



Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile
Graduate School in Civil Engineering

Sede: Facoltà di Ingegneria - Università di Pavia - via Ferrata 1 – 27100 Pavia – Italy

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile XX Ciclo

**Il controllo degli scarichi fognari
in tempo di pioggia mediante
vasche di prima pioggia:
aspetti progettuali e gestionali**

Tesi di Dottorato
Dott. Ing. Sara Todeschini

Relatore: Prof. Sergio Papiri

Controrelatore: Prof. Carlo Ciaponi

Ottobre 2007

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile

Settore:	Ingegneria
Sede Amministrativa non consortile:	Università degli Studi di PAVIA
Durata del dottorato:	3 anni
Periodo formativo estero:	come previsto dal regolamento del Dottorato di Ricerca
Numero minimo di corsi:	6

Organizzazione del corso

Il dottorato di ricerca in Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Pavia è stato istituito nell'anno accademico 1994/95 (X ciclo). Il corso consente al dottorando di scegliere tra quattro curricula: Idraulico, Sanitario, Sismico e Strutturale. Egli svolge la propria attività di ricerca rispettivamente presso il Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale per i primi due curricula, quello di Meccanica Strutturale per i rimanenti. Durante i primi due anni sono previsti almeno sei corsi. Il Collegio dei Docenti, composto da professori dei due Dipartimenti (e da esterni cooptati in mancanza di competenze interne), organizza i corsi con lo scopo di fornire allo studente di dottorato opportunità di approfondimento su alcune delle discipline di base. Corsi e seminari vengono tenuti da docenti di Università nazionali ed estere. Il Collegio dei Docenti, cui spetta la pianificazione della didattica, si è orientato ad attivare ad anni alterni corsi comuni sui seguenti temi:

- Meccanica dei solidi e dei fluidi.
- Metodi numerici per la meccanica dei solidi e dei fluidi.
- Rischio strutturale e ambientale.
- Metodi sperimentali per la meccanica dei solidi e dei fluidi.
- Intelligenza artificiale

più corsi specifici di indirizzo.

Al termine dei corsi del primo anno il Collegio dei Docenti assegna al dottorando un tema di ricerca da sviluppare sotto forma di tesina entro la fine del secondo anno; il tema, non necessariamente legato all'argomento della tesi finale, è di norma coerente con il curriculum, scelto dal dottorando.

All'inizio del secondo anno il dottorando discute con il Coordinatore l'argomento della tesi di dottorato, la cui assegnazione definitiva viene deliberata dal Collegio dei Docenti.

Alla fine di ogni anno i dottorandi devono presentare una relazione particolareggiata (scritta e orale) sull'attività svolta. Sulla base di tale relazione il Collegio dei Docenti, "previa valutazione della assiduità e dell'operosità dimostrata dall'iscritto", ne propone al Rettore l'esclusione dal corso o il passaggio all'anno successivo.

Il dottorando può svolgere attività di ricerca sia di tipo teorico che sperimentale, grazie ai laboratori di cui entrambi i Dipartimenti dispongono, nonché al Laboratorio Numerico di Ingegneria delle Infrastrutture.

Il "Laboratorio didattico sperimentale" del Dipartimento di Meccanica Strutturale dispone di:

- una tavola vibrante che consente di effettuare prove dinamiche su prototipi strutturali;
- opportuni sensori e un sistema di acquisizione dati per la misura della risposta strutturale;
- strumentazione per la progettazione di sistemi di controllo attivo e loro verifica sperimentale;
- strumentazione per la caratterizzazione dei materiali, attraverso prove statiche e dinamiche.

Il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dispone di:

- un circuito in pressione per effettuare simulazioni di moto vario;
- un tunnel idrodinamico per lo studio di problemi di cavitazione,
- canalette per lo studio delle correnti a pelo libero.

Recapiti

Dipartimento di Meccanica Strutturale

Via Ferrata, 1 – 27100 Pavia – Italia

Tel. +39.0382.985450 – Fax +39.0382.528422

Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale

Via Ferrata, 1 – 27100 Pavia – Italia

Tel. +39.0382.985300 – Fax +39.0382.985589

Coordinatore

CASCIATI Fabio – Professore Ordinario – ICAR/08

Dipartimento di Meccanica Strutturale

Via Ferrata, 1 – 27100 Pavia – Italia

Tel. +39.0382.985458 – Fax +39.0382.528422

E-mail: fabio@dipmec.unipv.it

Collegio dei Docenti

CAPODAGLIO Andrea Giuseppe – Professore Associato – ICAR/03

CASCIATI Fabio – Professore Ordinario – ICAR/08 (Coordinatore)

CAUVIN Aldo – Professore Ordinario – ICAR/09*

CIAPONI Carlo – Professore Straordinario – ICAR/02

FARAVELLI Lucia – Professore Ordinario – ICAR/08

FUGAZZA Mario – Professore Associato – ICAR/02

GOBETTI Armando – Professore Associato – ICAR/08

MOISELLO Ugo – Professore Ordinario – ICAR/02

PAPIRI Sergio – Professore Associato – ICAR/02

SALA Roberto – Professore Associato – ING – IND/08

MARCELLINI Alberto – Dirigente di Ricerca, CNR – Milano.

* Deceduto il 30 gennaio 2007

Elenco delle tesi

Battaini Marco (X Ciclo)	“Sistemi strutturali controllati: progettazione e affidabilità”
Mariani Claudia (X Ciclo)	“Problemi di ottimizzazione per strutture bidimensionali anisotrope”
Negri Antonella (X Ciclo)	“Stima delle perdite idrologiche nei bacini di drenaggio urbani”
Pisano Aurora Angela (XI Ciclo)	“Structural System Identification: Advanced Approaches and Applications”
Saltalippi Carla (XI Ciclo)	“Preannuncio delle piene in tempo reale nei corsi d'acqua naturali”
Barbieri Eugenio (XI Ciclo)	“Termofluid dynamics and topology optimisation of an active thermal insulation structure”
Barbolini Massimiliano (XII Ciclo)	“Dense snow avalanches: computational models, hazard mapping and related uncertainties”
Espa Paolo (XII Ciclo)	“Moti atmosferici generati da forze di galleggiamento: simulazioni numeriche e studio su modello fisico”
Petrini Lorenza (XII Ciclo)	“Shape Memory Alloys: Modelling the Martensitic Phase Behaviour for Structural Engineering Exploitation”
Podestà Stefano (XIV Ciclo)	“Risposta sismica di antichi edifici religiosi in muratura: sviluppo di nuovi modelli per l'analisi di vulnerabilità”
Sturla Daniele (XIV Ciclo)	“Simulazioni lagrangiane di flussi rapidamente variati nell'approssimazione di acque poco profonde”
Marazzi Francesco (XV Ciclo)	“Semi-active control of civil structures: implementation aspects”

- Nascimbene Roberto (XV Ciclo) “Sail Modelling for Maximal Speed Optimum Design”
- Giudici Massimo (XVI Ciclo) “Progettazione in regime non lineare di strutture in CAP a cavi aderenti e non aderenti”
- Matteo Mutti (XVI Ciclo) “Stability analysis of stratified three-phase flows in pipes”
- Petaccia Gabriella (XVI Ciclo) “Propagazione di onde a fronte ripido per rottura di sbarramenti in alvei naturali”
- Casciati Sara (XVII Ciclo) “Damage Detection and Localization in the Space of the Observed Variables”
- D’Amico Tiziana (XVI Ciclo) “Ricerca e Sviluppo di Metodologie Diagnostiche per il Recupero di Edifici monumentali: Prove Vibro-acustiche sul Tufo”
- Domaneschi Marco (XVIII Ciclo) “Structural Control of Cable-stayed and Suspended Bridges”
- Barco Olga Janet (XVII Ciclo) “Modeling the quantity and quality of storm water runoff using SWMM”
- Boguniewicz Joanna (XVIII Ciclo) “Integration of monitoring and modelling in the surface water state evaluation process of a sub-Alpine lake watershed”
- Bornatici Laura (XVIII Ciclo) “L’impiego degli algoritmi generici per la risoluzione dei problemi di progetto di reti di distribuzione idrica”
- Collivignarelli Maria Cristina (XVIII Ciclo) “Trattamento di rifiuti liquidi mediante processi biologici aerobici termofili e mesofili e processi avanzati di ossidazione chimica in diversa sequenza”
- Ráduly Botond (XVIII Ciclo) “Artificial neural network applications in urban water quality modeling”
- Antoci Carla (XVIII Ciclo) “Simulazione numerica dell’interazione fluido-struttura con la tecnica SPH”

- Cappabianca Federica (XVIII Ciclo) “La valutazione del rischio valanghivo attraverso la modellazione dinamica”
- Callegari Arianna (XVIII Ciclo) “Applicazione di tecnologie di monitoraggio on-line per la gestione dei processi di trattamento reflui”
- Gazzola Elisa (XVIII Ciclo) “Applicazione di processi biologici anaerobici al trattamento di acque reflue e fanghi di depurazione: aspetti tecnici ed energetici”
- Giuliano Fabio (XIX Ciclo) “Performance Based Design and Structural Control for Cable Suspension Bridge”
- Falappi Stefano (XIX Ciclo) “Simulazioni numeriche di flussi di fluidi viscosi e materiali granulari con la tecnica SPH”
- Zanaboni Sabrina (XIX Ciclo) “Pre-trattamento di rifiuti liquidi industriali mediante ossidazione ad umido”

