



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 IX Nuova serie (XXIII Ciclo)

**Verifiche di funzionalità e criteri di
ottimizzazione degli impianti di
potabilizzazione: alcuni casi di studio**

Tesi di Dottorato
Ing. Barbara Marianna Crotti

Relatore:
Prof. Ing. Carlo Collivignarelli

Controrelatore:
Prof. Ing. Sergio Papiri

Pavia, Ottobre 2010

*A mia nonna
e alla mia famiglia*

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile

Graduate School in Civil Engineering

Settore:	Ingegneria
Field:	Engineering
Sede Amministrativa non consortile:	Università degli Studi di PAVIA
Administrative location:	University of Pavia
Durata:	3 anni
Duration:	3 years
Periodo formativo estero:	come previsto dal regolamento del Dottorato di Ricerca
Period in foreign organization:	as required by the school's rules
Numero minimo di corsi:	6
Minimum number of courses:	6

Recapiti - Addresses



Dipartimento di Meccanica Strutturale
via Ferrata 1 - 27100 Pavia - Italy
Tel. +39 0382 / 505450 Fax +39 0382 / 528422



Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale
via Ferrata 1 - 27100 Pavia - Italy
Tel. +39 0382 / 505300 Fax +39 0382 / 505589

Coordinatore - Coordinator

CASCIATI Fabio - Professore Ordinario di Scienza delle Costruzioni (ICAR/08)

Dipartimento di Meccanica Strutturale
via Ferrata 1 - 27100 Pavia – Italy Tel. +39 0382 / 505458 Fax +39 0382 / 528422
e-mail: fabio@dipmec.unipv.it

Collegio dei Docenti – Teaching Staff

CIAPONI Carlo	Professore Straordinario (ICAR02)
DEL GROSSO Andrea	Professore Ordinario, UniGe (ICAR/08)
FARAVELLI Lucia	Professore Ordinario (ICAR/08)
GALLATI Mario	Professore Ordinario (ICAR/01)
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

Organizzazione del corso

Il dottorato di ricerca in *Ingegneria Civile* presso la Scuola di Dottorato in Scienze dell'Ingegneria 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. Il dottorando svolge la propria attività di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale, per i primi due curricula, o quello di Meccanica Strutturale per gli ultimi due.

Durante i primi due anni sono previsti almeno sei corsi, seguiti da rispettivi esami, che il dottorando è tenuto a sostenere. Il Collegio dei Docenti, composto da professori dei due Dipartimenti e da alcuni esterni all'Università di Pavia, organizza i corsi con lo scopo di fornire allo studente di dottorato opportunità di approfondimento su alcune delle discipline di base per le varie componenti. 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 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:

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

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

1. un circuito in pressione che consente di effettuare simulazioni di moto vario;
2. un tunnel idrodinamico per lo studio di problemi di cavitazione;
3. canalette per lo studio delle correnti a pelo libero.

Course Organization

The Graduate School of Civil Engineering, a branch of the Doctorate School in Engineering Science, was established at the University of Pavia in the Academic Year of 1994/95 (X cycle). The School allows the student to select one of the four offered curricula: Hydraulics, Environment, Seismic engineering and Structural Mechanics. Each student develops his research activity either at the Department of Hydraulics and Environmental Engineering or at the Department of Structural Mechanics. During the first two years, a minimum of six courses must be selected and their examinations successfully passed. The Faculty, made by Professors of the two Departments and by internationally recognized scientists, organizes courses and provides the student with opportunities to enlarge his basic knowledge. Courses and seminars are held by University Professors from all over the country and abroad. The Faculty starts up in alternate years common courses, on the following subjects:

- solid and fluid mechanics,
- numerical methods for solid and fluid mechanics,
- structural and environmental risk,
- experimental methods for solid and fluid mechanics,
- artificial intelligence.

More specific courses are devoted to students of the single curricula.

At the end of each course, for the first year the Faculty assigns the student a research argument to develop, in the form of report, by the end of the second year; the topic, not necessarily part of the final doctorate thesis, should be consistent with the curriculum selected by the student. At the beginning of the second year the student discusses with his Coordinator the subject of the thesis and, eventually, the Faculty assigns it to the student. At the end of every year, the student has to present a complete report on his research activity, on the basis of which the Faculty proposes to the Rector his admission to the next academic year or to the final examination. The student is supposed to develop either theoretical or experimental research activities, and therefore has access to the

Department Experimental Laboratories, even to the Numerical Laboratory of Infrastructure

Engineering. The Experimental Teaching Laboratory of the Department of Structural Mechanics offers:

1. a shaking table which permits one to conduct dynamic tests on structural prototypes;
2. sensors and acquisition data system for the structural response measurements;
3. instrumentation for the design of active control system and their experimental checks;
4. an universal testing machine for material characterization through static and dynamic tests.

The Department of Hydraulics and Environmental Engineering offers:

1. a pressure circuit simulating various movements;
2. a hydrodynamic tunnel studying cavitation problems;
3. micro-channels studying free currents.

Ringraziamenti

Come tradizione vuole, mi sembra giusto rivolgere alcuni ringraziamenti a coloro che in questi anni mi sono stati vicini, condividendo quest'avventura.

Il mio primo ringraziamento è rivolto senza dubbio a mamma e papà che, nonostante tutto, hanno fatto in modo che io raggiungessi questa meta. Proseguendo, vorrei ringraziare i miei cari nonni, che porto sempre nel mio cuore ogni giorno e le mie Sù, Lù e Franci, a cui voglio tanto bene. Ma il grazie più profondo è dedicato al mio Antonio, per esserci sempre stato nei momenti più belli e in quelli più difficili. Grazie, grazie, grazie!!!!

Desidero ringraziare il Prof. Carlo Collivignarelli e la Prof.ssa Sabrina Sorlini per avermi offerto la possibilità di svolgere questa tesi sotto la loro supervisione, per il costante supporto scientifico offerto e per l'entusiasmo trasmesso in questi anni.

