



**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 XI Nuova serie (XXV Ciclo)

**Tecniche innovative per il  
trattamento/recupero dei fanghi di  
depurazione delle acque reflue**

Tesi di Dottorato  
Ing. Matteo Canato

*Relatore:*  
Prof. Ing. Giorgio Bertanza

*Controrelatore:*  
Prof. Ing. Sergio Papiri

Pavia, Ottobre 2012

... più le rileggo e più capisco  
quanto mi abbiano cambiato

*C'è una forza motrice più forte del vapore,  
dell'elettricità e dell'energia atomica: la volontà.*

Albert Einstein

*Il mondo è nelle mani di coloro che hanno il coraggio di sognare  
e di correre il rischio di vivere i propri sogni.*

Paulo Coelho

## **Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile**

### **Graduate School in Civil Engineering**

<b>Settore:</b>	Ingegneria
<b>Field:</b>	Engineering
<b>Sede Amministrativa non consortile:</b>	Università degli Studi di PAVIA
<b>Administrative location:</b>	University of Pavia
<b>Durata:</b>	3 anni
<b>Duration:</b>	3 years
<b>Periodo formativo estero:</b>	come previsto dal regolamento del Dottorato di Ricerca
<b>Period in foreign organization:</b>	as required by the school's rules
<b>Numero minimo di corsi:</b>	6
<b>Minimum number of courses:</b>	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](mailto:fabio@dipmec.unipv.it)

## Collegio dei Docenti – Teaching Staff

CIAPONI Carlo	Professore Ordinario (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

Al termine di un percorso è doveroso ringraziare le persone che in esso ci hanno accompagnato, affiancato, sostenuto, consigliato, motivato e incoraggiato e, allo stesso tempo, è inevitabile fare un “bilancio”.

Mettendo sul piatto della bilancia ciò che ho ricevuto e ciò ho dato, penso di essere nettamente perdente. In questi 3 anni (che avrei voluto non finissero mai e che, invece, sono volati) sulla mia strada ho incontrato tante persone, ciascuna delle quali mi ha insegnato, consigliato e scientificamente stimolato. Partendo da questo presupposto, mi viene estremamente difficile riuscire ad esprimere a ciascuna di queste persone, in poche righe, la mia gratitudine, che è molta. Non ci sono distinzioni o preferenze, ciascuno mi ha dato tanto e ad ognuno sono egualmente grato.

Detto questo, qualche nome lo voglio fare....

**Grazie** al professor **Carlo Collivignarelli** e **Maria Cristina Collivignarelli** che, per primi, hanno creduto in me e che mi hanno concesso questa preziosa opportunità nonché al professor **Giorgio Bertanza**, il mio tutor, persona, per me, veramente speciale... per tanti motivi.

A tutti voi grazie perché negli anni, mai mi sono sentito abbandonato ma vi ho sempre trovato al mio fianco, pronti a consigliarmi e insegnarmi e che mai avete deluso le mie aspettative. Allo stesso tempo, spero di non aver deluso io le vostre...

Grazie anche al professor **Vincenzo Riganti** che si è sempre dimostrato disponibile e prodigo di consigli.

Un grazie va anche ad **Alessandro Abbà**, che con la discrezione, disponibilità e tranquillità che lo contraddistinguono si è affiancato a questo neo-laureato un po' incazzoso (*si può scrivere!?*) e l'ha aiutato e consigliato durante questo percorso. Grazie Ale!!!

Grazie **alla mia famiglia** (Rita, Sandro e Martina) che mi ha supportato anche in questa “avventura” e che, come sempre, rappresenta per me il porto sicuro nel quale approdare quando il mare è in burrasca.

Grazie, ovviamente, anche ad **ASMortara S.p.A.** e **3V Green Eagle S.p.A.**, senza le quali buona parte di questo lavoro non sarebbe stato possibile.

Un grazie lo devo anche ad **Ado** (al secolo **Riccardo Bigoni**) compagno di studio nonché collega di dottorato (anche se nel “filone bresciano”) col quale ho intrapreso il “grande salto” e fatto qualche “volo pindarico”.

Grazie anche **a chi ha sempre tifato per me** (lo zio Paolo, gli “zii” Tino&Marisa e Marco Borgognoni) e... **a chi non ha creduto in me**; con

questo lavoro vi ho dimostrato (coi fatti, come è mia consuetudine) che, non solo ancora una volta avete sbagliato nel giudicarmi, ma, molto più importante, che ce l'ho fatta!

Infine, anche se tecnicamente non sono ringraziamenti, un pensiero lo voglio dedicare anche a “ IL Presidente” **Federico Castagnola** e all’ ”agricolo” **Marco Sordi** che hanno sopportato (stoicamente) le mie “lune” nel periodo di scrittura di questa tesi ed **ai miei nonni**, che so, sarebbero orgogliosi di questo traguardo.

## 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: Optimization of an Active Thermal Insulation Structure (Aprile 2000).
Barbolini Massimiliano (XII Ciclo)	Dense Snow Avalanches: Computational Models, Hazard Mapping and Related Uncertainties (Aprile 2000).
Espa Paolo (XII Ciclo)	Moti atmosferici generati da forze di galleggiamento: simulazioni numeriche e studio su modello fisico (Aprile 2000).
Petrini Lorenza (XII Ciclo)	Shape Memory Alloys: Modelling the Martensitic Phase Behaviour for Structural Engineering Exploitation (Aprile 2000).

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).
Crotti Barbara Marianna (XXIII Ciclo)	Verifiche di funzionalità e criteri di ottimizzazione degli impianti di potabilizzazione: alcuni casi di studio (Gennaio 2011).
Franchioli Luigi (XXIII Ciclo)	Analisi prestazionale dei sistemi di distribuzione idrica e calcolo della loro affidabilità (Marzo 2011).
Marzi Alessandro (XXIII Ciclo)	Impianti in materiale plastico per il trasporto dei fluidi nel settore navale (Febbraio 2011).

