni, e quindi un andamento sempre crescente dei valori di portata in funzione dei valori di carico. Il punto di intersezione, e quindi di divisione dei campi di applicazione delle due curve, è stato identificato precisamente per un valore di tirante di 0,0595 m. In definitiva, i calcoli della portata defluente dallo stramazzo sono schematizzati come segue:

$$\text{per } h < 0,0595 \text{ m} \rightarrow Q = 326,61h^{2,17} \quad (4.5)$$

Dove h è appunto in metri.

$$\text{per } h > 0,0595 \text{ m} \rightarrow Q = \frac{8}{15} C_d \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) (2gh^5)^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

Dove $C_d = 0,60$ (coefficiente di efflusso costante).

Questa scelta è al momento la più opportuna in quanto l'applicazione della sola equazione teorica porterebbe a sottostime per carichi inferiori a 6 cm, mentre l'equazione empirica non può essere utilizzata per carichi superiori in quanto calibrata su un intervallo di valori di carico che non supera i 5 cm.

CAPITOLO 5 – CONCLUSIONI

Con questo lavoro di tesi è stato apportato un contributo alle sperimentazioni in atto nei rain garden di Agripolis. In particolare è stata realizzata:

- una caratterizzazione idrologica dei terreni dei due giardini pluviali e un confronto con il suolo naturale circostante attraverso misure di conducibilità idraulica a saturazione;
- un'analisi delle cause di perdita di volume nel bilancio tra gli afflussi idrici (precipitazioni) e i deflussi provenienti dalla copertura dell'edificio denominato "Centrale tecnologica" e diretti al rain garden piccolo, e una taratura degli strumenti per la misura dei deflussi (stramazzo in parete sottile).

Le prove di permeabilità sono state realizzate mediante permeometro di Guelph e hanno permesso di determinare la conducibilità idrica a saturazione di campo dei due rain garden e del suolo naturale circostante. Dai dati ottenuti da queste misure ci si sarebbe aspettato che il suolo naturale (di natura franco - limosa) presentasse una permeabilità molto inferiore rispetto a quella dei rain garden (il cui suolo è composto da una parte di suolo naturale e una parte di sabbia mescolati assieme), in realtà essi mostrano che il terreno naturale ha una permeabilità non molto più bassa rispetto a quella dei rain garden, mostrando inoltre valori di conducibilità idraulica a saturazione del tutto paragonabili al rain garden piccolo. Il suolo del rain garden grande sembra, invece, mediamente più permeabile del suolo naturale e del suolo del rain garden piccolo. Questi risultati sono probabilmente dovuti al fatto che il rain garden piccolo riceve le portate defluenti dal tetto che hanno portato ad una maggiore compattazione e a una modifica della struttura del terreno specialmente nel punto centrale dove arriva l'acqua del tetto e si registra il valore più basso di conducibilità idraulica a saturazione. Le maggiori differenze si notano quindi tra il rain garden grande, permeabilità media 85,65 mm/ora (valore medio tra punto centrale e laterale) e il suolo naturale, con permeabilità media pari a 36,6 mm/ora, mentre il rain garden piccolo mostra un valore di conducibilità idraulica a saturazione pari a 27,55 mm/ora (valore medio tra conducibilità idraulica a saturazione al centro e a lato del rain garden); il rain garden grande è quello più permeabile probabilmente perché, ricevendo solo l'acqua degli eventi di precipitazione che cadono direttamente su di esso e non anche la frazione di acqua proveniente dal tetto (il rain garden grande è scollegato dalla copertura), non ha subito i processi di compattazione verificatisi nel rain garden piccolo. In questo caso, infatti, l'azione di compattazione e trasformazione del terreno è più lenta e