Ringrazio il gruppo di lavoro pavese (Cri, Sabri ed i miei compagni d'ufficio Ale, Vera e Teo) per la vicinanza, l'incoraggiamento e l'affetto che sempre mi hanno dimostrato.

In particolare ringrazio Cri (la nostra Prof.), per la disponibilità e la cura con cui mi ha affiancato e consigliato in questa stimolante esperienza formativa nonché Sabri, per avermi supportato e sopportato.

Ringrazio i "bresciani" Teo ed Ado e tutti gli amici pavesi di questa avventura universitaria (Chiara, Manu, Igor, Davide, Gabriella, Roger, Sara, Sauro, Clemente, Raed, Mati,.....e tutti coloro che ho dimenticato), per avermi fatto ridere fin dal primo giorno.

Ringrazio i fratelli Marzi, per non avermi mai fatto mancare parole di conforto, abbracci, battute, risate e consigli.

Ringrazio i miei tecnici preferiti, Franco e Giorgio, per aver avuto sempre una buona parola.

Un doveroso ringraziamento va a tutti i collaboratori dell'AEM di Cremona che grazie alla cordialità e disponibilità dimostratami mi hanno permesso di svolgere, presso le loro strutture, la mia attività di ricerca.

A questo proposito un ringraziamento particolare va a Paolo Vicentini, ad Elvira, Davide e Mirko per avermi fatto conoscere più da vicino l'ambito della

chimica, ma soprattutto per l'accoglienza, la disponibilità e la fiducia dimostratami in ogni momento.

Una notevole gratitudine va ad ASMortara, per avermi dato la possibilità non solo di effettuare la mia attività di ricerca ma anche di realizzare un mio sogno. A questo proposito desidero ringraziare il presidente Simone Ciaramella, il geometra Ernesto Ardemagni, l'ingegnere Andrea Vacchelli per l'accoglienza, la disponibilità dimostratami in ogni momento e la fiducia nei miei confronti. Un sentito grazie va al "capo" (Giorgio), Giò, Maurino, Oppi, Pumino, Tiziano.....e a tutti gli operatori di ASMortara per la disponibilità con cui hanno sempre assecondato le mie richieste. Desidero poi ringraziare le mie compagne di pollaio nonché colleghe, Sara e Chiara, per avermi accolto come un'amica e per la pazienza dimostratami. Grazie!!!

Infine sono riconoscente ai tesisti (Filippo, Giulia, Michela e Stefano) che hanno contribuito alla realizzazione di alcuni esperimenti contenuti in questo lavoro, ed ai Prof. Paolo Berbenni, Sergio Papiri e Vincenzo Riganti per la competenza e l'attenzione con cui mi hanno indirizzato durante questi anni di dottorato.

Un pensiero speciale a Elisa.

Elenco delle tesi – Previous PhD Theses

Battaini Marco (X Ciclo)	Sistemi strutturali controllati: progettazione e affidabilità (Novembre 1998).
Mariani Claudia (X Ciclo)	Problemi di ottimizzazione per strutture bidimensionali anisotrope (Novembre 1998).
Negri Antonella (X Ciclo)	Stima delle perdite idrologiche nei bacini di drenaggio urbani (Aprile 1999).
Pisano Aurora Angela (XI Ciclo)	Structural System Identification :Advanced Approaches and Applications (Aprile 1999).
Saltalippi Carla (XI Ciclo)	Preannuncio delle piene in tempo reale nei corsi d'acqua naturali (Aprile 1999).
Barbieri Eugenio (XI Ciclo)	Thermo fluid Dynamics and Topology:

Podestà Stefano (XIII Ciclo)	Risposta sismica di antichi edifici religiosi: una nuova proposta per un modello di vulnerabilità.
Sturla Daniele (XIII 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 (Gennaio 2003).
Nascimbene Roberto (XV Ciclo)	Sail Modelling for Maximal Speed Optimum Design (Gennaio 2003).
Giudici Massimo (XVI Ciclo)	Progettazione in regime non lineare di strutture in CAP a cavi aderenti e non aderenti (Aprile 2004).
Mutti Matteo (XVI Ciclo)	Stability Analysis of Stratified Three-phase Flows in Pipes (Febbraio 2004).
Petaccia Gabriella (XVI Ciclo)	Propagazione di onde a fronte ripido per rottura di sbarramenti in alvei naturali (Febbraio 2004).
D'Amico Tiziana (XVI Ciclo)	Ricerca e sviluppo di metodologie diagnostiche per il recupero di edifici monumentali: prove vibroacustiche sul tufo (Febbraio 2005).
Casciati Sara (XVII Ciclo)	Damage Detection and Localization in the Space of the Observed Variables (Febbraio 2005).
Barco Olga Janet (XVII Ciclo)	Modeling the Quantity and Quality of Storm Water Runoff Using SWMM (Marzo 2006).

Boguniewicz Joanna (XVIII Ciclo)	Integration of Monitoring and Modelling in the Surface Water State Evaluation Process of a Sub-Alpine Lake Watershed (Marzo 2006).
Bornatici Laura (XVIII Ciclo)	L'impiego degli algoritmi generici per la risoluzione dei problemi di progetto di reti di distribuzione idrica (Marzo 2006).
Collivignarelli M Cristina (XVIII Ciclo)	Trattamento di rifiuti liquidi mediante processi biologici aerobici termofili e mesofili e processi avanzati di ossidazione chimica in diversa (Marzo 2006).
Domaneschi Marco (XVIII Ciclo)	Structural Control of Cable-stayed and Suspended Bridges (Febbraio 2006).
Ráduly Botond (XVIII Ciclo)	Artificial Neural Network applications in Urban Water Quality Modeling (MARzo 2006).
Antoci Carla (XVIII Ciclo)	Simulazione numerica dell'interazione fluido-struttura con la tecnica SPH (Luglio 2006).
Cappabianca Federica (XVIII Ciclo)	La valutazione del rischio valanghivo attraverso la modellazione dinamica (Luglio 2006).
Callegari Arianna (XVIII Ciclo)	Applicazione di tecnologie di monitoraggio on-line per la gestione dei processi di trattamento reflui (Luglio 2006).
Gazzola Elisa (XVIII Ciclo)	Applicazione di processi biologici anaerobici al trattamento di acque reflue e fanghi di depurazione: aspetti tecnici ed energetici (Febbraio 2007).