Emanuela Torti (XXIV Ciclo)	Experimental and numerical analysis of a confined two-phase turbulent jet system (Ottobre 2011).
Veronica Cornalba (XXIV Ciclo)	Recupero energetico da biomasse: aspetti tecnici e di impatto ambientale (Ottobre 2011).
ZhiCong Chen (XXIV Ciclo)	Structural monitoring and system control using a wireless sensor network (Ottobre 2011).
Sidi Mohammed El-Amine Bourdim (XXIV Ciclo)	Diagnosis and Seismic Analysis of a Historical Monument in Tlemcen (Ottobre 2011).
Paolo Basso (XXIV Ciclo)	Optimal form-finding algorithms for the control of structural (Giugno 2012).

# INDICE

INTRODUZIONE	1
<b>Capitolo 1</b>	
LA PROBLEMATICHE DEI FANGHI DI DEPURAZIONE: POSSIBILI STRATEGIE DI INTERVENTO	
1.1 Introduzione	5
1.2 Monitoraggio	8
1.3 Indici di funzionalità degli impianti	10
1.3.1 Metodologia di valutazione	11
1.4 Le verifiche di funzionalità applicate alla linea fanghi	19
1.4.1 Verifica del comparto di ispessimento	22
1.4.2 Verifica del comparto di stabilizzazione	23
1.4.3 Verifica del sistema di disidratazione meccanica	28
1.5 Possibili interventi per la minimizzazione della produzione dei fanghi	32

1.5.1	Interventi sulla linea acque	33
1.5.1.1	Interventi sui trattamenti chimico-fisici e meccanici	33
1.5.1.2	Interventi sul comparto biologico	34
1.5.1.3	Interventi sulla linea fanghi	46
1.5.1.3.1	Interventi di tipo chimico-fisico	46
1.5.1.3.2	Interventi di tipo biologico	52
1.6	Il recupero di materia ed energia dai fanghi	56
1.6.1	Recupero in agricoltura	57
1.6.2	Il compostaggio dei fanghi	63
1.6.3	La co-digestione di fanghi e altri substrati organici	65
1.6.4	Il co-incenerimento dei fanghi	66
1.6.4.1	Co-incenerimento con i rifiuti urbani	67
1.6.4.2	Produzione di cemento	68
1.6.4.3	Produzione di asfalto	69
1.6.4.4	Produzione di laterizi	70
1.6.5	Inertizzazione termica/ceramizzazione	71
1.6.6	Pirolisi/gassificazione	71
1.6.7	Altri processi termo catalitici	74
1.6.8	Ossidazione a umido ( <i>Wet Oxidation</i> )	74
1.6.9	Ossidazione con acqua supercritica (SCWO – <i>SuperCritical Water Oxidation</i> )	75

## Capitolo 2

CRITERI DI IMPOSTAZIONE DEL LAVORO DI RICERCA 77

## Capitolo 3

METODOLOGIE DI ESECUZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI

3.1 Prove di ispessimento	82
3.1.1 Descrizione degli apparati sperimentali	82
3.1.2 Modalità di effettuazione delle prove	83
3.2 Prove di disidratazione meccanica	89
3.2.1 Macchine utilizzate nella sperimentazione	90
3.2.1.1 Descrizione della centrifuga	90
3.2.1.2 Descrizione della filtropressa	92
3.2.2 Modalità di effettuazione delle prove di disidratazione Meccanica	94
3.3 Prove sul processo di ossidazione ad umido	104
3.3.1 Descrizione dell'impianto pilota di ossidazione ad umido	104
3.2.1.1 Modalità di esecuzione delle prove	107
3.3.2 Descrizione dell'impianto di ossidazione ad umido alla scala reale	111
3.4.1 Modalità di esecuzione delle prove	112
3.4 Descrizione dell'impianto pilota di digestione anaerobica	115
3.4.1 Modalità di esecuzione delle prove	119
3.5 Descrizione dell'impianto di lavaggio del residuo solido	122
3.3.1 Modalità di esecuzione delle prove	123

#### **Capitolo 4**

#### DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA PER IL CONFRONTO TECNICO- ECONOMICO DI DIFFERENTI SOLUZIONI PER LA GESTIONE DEI FANGHI

4.1 Dimensionamento degli impianti e calcolo dei bilanci di massa	130
---	-----

4.2	Calcolo dei consumi energetici	133
4.3	Definizione dei parametri tecnico-economici	135
4.4	Valutazione tecnico-economica	139
4.5	Analisi di sensitività	139
4.6	Caso di studio	140
4.6.1	Dimensionamento degli impianti e calcolo dei bilanci di massa	143
4.6.2	Calcolo dei consumi energetici	149
4.6.3	Definizione dei costi/ricavi specifici	152
4.6.4	Valutazione tecnico-economica e analisi di sensitività	153

## **Capitolo 5**

### METODICHE PER L'ESECUZIONE DELLE ANALISI CHIMICHE E CHIMICO-FISICHE

5.1	Misura della conducibilità specifica	162
5.2	Misura del pH	162
5.3	Misura del COD	163
5.3.1	Misura del COD (metodica standard)	164
5.3.2	Misure di COD con test colorimetrici	167
5.4	Misura del BOD	170
5.5	Misure di azoto totale e solubile	171

5.6. Misura del TKN	173
5.7 Misura dell'ammoniaca	174
5.8 Misure di fosforo totale e solubile	175
5.9 Misura dei cloruri	176
5.10 Contenuto di solidi	177
5.10.1 Solidi totali (ST)	178
5.10.2 Solidi sospesi totali (SST)	179
5.10.3 Solidi fissi e volatili a 600 °C (SSNV e SSV)	181
5.11 Determinazione del contenuto di metalli pesanti	182
5.12 Test di cessione per materiali granulari	183

## **Capitolo 6**

### **L'OTTIMIZZAZIONE DELLE STRUTTURE ESISTENTI ATTRAVERSO LE VERIFICHE DI FUNZIONALITA'**

6.1 Prove di ispessimento	185
6.1.1 Considerazioni finali	191
6.2 Prove di disidratazione meccanica	193
6.2.1 Efficienza del trattamento e parametri tecnico-operativi	193
6.2.2 Aspetti economici	200
6.2.3 Confronto economico tra il servizio di centrifugazione in outsourcing e la filtropressa installata presso l'impianto	203
6.2.3.1 Caso 1: interventi di tipo occasionale	205
6.2.3.2 Caso 2: servizio regolare e continuativo	207