quindi il suolo mantiene ancora le caratteristiche simili a quelle che aveva non appena è stato costruito, con una maggiore facilità di conduzione dell'acqua. Altre differenze si sono riscontrate in punti diversi all'interno del rain garden stesso e in particolare tra la conducibilità idrica al centro e quella ai lati. Nel rain garden piccolo, infatti, si sono ottenuti valori di permeabilità più bassi rispetto alla zona laterale e questo si suppone sia dovuto al principio spiegato in precedenza, ovvero al deflusso dell'acqua proveniente dallo stramazzo che ha maggiormente compattato il terreno nella zona centrale dove appunto viene versata. Nel rain garden grande si osserva invece l'opposto: conducibilità idraulica a saturazione più bassa lateralmente rispetto al punto centrale. Questo era quello che ci si aspettava prima di realizzare le misure, in quanto la parte laterale dei rain garden dovrebbe presentare una maggior compattazione proprio a causa della vicinanza con le pareti dello stesso. L'utilizzo del permeametro di Guelph in campo ha permesso, inoltre, di verificarne il funzionamento e di mettere in luce alcuni pregi e difetti. Alcune difficoltà si sono riscontrate nella misurazione nel punto centrale del rain garden grande, probabilmente dovute alla struttura del pozzetto o alla presenza di uno strato che impediva l'inizio del processo di infiltrazione. La necessità di eseguire le misure in un determinato punto (centro del rain garden) non permette di correggere eventuali problemi riscontrabili in fase di realizzazione del pozzetto, risolvibili invece semplicemente attraverso la scelta di un altro sito nelle vicinanze. La precisione delle misure, inoltre, spesso è in conflitto con la variabilità spaziale della grandezza misurata: la caratterizzazione idrologica di un sito andrebbe quindi effettuata attraverso la mediazione di una serie di misure realizzate su più pozzetti e a diverse profondità.

Le prove realizzate nella fase di analisi delle cause di perdita di volume nel bilancio tra gli afflussi idrici (precipitazioni) e i deflussi provenienti dalla copertura dell'edificio denominato "Centrale tecnologica" e diretti al rain garden piccolo hanno identificato nelle equazioni di taratura dello stramazzo la fonte di errore. Le prove sperimentali realizzate hanno quindi portato alla determinazione di una nuova equazione per il calcolo delle portate che defluiscono dallo stramazzo. La verifica della strumentazione ha messo inoltre in evidenza che l'idrometro a galleggiante fornisce generalmente valori inferiori rispetto al piezometro; questo è probabilmente dovuto sia al fatto che il galleggiante registra con difficoltà maggiori rispetto al piezometro le piccole variazioni di tirante (millimetriche) che hanno comunque una grande influenza sui volumi finali d'evento, sia al fatto che il piezometro può portare ad alcune sovrastime dovute a sovrappressioni di origine cinetica. Miglioramenti nella misura finale si osservano tarando lo zero idrometrico dei due

strumenti all'inizio delle misurazioni. L'utilizzo di un valore mediato fra i due strumenti sembra comunque una scelta opportuna per la sua applicazione nel calcolo della portata. Le operazioni di taratura dello stramazzo hanno portato alla definizione di un'insieme di due equazioni per il calcolo della portata: l'equazione empirica $Q = 326,61h^{2,17}$ per la stima della portata per carichi inferiori a 5,95 cm e l'equazione teorica $Q = \frac{8}{15} C_d \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) (2gh^5)^{\frac{1}{2}}$ per carichi maggiori. L'utilizzo di due equazioni è dovuto al fatto che l'equazione empirica non può essere utilizzata per carichi superiori in quanto calibrata su un intervallo di valori di carico che non supera i 5 cm. Le differenze tra l'equazione empirica stimata in questo lavoro di tesi e l'equazione empirica precedentemente utilizzata (lavoro di tesi di Brusaferrò, 2012) sono dovute probabilmente alle procedure di raccolta dei dati nel lavoro precedentemente realizzato: l'acqua veniva, infatti, raccolta dopo la vasca presente a valle dello stramazzo e i dati risentivano del suo effetto di laminazione. In questo lavoro, invece, l'acqua è stata raccolta subito in uscita dallo stramazzo evitando errori in tal senso. Inoltre, l'elevato quantitativo di dati raccolti (43 coppie di dati carico-portata) ha permesso di stimare una buona equazione per carichi massimi inferiori a 5 cm, che sono i carichi che permangono per maggior tempo sullo stramazzo e influenzano quindi maggiormente i volumi finali di evento. In conclusione l'applicazione del set di equazioni individuato con questo lavoro di tesi ha dimostrato di apportare un netto miglioramento nella stima dei volumi di acqua che arrivano al rain garden permettendo quindi una maggior precisione alle successive sperimentazioni ed analisi che verranno realizzate su questo sistema.