Maranca Federica (XVIII Ciclo)	Valutazione del ciclo di vita (LCA): confronto tra sistemi di trasporto gas via gasdotto (Febbraio 2007).
Giuliano Fabio (XIX Ciclo)	Performance Based Design and Structural Control for Cable Suspension Bridges (Febbraio 2007).
Falappi Stefano (XIX Ciclo)	Simulazioni numeriche di flussi di fluidi viscosi e materiali granulari con la tecnica SPH (Febbraio 2007).
Zanaboni Sabrina (XIX Ciclo)	Pre-trattamento di rifiuti liquidi industriali mediante ossidazione ad umido (Febbraio 2007).
Bruggi Matteo (XX Ciclo)	Topology optimization using mixed finite elements (Febbraio 2008).
Cimellaro Gian Paolo (XX Ciclo)	Passive Control of Industrial Structures for Natural Hazard Mitigation: Analytical Studies and Applications (Febbraio 2008).
Pagliardi Matteo (XX Ciclo)	Application of PIV technique to the study of subaqueous debris flows (Febbraio 2008).
Todeschini Sara (XX Ciclo)	Il controllo degli scarichi fognari in tempo di pioggia mediante vasche di prima pioggia: aspetti progettuali e gestionali (Febbraio 2008).
Alessandro Abbà (XXI Ciclo)	Recupero dei rifiuti speciali nel settore delle costruzioni: studio delle possibilità di recupero e valutazione dei meccanismi di lisciviazione (Febbraio 2009).

Karim Hamdaoui (XXI Ciclo)	Experimental Applications on Cu-based shape Memory Alloys: Retrofitting of Historical Monuments and Base Isolation (Febbraio 2009).
Thomas Messervey (XXI Ciclo)	Integration of Structural Health Monitoring into the Design, Assessment, and Management of Civil Infrastructure (Febbraio 2009).
Filippo Ubertini (XXI Ciclo)	Wind Effects on Bridges: Response, Stability and Control (Febbraio 2009).
Clemente Fuggini (XXII Ciclo)	Using satellites systems for structural monitoring: accuracy, uncertainty and reliability (Febbraio 2010).
Massimo Raboni (XXII Ciclo)	Impiego di tecniche numeriche e sperimentali per l'analisi di fenomeni multiphysics (Luglio 2010).
Alsaleh Raed (XXIII Ciclo)	Verification of wind pressure and wind induced response of a supertall structure using a long-term structural health monitoring system (Ottobre 2010).

INDICE

INTRODUZIONE	1
---------------------------	----------

1. LA QUALITÀ DI UN ACQUA POTABILE	5
---	----------

1.1	Generalità.....	5
1.2	Qualità chimica dell'acqua.....	6
1.3	Qualità microbiologica dell'acqua.....	9
1.3.1	Stima della sostanza organica.....	9
1.4	Influenza delle fonti di approvvigionamento sulla qualità dell'acqua.....	12
1.5	Influenza dei processi di trattamento sulla qualità dell'acqua.....	13
1.6	Influenza dei sistemi di distribuzione sulla qualità dell'acqua.....	16
1.7	Normativa sulla qualità dell'acqua.....	18
1.7.1	Linee Guida WHO.....	18
1.7.2	Decreto legislativo n.31 del 2 Febbraio 2001.....	20

2. CRITERI PER LA GESTIONE E L'OTTIMIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI DI POTABILIZZAZIONE	25
---	-----------

2.1	Generalità.....	25
2.2	Verifiche di funzionalità.....	27
2.2.1	Monitoraggio.....	27
2.2.2	Verifiche sperimentali sull'impianto.....	30
2.2.2.1	Verifiche idrodinamiche.....	31
2.2.2.2	Verifiche di sedimentabilità.....	33
2.2.2.3	Verifiche dei sistemi di aerazione.....	34
2.2.2.4	Ottimizzazione delle operazioni di	

	controlavaggio dei filtri.....	35
2.2.3	Verifiche sperimentali di laboratorio.....	36
2.2.3.1	Prove di Jar test.....	36
2.2.3.2	Consumo di ossidante.....	38
2.2.3.3	Potenziale di formazione dei sottoprodotti di ossidazione.....	39
2.2.3.4	Determinazione isoterme di adsorbimento ...	40
2.2.3.5	Misura dell'attività biologica.....	42
2.3	Tecniche di upgrading gestionale ed impiantistico	43
2.3.1	Criteri generali per la scelta di intervento.....	44
2.3.2	Tipologia di intervento.....	46
2.3.2.1	Intervento gestionale.....	47
2.3.2.2	Intervento impiantistico.....	49
2.3.3	Alcuni esempi di interventi di upgrading.....	51
2.3.3.1	Interventi per la rimozione dell'arsenico.....	51
2.3.3.2	Interventi per il controllo dei DBPs.....	53

3. VERIFICHE DI FUNZIONALITÀ:

	PROCEDURE APPLICATIVE	57
3.1	Generalità.....	57
3.2	Criteri di monitoraggio.....	57
3.2.1	Il campionamento.....	58
3.2.2	Le metodiche analitiche.....	60
3.2.3	Criteri di scelta dei parametri di qualità.....	65
3.3	Elaborazione dati gestionali.....	67
3.3.1	Calcolo e verifica delle portate.....	67
3.3.2	Calcolo dei principali parametri di processo.....	68
3.3.2.1	Carico idraulico.....	68
3.3.2.2	Tempo di permanenza.....	69
3.3.3	Calcolo delle concentrazioni.....	69
3.3.4	Calcolo dei carichi.....	70