6.2.3.3 Costi per la filtropressa	207
6.2.4 Disidratazione mediante centrifugazione: confronto economico tra unità mobile (servizio in outsourcing) e installazione fissa	210
6.2.5 Vantaggi tecnico-gestionali del servizio in outsourcing	213
6.2.6 Considerazioni finali	214

## **Capitolo 7**

### LA MINIMIZZAZIONE DEI FANGHI

7.1 Prove di ossidazione ad umido alla scala pilota	217
7.1.1 Effetto della temperatura di reazione	218
7.1.2 Effetto della pressione parziale iniziale di ossigeno	222
7.1.3 Effetto del tempo di reazione	223
7.1.4 Effetto della concentrazione dei solidi sospesi	224
7.1.5 Considerazioni riassuntive	225
7.2 Prove di ossidazione ad umido alla reale	226
7.2.1 Effetto della temperatura di reazione	226
7.2.2 Effetto del tempo di reazione	228
7.2.3 Effetto dell'ossigeno	229
7.2.4 Considerazioni riassuntive	231
7.3 Considerazioni integrate	233

## Capitolo 8

### VALORIZZAZIONE DEI RESIDUI DELL'OSSIDAZIONE AD UMIDO

8.1 Il recupero di energia	236
----------------------------	-----

8.1.1 Volumi	236
8.1.2 COD	237
8.1.3 Forme azotate	241
8.1.4 Solidi	243
8.1.5 BOD	245
8.1.6 Biogas	246
8.1.7 Cloruri	251
8.1.8 pH	252
8.1.9 Conducibilità	254
8.1.10 Considerazioni finali	255
8.1.10.1 Tipo di liquame e carico di COD	255
8.1.10.2 pH	258
8.1.10.3 Ammoniaca indissociata	259
8.1.10.4 Cloruri	261
8.1.10.5 Tempo di residenza cellulare	262
8.1.10.6 Esame integrato dei dati	264
8.2 Il recupero di materia	266
8.2.1 Acqua di lavaggio	272
8.2.2 Caratteristiche del materiale lavato	288
8.2.3 Test di cessione	298
8.2.4 Considerazioni conclusive	301

## **Capitolo 9**

### **SOSTENIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA DELL'OSSIDAZIONE AD UMIDO NEL TRATTAMENTO DEI FANGHI DI DEPURAZIONE**

9.1 Dimensionamento dell'impianto e bilancio di massa	306
9.2 Consumi energetici	311
9.2.1 Sollevamento	312
9.2.2 Micro-grigliatura	312
9.2.3 Dissabbiatura/Disoleatura	313
9.2.4 Sedimentazione	313

9.2.5 Aerazione della vasca di ossidazione biologica	314
9.2.6 Ispessitore	316
9.2.7 Digestore anaerobico	318
9.2.8 Disidratazione meccanica	317
9.2.9 Risultati ottenuti	318
9.3 Valutazione tecnico-economica e analisi di sensitività	319
9.4 Considerazioni finali	326
SINTESI E CONCLUSIONI	327
BIBLIOGRAFIA	339
ALLEGATI	353

## INTRODUZIONE

*“Historically, it was common to see schematics that showed the water treatment scheme in detail [...] and an arrow at the end that simply said ‘sludge to disposal’ ” (Neyens et al., 2004).*

Questa frase consente di capire quanta scarsa attenzione sia stata, storicamente, dedicata, fino ad oggi, alla gestione dei fanghi prodotti dagli impianti di depurazione delle acque reflue urbane. Il presente lavoro ha inizio proprio in corrispondenza della freccia finale dello schema a blocchi sopra citato ed ha come oggetto quella che, comunemente, viene indicata come “problematica dei fanghi di depurazione”.

L’origine del problema è il quadro normativo oggi in vigore; infatti, da un lato viene imposto ai gestori degli impianti di depurazione il raggiungimento di elevati rendimenti di rimozione degli inquinanti, dall’altro vengono modificati i possibili scenari di conferimento finale dei fanghi.

Il raggiungimento di elevati standard di qualità delle acque imposti dalla normativa vigente comporta, sia il peggioramento delle caratteristiche qualitative dei fanghi (in quanto contengono un maggior quantitativo di inquinanti) sia una maggiore produzione.

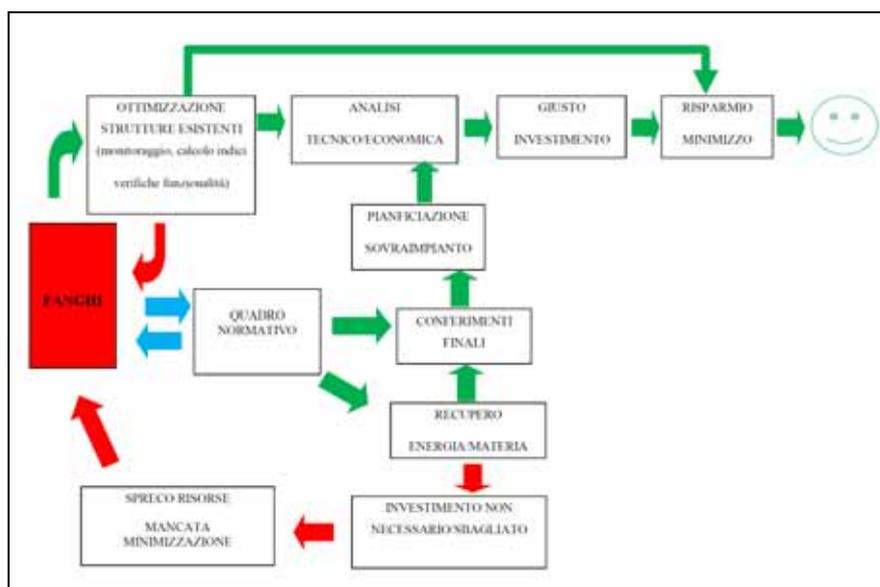
In merito alle possibili soluzioni utilizzate per il conferimento finale dei fanghi, in Italia, storicamente, sono sempre state adottate lo smaltimento in discarica e lo spandimento in agricoltura.

Lo smaltimento in discarica dei fanghi è sempre più difficoltoso in quanto, oramai, quest'ultima viene vista come la soluzione finale di un più complesso ciclo di trattamento dei rifiuti (non per niente, anche se con alcune deroghe, la Direttiva 1999/31/CE, recepita in Italia col D.Lgs. 36/2003 e s.m.i., sostanzialmente vieta il conferimento dei fanghi di depurazione tal quali in discarica).