BIBLIOGRAFIA

Brusaferro D., 2013. *Analisi dei flussi d'acqua nel giardino pluviale di Agripolis.* Tesi, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova.

Coffman L., Winogradoff D., 2007. *The Prince George's County Bioretention Manual.* Program and Planning Division, Department of environmental Resources. The Prince Georges Country, Maryland.

Dietz M.E., Clausen J.C., 2005. *A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment.* University of Connecticut, Department of Natural Resources Management and Engineering. Water, Air, & Soil Pollution.

Endreny T., Collins V., 2009. *Implications of bioretention basin spatial arrangements on stormwater recharge and groundwater mounding.* Ecological Engineering.

Facciorusso J., Madiani C., Vannucchi G., 2011. *Idraulica dei terreni (capitolo 4).* Dispense di Geotecnica, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze.

Gisonni C., Hager W.H., 2013. *Idraulica dei sistemi fognari: Dalla teoria alla pratica.* Springer.

Gregoretto C. *Idraulica (capitolo 5).* Dispense di Idraulica, Dipartimento di Tecnologie Scienze Ambientali e Forestali (TeSAF), Università degli Studi di Padova.

Hager W.H., 1990. *Scharfkantiger Dreieckuberfall [Stramazzi triangolari in parete sottile].* Wasser, Energie, Luft.

Longo S., Petti M., 2006. *Misuratori di portata volumetrica nei canali (capitolo 7).* Misure e controlli idraulici. McGraw-Hill.

Rienznner M., 2011. *Artifici per migliorare la consistenza delle misure con il permeametro di Guelph.* Dipartimento di Ingegneria Agraria, Università degli Studi di Milano.

Soilmoisture equipment corporation. 2008. *Operating instructions, model 2800K1 Guelph Permeameter.*

Simionato D., 2012. *Progettazione, realizzazione e prime valutazioni idrologico - vegetazionali del rain garden di Agripolis.* Tesi, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova (Dott.ssa Lucia Bortolini).

Zhang Z.F., Groenevelt P.H., Parkin G.W., 1998. The well shapefactor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter. *Soil Tillage Res.*

ALLEGATO I – MISURE DI PERMEABILITA'

RAIN GARDEN GRANDE PUNTO **CENTRALE** (carico 5 cm)

Lettura su cilindro INTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H_1	5	cm
Intervallo di tempo	0,5	min
a	3	cm
C_1	0,8032	
X	35,22	
Y	1.16	
α^*	0,36	cm ⁻¹
Rate of fall	0,1167	cm/s
Differenza stabilizzata	3,5	

Tabella 1

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	10.45.00	14,5	-
2	10.45.30	18	3,5
3	10.46.00	21,5	3,5
4	10.46.30	25	3,5
5	10.47.00	28,4	3,4
6	10.47.30	31,8	3,4
7	10.48.00	35,5	3,7
8	10.48.30	38,9	3,4
9	10.49.00	42,5	3,6
10	10.49.30	46,5	4
11	10.50.00	49,3	2,8
12	10.50.30	53	3,7
13	10.51.00	56,5	3,5

Tabella 2

RAIN GARDEN GRANDE PUNTO CENTRALE (carico 10 cm)