3.3.5	Calcolo dei rendimenti di rimozione.....	71
3.4	Verifica dell'attività biologica.....	71
3.4.1	Obiettivi.....	72
3.4.2	Test di OUR.....	73
3.4.3	Test di AUR.....	73
3.5	Verifica della capacità ossidativa.....	74
3.5.1	Obiettivi.....	75
3.5.2	Domanda di consumo degli ossidanti applicabili.....	75
3.5.3	Potenziale di formazione dei sottoprodotti.....	76
3.6	Verifica dell'impiego di carbone attivo.....	77
3.6.1	Obiettivi.....	78
3.6.2	Carbone attivo.....	79
3.6.3	Determinazione dell'isoterma di Freundlich.....	81
3.6.4	Prove in colonna.....	83
3.7	Prove di simulazione dei processi.....	84
3.7.1	Obiettivi.....	85
3.7.2	Prove di simulazione.....	85

4. APPLICAZIONI DELLE VERIFICHE

DI FUNZIONALITÀ: IL CASO DI ASMORTARA.....87

4.1	Impianti di potabilizzazione gestiti da AsMortara.....	87
4.2	Stato di fatto degli impianti di potabilizzazione.....	88
4.2.1	Caratteristiche acqua.....	90
4.2.2	Linea acque.....	91
4.3	Obiettivi delle verifiche di funzionalità svolte.....	99
4.4	Risultati: impianto di Sant' Albino.....	100
4.4.1	Monitoraggio routinario.....	100
4.4.2	Monitoraggio intensivo.....	104
4.4.3	Verifica dell'attività biologica.....	107
4.4.4	Verifica della capacità ossidativa.....	109
4.4.5	Verifica dell'impiego di carbone.....	111
4.4.6	Prove di simulazione del processo di filtrazione.....	114

4.5	Risultati: impianto di Piazza Marsala.....	116
4.5.1	Monitoraggio routinario.....	116
4.5.2	Monitoraggio intensivo.....	121
4.5.3	Verifica dell'attività biologica.....	122
4.6	Risultati: impianto di Porta Novara.....	123
4.6.1	Monitoraggio routinario.....	123
4.6.2	Monitoraggio intensivo.....	127
4.6.3	Verifica dell'attività biologica.....	129
4.7	Risultati: impianto di Corso Torino.....	130
4.7.1	Monitoraggio routinario.....	130
4.8	Risultati: verifica del materiale di riempim	

5.4.1.2	Monitoraggio della formazione dei THMs e del consumo di cloro a diversi tempi dall'aggiunta di tre dosaggi di NaClO.....	179
5.4.2	Verifica dell'impiego di carbone attivo per contenere l'eccessiva richiesta di ossidante in disinfezione.....	186
5.4.2.1	Determinazione del parametro di controllo..	186
5.4.2.2	Determinazione delle isoterme di Adsorbimento.....	194
5.4.2.3	Prove di disinfezione con ClO ₂ su campioni in uscita dal filtro a sabbia precedentemente messi a contatto con il carbone attivo.....	199
5.4.3	Verifica dell'impiego di carbone attivo per contenere l'eccessiva richiesta di ossidante in disinfezione mediante prove in colonna.....	205
5.4.3.1	Prove in colonna con alimentazione uscita dal filtro biologico.....	206
5.4.3.2	Prove in colonna con alimentazione uscita dalla miscelazione.....	210
5.4.3.3	Prove in colonna con alimentazione uscita dal filtro a sabbia.....	211
CONCLUSIONI		231
BIBLIOGRAFIA		241

Introduzione

La presente tesi di dottorato ha riguardato le verifiche di funzionalità ed i criteri di ottimizzazione applicabili agli impianti di potabilizzazione.

La potabilizzazione delle acque può essere conseguita attraverso schemi di trattamento diversamente articolati, in funzione delle caratteristiche dell'acqua grezza da trattare. Negli ultimi decenni, il trattamento dell'acqua destinata al consumo umano è diventato sempre più complesso sia per far fronte ad un peggioramento della qualità della fonte sia per rispondere all'esigenza di qualità sempre più elevata.

La direttiva europea 98/83/UE, recepita in Italia con il D.Lgs. 31/2001, ha introdotto alcune novità che hanno avuto importanti implicazioni di tipo tecnico-gestionali negli impianti potabilizzazione. Nasce quindi l'esigenza, da un lato, di impiegare nuove tecnologie di trattamento, sempre più efficaci nei confronti dei "nuovi" inquinanti e, dall'altro, di adottare tecniche di gestione degli impianti in modo da ottimizzarne il funzionamento.

Le problematiche riguardanti la funzionalità degli impianti di potabilizzazione (Collivignarelli e Sorlini, 2005, 2008 e 2009) sono legate a molteplici aspetti:

- la scelta di processi di trattamento in grado di rimuovere efficacemente gli inquinanti e, nel contempo, di non peggiorare la qualità chimica dell'acqua (formazione di sottoprodotti di disinfezione, residui di reagenti, ecc.);
- la progettazione di un impianto secondo criteri in grado di garantire il corretto funzionamento e, quindi, il conseguimento degli obiettivi di

esaminati al fine di migliorare la qualità dell'acqua erogata dagli impianti stessi nonché di indagare le problematiche tecnico-gestionali degli impianti stessi.

Gli impianti di potabilizzazione analizzati sono quelli gestiti da ASMortara e da AEM Cremona.

L'indagine è stata condotta con lo scopo di individuare la tipologia di impianto (natura delle acque grezze, ubicazione, caratteristiche tecniche), il funzionamento e le principali problematiche gestionali nonché tecniche.

È stata fatta un'attenta analisi degli impianti di potabilizzazione prescelti, attraverso sopralluoghi all'impianto, colloqui con i gestori ed infine una campagna sperimentale ad hoc che ha previsto sia interventi di tipo gestionale attraverso l'attività di monitoraggio (routinario ed intensivo) che l'effettuazione di verifiche di funzionalità.

Tali verifiche rivestono un'importanza "particolare" in quanto permettono da un lato l'ottimizzazione del funzionamento dei processi depurativi che oggi danno (ben più che in passato) ampia garanzia di efficienza e, dall'altro, il miglioramento del bilancio economico di esercizio.

