



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 VII Nuova serie (XXI Ciclo)

**Il recupero dei rifiuti speciali nel settore
delle costruzioni:
studio delle possibilità di recupero e
valutazione dei meccanismi di lisciviazione**

Tesi di Dottorato

Ing. Alessandro Abbà

Relatore:

Prof. Ing. Carlo Collivignarelli

Controrelatore:

Prof. Ing. Sergio Papiri

INDICE

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

PARTE PRIMA

IL RECUPERO DEI RIFIUTI SPECIALI: STATO DELL'ARTE E PROBLEMATICHE CONNESSE

1. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	7
1.1 Gli aggregati naturali	7
1.1.1 Disponibilità e consumi in Italia	9
1.1.2 Caratteristiche e utilizzi	11
1.2 La classificazione dei rifiuti	15
1.3 Residui da termovalorizzazione di rifiuti solidi urbani (RSU)	18
1.3.1 Caratterizzazione quantitativa dei residui da termovalorizzazione RSU	21
1.3.2 Caratterizzazione qualitativa dei residui da termovalorizzazione RSU	24
1.4 Aggregati derivanti dall'attività di lavaggio dei terreni contaminati	28
1.4.1 Distribuzione nazionale dei siti contaminati	30
1.4.2 Caratterizzazione qualitativa dei siti contaminati	33
1.4.3 Gestione degli interventi di bonifica	36
2. ASPETTI NORMATIVI	41
2.1 Premessa	41
2.2 La gestione dei rifiuti in Italia	42
2.2.1 Il D. Lgs. n. 152/2006 (aggiornato con il D. Lgs. del 16 gennaio 2008)	42

2.2.2	La Direttiva 67/548/CEE e sue modifiche	46
2.2.3	Il D. Lgs. n. 36/2003	48
2.2.4	Il D.M. del 3 agosto 2005	51
2.3	La possibilità di recupero dei rifiuti ai sensi delle normative vigenti	57
2.3.1	Il D.M. del 5 febbraio 1998 (modificato dal D.M. 186/2006)	58
2.4	Verifica della compatibilità al recupero	60
2.4.1	La marcatura “CE” degli aggregati	60
2.4.2	La valutazione del rilascio di inquinanti	66
2.4.3	Norme tecniche di settore per i materiali da costruzione	69
2.4.4	L’ecocompatibilità dei rifiuti	71

3. MECCANISMI DI RILASCIO DI INQUINANTI E

TEST DI CESSIONE: TIPOLOGIE E CONTESTI

AMBIENTALI 77

3.1	Premessa	77
3.2	La normativa UNI EN 12920:2006	78
3.3	Il fenomeno della lisciviazione	82
3.3.1	I meccanismi di rilascio	82
3.3.1.1	Solubilizzazione	85
3.3.1.2	Trasporto attraverso il solido	86
3.3.1.3	Diffusione attraverso lo strato lisciviato	89
3.3.1.4	Diffusione attraverso lo strato limite tra solido e liquido	90
3.3.1.5	Trasporto di massa nel liquido lisciviante	93
3.3.1.6	Reazioni chimiche	97
3.3.1.7	Attacco biologico	97
3.3.2	I fattori che influenzano la lisciviazione	98
3.3.2.1	Fattori chimici	100
3.3.2.2	Fattori fisici	104

3.3.3	Le tipologie di test di cessione	107
3.3.3.1	Test statici	108
3.3.3.2	Test dinamici	110
3.3.3.3	Parametri caratteristici dei test di cessione	113
3.4	Scenari di recupero	115

4.	ESPERIENZE DI RECUPERO DI ALCUNE TIPOLOGIE DI RIFIUTI SPECIALI	119
4.1	Premessa	119
4.2	Campi di impiego dei residui della termovalorizzazione di RSU e degli aggregati derivanti dalle operazioni di lavaggio dei terreni contaminati	120
4.3	Requisiti principali degli aggregati riciclati e dei prodotti ottenuti	124
4.3.1	Prestazioni tecniche	124
4.3.2	Valutazione del rilascio di inquinanti	137
4.3.3	Ecocompatibilità	144

PARTE SECONDA MATERIALI E METODI

5.	LA PIATTAFORMA BRESCIANA RECUPERI	157
5.1	Ubicazione e storia dell'azienda	157
5.2	Impianti della Piattaforma PBR	159
5.2.1	Sezione inertizzazione rifiuti	159
5.2.2	Sezione bonifica e recupero dei terreni e dei rifiuti	160
5.2.2.1	Impianto di lavaggio terreni e rifiuti	161