Indice

Abstract	pag. 1
-----------------	--------

Introduzione	pag. 3
---------------------	--------

Capitolo 1

La qualità delle acque fognarie in tempo di pioggia

1.1 Generalità	pag. 7
1.2 Qualità delle acque fognarie in tempo asciutto	pag. 8
1.2.1 Il liquame domestico	pag. 8
1.2.2 I liquami industriali	pag. 11
1.3 Qualità delle acque meteoriche	pag. 11
1.4 Fenomeni e fattori che governano la qualità delle acque fognarie in tempo di pioggia	pag. 14
1.4.1 Accumulo dei sedimenti sulle superfici del bacino	pag. 14
1.4.2 Lavaggio delle superfici operato dalla pioggia	pag. 18
1.4.3 Accumulo dei sedimenti nel sistema di drenaggio	pag. 20
1.4.4 Trasporto degli inquinanti nel sistema di drenaggio	pag. 20
1.5 Uso del suolo e qualità delle acque meteoriche di dilavamento	pag. 23
1.6 Qualità delle acque fognarie in tempo di pioggia	pag. 31
1.6.1 Sistemi fognari unitari	pag. 32
1.6.2 Sistemi fognari pluviali	pag. 46

Capitolo 2

I sedimenti fognari

2.1 Generalità	pag. 51
2.2 Origine e natura	pag. 51
2.3 Granulometria	pag. 53
2.4 Coesione e grado di consolidamento	pag. 57
2.5 Comportamento reologico	pag. 58

Capitolo 3

Le strategie di controllo della qualità degli scarichi fognari in tempo di pioggia

3.1 Generalità	pag. 59
3.2 Obiettivi del controllo degli scarichi fognari in tempo di pioggia	pag. 60
3.3 Sistemi non strutturali di controllo qualitativo	pag. 63
3.4 Sistemi strutturali di controllo qualitativo	pag. 67
3.4.1 Controllo mediante scaricatori di piena	pag. 69
3.4.2 Controllo mediante scaricatori di piena e vasche di prima pioggia	pag. 71
3.4.3 Controllo mediante trattamento in situ	pag. 71

Capitolo 4

Il controllo degli scarichi fognari mediante vasche di prima pioggia

4.1 Generalità	pag. 73
4.2 Vasche in linea e fuori linea	pag. 74
4.3 Vasche di transito e di cattura	pag. 76
4.4 Modalità di svuotamento	pag. 77
4.5 Criteri di dimensionamento	pag. 80
4.5.1 Schemi impiantistici e sistemi fognari	pag. 81
4.5.2 Portate di inizio sfioro degli scaricatori e volumi utili delle vasche di prima pioggia	pag. 84
4.5.3 Influenza delle caratteristiche idrologiche del bacino	pag. 88
4.5.4 Modalità di svuotamento delle vasche di prima pioggia	pag. 89

Capitolo 5

Aspetti progettuali e gestionali delle vasche di prima pioggia

5.1 Generalità	pag. 93
5.2 Schemi impiantistici	pag. 94
5.3 Forme delle vasche	pag. 97
5.4 Sistemi di alimentazione	pag. 98
5.5 Sistemi di svuotamento	pag. 104
5.6 Sistemi di lavaggio	pag. 110
5.6.1 Sistemi di lavaggio per vasche rettangolari	pag. 111
5.6.2 Sistemi di lavaggio per vasche circolari	pag. 137

5.7 Aspetti gestionali	pag. 142
5.7.1 Modalità di svuotamento delle vasche	pag. 144
5.7.2 Aspetti gestionali dei sistemi di pulizia	pag. 146

Capitolo 6

La modellazione dell'erosione e del trasporto dei sedimenti fognari

6.1 Generalità	pag. 147
6.2 Erosione e trasporto di sedimenti non coesivi	pag. 148
6.3 Erosione e trasporto di sedimenti coesivi	pag. 154
6.4 Erosione e trasporto di sedimenti di materiale coesivo e non coesivo	pag. 159
6.5 Erosione e trasporto dei sedimenti in una vasca di prima pioggia	pag. 175

Capitolo 7

Codice di calcolo sviluppato

7.1 Generalità	pag. 177
7.2 Modello matematico	pag. 177
7.3 Integrazione delle equazioni di governo	pag. 181
7.3.1 Metodo numerico alle differenze finite	pag. 182
7.3.2 Schema di MacCormack	pag. 184
7.3.3 Esistenza unicità e convergenza della soluzione numerica	pag. 187
7.3.4 Viscosità artificiale	pag. 189

7.3.5 Correzioni TVD	pag.191
7.3.6 Condizioni al contorno e iniziali	pag.195

Capitolo 8

Validazione del codice di calcolo

8.1 Generalità	pag.203
8.2 Soluzione analitica di Riemann	pag.204
8.3 Prove sperimentali al DICA di Catania (Campisano e altri, 2004)	pag.205
8.4 Prove sperimentali al Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale di Pavia	pag.207
8.4.1 Descrizione dell'apparato sperimentale	pag.207
8.4.2 Validazione idraulica	pag.208
8.4.3 Prove con sabbia	pag.215
8.4.3.1. Prove con sabbia (tipologia 1)	pag.216
8.4.3.2. Prove con sabbia (tipologia 2)	pag.216
8.4.3.3. Prove con sabbia (tipologia 3)	pag.217
8.4.4 Prove con sabbia e argilla	pag.219
8.4.4.1. Prove con sabbia (tipologia 1) e argilla 7,5%	pag.220
8.4.4.2. Prove con sabbia (tipologia 2) e argilla 7,5%	pag.220
8.4.4.3. Prove con sabbia (tipologia 3) e argilla 7,5%	pag.221
8.4.4.4. Prove con sabbia (tipologia 1) e argilla 15%	pag.221
8.4.4.5. Prove con sabbia (tipologia 2) e argilla 15%	pag.222
8.4.4.6. Prove con sabbia (tipologia 3) e argilla 15%	pag.222
8.4.4.7. Prove con sabbia (tipologia 1) e argilla 25%	pag.223
8.4.4.8. Prove con sabbia (tipologia 2) e argilla 25%	pag.223

8.4.4.9. Prove con sabbia (tipologia 3) e argilla 25%	pag.224
---	---------

Conclusioni	pag.227
--------------------	---------

Bibliografia	pag.233
---------------------	---------

Abstract

This Ph.D. thesis is about design and management of adequate and properly functioning stormwater storage tanks for the environmental protection of the receiving water bodies.

The thesis is developed into eight chapters:

- Quality of stormwater runoff: several international studies regarding quality of stormwater runoff are presented. The characterization of contaminants in stormwater runoff in the impervious areas is a complex problem that has become an increasingly important environmental issue for urban communities. Several studies, often based on quite thorough monitoring campaigns, are presented to assess the pollution fluxes going through separate and combined sewer networks and to quantify the impact of urban wet weather discharges in the receiving water. Data and analyses from the monitoring campaigns carried out during the Ph.D. at Cascina Scala and Bivio Vela experimental catchments in Pavia and at Cremona toll gate area are presented.
- Sewer sediments: the main characteristics of sewer sediments are described: origin and nature; grain size; rheology. Data from the experimental campaign carried out during the Ph.D. in the combined sewer system of Pavia are presented.
- Stormwater quality control systems: different stormwater quality control measures are described and their advantages/disadvantages are presented.
- Stormwater storage tanks for control of sewer discharges: studies and simulations on efficacy of stormwater storage tanks are

presented. The efficacy to reduce pollutant mass to the receiving water bodies is evaluated for different specific capacities for impervious catchment, drainage basins, filling and emptying cycles, sewer systems, insertion in the sewer system.

- Design and management of stormwater storage tanks: design criteria of stormwater storage tanks are specified. Also technical aspects of equipments are discussed.
- Modelling of erosion and transport of sewer sediments: recent studies on sewer sediments erosion and transport are presented. The studies are carried out both in laboratory and in field considering cohesive and non-cohesive material. From these studies a model describing the scouring effects of flushing waves on sewer sediments deposits at the bottom of a stormwater storage tank is derived.
- The numerical code: the model solves the *De Saint Venant* equations describing unsteady flow in open channel and the continuity equation for the conservation of the sediment mass (*Exner* equation). The *MacCormack* explicit finite difference scheme is introduced. The sediment erosion relationship of Mitchener e Torfs (1996) is included in the computations. The properties of stability, consistency convergence, and initial - boundary conditions are described.
- Validation of the numerical code: The computed results are compared with the available experimental data obtained on the laboratory channel of the Department of Hydraulic and Environmental Engineering of Pavia University. The first set of experiments is developed without sediments and the water levels determined during the flushing processes are monitored by a digital video-camera. The second set of experiments is carried out with uniform layers of sediments at the bottom of the channel and the effects on sediment beds produced by flushes are analysed. The computed results are also compared with the Riemann analytical solution and with experimental data found in literature.