Lo spandimento in agricoltura dei fanghi, invece, è da diversi anni al centro di un forte dibattito che ha portato, soprattutto nelle regioni del Nord, ad una fervida legislazione regionale volta a regolamentare tale possibilità.

La soluzione del problema è tutt'altro che semplice e richiede per la sua risoluzione, ad avviso dello scrivente, un approccio di tipo globale. Esso si basa, per prima cosa, sulla massimizzazione delle strutture esistenti mediante il calcolo di indici (indici di funzionalità) e la verifica della funzionalità dei vari comparti presenti in impianto. Solo dopo l'effettuazione di queste prove e sulla base dei loro risultati, può essere presa in considerazione la possibile adozione di tecniche utili a ridurre la quantità di fango (o all'origine o prima del conferimento finale). Allo scopo di individuare la migliore tecnica di minimizzazione e/o di gestione, è necessario procedere ad una valutazione che consenta di verificare la sostenibilità tecnico-economica della/e soluzione/i ipotizzata/e. Infine, deve essere valutata la possibilità di recuperare materia e/o energia dai fanghi, così come indicato dal testo Unico Ambientale (D.Lgs. 152/2006). Si evidenzia che, pur non essendo oggetto del presente lavoro, un approccio di tipo globale come quello appena descritto, non può prescindere da una accurata pianificazione territoriale.

Nella figura seguente (Figura I.1) è rappresentato lo schema concettuale utilizzato per affrontare il problema.



**Figura I.1.** Rappresentazione grafica dello schema concettuale utilizzato per affrontare la “problematica fanghi”.

Gli aspetti più innovativi riportati all’interno della tesi riguardano le verifiche di funzionalità del comparto di ispessimento e disidratazione meccanica del fango, messe a punto nel corso dell’attività sperimentale e la metodica che consente il confronto tecnico-economico tra differenti soluzioni di gestione dei fanghi.

Tra le numerose tecniche di minimizzazione proposte in letteratura, nel presente lavoro, è stato esaminato il processo di ossidazione ad umido, del quale, inoltre, è stato anche studiato il possibile recupero di materia ed energia derivante dai suoi residui, rispettivamente, solido e liquido.

La tesi è strutturata in modo tale da ricalcare l’impostazione teorica sopra esposta e può essere suddivisa in 3 parti:

- parte I: bibliografica (*Capitolo 1*);
- parte II: materiali e metodi (*Capitoli 2,3,4,5*);
- parte III: risultati delle prove sperimentali e loro discussione (*Capitoli 6,7,8,9*).

Il *Capitolo 1* racchiude in sé tutta la parte bibliografica ed al suo interno sono riportati:

- i metodi utilizzabili per il calcolo degli indici di funzionalità degli impianti (col solo riferimento alla linea fanghi);
- le verifiche di funzionalità applicabili alla linea fanghi;
- una panoramica sulle possibili tecniche di minimizzazione applicabili agli impianti;
- le possibili strategie utilizzabili per il recupero di materia ed energia dai fanghi.

Il *Capitolo 2* spiega l'impostazione del lavoro sperimentale mentre il *Capitolo 3* è dedicato alla descrizione degli apparati sperimentali e alle modalità di esecuzione delle prove. Nel *Capitolo 4*, invece, è riportata la descrizione della procedura messa a punto per la valutazione tecnico-economica delle differenti soluzioni di gestione/minimizzazione dei fanghi; infine, nel *Capitolo 5*, sono descritte le metodiche analitiche utilizzate nel corso delle sperimentazioni.

I *Capitoli 6, 7 e 8* sono dedicati all'esposizione dei risultati delle prove eseguite presso gli impianti di *ASMortara S.p.A.* (prove di ispessimento e disidratazione meccanica) e *3V Green Eagle S.p.A.* (prove di ossidazione ad umido dei fanghi di depurazione alla scala pilota e reale e digestione anaerobica del residuo liquido nonché prove di lavaggio per lo studio del recupero del residuo solido derivante dal processo di *Wet Oxidation*) mentre, nel *Capitolo 9*, sono riportati i risultati della procedura di valutazione tecnico-economica concepita nell'ambito del progetto europeo denominato ROUTES ed applicata ad un impianto da 500.000 AE in cui è stato ipotizzato di minimizzare la quantità di fanghi (primari e di supero) da smaltire mediante il processo di ossidazione ad umido e di recuperare energia dalla digestione anaerobica del residuo liquido da essa derivante.

## SINTESI E CONCLUSIONI

Le tematiche presenti nella tesi di dottorato sono numerose ed hanno riguardato diversi aspetti della “problematica fanghi”.

Gli argomenti affrontati spaziano dal calcolo degli indici di funzionalità degli impianti al confronto tecnico-economico di diverse soluzioni per la gestione dei fanghi. Tutte queste tematiche possono sembrare tra di loro scorrelate, in realtà, così non è, se si legge l'intero lavoro con la giusta chiave di lettura, ossia l'ottica dell'approccio integrato.

La filosofia dell'approccio integrato più volte richiamata all'interno del presente lavoro, prevede che, prima di effettuare qualsiasi tipo di intervento di *upgrading* (sia strutturale che gestionale), interventi che richiedono solitamente cospicui investimenti economici, debba essere fotografato lo stato di salute dell'impianto. Questo viene fatto mediante il calcolo degli indici di funzionalità; tali indici consentono di valutare le prestazioni di un impianto confrontando gli indicatori effettivi (cioè che risultano dall'elaborazione dei dati gestionali) con i valori “attesi” degli indicatori stessi (valutati, per ogni caso specifico, in funzione delle condizioni di funzionamento).

Tali indici consentono, pertanto, di evidenziare i comparti nei quali l'impianto risulta carente; se questo si verifica, è necessario procedere alla verifica di funzionalità del comparto.

Proprio analizzando i dati gestionali dell'impianto di depurazione di Mortara è stato visto che due comparti necessitavano una verifica di funzionalità, da qui, le prove di ispessimento e di disidratazione meccanica.