5.2.2.2	Impianto di bonifica biologica dei terreni	168
5.2.3	Impianto di stoccaggio e ricondizionamento rifiuti	170
5.2.4	Sezioni di presidio ambientale	171
5.2.4.1	Pavimentazione	172
5.2.4.2	Impianto di raccolta e depurazione delle acque meteoriche e di percolamento	172
5.2.4.3	Impianto di aspirazione e abbattimento delle emissioni aeriformi	173
5.2.4.4	Impianto di lavaggio ruote automezzi	173
5.2.4.5	Portale di rilevabilità radioattiva	174
5.2.5	Strutture di servizio	174
5.2.5.1	Laboratorio di analisi	174
5.2.5.2	Aree di stoccaggio rifiuti	175
5.2.5.3	Sistema di raccolta delle acque di falda	175

6. METODOLOGIE DI ESECUZIONE DELLE PROVE .. 177

6.1	Materiali studiati	177
6.1.1	Residui derivanti dalle operazioni di lavaggio dei terreni contaminati	178
6.1.2	Residui provenienti dalle operazioni di lavaggio delle scorie RSU	179
6.1.3	Inerti naturali	180
6.1.4	Cementi	181
6.1.5	Miscele di calcestruzzo	183
6.1.5.1	Provini per le analisi di laboratorio	183
6.1.5.2	Canalette di scarico scarpata	186
6.1.5.3	Cordoli	189
6.2	Il calcestruzzo ed i suoi componenti	192
6.3	Mix design del calcestruzzo	200
6.4	Programma delle prove effettuate	208

6.5	Prove di caratterizzazione del calcestruzzo	210
6.5.1	Prove sul calcestruzzo fresco	210
6.5.2	Prove sul calcestruzzo indurito	213
6.6	Metodiche di esecuzione dei test di cessione	218

PARTE TERZA

RISULTATI SPERIMENTALI

7.	COMPORTAMENTO FISICO-MECCANICO	
	DELLE MISCELE DI CALCESTRUZZO	227
7.1	Caratteristiche degli aggregati utilizzati nella sperimentazione	227
7.1.1	Contenuto di metalli nei materiali studiati	228
7.1.2	Requisiti richiesti dalle norme UNI	232
7.2	Caratterizzazione fisico-meccanica delle miscele di calcestruzzo	242
7.3	Caratterizzazione fisico-meccanica dei manufatti	245
7.3.1	Canalette di scarico scarpata	245
7.3.1.1	Risultati delle prove a compressione	246
7.3.1.2	Risultati delle prove a flessione	248
7.3.1.3	Risultati delle prove di assorbimento d'acqua	249
7.3.2	Cordoli	250
7.3.2.1	Risultati delle prove a compressione	250
7.3.2.2	Risultati delle prove a flessione	252
7.3.2.3	Risultati delle prove di assorbimento d'acqua	254
7.3.2.4	Risultati delle prove di abrasione	255

8. VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO	
AL RILASCIO DI INQUINANTI	257
8.1 Risultati dei test di cessione relativi ai	
materiali granulari	257
8.1.1 Test di cessione a singolo stadio	
(UNI EN 12457-2)	258
8.1.1.1 Andamento del rilascio di inquinanti	
in funzione della natura del materiale	270
8.1.2 Test di cessione a doppio stadio	
(UNI EN 12457-3)	273
8.1.2.1 Andamento del rilascio di inquinanti	
in funzione della natura del materiale	284
8.1.3 Andamento del rilascio di inquinanti	
in funzione del test di cessione	287
8.1.4 Influenza del pH sulla lisciviazione	
(UNI CEN/TS 14429)	297
8.2 Risultati dei test di cessione relativi	
alle miscele di calcestruzzo	304
8.2.1 Test di cessione per materiali monolitici	
(UNI 10802)	304
8.2.1.1 Influenza della fessurazione del	
calcestruzzo	308
8.2.2 Test di cessione a singolo stadio	
per le miscele frantumate	316
8.2.3 Test di diffusione (NEN 7375)	324
CONCLUSIONI	341
BIBLIOGRAFIA	345

APPENDICE A – LA NORMATIVA NEN 7375:

MODALITÀ DI ELABORAZIONE DEI RISULTATI..... 357

A.1	Analisi degli eluati	357
A.2	Procedura di calcolo	358

Introduzione

La presente tesi di dottorato ha riguardato il recupero di rifiuti speciali nel settore delle costruzioni.

Nel corso degli ultimi decenni si è registrato un aumento della produzione di rifiuti solidi urbani; tale aspetto presenta la necessità di gestire in modo coerente il ciclo dei rifiuti, ricorrendo, ove possibile, a forme di recupero alternative allo smaltimento in discarica.