Introduzione

Come è stato ampiamente dimostrato in numerosi studi sperimentali, pubblicati a partire dagli anni settanta, le acque meteoriche di dilavamento di aree urbanizzate sono molto contaminate e possono determinare un rilevante impatto negativo sulla qualità del corpo idrico ricettore.

Allo scopo di contribuire alla caratterizzazione della qualità delle acque meteoriche di dilavamento di superfici urbanizzate e allo studio dei fenomeni che governano la dinamica degli inquinanti veicolati in tempo di pioggia nel sistema bacino - rete fognaria, nel corso del dottorato, sono state condotte delle campagne di monitoraggio presso il bacino urbano residenziale di Cascina Scala a Pavia, il sito a destinazione produttiva del Bivio Vela di Pavia e l'area di pertinenza della barriera a pedaggio di Cremona lungo l'autostrada A21 Brescia – Piacenza.

I convenzionali criteri progettuali dei sistemi fognari si basano sull'ipotesi che le acque meteoriche abbiano un livello di contaminazione trascurabile. Sulla base di questa errata presunzione, nei sistemi fognari separati, le acque meteoriche raccolte dalla fognatura pluviale sono scaricate direttamente nel ricettore senza trattamento e, nei sistemi fognari unitari, proprio contando sull'effetto di diluizione operato dall'acqua meteorica, gli scaricatori di piena sono dimensionati assegnando alla portata di inizio sfioro un valore pari ad un multiplo, in genere compreso fra 2 e 5, della portata media di tempo asciutto.

Numerose ricerche hanno però dimostrato l'inadeguatezza del controllo ambientale conseguibile con questo approccio convenzionale; in particolare, è stato bene evidenziato che le portate meteoriche conferite al trattamento

attraverso scaricatori di piena dimensionati secondo i criteri convenzionali sono troppo piccole per garantire un'efficace riduzione dei carichi inquinanti scaricati nei ricettori (Mignosa et alii, 1991; Papiri, 2001). D'altra parte, l'aumento del valore della portata di inizio sfioro ai fini di una migliore protezione del ricettore sarebbe difficilmente praticabile, in quanto determinerebbe all'ingresso degli impianti di depurazione portate incompatibili con la loro capacità di trattamento.

La necessità di inviare al trattamento un'aliquota importante della massa di inquinanti veicolata dalle acque meteoriche di dilavamento, senza aumentare le portate usualmente addotte in tempo di pioggia agli impianti di depurazione, suggerisce, quindi, come soluzione atta ad una migliore tutela del ricettore, di accoppiare agli scaricatori di piena appositi sistemi di invaso, nei quali possano essere accumulate le prime acque di pioggia, alle quali è normalmente associata una frazione importante della massa di inquinanti.

Questi invasi, detti *vasche di prima pioggia*, hanno la funzione di accumulare, fino al loro completo riempimento, i deflussi con portata eccedente il valore di inizio sfioro, per inviarli poi alla depurazione con portate compatibili con l'impianto.

Le vasche di prima pioggia rappresentano un intervento strutturale molto efficace nell'ambito del controllo della qualità degli scarichi fognari in tempo di pioggia. Tuttavia, ad oggi, per questi manufatti, non esistono consolidati criteri di progettazione che consentano di mettere in relazione l'entità dei parametri di dimensionamento con l'efficacia che si intende conseguire in termini di riduzione del carico inquinante scaricato, anche con riferimento alle specifiche caratteristiche dell'area servita. Ulteriori elementi di incertezza riguardano l'incidenza, sull'efficacia delle vasche, esercitata dalle modalità del loro inserimento nell'ambito del sistema fognario, nonché dalle modalità gestionali relative al loro svuotamento.

Al fine di giungere a una definizione dei criteri di progetto di questi interventi strutturali funzionale agli obiettivi prestazionali attesi, in questa tesi sono stati condotti studi e simulazioni, con particolare riferimento alla pluviometria di Pavia, per quantificare i benefici conseguibili con l'impiego

delle vasche di prima pioggia, in funzione della loro capacità specifica ($\text{m}^3/\text{ha}_{\text{imp}}$), della modalità di inserimento nel sistema fognario (in linea o fuori linea), nonché della modalità di alimentazione (di transito o di cattura) e di svuotamento (in continuo o intermittente).

Per quanto riguarda i criteri progettuali e gli aspetti tecnico gestionali delle vasche di prima pioggia sono stati esaminati i differenti schemi impiantistici di inserimento nella rete fognaria e le possibili modalità di alimentazione, di svuotamento e di pulizia del fondo precisando gli aspetti tipologici e costruttivi dei manufatti. Inoltre, dal momento che la rimozione dei sedimenti costituisce un intervento essenziale di manutenzione delle vasche di raccolta delle acque di prima pioggia, sono state discusse le prestazioni di ciascun sistema di pulizia in termini di affidabilità meccanica, facilità di installazione e di rimozione in caso di manutenzione straordinaria, costo, richiesta d'acqua oltre a quella conferita dal sistema fognario e consumo di energia elettrica.

Infine, la tesi ha indagato i meccanismi di erosione e trasporto dei sedimenti fognari connessi a un'onda di lavaggio del fondo di una vasca di prima pioggia.

Per questo aspetto, dapprima sono state esaminate, avvalendosi sia di dati di letteratura, sia di alcuni dati desumibili da esperienze condotte durante il dottorato, le principali caratteristiche dei sedimenti fognari con particolare riferimento alla loro granulometria, coesione, grado di consolidamento e comportamento reologico. Successivamente, sono stati analizzati i più recenti studi teorici e sperimentali finalizzati allo studio dell'erosione e del trasporto dei sedimenti fognari. Infine, dopo aver individuato un modello opportuno per descrivere il lavaggio del fondo di una vasca di prima pioggia, è stato sviluppato un codice numerico in ambiente Matlab.

Il codice riproduce una corrente non stazionaria accoppiata a un letto mobile in forma monodimensionale. Le equazioni complete del De Saint Venant per l'acqua e l'equazione di continuità dei sedimenti sono risolte simultaneamente mediante lo schema esplicito del secondo ordine di precisione di MacCormack. La velocità di erosione dei sedimenti viene descritta mediante il modello proposto da Mitchener e Torfs (1996), adatto ai sedimenti coesivi caratterizzati da un processo di erosione di massa (Metha, 1991).

La validazione del codice è stata condotta sia mediante un confronto con la soluzione analitica del problema di Riemann, sia mediante le evidenze sperimentali di alcune prove di laboratorio in canalette a geometria regolare con alveo prismatico e pendenza del fondo costante. Le evidenze sperimentali fanno riferimento sia a prove su modello fisico presenti nella letteratura scientifica sia a prove effettuate nel corso del dottorato presso il Laboratorio di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università di Pavia.

Per quanto riguarda le prove condotte nel corso del dottorato, alcune sono state svolte con sola acqua per validare il codice dal punto di vista idraulico; altre stendendo uno strato uniforme di sedimenti (sabbie con granulometrie differenti o miscele di sabbia e argilla) sul fondo della canaletta per studiare i fenomeni di erosione e trasporto connessi all'onda di lavaggio generata dall'apertura repentina di una paratoia a sollevamento verticale.

Conclusioni

Le determinazioni analitiche sui campioni di liquame fognario prelevati in tempo di pioggia nel corso delle campagne di monitoraggio presso il bacino urbano residenziale di Cascina Scala a Pavia, il sito a destinazione produttiva del Bivio Vela di Pavia e l'area di pertinenza della barriera a pedaggio di Cremona confermano l'elevato grado di inquinamento delle acque meteoriche di dilavamento. Le sostanze inquinanti veicolate dai deflussi meteorici sovente superano (nella maggior parte dei casi nei deflussi connessi alla prima parte degli eventi di pioggia, ma talvolta anche per l'intera durata dell'evento) i limiti stabiliti dal D.Lgs. 152/2006 per lo scarico in acque superficiali e per lo scarico sul suolo.

Questi risultati confermano l'inadeguatezza del controllo ambientale tradizionale basato sull'assunzione che le acque meteoriche abbiano un livello di contaminazione trascurabile e avvalorano l'attività di ricerca sviluppata in questa tesi che ha consentito di trarre alcune conclusioni che possono utilmente informare la progettazione e la gestione dei sistemi fognari e delle opere strutturali di controllo della qualità delle acque meteoriche di dilavamento: gli scaricatori di piena e le vasche di prima pioggia.