Dalla necessità di verificare la funzionalità di questi comparti sono nate le metodiche per la **verifica di funzionalità** riportate in questa tesi, in quanto, quelle riportate in letteratura, non state ritenute soddisfacenti. Questo perché, ove esistenti, si è visto essere, per lo più, basate su un approccio che può essere definito di tipo *booleano*; ossia, viene scelto un parametro rappresentativo del processo (per esempio il contenuto di secco in uscita dal comparto di disidratazione) e lo si confronta con i rispettivi valori di letteratura o obiettivo ed il giudizio finale è basato sul criterio di "*valore raggiunto o non raggiunto*". Tale tipo di approccio, si ritiene essere sbagliato in quanto, una procedura di verifica deve consentire di evidenziare tutti quegli aspetti che consentano il raggiungimento del giusto compromesso tra ottimo tecnico ed ottimo economico. Per fare ciò, è necessario tenere conto di una serie di aspetti che tradizionalmente sono stati spesso trascurati, quali ad esempio, i costi associati ad eventuali ricircoli in testa all'impianto.

Le prove eseguite presso il depuratore di Mortara hanno testato la capacità di ispessimento dei fanghi di supero derivanti dal sedimentatore secondario dell'impianto.

Il fango testato è stato sia tal quale sia con preventiva aggiunta di polielettrolita (fango condizionato). In entrambi i casi, il fango è stato sottoposto ad ispessimento, oltre che in condizioni statiche, anche a lenta agitazione, così da simulare, in quest'ultimo caso, il risultato conseguibile con un ispessitore meccanizzato.

Le prove sono state eseguite in due giorni differenti (31 maggio e 1 giugno 2010), ma consecutivi, in modo da ridurre al minimo le variazioni nelle caratteristiche chimico-fisiche del fango utilizzato. Il fango utilizzato il primo giorno presentava un contenuto di solidi pari a circa 13,2 g/L, mentre quello del secondo, in cui è stato aggiunto polielettrolita in quantità pari a 3 mL/L, circa 14,8 g/L.

Per quanto riguarda le prove svolte su **fango non condizionato**, la movimentazione lenta del fango (a simulare un ispessitore meccanizzato) ha portato benefici che si sono evidenziati in termini di:

- maggior grado di ispessimento (al termine della prova, dopo 24 ore, il livello dell'interfaccia fango ispessito-surnatante ha raggiunto quota 49 cm, contro 55 cm per il fango mantenuto in condizioni statiche; inoltre la concentrazione di solidi a -30 cm dal pelo libero è risultata molto minore, in presenza di agitazione lenta (3,4 g/L contro 10,5 g/L), ad indicare un maggior trasferimento dei solidi sul fondo del cilindro);
- una maggiore regolarità e stabilità (nel tempo) della velocità di sedimentazione-ispessimento.

In entrambi i casi sono stati misurati valori molto bassi di solidi totali nel surnatante, almeno durante le prime ore di prova.

Le prove effettuate con **fango condizionato** hanno evidenziato come l'aggiunta del polielettrolita non determini un miglioramento nelle prestazioni dell'ispessimento, infatti:

- la velocità di sedimentazione è risultata più bassa (circa del 50%) rispetto al caso di fango non condizionato;
- la concentrazione di solidi a - 30 cm dal pelo libero si è mantenuta elevata (25-28 g/L) denotando una difficoltà di addensamento del fango sul fondo del cilindro.

Anche le prove svolte con fango condizionato hanno evidenziato benefici derivanti dalla lenta movimentazione del fango, in particolare una velocità di sedimentazione più regolare e costante nel tempo e una minore concentrazione di solidi sospesi nel surnatante a fine prova.

In definitiva, nel caso specifico, si può concludere che l'aggiunta di un polielettrolita (condizionamento) non sembra portare benefici, mentre l'adozione di un sistema di movimentazione lenta (ispessimento meccanizzato) potrebbe migliorare l'efficienza complessiva del trattamento.

Le **prove di disidratazione meccanica** dei fanghi, effettuate con la filtropressa installata presso il depuratore di Mortara e con la centrifuga mobile *Alfa Laval*, hanno consentito di valutare le prestazioni tecnico-economiche delle macchine e mettere a punto la relativa metodica di verifica.

Dal punto di vista delle prestazioni tecniche, la centrifuga ha ottenuto un riscontro migliore in termini di percentuale di secco nel fango disidratato (21,7% nella Prova 2 rispetto al 18,1 della filtropressa) mentre la filtropressa in termini di qualità del residuo liquido da ricircolare in testa all'impianto di depurazione (COD filtropressa=600 mg/L contro un COD medio per la centrifuga di 1.500 mg/L).

In tutte le prove, l'indice di cattura dei solidi ha presentato valori molto elevati (> 90%) che, nel caso della filtropressa raggiunge il valore massimo e prossimo al 100%.

L'analisi delle voci economiche ha permesso di evidenziare le voci che sono risultate essere maggiormente incisive sul costo totale di smaltimento del fango disidratato, ossia: il costo di smaltimento del fango (*S.F.*) che incide per circa l'80% e il costo del polielettrolita ( $\text{€}_{\text{poli}}$ ), che incide per circa il 15%. Il costo dell'ammortamento è stato omesso dai risultati delle prove in quanto, non solo si è visto in fase di elaborazione incidere in modo non significativo sul costo totale (circa 7,5%), ma anche per la difficoltà di operare un confronto con la filtropressa, vista la sua obsolescenza. Altrettanto poco significative sono risultate essere le seguenti voci di costo: trattamento/smaltimento dei fanghi prodotti dalla depurazione del centrato (T.S.F.C.) (5%), dalla manutenzione (*M*) (4%), del consumo di energia elettrica (*E.E.*) (2,5%), del personale (*P*) (2%) e del fabbisogno di ossigeno per la depurazione del centrato ( $\text{O}_2$ ) (<1%). Inoltre, va sottolineato che il costo relativo all'acqua ( $\text{€}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) è stato considerato nullo poiché l'acqua di rete è in gestione alla stessa società che gestisce l'impianto di depurazione (*ASMortara S.p.A.*).