Lettura su cilindro INTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H₂	10	cm
Intervallo di tempo	0,166667	min
a	3	cm
C₁	1,2875	
X	35,22	
Y	2.16	
α*	0,36	cm ⁻¹
Rate of fall	0,5917	cm/s
Differenza stabilizzata	5,91666667	

Tabella 3

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	10.53.10	27,5	-
2	10.53.20	33,7	6,2
3	10.53.30	39	5,3
4	10.53.40	44,5	5,5
5	10.53.50	50,6	6,1
6	10.54.00	57,8	7,2
7	10.54.10	63	5,2

Tabella 4

RAIN GARDE GRANDE PUNTO LATERALE (carico 5 cm)

Lettura su cilindro INTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H₁	5	cm
Intervallo di tempo	1	min
a	3	cm
C₁	0,8032	
X	35,22	
Y	2.16	
α*	0,36	cm ⁻¹
Rate of fall	0,0199	cm/s
Differenza stabilizzata	1,192308	

Tabella 5

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	11.21.00	4,5	-
2	11.22.00	5,9	1,4
3	11.23.00	7,1	1,2
4	11.24.00	8,2	1,1
5	11.25.00	9,4	1,2
6	11.26.00	10,6	1,2
7	11.27.00	11,7	1,1
8	11.28.00	13	1,3
9	11.29.00	14,1	1,1
10	11.30.00	15,2	1,1
11	11.31.00	16	0,8
12	11.32.00	17,7	1,7
13	11.33.00	18,8	1,1
14	11.34.00	20	1,2

Tabella 6

RAIN GARDEN GRANDE PUNTO LATERALE (carico 10 cm)

Letture su cilindro ESTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H₂	10	cm
Intervallo di tempo	0,5	min
a	3	cm
C₁	1,2875	
X	35,22	
Y	2.16	
α*	0,36	cm ⁻¹
Rate of fall	0,1258	cm/s
Differenza stabilizzata	3,775	

Tabella 7

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	11.35.00	28,8	-
2	11.35.30	33	4,2
3	11.36.00	37	4
4	11.36.30	41	4
5	11.37.00	44,5	3,5
6	11.37.30	48,3	3,8
7	11.38.00	52	3,7
8	11.38.30	55,4	3,4
9	13.39.00	59	3,6

Tabella 8

RAIN GARDEN PICCOLO PUNTO LATERALE (carico 5 cm)

Lettura su cilindro ESTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H₁	5	cm
Intervallo di tempo	1	min
a	3	cm
C₁	0,8032	
X	35,22	
Y	2.16	
α*	0,36	cm ⁻¹
Rate of fall	0,0111	cm/s
Differenza stabilizzata	0,666667	

Tabella 9

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	12.19.00	4,9	-
2	12.20.00	5,5	0,6
3	12.21.00	6,1	0,6
4	12.22.00	6,8	0,7
5	12.23.00	7,5	0,7
6	12.24.00	8	0,5
7	12.25.00	8,8	0,8
8	12.26.00	9,5	0,7
9	12.27.00	10,2	0,7
10	12.28.00	10,9	0,7

Tabella 10

RAING GARDEN PICCOLO PUNTO LATERALE (carico 10 cm)

Lettura su cilindro ESTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H₂	10	cm
Intervallo di tempo	1	min
a	3	cm
C₁	1,2875	
X	35,22	
Y	2.16	
α^*	0,36	cm ⁻¹
Rate of fall	0,0224	cm/s
Differenza stabilizzata	1,34375	

Tabella 11

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	12.29.00	15,75	-
2	12.30.00	17,35	1,6
3	12.31.00	18,7	1,35
4	12.32.00	20	1,3
5	12.33.00	21,4	1,4
6	12.34.00	22,7	1,3
7	12.35.00	23,8	1,1
8	12.36.00	25,2	1,4
9	12.37.00	26,5	1,3