In particolare, gli studi e le simulazioni condotti con riferimento ai dati pluviometrici di Pavia hanno ben evidenziato che ai fini del controllo dell'impatto qualitativo sul corpo idrico ricettore, contrariamente all'opinione di vari addetti ai lavori, il sistema separato con scarico libero delle acque meteoriche presenta prestazioni inferiori rispetto al sistema unitario con controllo attuato mediante semplici scaricatori di piena. Questo tipo di

controllo, indipendentemente dal sistema fognario in cui è applicato, è comunque inadeguato per perseguire una significativa riduzione del carico inquinante scaricato in tempo di pioggia, a meno di non ricorrere a valori della portata di inizio sfioro decisamente elevati, dell'ordine di 10 volte la portata nera media nei sistemi unitari e dell'ordine di 5 l/(s ha_{imp}) nei sistemi pluviali. Queste portate, incompatibili con le tradizionali capacità di trattamento degli impianti di depurazione, molto spesso non creano problemi di compatibilità idraulica lungo la rete dove, quindi, si può ottenere un efficace controllo degli scarichi meteorici dimensionando opportunamente gli scaricatori di piena. Nella sezione finale della fognatura, in testa all'impianto di depurazione, dove è invece necessario limitare la portata in ingresso all'impianto, solo l'impiego di vasche di prima pioggia, adeguatamente dimensionate e gestite, consente una significativa riduzione degli indicatori di impatto (massa inquinante scaricata, numero annuo degli scarichi, concentrazione media e concentrazione massima degli inquinanti scaricati). Con questi presidi, l'impatto sul ricettore è pressoché identico tra sistemi unitari e separati dotati di attrezzature (scaricatori e vasche) analoghe; ne consegue che gli aspetti relativi ad una migliore tutela ambientale non possono costituire un argomento determinante nella scelta fra i due diversi sistemi fognari.

Per quanto riguarda le possibili scelte circa l'inserimento delle vasche nell'ambito della fognatura, l'efficacia delle vasche in linea e di quelle fuori linea è, a parità di volume, sostanzialmente analoga. Decisamente superiore è, invece, il rendimento offerto dalle vasche di cattura (con miscelazione nulla o trascurabile), rispetto a quelle di transito (con miscelazione totale o comunque rilevante).

Gli studi condotti mostrano che il valore ottimale del volume da assegnare alle vasche è compreso tra 25÷50 m³/ha_{imp} ; la scelta all'interno di questi valori è legata al beneficio che si intende conseguire e ai valori adottati per la portata di inizio sfioro dello scaricatore di piena accoppiato alla vasca (nelle vasche fuori linea) o per la portata massima controllata dalla bocca di efflusso (nelle vasche in linea). Per la scelta del valore più opportuno, utili indicazioni, seppur

ancora non generalizzabili, possono essere tratte dagli abachi ricavati mediante simulazione di lunghe serie di eventi pluviometrici.

Per quanto riguarda le modalità di svuotamento, oltre allo svuotamento in continuo semplicemente controllato da una bocca di efflusso (schema tipico delle vasche in linea), si può pensare di adottare sistemi più complessi (supportati da apparati di misura e di comando automatico e/o temporizzato), con lo scopo di ridurre i volumi idrici inviati alla depurazione, senza sacrificare in modo significativo l'efficacia del controllo. Propedeutico all'analisi delle possibili modalità di svuotamento della vasca (e delle connesse implicazioni tecnologiche), è l'approfondimento di un criterio che stabilisca quando due eventi meteorici debbano essere considerati distinti agli effetti della necessità di intercettazione delle acque di prima pioggia. Per la definizione di questo criterio, che peraltro assumerebbe anche un'importante valenza legale nell'ambito delle normative che le Regioni dovrebbero approntare, nel corso del dottorato sono stati quantificati su base probabilistica mediante simulazione gli effetti delle possibili opzioni in termini di impatto sul ricettore e sul depuratore.

Nel caso simulato (vasca inserita in un sistema fognario separato; pluviometria relativa alla zona di Pavia; sistema bacino - rete caratterizzato da una costante di invaso di 20 minuti) è emerso che, a parità di beneficio ambientale (in termini di riduzione di massa inquinante scaricata nel ricettore), una vasca in linea con svuotamento in continuo convoglia alla depurazione un volume di acque meteoriche di dilavamento alquanto maggiore di quello convogliato da una vasca fuori linea con svuotamento intermittente e quindi comporta maggiori oneri gestionali dell'impianto di trattamento. D'altra parte, lo svuotamento in continuo consente di conseguire lo stesso beneficio ambientale dello svuotamento ad intermittenza con un volume specifico della vasca molto più contenuto e quindi con oneri di investimento alquanto minori.

Per i sistemi con svuotamento intermittente, la portata di svuotamento non condiziona in modo significativo l'efficacia della vasca, che invece risente in modo rilevante del valore dell'intervallo di tempo di assenza di precipitazione (o di deflusso meteorico in rete) superato il quale un nuovo evento meteorico è considerato distinto dal precedente, richiedendo di conseguenza

l'intercettazione delle sue acque di prima pioggia. I risultati delle simulazioni evidenziano, come ci si poteva aspettare, che, all'aumentare del valore di questo intervallo di tempo, il raggiungimento di determinati obiettivi ambientali richiede valori alquanto maggiori del volume specifico della vasca. I risultati ottenuti mostrano, in particolare, che non è opportuno aumentare il valore di dell'intervallo di tempo superato il quale un nuovo evento meteorico è considerato distinto dal precedente oltre le 48 ore, poiché non sarebbe possibile conseguire rendimenti consistenti sulle masse intercettate neppure con vasche di volume specifico molto elevato; peraltro, il beneficio conseguibile in termini di minor volume di acque di pioggia trattate risulterebbe modesto in termini assoluti.

Va sottolineato che tutte le considerazioni relative all'efficacia delle vasche al variare delle loro dimensioni e delle modalità del loro svuotamento hanno validità solo nei casi in cui la portata di svuotamento della vasca, in aggiunta eventualmente a quella derivata dallo scaricatore di piena, venga conferita direttamente all'impianto di depurazione o ad una fognatura nera collegata all'impianto stesso. Negli altri casi in cui, invece, le acque meteoriche intercettate dal sistema scaricatore-vasca vengano inviate alla depurazione attraverso un sistema fognario unitario che ne consente la miscelazione con altre portate meteoriche confluenti in fognatura a valle della vasca e il conseguente possibile scarico nel ricettore, l'efficacia della vasca può essere quantificata solo con una valutazione globale che prenda in esame il funzionamento dell'intero sistema fognario.

Per quanto riguarda l'analisi delle possibili modalità di pulizia del fondo delle vasche di prima pioggia è possibile effettuare le seguenti considerazioni.

I diversi sistemi di pulizia delle vasche sono equivalenti dal punto di vista dei costi di investimento, tuttavia richiedono impegni di potenza e consumi di energia molto diversi. I sistemi di lavaggio mediante paratoie presentano i minori impegni di potenza e consumi di energia, mentre quelli con mixer ed eiettori comportano i maggiori impegni di potenza e consumano i maggiori quantitativi di energia.

L'impiego di eiettori aria-acqua elimina (o riduce considerevolmente) i fenomeni putrefattivi di tipo anaerobico che creano problemi in loco e nel sistema di valle (rete fognaria o impianto di depurazione).

Il lavaggio mediante mixer ed eiettori consente di inviare a valle una portata d'acqua con concentrazioni di solidi abbastanza costanti nel tempo e, quindi, rispetto ai sistemi di lavaggio che operano quando la vasca è vuota (lavaggio mediante paratoie, mediante sistema a depressione e mediante vasche ribaltanti), consente di alimentare l'impianto di trattamento con acque aventi caratteristiche qualitative meno variate nel tempo. Questo aspetto è garanzia di maggiore efficienza dei processi depurativi.

Inoltre, le concentrazioni molto elevate di solidi sedimentabili nelle acque di lavaggio, tipiche dei sistemi che agiscono quando la vasca è vuota, possono creare problemi significativi di deposito nella rete fognaria di valle, soprattutto se le pendenze dei collettori sono molto deboli.

Infine, il codice di calcolo sviluppato per studiare l'erosione e il trasporto dei sedimenti al fondo delle vasche di prima pioggia si accorda bene con la soluzione analitica del problema di Riemann e con le evidenze sperimentali di alcune prove di laboratorio (in canalette a geometria regolare con alveo prismatico e pendenza del fondo costante) desunte dalla letteratura e condotte nel corso del dottorato presso il Laboratorio di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università di Pavia.

Le prove condotte stendendo uno strato uniforme di sedimenti (sabbie con granulometrie differenti o miscele di sabbia e argilla) sul fondo della canaletta hanno consentito di calibrare i parametri che descrivono globalmente l'erosione e il trasporto connessi all'onda di lavaggio generata dall'apertura repentina di una paratoia a sollevamento verticale.

Per quanto riguarda le prove con sola sabbia, è risultato a che parità di spessore la percentuale di sabbia dilavata rispetto alla totale stesa è maggiore per le prove con sabbia asciutta perché l'umidità rende i sedimenti più compatti e meno facilmente rimovibili. Inoltre, a parità di spessore le percentuali di sabbia dilavata diminuiscono al crescere della dimensione granulometrica della

sabbia. Questo risultato deriva dalla maggiore resistenza al moto che posseggono i granuli della sabbia più grossolana.