Già a seguito del Decreto Legislativo n. 22 del 5 febbraio 1997 (Decreto Ronchi) è stata abbandonata la nozione di smaltimento generalizzato per dare spazio al concetto di recupero, prevenzione e riduzione. Diventa, quindi, fondamentale:

- ridurre alla fonte la quantità di rifiuti prodotti;
- attuare ogni possibile intervento affinché i rifiuti siano valorizzati, riciclati e riutilizzati;
- avviare allo smaltimento finale solamente ciò che non è più riutilizzabile.

I principali vantaggi legati alle procedure di **recupero** sono, in primis, il recupero di materiali che altrimenti andrebbero ad incrementare il volume delle discariche adibite al proprio stoccaggio, ed in secondo luogo il risparmio di materiali naturali. Allo sfruttamento di risorse naturali, oltre ad un vero e proprio esaurimento di materia, sono infatti associati problemi legati all'ubicazione delle cave di aggregati naturali, soprattutto quelli impiegati nel confezionamento del calcestruzzo; tali materiali, a causa del basso valore unitario, sono vantaggiosamente commercializzabili solamente se le relative fonti di approvvigionamento sorgono vicino ai luoghi di utilizzo, cioè in prossimità dei grandi centri abitati.

Lo scopo di tale ricerca è quello di verificare la possibilità di produrre manufatti in calcestruzzo a prestazioni meccaniche medie e basse, sostituendo

gli inerti naturali con aggregati riciclati provenienti dal lavaggio delle seguenti categorie di rifiuti:

- **ceneri pesanti** derivanti dalla termovalorizzazione dei rifiuti solidi urbani;
- **terreni contaminati** sottoposti alle procedure di bonifica.

Tali rifiuti speciali sono stati sottoposti, presso la Piattaforma Bresciana Recupero (PBR), ad un trattamento di lavaggio e classificazione granulometrica. Lo scopo di tali trattamenti è quello di concentrare gli inquinanti nella frazione più fine (limo), ottenendo pertanto materiale di granulometria superiore a 0,063 mm con caratteristiche simili a quelle degli aggregati naturali.

A livello europeo sono state pubblicate una serie di norme (dette armonizzate) riguardanti i prodotti per le costruzioni, il cui scopo principale è quello di regolamentarne la qualità. In particolare, esse richiedono che tutti i prodotti commercializzati in ambito Europeo, siano provvisti di una “marcatrice CE” entro un periodo stabilito. In Italia, per gli aggregati da calcestruzzo la marcatura è diventata obbligatoria dal 1 giugno 2004.

Pertanto la sperimentazione ha inizialmente individuato la possibilità di marcare i residui provenienti dalle operazioni di lavaggio delle scorie RSU e dei terreni contaminati.

Successivamente sono stati confezionati una serie di **miscele di calcestruzzo**, sostituendo parzialmente o totalmente gli inerti naturali con gli aggregati “riciclati” e variando il quantitativo e la tipologia di cemento; lo scopo di tale fase è quello di individuare le miscele ottimali dal punto di vista delle resistenze meccaniche in vista di una successiva applicazione alla scala reale.

Sono stati infatti realizzati, presso un’azienda di manufatti prefabbricati, **cordoli e canalette di scarico scarpata** (embrici), verificando, in accordo con la normativa tecnica di settore, la rispondenza alle proprietà fisico-meccaniche richieste.

Parallelamente alle fasi precedenti è stato valutato il **rilascio di inquinanti** sia dai residui in uscita dal trattamento di lavaggio della Piattaforma, sia dalle

miscele di calcestruzzo confezionate nella sperimentazione. Il comportamento alla lisciviazione diventa infatti estremamente importante per la collocazione di tali manufatti nell'ambiente.

Il presente elaborato è suddiviso nelle seguenti parti:

- I. **prima parte** (capp. 1, 2, 3, 4): dopo una breve descrizione, reperita in letteratura, delle caratteristiche dei materiali utilizzati nel presente lavoro di ricerca, sono descritti gli aspetti normativi finalizzati al recupero dei rifiuti; viene analizzato il fenomeno della lisciviazione, descrivendo in particolare i meccanismi di rilascio coinvolti, e successivamente sono riportate le esperienze di recupero relative alle medesime tipologie di rifiuti utilizzati nella sperimentazione.
- II. **Seconda parte** (capp. 5, 6): è riportata una descrizione della Piattaforma Bresciana Recuperi, soffermandosi sull'impianto di lavaggio dei terreni e dei rifiuti, e sono definite, in accordo con le normative tecniche di settore, le metodologie di esecuzione delle prove.
- III. **Terza parte** (capp. 7, 8): sono riportati e discussi i risultati delle prove fisico-meccaniche sulle miscele di calcestruzzo ed i risultati dei test di cessione.

Conclusioni

L'obiettivo della presente tesi di dottorato è quello di verificare la possibilità di impiegare i residui derivanti dal lavaggio dei terreni contaminati e delle scorie derivanti dalla termovalorizzazione di rifiuti solidi urbani per produrre manufatti in calcestruzzo a prestazioni meccaniche medie e basse.