In merito al confronto tra la installazione fissa ed *outsourcing* si è visto che il servizio in *outsourcing*, se effettuato con un contratto "conveniente", caratteristico cioè di una prestazione regolare e prolungata nel tempo (caso 2), può risultare competitivo, oltre che sul piano operativo, anche sul piano

economico; la differenza, rispetto alla filtropressa, è solo del 4% circa (600 vs 575 €<sub>t<sub>SS</sub> alim.</sub>, rispettivamente). A parità di macchina utilizzata, l'installazione fissa risulta essere più conveniente rispetto all'esternalizzazione (560 vs 600 €<sub>t<sub>SS</sub> alim.</sub>, rispettivamente); ciò, del resto, è un risultato atteso: l'onere aggiuntivo dell'esternalizzazione è infatti giustificato da una serie di vantaggi tecnico-gestionali offerti dall'*outsourcing* difficilmente quantificabili, ma con un sicuro riflesso positivo in termini economici.

Per quanto riguarda la gestione dei fanghi la soluzione in *outsourcing* comporta una serie di vantaggi tecnico-gestionali difficilmente monetizzabili, ma che hanno un sicuro risvolto a livello economico, e che possono risultare decisivi nella scelta di ricorrere a questa soluzione, soprattutto, per impianti medio-piccoli, dotati di adeguato volume di accumulo e, comunque, ogni qual volta si presentino situazioni provvisorie cui è necessario far fronte in breve tempo.

Solo sulla base dei risultati ottenuti dalle verifiche di funzionalità è possibile valutare l'adozione di tecniche di minimizzazione. Queste tecniche possono essere applicate, come si è ampiamente visto nel *Capitolo 1*, sia sulla linea acque sia sulla linea fanghi e possono essere di tipo "convenzionale" o "innovativo". Inoltre, possono essere di tipo "preventivo", quando consentono di prevenire la produzione di fango all'interno del processo biologico, o di tipo "riduttivo", quando riducono la quantità di fango da smaltire.

A tale proposito è stata studiata la possibile applicazione del processo di **ossidazione ad umido** ai fanghi di depurazione. La sperimentazione è stata svolta presso l'azienda *3V Green Eagle* (Grassobbio – BG) dove sono state eseguite sia prove di ossidazione ad umido alla scala di laboratorio sia alla scala reale.

In base alle prove di ossidazione ad umido effettuate è stato visto che il parametro che è risultato influenzare maggiormente il processo è la temperatura; infatti, passando da 225 a 250 °C il rendimento di rimozione del COD passa, rispettivamente, dal 54 all'80%, ed il rapporto tra SSV/SST si dimezza (da 0,25 a 225 °C e 0,11 a 250 °C). Inoltre, è stato visto che l'idrolisi dei solidi sospesi è molto rapida: la rimozione avviene già nei primi 15 minuti a 250 °C.

L'aumento maggiore in termini di rendimento di rimozione del COD si ottiene aumentando il tempo di reazione da 15 a 60 minuti (si passa dal 59 all'80%) mentre, per tempi di contatto maggiori, si ha sì un aumento di tale indice ma non così marcato.

La quantità di ossigeno fornita non risultata essere un parametro particolarmente limitante per la cinetica di rimozione. Infatti, seppur presentando valori del rendimento di rimozione del COD maggiori all'80% per le condizioni più estreme (33 e 44 atm), per tutte le altre prove (laboratorio e scala reale) tale parametro si attesta a valori prossimi al 70%.

Sulla base dei risultati sopra esposti, le condizioni di processo che consentono di ottenere un residuo solido caratterizzato da un minimo contenuto di sostanza organica e un residuo liquido che risulti idoneo alla biodegradazione sono le seguenti:

- temperatura: 250 °C;
- percentuale di ossigeno rispetto allo stechiometrico: 69%;
- tempo di reazione: 60 minuti.

Al fine di perseguire le indicazioni presenti in Normativa in merito al recupero energetico e riutilizzo dei rifiuti, è stato alimentato un **digestore anaerobico pilota** col residuo liquido prodotto dal processo di *Wet Oxidation* ed è stata monitorata la produzione di biogas; inoltre, è stato anche valutato il possibile riutilizzo come inerte del residuo solido prodotto dall'ossidazione ad umido del fango nel settore delle costruzioni.

Il processo di digestione anaerobica del residuo liquido ottenuto dalla *Wet Oxidation*, ad oggi, non ha dato i risultati sperati. Complessivamente, infatti, sono stati riscontrati un basso rendimento di rimozione della sostanza organica e una scarsa produzione di biogas, peraltro, di pessima qualità.

Al termine della sperimentazione si è cercato di individuare le possibili cause alla base dell'inibizione del processo di digestione anaerobica. A tale scopo sono stati analizzati gli andamenti, nell'arco dell'intera sperimentazione, di diversi parametri, in modo tale da poterli confrontare nella fase di cattivo funzionamento rispetto alla fase di buon funzionamento dell'impianto.

In funzione della principale evidenza sperimentale di funzionamento del processo, ossia l'abbattimento del COD, sono stati confrontati gli andamenti dei seguenti parametri: pH, ammoniaca libera, cloruri, carico di COD rispetto ai SSV contenuti nel reattore e carico volumetrico di COD. Inoltre, è stato evidenziato il possibile effetto della tipologia di liquame alimentato.

Dall'analisi integrata dei dati si è visto che la tipologia di substrato e il carico di COD in ingresso risultano essere, da subito, fattori limitanti per il processo di digestione mentre, negli ultimi due periodi della sperimentazione, il processo risulta essere inibito dalla quasi totalità dei parametri (fase di alimentazione con il NEW TOP). Pertanto, alla luce dei dati a disposizione, non è possibile imputare l'inibizione del processo ad un singolo fattore in quanto, dall'analisi integrata dei dati, si è visto che non vi è stata una fase in cui un solo parametro è risultato essere critico.

Sul **residuo solido ottenuto dall'ossidazione ad umido** dei fanghi di depurazione sono state effettuate, sempre a *3V Green Eagle S.p.A.*, tre **prove di lavaggio** al fine di studiare il suo possibile recupero nel settore delle costruzioni o il suo smaltimento in discarica per inerti.

Il residuo utilizzato (FILLER) per le prove è stato ottenuto dal processo DUAL top, ossia quel processo che ossida, insieme ai fanghi di depurazione (fanghi di supero dell'impianto biologico a servizio dell'Azienda *3V Green Eagle S.p.A.*), rifiuti liquidi caratterizzati da un alto carico di COD.