Il presente elaborato è suddiviso nelle seguenti parti:

- I. **prima parte** (capp. 1, 2): sono descritti gli aspetti normativi relativi alla acque destinate al consumo umano; e successivamente sono riportati i criteri per la gestione e l'ottimizzazione degli impianti di potabilizzazione, molti dei criteri citati nel testo sono normati solo nel caso di applicazione alle acque reflue.
- II. **Seconda parte** (cap. 3): è riportata una descrizione delle procedure applicative delle verifiche di funzionalità svolte presso gli impianti di potabilizzazione prescelti.
- III. **Terza parte** (capp. 4, 5): sono riportati e discussi i risultati delle verifiche di funzionalità condotte sugli impianti stessi, dapprima vengono riportati le risultanze delle verifiche di funzionalità applicate agli impianti gestiti da ASMortara, successivamente sono esposte le risultanze delle verifiche applicate all'impianto di potabilizzazione

gestito da AEM Cremona. Per i casi presi in esame sono infine proposti alcuni possibili interventi migliorativi.

Conclusioni

La presente tesi di dottorato ha riguardato le verifiche di funzionalità ed i criteri di ottimizzazione applicabili agli impianti di potabilizzazione.

L'applicazione rigorosa ed estesa per un periodo significativo di un'analisi di funzionalità su un impianto di potabilizzazione, come i casi di studio, può risultare uno strumento utile per l'ottimizzazione dei processi depurativi ed il miglioramento del bilancio economico di esercizio.

Le verifiche di funzionalità di un impianto di trattamento permettono di conseguire in fase di gestione i seguenti obiettivi:

- valutare le reali condizioni di funzionamento;
- valutare la capacità di rimozione degli inquinanti;
- verificare la conformità con i limiti di qualità prescritti dalle normative vigenti;
- individuare eventuali anomalie di funzionamento o carenze di funzionamento;
- individuare le cause di malfunzionamento;
- individuare interventi per ottimizzare il funzionamento dell'impianto o per risolvere eventuali malfunzionamenti.

Le verifiche di funzionalità possono essere applicate nei diversi punti che compongono un sistema di approvvigionamento, dalla fonte al rubinetto per l'utilizzo finale.

Per una valutazione completa è necessario un approccio integrato, che vada a considerare molteplici aspetti (tecnici-costruttivi, di processo ed economici). Un

approccio di questo tipo richiede che le verifiche di funzionalità siano effettuate seguendo procedure precise e dettagliate.

Nonostante la carenza di procedure standardizzate (esistono numerose metodiche ufficiali di tipo analitico mentre non vi sono numerosi riferimenti ufficiali sulle procedure di verifica di funzionalità degli impianti), in questo lavoro di tesi di dottorato si è voluto individuare una proposta di protocollo di verifica che, generalmente si compone di molteplici verifiche specifiche integrate tra di loro (alcune delle quali, come visto, fanno riferimento a metodiche standardizzate).

I passi principali in cui una verifica integrata potrebbe svilupparsi sono i seguenti:

- definizione dell’obiettivo della verifica;
- individuazione della procedura di verifica;
- definizione dei criteri di elaborazione dei dati.

Nella pratica gestionale ordinaria le verifiche di funzionalità non sono convenzionalmente applicate, in particolare negli impianti di piccole e medie dimensioni.

L’esperienza di monitoraggio e verifiche di funzionalità condotte negli impianti reali oggetto di studio nella presente tesi di dottorato conferma che queste rappresentano uno strumento essenziale per comprendere le reali condizioni di funzionamento di un impianto, per individuare possibili criticità, i margini di miglioramento e definire adeguate proposte di ottimizzazione.

Di seguito si riportano le considerazioni riassuntive emerse per i due impianti reale oggetto di studio.

Il lavoro di tesi svolto presso *gli impianti di potabilizzazione gestiti da ASMortara* (attraverso l’acquisizione ed elaborazione dei dati gestionali, l’effettuazione sia di monitoraggi intensivi dei parametri critici, sia di sopralluoghi tecnici sull’impianto e sia di approfondimenti analitici) ha permesso di:

- definire lo stato di fatto;

- verificare le prestazioni dei singoli processi e le condizioni operative in modo da assicurare una garanzia in termini di efficienza;
- individuare le criticità tecnico-gestionali;
- mettere in atto una serie di interventi correttivi a vario livello.

Le principali considerazioni sui risultati ottenuti sono state principalmente il riscontro di alcune incongruenze con quanto stabilito da progetto, come segue:

- i principali inquinanti critici sono: ammoniaca; manganese; arsenico;
- nessun riscontro di presenza di sostanza organica disciolta;
- le concentrazioni di ossigeno in fase di preossidazione sono inferiori rispetto ai valori di saturazione (10-11 mg/L), è quindi necessario un potenziamento di tale fase anche mediante integrazioni impiantistiche;
- risulta necessario il ripristino/reintegro del materiale di riempimento dei filtri a sabbia, valutando anche l'ipotesi di impiegare un filtro misto (quarzite e pirolusite) come nel caso dell'impianto di potabilizzazione di Sant'Albino; laddove presente la pirolusite valutare non solo il reintegro di tale materiale ma anche la rigenerazione di esso mediante aggiunta di agenti chimici quali ad esempio ipoclorito di sodio, permanganato di potassio.
- per quanto riguarda due dei quattro impianti (Sant'Albino e Corso Torino) la nitrificazione biologica avviene nel comparto di filtrazione su carboni attivi e non, come previsto da progetto, nei filtri a sabbia (biofiltri). Viene inoltre confermata la non utilità della fase di adsorbimento su carbone attivo granulare;
- laddove la fase di adsorbimento su carbone attivo funge da reattore bioogico (B.A.C.), tale unità di trattamento non va nell'immediato modificata in quanto unico trattamento adibito alla nitrificazione, quindi per un periodo transitorio andrà mantenuto attivo;
- l'ozono risulta inutile e non sostenibile economicamente per la rimozione del manganese;
- si è registrato un basso dosaggio di ossidante (0,02 mg/L) in fase di disinfezione finale ed una mancanza di valutazioni sul cloro residuo e sui DBPs (sottoprodotti di disinfezione), principale problema legato

all'utilizzo di biossido di cloro è la formazione di sottoprodotti inorganici, il clorito e il clorato.