Per quanto riguarda le prove con miscele di sabbia e argilla, le evidenze sperimentali mostrano che il volume e la frazione dei sedimenti erosi dall'onda di lavaggio diminuiscono all'aumentare del contenuto di argilla per una data tipologia di sabbia. Questo risultato è dovuto alle forze di tipo coesivo che si sviluppano tra le particelle di sabbia e di argilla e che sono spezzate soltanto con sforzi di taglio più consistenti rispetto a quelli che innescano il processo erosivo per le sole sabbie. Gli sforzi di taglio critici per cui ha luogo l'erosione sono pertanto crescenti all'aumentare del contenuto di argilla nella miscela.

I valori del parametro k_{er} , che rappresenta sostanzialmente la velocità di erosione una volta che il processo erosivo si è innescato, risultano maggiori nelle prove con le miscele di sabbia e argilla con percentuali (in peso) di argilla del 15% e 25% rispetto a quelli delle prove con sola sabbia. Questo risultato è attribuibile al differente meccanismo di trasporto che caratterizza il materiale coesivo rispetto a quello non coesivo. Il trasporto dei sedimenti coesivi è essenzialmente di massa, ovvero, una volta che la resistenza di snervamento dei sedimenti viene superata, si verifica un processo di rapida rimozione di pezzi di sedimenti che giustifica la maggiore velocità di erosione rispetto ai sedimenti di sola sabbia.

Le miscele di sabbia e argilla con percentuale (in peso) di argilla del 7,5% presentano un comportamento intermedio tra quello del materiale non coesivo (sole sabbie) e quello del materiale coesivo (miscele di sabbia e argilla con percentuali in peso del 15% e 25%). Il comportamento “*non completamente coesivo*” di queste miscele, che si riflette in un valore intermedio del parametro k_{er} , risulta molto evidente anche dalle osservazioni visive.

Lo sviluppo di questo studio consentirà di trarre indicazioni molto utili per il dimensionamento corretto e l'ubicazione più opportuna, in relazione all'estensione (e in particolare allo sviluppo longitudinale) della superficie da lavare, delle precamere e dei dispositivi tesi alla rimozione dei sedimenti dal fondo delle vasche di prima pioggia.

Bibliografia

AA. VV., *Le deposizioni inquinate in Lombardia: risultati di una ricerca interdisciplinare* a cura di P. Berbenni. Il Notiziario dell'Ecologia, IV (N.S.), pp. 9-28, 1986.

Abbot M.B., *Computational Hydraulics*, London. Pitman Publishing limited, 1979.

Ackers P., White R.W., *Sediment transport: new approach and analysis*, Journal of Hydraulic Division, Am. Soc. Civ. Eng., 99(11), pp. 2041-2060, 1973.

Ackers P., *Sediment aspects of drainage and outfall design*, Environmental Hydraulics, Lee & Cheung editions, 1991.

Ackers J.C, Butler D., May R.W.P., *Design of sewers to control sediment problems*, Construction Industry Research and Information Association, Report 141, 1996.

Alley W.M., *Estimation of impervious area wash-off parameters*, Water Resources Research, vol. 17, n. 4, pp. 1161-1166, 1981.

- Alley W.M., Smith P.E., *Estimation of accumulation parameters for urban runoff quality modelling*, Water Resources Research, vol. 17, n. 6, pp. 1657-1664, 1981.
- Alvarez E.M., *The influence of cohesion on sediment movement in channels of circular cross-section*, PhD. University of Newcastle upon Tyne, UK, 1990.
- Artina S., Maglionico M., *Dimensionamento di vasche di prima pioggia secondo criteri di "stream standard"*, Dalle fognature alla Tutela Idraulica e Ambientale del Territorio, Atti della II Conferenza Nazionale sul Drenaggio Urbano, Palermo, La Loggia G. (a cura di), pp. 129-138, CSDU, Milano, 2001.
- Ashley R.M., Wotherspoon D.J.J., Goodison M.J., McGregor I, Coghlan B.P., *The deposition and erosion of sediment in sewers*, Water Science and Technology, Vol. 26, N. 5-6, pp. 1283-1293, 1992.
- Ashley R.M., Verbanck M.A., *Mechanics of sewer sediment erosion and transport*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 34, No. 6, pp. 753-769, 1996.
- Ammon D.C., *Urban storm water pollutant build-up and wash-off relationships*. Master of Engineering Thesis, University of Florida, Dept. of Environmental Engineering Sciences, Gainesville, Florida, 1979.
- Amos C.L., Mosher D.C., *Erosion and deposition of fine-grained sediments from the Bay of Fundy*, Sedimentology, pp. 815-832, 1985.
- Amos C.L., Daborn G.R., Christian H.A., Atkinson A., Robertson A., *In situ erosion measurements on fine-grained sediments from the Bay of Fundy*, Marine Geology, 108, pp. 175-196, 1992.

- Amos C.L., Sutherland T.F., Zevenhuizen J., *The stability of fine-grained sediments in Manitounik Sound Hudson Bay Canada*, Sedimentology, 1995.
- Andreoni V., Bianucci G., Sorlini C., *Le deposizioni inquinate a Milano e nella provincia di Varese*. Il Notiziario dell'Ecologia, IV (N.S.), pp. 9-12, 1986.
- Artina S., Maglionico M., Marinelli A., "Le misure di qualità nel bacino urbano Fossolo", Atti del Seminario sui Deflussi Urbani di San Cassiano, 28-31 Marzo 1995, in Modelli quali-quantitativi del drenaggio urbano, CSDU, Milano, 1997.
- Artina S., G. Bardasi, F. Borea, C. Franco, M. Maglionico, A. Paoletti, U. Sanfilippo, *Water quality modelling in ephemeral streams receiving urban overflows. The pilot study in Bologna*. 8th International Conference Urban Storm Drainage, ICUSD, Sydney, 30 Agosto-3 Settembre 1999.
- Artina S., Bolognesi A., Liserra T., Maglionico M., Salmoiraghi G., *Experimental analysis of first foul flush in an industrial area*. 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen/Denmark, 21-26 August 2005, 2005.
- Atlanta Regional Commission, *Georgia Stormwater Management Manual – Volume 2 – Technical Handbook*, 2001.
- Aureli F., Mignosa P., Tomirotti M., Numerical simulation and experimental verification of Dam-Break flows with shocks, Journal of Hydraulic Research, 38(3), pp. 197-206, 2000.
- Bacchi B., Papiri S., Todeschini S., Capitolo 1: *Le precipitazioni meteoriche e le acque meteoriche di dilavamento*. In manuale di Ingegneria Sanitaria e Ambientale: Gestione delle acque meteoriche e di dilavamento, Editore: CIPA, vol. 6, pp. 13-44, ISSN 1126-1129, 2006.

- Bacchi B., Balistrocchi M., Grossi G., Papiri S., Todeschini S., (2006). Capitolo 4: *Sistemi di fognature e acque meteoriche di dilavamento*. In manuale di Ingegneria Sanitaria e Ambientale: Gestione delle acque meteoriche e di dilavamento, Editore: CIPA, vol. 6, pp. 133-192, ISSN 1126-1129.
- Ball J.E., Abustan I., *An investigation of particle size distribution during storm events from an urban catchment*. Proceedings of the Second International Symposium on Urban Stormwater Management NCP n. 95/03 (2), pp. 521-535, 1995.
- Ball J.E., Jenks R., Ausborg D., *An assessment of availability of pollutant constituents on road surfaces*. The Science of the Total Environment, 209, pp. 243-254, 1998.
- Ballamudi S.M., Chaudhry M.H., *Numerical modelling of aggradation and degradation in alluvional channels*, Journal of Hydraulic Engineering, 117(9), 1991
- Bannerman R., Owens D.W., Dodds R.B., Hornewer N.J., *Source of pollutants in Wisconsin storm water*. Water Science and Technology, Vol. 28, n. 35, pp. 241-259, 1993.
- Barco O.J., Ciaponi C., Papiri S., *Inquinamento delle acque meteoriche di dilavamento. Il caso del bacino urbano residenziale di Cascina Scala (Pavia)*, Atti del XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento, pp. 21-29, Editoriale Bios sas, Cosenza, 2004.
- Barco O.J., *Modelling the quantity and quality of storm water runoff using SWMM*, Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Pavia, 2006.