Le prove di lavaggio hanno testato l'effetto di differenti rapporti liquido/solido ( $L/S=108,1$  L/kg e  $L/S=575,89$  L/kg) e del dosaggio di un tensioattivo (*Neopal* con un rapporto  $L/S=108,1$  L/kg).

Sottoponendo il FILLER a test di cessione è stato riscontrato che, nessuna tipologia di trattamento testata, consente il rispetto di tutti i limiti previsti dalla Normativa sia per il recupero del materiale nel settore delle costruzioni (D.M. 05/02/1998) sia per il conferimento del materiale in discarica per inerti (D.M. 27/09/2010), anche se i lavaggi hanno permesso di ridurre notevolmente il contenuto iniziale di inquinante.

Considerando i limiti Normativi previsti per il recupero del FILLER si nota che i parametri che risultano essere più problematici sono: mercurio, nichel,

rame e COD. Di questi, quello che è risultato maggiormente critico è il COD. Questo significa che il FILLER rilascia un'elevata quantità di sostanza organica, almeno dieci volte superiore al limite previsto dal D.M. 05/02/1998 (30 mg/L). Confrontando le concentrazioni di COD nel FILLER e nell'eluato, si è visto che esse rimangono sostanzialmente invariate, ad esclusione della prova nella quale è stato utilizzato *Neopal*. Questo evidenzia che il tensioattivo contribuisce alla rimozione della sostanza organica, nel caso in esame consente una riduzione di circa il 36% (si passa da 343.785 a 211.554 mg/kgSS).

Confrontando, invece, il rilascio di COD (valutato attraverso test di cessione) dal FILLER tal quale con quello dai FILLER ottenuti dai lavaggi, si è osservato che un aumento del rapporto L/S contribuisce ad un minore rilascio. A parità di rapporto L/S, invece, il lavaggio con *Neopal* produce un eluato con un minor contenuto di COD (9.130 contro 3.180 mg/kgSS).

I valori di COD nell'eluato delle prove condotte con *Neopal* (rapporto L/S=108,1 L/kg) e con acqua (rapporto L/S=575,89 L/kg) non risultano essere congruenti in quanto, nella prima prova, a fronte di una rimozione della sostanza organica del 36% nel FILLER, si ottiene un maggior contenuto di COD nell'eluato (3.100 contro 2.700 mg/kgSS). Questo potrebbe essere giustificato dal fatto che l'utilizzo di tensioattivo solubilizzi degli elementi che comportano un aumento del rilascio di COD.

Facendo riferimento al quantitativo di metalli pesanti rilasciati nell'eluato, le prove hanno evidenziato, invece, che, l'utilizzo del tensioattivo, non sembra essere giustificato.

Anche confrontando i risultati dei test di cessione coi limiti previsti per l'ammissibilità di un rifiuto in discarica per inerti si osserva che, nessuna prova di lavaggio, consente il loro rispetto, anche se un aumento dell'acqua di lavaggio consente il rispetto per alcuni elementi il rispetto dei limiti imposti (è il caso del nichel e dello zinco).

Il parametro che risulta particolarmente critico per l'ammissibilità in discarica è il DOC per il quale è prevista una concentrazione massima nell'eluato di 50 mg/L. Dall'analisi dei dati si evince che il contenuto di DOC diminuisce all'aumentare del rapporto L/S mentre, a parità di rapporto L/S

(108,1 L/kg), risulta minore nell'eluato del campione lavato con sola acqua. Questo potrebbe essere dovuto al non trascurabile contenuto di tensioattivo nel FILLER a fine prova. A tale proposito, si sta pensando di eseguire un risciacquo del campione al termine del lavaggio, in modo da verificare la rispondenza al limite del campione con un minore contenuto di *Neopal*.

Altre limitazioni per il conferimento in discarica per rifiuti inerti provengono dal contenuto di sostanza organica carboniosa totale (TOC) del residuo: infatti, il TOC nel materiale da destinare a tali discariche deve essere inferiore a 30.000 mg/kg. Il FILLER essiccato eccedeva questa quota e nessun lavaggio ha permesso il rispetto del limite; il miglior risultato per questo parametro è stato ottenuto nella prova di lavaggio in cui è stato utilizzato il tensioattivo.

Altro parametro critico è il contenuto di oli minerali, per il quale la Normativa prevede una concentrazione massima di 500 mg/kg. Tale valore è stato superato sia nel FILLER tal quale (17.000 mg/kg) che in quello ottenuto nelle varie prove di lavaggio effettuate con la sola acqua, mentre, l'uso di tensioattivo consente, seppur di poco, il rispetto del limite normativo.

Infine, nel caso in cui si fosse costretti ad adottare una tecnica di minimizzazione, è opportuno che essa venga scelta sulla base dei risultati derivanti da una **valutazione tecnico-economica**, in quanto essa non solo deve essere tecnicamente efficace (ridurre la quantità di fango da smaltire) ma, anche, economicamente sostenibile.

La procedura di valutazione tecnico-economica è stata concepita nell'ambito di un progetto europeo chiamato ROUTES - *Novel processing routes for effective sewage sludge management* ([http://cordis.europa.eu/fp7/home\\_it.html](http://cordis.europa.eu/fp7/home_it.html)) nel quale sono state confrontate tra di loro 15 differenti soluzioni innovative per la gestione dei fanghi.

La procedura di valutazione messa a punto è basata sul confronto tra l'impianto nella configurazione "convenzionale" e quello in cui è stata inserita una tecnica di minimizzazione (configurazione "innovativa").

Tra le possibili soluzioni esaminate è stata considerata quella in cui è stata ipotizzata l'ossidazione ad umido dei fanghi misti (primario + supero) prodotti in un impianto di potenzialità pari a 500.000 AE e la digestione anaerobica del

residuo liquido generato dal processo di *Wet Oxidation*. Per gli scenari di conferimento finale sono stati ipotizzati: lo smaltimento in discarica ed il co-incenerimento.

I parametri utilizzati nell'analisi tecnico-economica della soluzione *innovativa* sono stati, ad oggi, ipotizzati sulla base dei primi risultati derivanti sia dalle prove di ossidazione ad umido dei fanghi di depurazione condotte in laboratorio sia dal monitoraggio dell'impiantino pilota di digestione anaerobica; pertanto, l'attività sperimentale di ossidazione dei fanghi alla scala reale, ad oggi in corso, ha anche lo scopo di fornire dati più accurati in merito ai parametri di processo; infatti, i risultati da essa derivanti potrebbero, ovviamente, cambiare (anche in modo non trascurabile) i risultati dell'analisi esposta nel presente lavoro (*Capitolo 9*).