Tra le ipotesi di razionalizzazione della filiera di trattamento formulate l'alternativa più idonea risulta essere quella che ricalca la filiera di trattamento presente presso l'impianto di Porta Novara, ovvero una fase di preossidazione seguita da una fase di biofiltrazione ed infine una fase di disinfezione finale, cautelativamente si può prevedere in testa ai biofiltri il dosaggio in linea di cloruro ferrico per garantire l'adeguata rimozione/precipitazione dell'arsenico, parametro risultato essere critico.

Per verificare sistematicamente sia la corretta funzionalità dei processi che le operazioni di gestione, andrà steso e applicato in maniera continuativa un adeguato piano di monitoraggio e controllo interno.

L'individuazione di criteri di ottimizzazione dei trattamenti applicati presso *l'impianto di potabilizzazione gestito da AEM Cremona*, al fine di migliorare la qualità dell'acqua erogata dall'impianto stesso eliminando quella componente organica non adeguatamente rimossa dalla filiera causante sia la formazione di sottoprodotti indesiderati, sia l'eccessiva richiesta di reagente in disinfezione finale, è stato possibile grazie all'esecuzione di programmate prove in laboratorio riconducibili a due principali filoni d'inchiesta:

- prove finalizzate alla verifica dell'impiego di ipoclorito di sodio in disinfezione finale in sostituzione del biossido di cloro dosato nell'impianto;
- prove mirate a verificare l'impiego di carbone attivo come trattamento aggiuntivo al fine di eliminare la sostanza organica presente nella matrice acquosa studiata e di contenere così la richiesta di ossidante in disinfezione finale e con l'obiettivo finale di realizzare dei filtri misti sabbia e carbone, in luogo degli attuali filtri a sabbia.

Il primo filone d'inchiesta è stato caratterizzato da prove di simulazione della fase di disinfezione con ipoclorito di sodio su campioni in uscita dal filtro a sabbia con l'obiettivo di valutare la possibilità di sostituire il biossido di cloro dosato nell'impianto con il suddetto ossidante. I dati raccolti mostrano che

l'acqua giunta quasi al termine del ciclo di trattamento presenta ancora un'eccessiva richiesta di reagente; in particolare si è riscontrato che:

- l'acqua presenta un consumo particolarmente accelerato in corrispondenza dei primi minuti di contatto, all'incirca del 30%;
- l'acqua, dopo due giorni di contatto (tempo massimo di contatto dell'acqua nella rete di distribuzione) con l' NaClO , consuma più del 90% dell'ossidante inizialmente dosato.

I forti consumi sono giustificati dalla presenza della matrice disciolta che nessun trattamento intermedio è in grado di rimuovere. Poiché la presenza di sostanza organica disciolta nell'acqua è la principale causa della formazione dei trialometani in presenza dell'ipoclorito di sodio, sono stati analizzati anch'essi in quanto elementi nocivi per la salute umana e soggetti a severi limiti normativi. I risultati ottenuti mostrano un quadro del tutto negativo:

- la formazione di THMs aumenta progressivamente con l'aumentare del dosaggio iniziale di cloro e con il trascorrere del tempo di contatto;
- la matrice testata supera la concentrazione limite imposta dalla legge per i THMs ($30\mu\text{g/L}$) a basse concentrazioni iniziali di NaClO e dopo poche ore di contatto acqua/ossidante.
- dal contatto acqua/cloro il composto che si genera in quantità maggiori è il cloroformio (CHCl_3);
- le concentrazioni di THMs che si generano a partire dall'acqua prelevata dai FS sono indipendenti dalla fase di controlavaggio del filtro stesso: la quantità di ogni composto che si crea è la medesima in qualsiasi fase, di più o meno criticità, del filtro.

Dimostrata ancora una volta la presenza eccessiva di sostanza organica v8 0 0 10.98 275.61612438.5.98

- a parità del tempo di contatto, all'aumentare del dosaggio iniziale di CA il rendimento di rimozione della sostanza organica espressa in termini di Assorbanza UV a 254 nm aumenta progressivamente;
- i carboni risultati migliori sono: Picabiol (vegetale e macroporoso), Picahydro F22 (minerale e mesoporoso) e Poractiv M21 (minerale e macroporoso). Tali carboni hanno determinato rendimenti di rimozione della sostanza organica, a parità sia di dosaggio di CA che di tempo di contatto, rispettivamente del 100% per il primo e il secondo carbone e del 92% per l'ultimo sopra elencato.

Si è proceduto affinando la ricerca simulando la fase di disinfezione con ClO_2 su campioni prelevati dal filtro a sabbia e posti preventivamente a contatto con il carbone attivo in polvere. L'applicazione del carbone attivo ha permesso di osservare che tutti i carboni utilizzati, anche se con rendimenti differenti, consentono una significativa rimozione della sostanza disciolta e di conseguenza determinano una diminuzione della domanda di ossidante, ma quelli che hanno fornito risultati migliori sono stati quelli di origine minerale ad esclusione dell'ultimo sotto elencato che è di origine vegetale:

- NORIT GAC 1240 determina la rimozione del 96% della sostanza disciolta e consente di ridurre del 50% il consumo di ClO_2 in disinfezione finale;
- PICAHYDRO F22 fornisce un rendimento di rimozione pari all'88% e riduce del 38% il consu(inano)Tj10.98 0 0 r19.9856 413.8405 Tm(m)Tj10.98 0 0 10.98 3675

nella scelta di un carbone attivo di origine minerale e di tipo mesoporoso, consentendo così di ridurre il contenuto di sostanza organica e di conseguenza il consumo di ClO_2 in disinfezione finale. Dagli studi condotti, al fine di ottimizzare la fase di filtrazione, si è proseguito la sperimentazione eseguendo delle prove di monitoraggio, dette prove in colonna, presso l'impianto per valutare il tempo di esaurimento dei carboni attivi granulari risultati migliori con l'obiettivo di selezionare un solo carbone attivo per un eventuale futuro impiego nell'impianto reale stesso.