- Been K., Sills G.C., *Self weighed consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study*, Géotechnique, 31(4): pp. 519-535, 1981.
- Bender G.M., Terstriep M.L., *Effectiveness of street sweeping in urban runoff pollution control*, The Science of the total Environment, 33, pp. 185-192, 1984.
- Berlamont J., Ockenden M., Toorman E., Winterwerp J., *The characterisation of cohesive sediment properties*, Coastal Engineering, 21, pp. 105-128, Elsevier Science Publishers B.V., 1993.
- BIOGEST, *Manuale tecnico illustrativo*, 2004.
- Bornatici L., Ciaponi C., Papiri S., *Sul controllo degli scarichi fognari nei corpi idrici ricettori in tempo di pioggia attuato mediante scaricatori di piena e vasche di prima pioggia*, Atti del XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento, pp. 37-44, Editoriale Bios sas, Cosenza, 2004.
- Bornatici L., Ciaponi C., Papiri S., *Le vasche di prima pioggia nel controllo della qualità degli scarichi fognari generati da eventi meteorici*, La Tutela Idraulica e Ambientale dei Territori Urbanizzati, Edizioni CSDU, 2005.
- Bris F.J., Garnauld S., Appery N., Gonzalez A., Mouchel J. M., Chebbo G., Thevenot D., *A street deposit sampling method for metal and hydrocarbon contamination assessment*, Science of the total Environment, 235, pp. 211-220, 1999.
- British Columbia Ministry of Water, *Stormwater planning: a guidebook for British Columbia*, 2002,
<http://www.env.gov.bc.ca/epd/epdpa/mpp/stormwater/stormwater.html> .

- Bujon G., *Prévision des débits et des flux polluants transités par les réseaux d'égouts par temps de pluie. Le Modèle FLUPOL*, La Houille Blanche, n. 1, 1988.
- Bujon G., Herremans L., *FLUPOL Modèle de prévision des débits et des flux polluants en réseaux d'assainissement par temps de pluie: calage et validation*, La Houille Blanche, n.2, 1990.
- Calomino F., Mordente F., Piro P., Veltri P., *Il bacino sperimentale urbano del canale Liguori nella città di Cosenza*. Edizioni BIOS, Cosenza, 2000.
- Campisano A., Creaco E., Modica C., *Experimental and numerical analysis of the scouring effects of flushing waves on sediment deposits*, Journal of Hydrology, 299, pp. 324-334, 2004.
- Campisano A., Creaco E., Modica C., Reitano S., *Primi risultati di un'indagine sperimentale sugli effetti di cacciate su sedimenti coesivi*, Atti del XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Roma, ISBN 88-87242-81-X ; ISBN 978-88-87242-81-2, 2006.
- Cao Z., Day R., Egashira S., *Coupled and decoupled numerical modelling of flow and morphological evolution in alluvional rivers*, Journal of Hydraulic Engineering, 128(3), pp. 306-321, 2002.
- Chebbo G., *Solides des rejets pluviaux urbains: caractérisation et traitabilité*. Ph.D. Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- Ciaponi C., Mutti M., Papiri S., *Storm Water Quality in the Cascina Scala (Pavia Italy) Experimental Catchment*. New Trends in Water and Environmental Engineering, June 24-28, Capri, Italy, 2002a.

- Ciaponi C., Mutti M., Papiri S., *A conceptual model for the estimation of loadographs in sewer networks during meteorological events*, New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Eco-compatible solutions for aquatic Environments, 2nd International Conference, Capri (Italy), Becciu G. et alii (a cura di), CSDU, Milano, 2002b.
- Ciaponi C., F. Conti, S. Papiri, G. Urbini, *Prima interpretazione di dati sperimentali sulla qualità delle acque defluenti in reti fognarie miste*", VI Sibesa – Simposio Italo-Brasiliano di Ingegneria Sanitaria e Ambientale, Vitoria, Brasile, 1-5 settembre 2002, 2002b.
- Ciaponi C., Papiri S., Todeschini S., *Qualità delle acque meteoriche di dilavamento dei siti sperimentali di Cascina Scala (Pavia) e di Cremona*, La tutela idraulica e ambientale dei territori urbanizzati, CSDU, Milano, 2005.
- Ciaponi C., Papiri S., Todeschini S., *Vasche di prima pioggia: analisi critica di possibili modalità di svuotamento*, I Convegno Nazionale di Idraulica Urbana: Acqua e Città, Sorrento (Napoli), 2005.
- Ciaponi C., Papiri S., Todeschini S., Valcher P., *Pollution in storm water runoff in a highway toll gate area and performance test of a control commercial system (EcoDrainTM)*. 10th International Conference on Urban Drainage ICUD, Copenhagen (Denmark), 2005.
- Ciaponi C., Papiri S., Todeschini S., *Analisi e interpretazione della correlazione tra alcuni parametri inquinanti nella rete fognaria di Cascina Scala in tempo di pioggia*. Atti del XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Roma, ISBN 88-87242-81-X ; ISBN 978-88-87242-81-2, 2006.

- Clark S., Rovantsek R., Wright L., J. Heaney, Field R., Pitt R., *Urban Wet Weather Flows – 2000 Literature Review*, Water Environment Research, Vol. 73, n. 51, 2001.
- Clark S., Pitt R., Burian S., *Urban Wet Weather Flows – 2001 Literature Review*, Water Environment Research, Vol. 74, n. 5, (CD-ROM), 2002.
- Clark S., Pitt R., Burian S., *Urban Wet Weather Flows – 2002 Literature Review*, Water Environment Research, Vol. 75, n. 5, 3 (CD-ROM), 2003.
- Clark S., Pitt R., Burian S., *Urban Wet Weather Flows – 2003 Literature Review*, Water Environment Research, Vol. 76, n. 5, (CD-ROM), 2004.
- Collins M.B., *The behaviour of cohesive and non-cohesive sediments*, Proc. Of International Seminar on the Environmental Aspects of Dredging Activities, Nantes, France, 1989.
- Crabtree R.W., *Sediment in sewers*, JIWEM, 3(6), 569-578, 1989.
- Cunge J.A., Holly F.M., Verwey A., *Practical Aspects of computational river Hydraulics*, Pitman Advanced Publishing Program, 1980.
- Dellacasa F., *Indagine sperimentale e modellazione numerica per lo studio quali-quantitativo dei deflussi urbani* Ph.D. Thesis, Università di Pisa, 2004.
- Driver N.E., Mustard M.H., Rinesmith R.B., Middelburg R.F., *U.S. Geological Survey Urban Stormwater Database for 22 Metropolitan Areas throughout the United States*, USGS open-file Report 85-337, USGS Federal Center, Box 25425, Denver, Colorado 80225, 1985.
- Driver N.E., Tasker G.D., *Techniques for Estimation of Storm Runoff Loads, Volumes and Selected Constituent Concentrations in Urban Watersheds in*

- the United States, USGS Paper 2363, USGS Federal Center, Box 25425, Denver, Colorado 80225, 1990.
- Einstein H.A., *Formulas for the transport of bed load*, Classic papers in Hydraulics, 2140, ASCE, 1982.
- Einstein H.A., Banks R.B., *Fluid roughness. Transactions*, American Geophysical Union, 31(4), 1950.
- Ellis J.B., Revitt D.M., *Incidence of heavy metals in street surface sediments: solubility and grain size studies*, Water Air Soil Pollution, 17, pp. 87-100, 1982.
- Ellis J.B., *Pollutional aspects of urban runoff*. In Urban Runoff Pollution, Torno H.C., Marsalek J., Desbordes M., Edizioni NATO ASI Series G: Vol. 10 Springer-Verlag pp.1-38, 1985.
- Engelund F., Hansen E., *A monograph on sediment transport in alluvional streams*, Teknische forlag, 1967.
- EUROMEC, *Manuale tecnico illustrativo*, 2004.
- Foster G.R., Mayer L.D., *Transport of soil particles by shallow flow*, ASAE, n. 15, pp. 99-102, 1972.
- Fredsoe J., *Sediment transport in currents and waves*, Report 49, Inst. of Hydrodynamics and Hydraulic Eng., Technical University of Denmark, 1984.
- Giordano C. e Specchiarello M., Alcune considerazioni sulle deposizioni acide in provincia di Pavia dal gennaio 1984 all'aprile 1986. *Atti del XII Congresso Nazionale di Merceologia con partecipazione internazionale*:

- Contributo delle Scienze Merceologiche allo sviluppo delle Regioni*, 1055-1064, Torino, 1986.
- Giulianelli M., Benedini M., Rimedia G., *Indagine sperimentale sugli aspetti quantitativi e qualitativi delle acque di drenaggio urbano – Parte II: Indagine sperimentale e analisi dei risultati*. Ingegneria ambientale, vol. XXVII, N. 11-12, 1998.
- Gromaire-Mertz M.C., Chebbo G., Saad M., *Origins and characteristics of urban wet weather pollution in combined sewer systems*. Proceedings of the International Conference “The sewer as a physical, chemical and biological reactor”, Aalborg, Denmark, 1997.
- Gromaire-Mertz M.C., Garnaud S., Ahyyerre M., Chebbo G., *The quality of street cleaning waters: comparison with dry and wet weather flows in a Parisian combined sewer system*, Urban Water 2, pp. 39-46, 2000.
- Hirsh C., *Numerical computation of internal and external flows*, John Wiley & Sons, 1, 2, Chichester, 1992.
- Kamphuis W., Hall K.R., *Cohesive material erosion by unidirectional current*, J. Hydraul. Eng., pp. 49-61, 1983.
- Krone R.B., *Flume studies of the transport of sediment in estuarial processes*, Final Rep. Hydraulic Eng. Lab. Sanit. Eng. Res. Lab., University of California, Berkeley.
- Kuti E.O., Yen C.L., *Scouring of cohesive soils*, J. Hydraul. Res., 143(3), pp. 195-206, 1976.
- Imhoff, *Lehr and handbuch der Abwassertechnik*, Verlag von Wilhem Ernst & Sohn, Berlin, 1989.