Tra l'altro, i punteggi dei due scenari potrebbero cambiare in modo significativo se i risultati sperimentali (ad oggi non ancora disponibili) dimostrassero che il residuo solido prodotto dall'ossidazione ad umido possa essere smaltito in discarica per inerti o essere recuperato come inerte nel settore delle costruzioni. Difatti, se questo trovasse conferma, non solo dovrebbero essere adottati due differenti costi di conferimento nello scenario "discarica" (100 €/t per la soluzione *convenzionale* e 20 €/t per l'*innovativa*) ma si avrebbe un ricavo derivante dalla vendita del residuo stesso.

Applicando la procedura di valutazione è risultato che la soluzione *innovativa* è sensibilmente sconveniente (dal punto di vista tecnico) rispetto alla *convenzionale* (gap <0). Gli aspetti maggiormente penalizzanti sono risultati essere: il consumo di materie prime e reagenti (gap= -1,32); l'affidabilità (soluzione in effetti poco diffusa a livello europeo) e flessibilità/modularità (gap= - 0,67) e il consumo di energia elettrica (gap= -0,56).

Viceversa, la soluzione *innovativa* risulta essere più vantaggiosa (gap > 0) rispetto alla *convenzionale* per quanto riguarda la possibilità di produrre energia elettrica (gap= +1,50) e la minore quantità di residui solidi da smaltire (gap= +1,00).

Sotto l'aspetto economico la soluzione *innovativa* risulta essere più vantaggiosa rispetto alla *convenzionale*; infatti, la sua applicazione consentirebbe un

risparmio *pro-capite* annuo pari a €1,41. Le voci economiche in cui presenta un forte vantaggio sono: il costo per lo smaltimento finale dei residui (gap= -7,89 €(AE·y)) ed i ricavi che derivano dalla vendita dell'energia elettrica e termica (gap= -4,09 €(AE·y)).

L'analisi di sensitività mostra che il costo complessivo della soluzione è maggiormente influenzato da: il costo per il conferimento finale dei residui solidi, il costo delle materie prime e dei reagenti e dalla tariffa per la rivendita dell'energia (sia essa elettrica o termica). Infatti, anche una piccola variazione di questi parametri ( $\pm 10\%$ ) comporta una significativa modificazione del costo complessivo della soluzione.

La sostenibilità ambientale degli scenari non è stata oggetto di valutazione nel presente lavoro anche se rappresenta un aspetto tutt'altro che trascurabile. Per esempio, la possibilità di inviare i fanghi ad un impianto di incenerimento piuttosto che ad uno di co-incenerimento potrebbe modificare il giudizio ambientale dello scenario, così come, per esempio, scegliendo di conferire i residui ad un impianto di termovalorizzazione piuttosto che in discarica. In merito alle emissioni in atmosfera, si sottolinea, comunque, che il processo di ossidazione ad umido emette una quantità limitata di inquinanti (per lo più rappresentati da vapore e CO<sub>2</sub>).

Pertanto, al fine di avere un giudizio complessivo sia sulla soluzione che sugli scenari ipotizzati, è opportuno far seguire alla valutazione tecnico-economica quella di sostenibilità ambientale (per esempio, *LCA*).

Si ritiene doveroso, comunque, sottolineare l'importanza di non focalizzare eccessivamente l'attenzione sui risultati numerici derivanti dall'analisi qui riportata in quanto, come più volte sottolineato, alcuni parametri potrebbero subire forti cambiamenti sulla base dei risultati sperimentali (di fatti, l'attività di ricerca è ancora in corso) ma sulla metodologia utilizzata per affrontare il problema. Detto questo, si è, comunque, voluto riportare un esempio numerico in quanto, non solo questo rende maggiormente comprensibile l'applicazione della procedura, ma anche perché i risultati che derivano da essa permettono di avere un'indicazione (seppur sintomatica) della sostenibilità tecnico-economica della soluzione.

In conclusione, i risultati riportati in questo lavoro (molti dei quali sono ancora, ad oggi, oggetto di studio) evidenziano la validità dell'approccio seguito. Infatti, si ritiene che solo un'analisi di tipo globale, come quella qui riportata, possa fornire utili strumenti ai gestori o agli enti pianificatori nel momento in cui si trovano a dover affrontare scelte inerenti la gestione dei fanghi di depurazione.

In molti casi, anche dai contatti quotidiani avuti con gestori di impianti, si è visto che è ancora molto diffusa l'idea che, per risolvere un problema, debbano essere necessariamente previsti cospicui investimenti mentre, il monitoraggio e il calcolo degli indici di funzionalità, nonché l'applicazione delle verifiche di funzionalità, hanno dimostrato, in molti casi, che questo non è necessario e che, anzi, consentono di ottenere un risparmio.

Si ritiene, pertanto, che il primo obiettivo da perseguire al fine di minimizzare la quantità di fanghi da smaltire sia **l'ottimizzazione delle strutture esistenti** e solo una volta individuate le carenze dell'impianto e sulla base di un'accurata **analisi tecnico-economica** si debba adottare una tecnica di minimizzazione. Infatti, si ritiene che, come non esista l'impianto "tipo", non esista la tecnica di minimizzazione "migliore in assoluto" ma, bensì quella migliore per quell'impianto e con quelle condizioni al contorno (funzione, anche, degli obiettivi che si prefigge il gestore).

L'analisi riportata in questo lavoro, pertanto, consente di tenere presente le peculiarità di ciascun impianto e, mediante diversi fattori, di evidenziare, nel caso di riferimento, i vantaggi tecnici ed economici derivanti dall'utilizzo di una specifica tecnica di minimizzazione.

Infine, si ritiene che, insieme oltre ad una **stabilizzazione del quadro Normativo**, sia fondamentale un'**accurata pianificazione sovra impiantistica** da parte degli enti preposti (per esempio, i gestori del Servizio Idrico Integrato) in modo che possano essere effettuati investimenti mirati ed evitati inutili sprechi.