La scelta del carbone migliore è stata fatta attraverso l'esecuzione di tre tipologie di prove sperimentali: una prima serie di prove finalizzata a valutare l'influenza del carbone attivo granulare sulla domanda di ossidante, una seconda serie di prove mirate a verificare la capacità adsorbente del carbone attivo stesso, ed infine una terza serie di prove volta a stimare la natura chimico – fisica della sostanza organica disciolta nell'acqua da trattare mediante analisi spettroscopica a diverse lunghezze d'onda. Tali prove sono state condotte sui campioni di acqua prelevati in ingresso ed in uscita dalle colonnine installate in uscita dal filtro biologico, in uscita dalla fase di miscelazione ed in uscita dal filtro a sabbia. Inoltre, le analisi sono state eseguite su campioni non filtrati e filtrati su membrana a $0,45\ \mu\text{m}$, al fine di stabilire se la sostanza organica presente nella matrice acquosa fosse in forma sospesa o disciolta.

Le prove di domanda di biossido di cloro, eseguite su campioni in uscita dalla colonnina con alimentazione uscita dal filtro biologico, mostrano che il carbone attivo è in grado di ridurre notevolmente la richiesta di ossidante in disinfezione finale; questo è dovuto al fatto che in uscita dal filtro biologico l'acqua è ricca di materiale organico, che è responsabile del consumo di ClO_2 e che viene rimosso dal carbone attivo mediante il processo di adsorbimento. Tuttavia, il tempo di funzionamento di tale colonnina è di sole due settimane, a causa del rapido impaccamento del carbone dovuto al deposito di materiale biologico all'interno della colonnina stessa.

Le medesime prove effettuate su campioni in uscita dalla colonnina con alimentazione uscita dalla fase di miscelazione sono poco significative, in quanto dopo pochi giorni di funzionamento il carbone attivo si è impaccato per

effetto del deposito di composti insolubili, generati dall'aggiunta di potassio e cloruro ferrico all'interno di tale comparto di trattamento.

Per quanto riguarda le prove di domanda di ClO_2 relative a campioni in uscita dalla colonnina con alimentazione uscita dal filtro a sabbia, si è notato che le curve di domanda relative ai carboni minerali GAC 1240, Poractiv M21 e Picahydro F22 presentano un andamento pressoché simile, con buoni rendimenti lungo tutto il periodo di funzionamento; al contrario, le curve relative ai carboni vegetali GCN 1240 e Poractiv C24 mostrano valori elevati della domanda di ossidante già dopo pochi giorni di funzionamento. Globalmente, si evince che il carbone attivo che garantisce i valori più bassi della domanda è il GAC 1240, mentre i valori più elevati della domanda di ossidante si registrano con il GCN 1240.

Le prove di verifica della capacità adsorbente del carbone attivo granulare, eseguite su campioni in uscita dalla colonnina con alimentazione uscita dal filtro biologico, mostrano che il carbone è in grado di adsorbire la sostanza organica disciolta nell'acqua e pertanto i valori di assorbanza UV a 254 nm, indice del contenuto di sostanza organica nell'acqua, sono bassi, soprattutto nel primo periodo di funzionamento della colonnina.

Nel caso delle prove relative alla colonnina con alimentazione uscita dalla fase di miscelazione i risultati non sono significativi, a causa dell'impaccamento del materiale adsorbente.

Tali prove effettuate su campioni in uscita dalla colonnina con alimentazione in uscita dal filtro a sabbia mostrano che il carbone avente la migliore capacità di adsorbimento è il Poractiv C24; ciò significa che tale carbone trattiene la materia organica in modo più efficiente rispetto agli altri carboni attivi.

Da quanto esposto si può dedurre che la soluzione possibile, in risposta alla problematica dell'eccessiva richiesta di biossido di cloro in disinfezione finale, consiste nell'impiego di un filtro misto sabbia – carbone presso l'impianto di potabilizzazione di Cremona, al fine di rimuovere la sostanza organica disciolta responsabile del consumo di ClO_2 . Dunque, per quanto riguarda gli sviluppi futuri, con l'intento di passare all'implementazione a scala reale, si ritiene opportuna l'adozione di un impianto pilota; dotato di controlavaggi

automatizzati, consentirebbe di raggiungere l'esaurimento del carbone attivo in tempi più lunghi rispetto a quelli verificati nella presente sperimentazione. Infatti, ad una scala maggiore, con portate costanti e controlavaggi automatici, i risultati sarebbero sicuramente più precisi.

Bibliografia

Andreottola G., Foladori P. (2002). “Significato ed utilità delle stime di attività biologica dei fanghi attivi per l’ottimizzazione della gestione degli impianti di depurazione”. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di ingegneria Civile e Ambientale.

APAT (2003). “Metodi analitici per le acque, Manuali e linee guida”. (www.apat.gov.it).

ASCE (1993). “Measurement of oxygen transfer in clean water”. American Society of Civil Engineers.

ASTM D2035-80 (2003). “ Standard Practice for coagulation-flocculation Jar Test of water”.

ASTM D3860-79 – “Standard Practice for determination of adsorptive capacity of carbon by isotherm technique”.

AWWA (1999). “Handbook of community water supplies”, 5th edition, AWWA, McGraw Hill Inc.

AWWA Standard Methods 2350 (1998). “Examination of water and wastewater: oxidant demand/requirement”, 20th edition.