Tabella 12

RAIN GARDEN PICCOLO PUNTO CENTRALE (carico 5 cm)

Lettura su cilindro ESTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H₁	5	cm
Intervallo di tempo	1	min
a	3	cm
C₁	0,8032	
X	35,22	
Y	2.16	
α*	0,36	cm ⁻¹
Rate of fall	0,0107	cm/s
Differenza stabilizzata	0,64	

Tabella 13

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	12.52.00	4,5	-
2	12.53.00	4,9	0,4
3	12.54.00	5,6	0,7
4	12.55.00	6,4	0,8
5	12.56.00	7,1	0,7
6	12.57.00	7,8	0,7
7	12.58.00	8,4	0,6
8	12.59.00	9,1	0,7
9	13.00.00	9,7	0,6
10	13.01.00	10,3	0,6
11	13.02.00	10,9	0,6

Tabella 14

RAIN GARDEN PICCOLO PUNTO CENTRALE (carico 10 cm)

Lettura su cilindro ESTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H₂	10	cm
Intervallo di tempo	1	min
a	3	cm
C₁	1,2875	
X	35,22	
Y	2.16	
α^*	0,36	cm ⁻¹
Rate of fall	0,0169	cm/s
Differenza stabilizzata	1,014286	

Tabella 15

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	13.04.00	16,1	-
2	13.05.00	17,2	1,1
3	13.06.00	18,2	1
4	13.07.00	19,1	0,9
5	13.08.00	20,15	1,05
6	13.09.00	21,2	1,05
7	13.10.00	22,2	1
8	13.11.00	23,2	1

Tabella 16

SUOLO NATURALE (punto di rilievo 1, carico 5 cm)

Lettura su cilindro ESTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H₁	5	cm
Intervallo di tempo	1	min
a	3	cm
C₁	0,8032	
X	35,22	
Y	2.16	
α^*	0,12	cm ⁻¹
Rate of fall	0,0344	cm/sec
Q₁	1,2101	
K_{fs} (One Head Analysis)	0,0022	cm/s
K_{fs} (One Head Analysis)	79,2344	mm/ora
Differenza stabilizzata	2,061538462	

Tabella 17

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	13.50.00	6,1	-
2	13.51.00	8,4	2,3
3	13.52.00	10,5	2,1
4	13.53.00	12,5	2
5	13.54.00	14,6	2,1
6	13.55.00	16,5	1,9
7	13.56.00	18,7	2,2
8	13.57.00	20,5	1,8
9	13.58.00	22,7	2,2
10	13.59.00	24,7	2
11	14.00.00	26,8	2,1
12	14.01.00	28,9	2,1
13	14.02.00	30,9	2
14	14.03.00	32,9	2

Tabella 18

SUOLO NATURALE (punto di rilievo 1, carico 10 cm)

Letture su cilindro ESTERNO		
Profondità del pozzo	15	cm
H₂	10	cm
Intervallo di tempo	1	min
a	3	cm
C₁	1,2875	
X	35,22	
Y	2,16	
α^*	0,12	cm ⁻¹
Rate of fall	0,0270	cm/sec
Q₁	0,9502	
K_{fs}	0,0010	cm/s
K_{fs}	37,0636	mm/ora
Differenza stabilizzata	1,61875	

Tabella 19

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	14.04.00	34,7	-
2	14.05.00	36,2	1,5
3	14.06.00	37,8	1,6
4	14.07.00	39,3	1,5
5	14.08.00	41	1,7
6	14.09.00	42,55	1,55
7	14.10.00	44,3	1,75
8	14.11.00	46	1,7
9	14.12.00	47,65	1,65

Tabella 20

SUOLO NATURALE (punto di rilievo 2, carico 5 cm)

Lettura su cilindro esterno		
Profondità del pozzo	25	cm
H_1	5	cm
Intervallo di tempo	1	min
a	3	cm
C_1	0,8032	
X	35,22	
Y	2.16	
α^*	0,12	cm ⁻¹
Rate of fall	0,0092	cm/sec
Q_1	0,3229	
K_{fs}	0,0006	cm/s
K_{fs}	21,1390	mm/ora