ITT flygt, *Manuale tecnico illustrativo*, 2003.

Gnecco I., Berretta C., Lanza L.G., La Barbera P., (2005) Quality of stormwater runoff from paved surfaces of two production sites. 10th Int. Conf. On Urban Drainage, Copenhagen, Denmark 21-26 agosto 2005.

Jameson A., Schmidt W., Turkel E., *Numerical solutions of the Euler by finite volume methods using Runge-Kutta time-stepping schemes*, 14th Fluid and Plasma Dyn. Conf., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Palo Alto, California, 1981.

Hvitved-Jacobsen T., Nielsen P.H., Larsen T., Jensen N.A., *The sewer as a physical, chemical and biological reactor*, Water Science and Technology, Vol. 31, N. 7, 1995.

La Loggia G., Viviani G., *Misure delle caratteristiche di qualità delle acque di pioggia nel bacino di Parco D'Orleans. Analisi dei primi risultati*, Atti del III Seminario sui Sistemi di Drenaggio Urbano, Ancona, Italia, 1992.

LADURNER, *Manuale tecnico illustrativo*, 2004.

Leoncavallo M. (ITT flygt), *Sistemi di pulizia e automazione per vasche volano e di prima pioggia*, Atti della Giornata di Studio: Acque di Prima Pioggia: Esperienze sul territorio e normativa, Genova, 2003.

Lindholm O., Balmér P., *Pollution in storm runoff and combined sewer overflows*, Proceedings of the 1st Int. Conference on Urban Storm Drainage, Southampton, Great Britain, pp. 575-585, 1978.

MacCormack R.W., *Numerical solution of the interaction of a shock wave with laminar boundary layer*, Proc. 2nd International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, Berlin, pp. 151-163, 1971.

Maglionico M., *Indagine sperimentale e simulazione numerica degli aspetti qualitativi dei deflussi nelle reti di drenaggio urbano*, Ph.D. Thesis, Università di Bologna - Politecnico di Milano, 1998.

Maglionico M., Pollicino F., *Experimental analysis of the build-up of pollutants on an urban road surface*, pp. 745-752 - International Conference Novatech 2004, Lyon, France; 6-10 giugno 2004.

MAST G6M COASTAL MORPHODYNAMIC, *On the methodology and accuracy of measuring physic-chemical properties to characterise cohesive sediments*, EC MAST-I research programme, 1993.

Maestre A., Pitt R.E., Williamson D., *Nonparametric statistical tests comparing first flush with composite samples from NPDES Phase 1 municipal stormwater monitoring data*, Models and Applications to Urban Water Systems, Vol. 12, Eds W. James, CHI, Guelph, Ontario, pp.317-338, 2004.

Maestre A., Pitt R.E., Durrans R.S., Chakraborti S., *Stormwater quality descriptions using the three parameter lognormal distribution*, Stormwater and Urban Water Systems Modelling, Models and Applications to Urban Water Systems, Monograph 13, Eds W. James, K.N. Irvine, E.A. McBean, R.E. Pitt, CHI, Guelph, Ontario, 2005.

McCave I.N., *Erosion transport and deposition of fine-grained marine sediments*, Geol. Soc. London, Spec. Publ. N.15.

Metcalf-Eddy, *Wastewater Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1972.

Metcalf-Eddy, *Wastewater Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1991.

- Metha A.J., *Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion*, N.C. Krauss et al. Editors, Coastal Sediments, Vol. 1, pp. 44-53, 1988.
- Metha A.J., *On estuarine cohesive sediment suspension behaviour*, Journal of Geophysical Research, Vol. 94 C10, pp. 14303-14314, 1989.
- Metha A.J., *Review notes on cohesive sediment erosion*, ASCE, Coastal sediments, Vol. 1, N.C. Krauss et al. ed., pp.40-53, 1991.
- Metha A.J., Lee S.C., *Problems in linking the threshold condition for the transport of cohesionless and cohesive sediment grains*. Journal of Coastal Research, Vol. 10(1), pp. 170-177, 1994.
- Metha A.J., Partheniades E., *Resuspension of deposited cohesive beds*, Proc. 18th Coastal Engineering Conference, Vol. 2, pp. 1569-1588, 1982.
- Mignosa P., Paoletti A., Passoni G., *Carichi effluenti dagli scaricatori di piena di fognature unitarie*, Idrotecnica, n. 3, pp. 231-246, 1991.
- Milano V., Pagliara S., Dellacasa F., *Urban stormwater quantity and quality in the experimental urban catchment of Picchianti*, New Trends in Water and Environmental Engineering, June 24-28, Capri, Italy, 2002.
- Milano V., Pagliara S., Dellacasa F., *Dati sperimentali sulla qualità e la quantità dei deflussi urbani nel bacino di Picchianti (LI) nel triennio 2000-2002*, Edizioni ETS, Pisa, 2004.
- Mirtskhoulava T.S.E., *Scouring by flowing water of cohesive and non cohesive beds*, Journal of Hydraulic Research, 3, pp. 341-354, 1991.
- Mitchener H., Torfs H., *Erosion of mud/sand mixtures*, Journal of Coastal Engineering, 29, pp. 1-25, 1996.

Murray W.A., *Erosion of coarse sand-clayey silt mixtures*, J. Hydraul. Eng., pp. 1222-1227, 1977.

Mustard M.H., Driver N.E, Chyr J., Hansen B.G., *U.S. Geological Survey Urban Stormwater Database of Constituent Storm Loads: Characteristics of Rainfall, Runoff and Antecedent Conditions; Basin Characteristics*, USGS open-file Report 87-4036, USGS Federal Center, Box 25425, Denver, Colorado 80225, 1987.

Nalluri C., Alvarez E.M., *The influence of cohesion on sediment behaviour*, Water Science and Technology, Vol. 25, No. 8, pp. 151-164, 1992.

Natale P., Maina E., Sarasino G., *Deposizione acida. Risultati di 27 mesi di indagine in Piemonte*. Inquinamento, XXVIII, (6), pp.40-49, 1986.

Novotny V., Goodrich-Mahoney J., *Comparative assessment of pollution loadings from non point sources in urban land use*, Prog. Water Tech., n. 10, pp. 775-785, 1978.

Ockenden M.C., Delo E.A., *Consolidation and erosion of estuarine mud and sand mixtures*, HR Wallingford Report No. SR 149, 1988.

Oliveri E., Viviani G., La Loggia G., *Comportamento ed efficienza delle vasche di pioggia*, Dalle fognature alla tutela idraulica e ambientale del territorio, Atti della II Conferenza Nazionale sul Drenaggio Urbano, Palermo, La Loggia G. (a cura di), pp. 279-290, CSDU, Milano, 2001.

Paoletti A., Papiri S., *Sistemi fognari unitari e separati: aspetti funzionali e ambientali*, Atti della Giornata di Studio “La Separazione delle Acque nelle Reti Fognarie Urbane”, Roma, 2003.

- Paoletti A., Sanfilippo U., *Structural and non-structural measures to reduce pollutants discharged in receiving water bodies*, Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, 5th International Conference, Novatech, Lyon (France), pp. 679-686 (I), Edition GRAIE, 2004.
- Papiri S., *Precipitazioni e deflussi nel bacino urbano sperimentale di Cascina Scala (Pavia)*, Pubblicazione del Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale, Università di Pavia, n. 166, 1989.
- Papiri S., *Gli scaricatori di piena nelle fognature miste alla luce dei risultati di una simulazione continua quali-quantitativa delle acque meteoriche nel bacino urbano sperimentale di Cascina Scala (Pavia)*, Dalle fognature alla tutela idraulica e ambientale del territorio, Atti della II Conferenza Nazionale sul Drenaggio Urbano, Palermo, La Loggia G. (a cura di), pp. 49-60, CSDU, Milano, 2001.
- Papiri S., Todeschini S., *Qualità e controllo delle acque di dilavamento di infrastrutture viarie*. Atti della Giornata di Studio “Insediamenti Produttivi e Infrastrutture”, Genova (Italia), 26 novembre 2004, Editore: CSDU, pp. 109-137, ISBN 88-900282-5-4, 2004.
- Papiri S., Todeschini S., *La gestione delle acque meteoriche di dilavamento e gli impianti di depurazione urbani*. Atti di Acque di prima pioggia: soluzioni tecnologiche e innovazione, Genova, 2005.
- Papiri S., Todeschini S., *Il controllo dei sedimenti nei sistemi fognari e sue implicazioni progettuali*. Architettura del paesaggio. ISSN: 1125-0259, 2007.
- Parchure T.M., Metha A.J., *Erosion of soft cohesive sediment deposits*, Journal of Hydraulic Engineering, pp. 1308-1326, 1985.