- Conio O. e Porro R. (2004). "L'arsenico nelle acque destinate al consumo umano". Fondazione Amga onlus, Franco Angeli editore, pp.229.
- Crittenden J.C., Trussel R.R., Hand D.W., Howe K.J., Tchobanoglous G. (2005). "Adsorption. Water treatment: principles and design". II ed. Jhon Wiley & Sons Inc.
- Crittenden, J. C., Reddy, P. S., Arora, H., and Hand, J. T. D. W. (1991). "Predicting GAC performance with Rapid Small-Scale Column Tests " Journal AWWA, Jan.
- D. Lgs. n.27 (2002). "Modifiche ed integrazioni al D. Lgs. 31/2001". 2 febbraio.
- D. Lgs. n. 31 (2001). "Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano". 2 febbraio.
- Direttiva europea n. 83 (1998). "Qualità delle acque destinate al consumo umano". 3 novembre.
- EPA (1983). " Development of standard procedures for evaluating oxygen transfer devices". EPA 600/2-83-102, October.
- EPA (1999). "Alternative disinfectants and oxidants guidance manual". EPA 815-R-99-014, April, 1999
- EPA (2003). "Design Manual- Removal of arsenic from drinking water by adsorptive media". EPA/600/R-03/019, March, pp. 96.
- ISPRA (2009). "L'ottimizzazione del servizio di depurazione delle acque di scarico urbane: massimizzazione dei recuperi di risorsa (acque e fanghi) e

- riduzione dei consumi energetici”. ISPRA Rapporti - 93/2009 ISBN 978-88-448-0394-0.
- Kaplan L.A., Reasoner D.J., Rice E.W., Bott T.L. (1992). “A survey of assimilable organic carbon, biodegradable organic carbon and coliform growth response in US drinking water”. *Journal Water SCI*, vol. 5, pp. 207-224.
- Karpel Vel Leitner N., De Laat J., Dore M., Suty H., Pouillot M. (1992). “Chlorite and chlorine dioxide removal by activated carbon”. *Water Research*, 26, p. 1053.
- Katz and N. Narkis. (2001). “Removal of chlorine dioxide disinfection by-products by ferrous salts”. *Water Research*, 35(1), pp. 101-108.
- Kawamura, S. (2000). “Integrated design and operation of water treatment facilities”. 2nd ed., John Wiley and Sons, New York.
- Knocke W. R. e Iatrou A. (1993). “Chlorite Ion Reduction by Ferrous Iron Addition”. AWWARF book, p. 40.
- Korn C., Andrews R.C. and Escobar M. (2002). “Development of Chlorine Dioxide-Related By-Product Models for Drinking Water Treatment”. *Water Research*, 36, pp. 330-342.
- Korshin G.V., Li C., Benjamin M.M. (1997). “Monitoring the properties of natural organic matter through UV spectroscopy: a consistent theory”. *Water research*, vol. 31, November 7, pp. 1787-1795.
- LeChevallier M.W. (1999). “The case for maintaining a disinfectant residual”. *Journal of American Water Work Association*, vol. 99, pp 86-94.

- LeChevallier M.W., Shaw N.E., Kaplan L.A., Bott T.L. (1993). "Development of a rapid AOC method for water". *Applied and Environmental Microbiology*, vol 59.
- Manahan S.E. (2000). "Chimica dell'ambiente". Piccin Editore.
- Masten S.J., Hoigné J. (1992). "Comparison of ozone and hydroxyl radical-induced oxidation of chlorinated hydrocarbons in water". *Ozone Science Engineering*, 14(3), pp. 197-214.
- Metcalf and Eddy (1991). "Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, Reuse". 3rd edition, McGraw-Hill Int. Ed., Singapore.
- Meucci L. (1996). "Ossidazione con ozono e sistemi misti". *Giornata di studio: La disinfezione delle acque ad uso potabile: aspetti chimici ed igienico sanitari*.
- Nurizzo C., Marforio T., Butelli P. (1993). "Removal of herbicides from groundwater". *Environmental Man&Health*, 4(2), p. 24.
- Roccaro P., Vagliasindi F.G.A. (2009). "Differential vs. absolute UV absorbance approaches in studying NOM reactivity in DBPs formation: comparison and applicability". *Water research*, vol. 43, pp. 744-750.
- Snoeyink V.L., Summer S.R. (1999). "Adsorption of organic compounds. Water quality & treatment – A handbook of community water supplies", V ed., AWWA, McGraw Hill Inc.
- Sorlini S., Collivignarelli C., Belluati M. (2004). "Utilizzo dei carboni attivi nelle acque potabili". *IA-Ingegneria Ambientale*, vol. XXXIII, N.9, settembre, pp. 412-418.

- Sumarcz-Gorska J., Gernaey K., Demuinck C., Vanrolleghem P., Verstraete W. (1996). "Nitrification monitoring in activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) measurements". *Water Research*, 30(5), pp. 1228-1236.
- Toor R., Mohseni M.. (2007). "UV-H₂O₂ based AOP and its integration with biological activated carbon treatment for DBP reduction in drinking water". *Chemosphere*, 66, pp. 2087–2095.
- UNI EN 12901 (2005). "Prodotti usati per il trattamento di acque destinate al consumo umano - Materiali di supporto e di filtrazione – Definizioni".
- UNI EN 12904 (2005). "Prodotti utilizzati per il trattamento di acque destinate al consumo umano - Sabbia e ghiaia di quarzo":
- UNI EN 12915-1 (2009). "Prodotti utilizzati per il trattamento delle acque destinate al consumo umano - Carbone attivo granulare - Parte 1: Carbone attivo granulare vergine".
- UNI EN 12915-2 (2009). "Prodotti utilizzati per il trattamento delle acque destinate al consumo umano - Carbone attivo granulare - Parte 2: Carbone attivo granulare riattivato".
- UNI EN 14718 (2007). "Influenza dei materiali organici sull'acqua destinata al consumo umano – Determinazione della richiesta di cloro – Metodo di prova".
- UNI EN 25667-1 (1996). "Qualità dell'acqua. Campionamento. Guida alla definizione di programmi di campionamento".
- UNI EN 25667-2 (1996). "Qualità dell'acqua. Campionamento. Guida alle tecniche di campionamento".

UNI EN ISO 8467 (1995). “Determinazione dell’indice di permanganato”.

Uyguner C.S., Bekbolet M. (2005). “Implementation of spectroscopic parameters for practical monitoring of natural organic matter”. *Desalination*, vol. 176, pp. 47-55.

WHO (2004). “Safe piped water: Managing microbial water quality in piped distribution systems”. Edited by Richard Ainsworth.

WHO (2006). “Guidelines for drinking water quality”. First addendum to third edition.