Tabella 21

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	10.44	3	-
2	10.45	5,3	2,3
3	10.46	7,3	2
4	10.47	9,1	1,8
5	10.48	10,8	1,7
6	10.49	12,4	1,6
7	10.50	13,9	1,5
8	10.51	15,4	1,5
9	10.52	16,9	1,5
10	10.53	18,2	1,3
11	10.54	19,5	1,3
12	10.55	20,8	1,3
13	10.56	22,1	1,3
14	10.57	23,3	1,2
15	10.58	24,4	1,1
16	10.59	25,6	1,2
17	11.00	26,7	1,1
18	11.01	27,8	1,1
19	11.02	28,8	1
20	11.03	29,9	1,1
21	11.04	30,9	1
22	11.05	31,9	1
23	11.06	32,9	1
24	11.07	33,9	1
25	11.08	34,9	1
26	11.09	35,8	0,9
27	11.10	36,7	0,9

28	11.11	37,5	0,8
29	11.12	38,4	0,9
30	11.13	39,3	0,9
31	11.14	40,1	0,8
32	11.15	40,9	0,8
33	11.16	41,75	0,85
34	11.17	42,6	0,85
35	11.18	43,4	0,8
36	11.19	44,3	0,9
37	11.20	44,9	0,6
38	11.21	45,5	0,6
39	11.22	46,4	0,9
40	11.23	47,2	0,8
41	11.24	47,9	0,7
42	11.25	48,6	0,7
43	11.26	49,3	0,7
44	11.27	50,1	0,8
45	11.28	50,8	0,7
46	11.29	51,5	0,7
47	11.30	52,2	0,7
48	11.31	52,85	0,65
49	11.32	53,5	0,65
50	11.33	54,2	0,7
51	11.34	54,7	0,5
52	11.35	55,3	0,6
53	11.36	55,9	0,6
54	11.37	56,45	0,55
55	11.38	57	0,55
56	11.39	57,6	0,6
57	11.40	58,2	0,6
58	11.41	58,8	0,6
59	11.42	59,3	0,5
60	11.43	59,85	0,55
61	11.44	60,4	0,55
62	11.45	61	0,6

Tabella 22

SUOLO NATURALE (punto di rilievo 3, carico 5 cm)

Lettura su cilindro esterno		
Profondità del pozzo	25	cm
H₁	5	cm
Intervallo di tempo	3	min
a	3	cm
C₁	0,8032	
X	35,22	
Y	2.16	
α*	0,12	cm ⁻¹
Rate of fall	0,0039	cm/sec
Q₁	0,1370	
K_{fs}	0,0002	cm/s
K_{fs}	8,9681	mm/ora

Tabella 23

N° lettura	Tempo	Livello (cm)	Differenza (cm)
1	12.03	5,5	-
2	12.06	9	3,5
3	12.09	11,8	2,8
4	12.12	14,1	2,3
5	12.15	16,2	2,1
6	12.18	18,1	1,9
7	12.21	19,7	1,6
8	12.24	21,3	1,6
9	12.27	22,7	1,4
10	12.30	24,1	1,4
11	12.33	25,3	1,2
12	12.36	26,6	1,3
13	12.39	27,6	1
14	12.42	28,7	1,1
15	12.45	29,6	0,9
16	12.48	30,5	0,9
17	12.51	31,4	0,9
18	12.54	32,2	0,8
19	12.57	33	0,8
20	13.00	33,8	0,8
21	13.03	34,5	0,7
22	13.06	35,3	0,8
23	13.09	36	0,7
24	13.12	36,6	0,6
25	13.15	37,3	0,7
26	13.18	38	0,7
27	13.21	38,7	0,7
28	13.24	39,4	0,7

Tabella 24