Partheniades E., *Erosion and deposition of cohesive soils*, Journal of the Hydraulic Division, pp. 105-139, 1965.

Paterson D.M., *Biological mediation of sediment erodibility: ecology and physical dynamics*. 4th Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference INTERCOH'94, Wallingford, U.K., 1994.

Périgaud C., *Mécanique de l'érosion des vases*, La Houille Blanche, N. 7/8, 1983.

Pitt R., *Demonstration of non-point pollution abatement through improved street cleaning practices*, EPA-600/2-79-161, EPA, Cincinnati, 1979.

Pitt R., Maestre A., Morquecho R., *The national stormwater quality database (NSQD, version 1.0)*, Water Environment Federation Technical Exposition and Conference, Los Angeles 2003.

Pitt R., Maestre A., Morquecho R., Williamson D., *Collection and examination of a municipal separate storm sewer database*, Stormwater and Urban Water Systems Modelling, Models and Applications to Urban Water Systems, Vol. 12, Eds W. James, CHI, Guelph, Ontario, pp. 257-294, 2004a.

Pitt R., Maestre A., Morquecho R., *Stormwater characteristics as contained in the nationwide MS4 stormwater phase 1 database*, Water World and Environmental Resources Conference 2004, Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers, Salt Lake City, Utah, Conference CD-rom, 2004b.

Pöpel F., *Belebungsanlagen*, Deutscher Fachschriften, Mainz, 1973.

- Riganti V., Lombardi A., Conio O. e Bonfiglioli O., *Applicazione della tecnica ICP-MS all'analisi di metalli pesanti in campioni di acque piovane*, Rivista di Merceologia, CLUEB, volume 36 (IV), pp. 201-216, 1997.
- Ristenpart E., Uhl M., *Dynamic behaviour of sewer sediments*. Proc. 6th Int. Conf. Urban Storm Drainage, Niagara falls, Canada, ISBN 1-50056-253-3, pp. 748-753, 1993.
- Ristenpart E., *Modelling of sediment erosion in a combined sewer*, 7th International Conference on Urban Storm Drainage, Hannover, Germany, pp. 851-856, 1996.
- Roe P.L., *Approximate Reimann solvers, parameter vectors, and difference schemes*, Journal of Computational Physics, 43, pp. 357-372, 1981.
- Rushforth P.J., Tait S.J., Saul A.J., *Modelling the erosion of mixtures of organic and granular in- sewer sediments*, Journal of Hydraulic Engineering, 129(4), pp. 308-315, 2003.
- Saget A., Chebbo G., *Base de données sur la qualité des rejets urbains de temps de pluie (QASTOR): distribution de la pollution rejetée, dimensions des ouvrages d'interception*. La Houille Blanche, n. 8, 1996.
- Saget A., Gromaire-Mertz M.C., Deutsch V., Chebbo G. *Extent of pollution in urban wet weather discharges*, Proceedings of the BHS International Conference, 6-10 July 1998, Exeter - UK, 1998.
- Sartor J.D., Boyd G.B., *Water pollution aspects of street surface contaminants*, U.S.EPA Report N. R2-72-081, Washington, 1972.

Sartor J.D., Boyd G.B., Agardy F.J. *Water pollution aspects of street surface contaminants*, Journal of Water Pollution Control Federation, vol. 46, n. 3, 1974.

Sartor J.D., Gaboury D.R., *Street sweeping as a water pollution control measure: lessons over the past ten years*, The Science of the total Environment, 33, pp.171-183, 1984.

Sehmel G.A., "Particle resuspension from an asphalt road caused by car and truck traffic", Atms. Env., n.7, 1973.

Skipworth P.J., Tait S.J., Saul A.J., *Erosion of sediments beds in sewers: model development*, Journal Environ. Eng., 125(6), pp. 566-573, 1999.

Silvagni G., Vagnino M., *The Malvaccaro station for water quality of urban runoff*, Urban Drainage Experimental Catchments in Italy, Edited by Calomino F., Maksimovic C., Molino B., BIOS, 1995.

STEINHARDT, *Manuale tecnico illustrativo*, 2004.

Steuer J., Selbig W., Hornewer N. e Prey J., *Sources of Contamination in an urban basin in Marquette, Michigan and analysis of concentrations, loads, and data quality*, U.S.G.S. Water Resources Investigations Report, pp. 97-4242. Wisconsin DNR and EPA, 1997.

Sutherland R.C., *Hiding functions to predict self armouring*, Proc. Int. Grain Sorting Seminar, Zurich, pp. 273-298, 1992.

Sutherland R.C., McCuen R.H., *Simulation of urban non point source pollution*, Water Resources Bulletin, AWRA, Vol. 14, 1978.

- Sweby P.K., *High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws*, Journal of Numerical Analysis, 21(5), pp. 995-1011, 1984.
- Teeter A.M., *Size dependence in fine-grained sediment transport*, DRP-1-11, US Army Engineer Waterways Experiment Station, MS, USA, 1993.
- Todeschini S., *Qualità delle acque meteoriche di dilavamento di aree urbanizzate*. Atti di Gestione delle acque meteoriche di dilavamento: un approccio integrato, Varese, 2005.
- Toorman E.A., Berlamont J.E., *Settling and consolidation of mixtures of cohesive and non cohesive sediments*, Adv. Hydro-Sci. Eng. 1, pp. 606-613, 1993.
- Torfs H., *Erosion of mixed cohesive/non-cohesive sediments in uniform flow*, 4th INTERCOH'94, Wallingford, 1994a.
- Torfs H., *Erosion of layered sand-mud beds in uniform flow*, 24th International Conference on Coastal Engineering, Kobe, 1994b.
- Torfs H., *Erosion of mud/sand mixtures*, Ph. D. Thesis Katholieke Universiteit Leuven, 1995.
- U.S.EPA, *Results of the Nationwide Urban Runoff Program: Volume I – Final Report*. United States Environmental Protection Agency, NTIS Accession Number: PB84-185552, National Technical Information Service , U.S. Department of Commerce, Springfield, Virginia 22161, 1983.
- US-EPA, *Innovative Urban Wet-Weather Flow Management System*, NRMRL Publication n° 600/R-99/029, 1999a.

US-EPA, Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices, Publication n° 821/R-99/012, 1999b.

Van Rijn L.C., *Sediment transport, part I: bed load transport*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 110(10), PP. 1431-1456, 1984a.

Van Rijn L.C., *Sediment transport, part II: suspended load transport*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 110(10), pp. 1613-1641, 1984b.

Van Rijn L.C., *Handbook sediment transport by currents and waves*, 1989.

Vaze J., Chiew F.H.S., *Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface*, Urban Water, 4, pp. 379-389, 2002.

Verbanck M.A., *Field investigation on sediment occurrence and behaviour in Brussels combined sewers*, Water Science and Technology, Vol. 25, N. 8, pp. 71-82, 1992.

Verbanck M.A., Ashley R.M, Bachoc A., *International Workshop on origin, occurrence and behaviour of sediments in sewer systems: summary and conclusions*, Water Research – Vol. 28, N. 1 pp. 187-194, 1994.

Williams D.J.A., Williams P.R., Crabtree R.W., *Preliminary investigations into the rheological properties of sewer sediment deposits and the development of a synthetic sewer sediment material for laboratory studies*, FWR Report No. FR 0016, 1989.

Williamson H.J., *Tidal transport of mud/sand mixtures. Sediment distributions: a literature review*. H.R. Wallingford, Report SR 286, 1991.

Williamson H.J., *Tidal transport of mud/sand mixtures. Field trials at Clevedon, Severn Estuary*, H.R. Wallingford, Report SR 372, 1993

- Williamson H.J., *Recent field measurements of erosion shear stress using ISIS*, 4th INTERCOH'94, Wallingford, 1994.
- Williamson H.J., Ockenden M.C., *Tidal transport of mud/sand mixtures, laboratory tests*, HR Wallingford, Report SR 257, 1992.
- Williamson H.J., Ockenden M.C., *Laboratory and field investigations of mud and sand mixtures*, Proc. First International Conference on Hydro-science and Engineering, pp. 622-629, S.S.Y. Wang eds., 1993.
- Wotherspoon D.J.J.W., *The movement of cohesive sediment in a large combined sewer*. PhD. Thesis. University of Abertay Dundee, UK, 1994.
- Wotherspoon D.J.J.W., Ashley R.M., *Rheological measurement of the yield strength of combined sewer sediment deposits*, Water Science and Technology, Vol. 25, No 8, pp. 165-170, 1992.
- Yalin M.S., *An expression for bed load transportation*, Journal of Hydraulic Div., ASCE, n. 89, pp. 221-250, 1963.
- Yalin M.S., Karahan E., *Interception of sediment transport*, Journal of Hydraulic Div., ASCE, n. 105, pp. 1433-1443, 1979.
- Young R.N., Southard J.B., *Erosion of fine-grained marine sediments: sea floor laboratory experiments*, Geol. Soc. Am. Bull., 89, pp. 663-672, 1978.