Nella **prima parte** della sperimentazione sono stati caratterizzati gli aggregati "riciclati", valutando la possibilità di marcarli CE, allo scopo di utilizzarli per il confezionamento del calcestruzzo.

Dapprima è stata analizzata la composizione chimica dei materiali utilizzati al fine di valutare la presenza di possibili elementi che potrebbero influire negativamente sul riutilizzo di tali rifiuti speciali.

Per quanto riguarda le scorie RSU è stato osservato che il trattamento di lavaggio consente di ottenere una riduzione dei quantitativi di piombo, rame e zinco; un eccessivo contenuto di piombo e zinco potrebbe infatti rallentare la velocità di presa durante il confezionamento del calcestruzzo. Altri metalli, quali ad esempio il bario ed il manganese, non sono invece influenzati dal trattamento di lavaggio.

Gli aggregati derivanti dai terreni lavati presentano un contenuto di piombo, rame e zinco simile a quello rilevato negli inerti naturali.

Dalle prove effettuate, secondo la UNI 8520-2, sono risultati impiegabili per la produzione di calcestruzzo:

- la scoria RSU lavata grossa, di granulometria compresa tra 2 e 60 mm;
- la ghiaia da lavaggio terreni di classe granulometrica 2-60 mm;
- la scoria RSU lavata fine 0,063-2 mm, ma solo se in combinazione con una ulteriore classe granulometrica per rispettare il limite sulla granulometria;
- la sabbia da lavaggio terreni 0,063-2 mm, anche in questo caso solo se in combinazione con una ulteriore classe granulometrica per rispettare

il limite sulla granulometria e con una ulteriore riserva sul parametro equivalente in sabbia.

In definitiva il trattamento di lavaggio è indispensabile per poter recuperare come aggregati per il calcestruzzo le scorie RSU.

Nella **seconda parte** della sperimentazione sono state confezionate alcune miscele di calcestruzzo sostituendo parzialmente o totalmente gli inerti naturali con gli aggregati “riciclati” caratterizzati in precedenza.

Successivamente, una volta individuate le miscele più idonee, sono state prodotte due diverse tipologie di manufatti (cordoli e canalette di scarico scarpata) e sono state caratterizzate secondo le normative tecniche di settore.

Dalle prove di resistenza a compressione delle miscele di calcestruzzo è emerso che le prestazioni migliori sono state ottenute nei getti confezionati con un dosaggio di 270 kg/m^3 di cemento TECNOCEM A-LL 42,5 R ARS; inoltre rispetto all'utilizzo di 300 kg/m^3 di cemento DURACEM B 32,5 R si ottiene comunque un risparmio sul costo finale della miscela.

Per quanto riguarda i manufatti in calcestruzzo, nel caso delle canalette di scarico scarpata (embrici) sono state rilevate prestazioni migliori rispetto a quelle misurate nei cordoli; probabilmente tale fatto è da ricondurre all'utilizzo di aggregati “riciclati” di classe granulometrica superiore per il confezionamento degli embrici.

In generale i manufatti confezionati limitando il dosaggio di scoria RSU lavata a 400 kg/m^3 hanno fornito, dal punto di vista della caratterizzazione fisico-meccanica, risultati di poco inferiori rispetto ai prodotti di riferimento; nel caso di sostituzione completa si nota invece una diminuzione sensibile delle prestazioni.

Nella **terza parte** della sperimentazione è stato valutato il comportamento alla lisciviazione degli aggregati riciclati e delle miscele confezionate nello studio.

Dai test di cessione sui materiali granulari (UNI EN 12457-2) è stato osservato, per tutti i parametri analizzati, il completo rispetto dei limiti dettati

dal D.M. 186/2006, riguardante il recupero di rifiuti non pericolosi in regime semplificato. Inoltre il rilascio dagli aggregati riciclati di parametri quali nitrati, zinco, bario e rame è risultato in linea con gli inerti naturali.

Anche il rilascio per i materiali monolitici (secondo la UNI 10802) rispetta i limiti normativi del D.M. 186/2006. La fessurazione del calcestruzzo non provoca un aumento del rilascio rilevante ai fini del riutilizzo nel settore delle costruzioni.

Per quanto riguarda invece il test di cessione sui provini monolitici frantumati, sono stati osservati rilasci elevati, anche se conformi ai limiti, per bario, cromo e piombo; il pH, anche nel caso del calcestruzzo confezionato solamente con inerti naturali, supera invece il limite normativo, a causa della frantumazione del materiale e quindi della presenza del cemento.

Il test di cessione a doppio stadio (UNI EN 12457-3), eseguito nell'ottica di simulare il comportamento a percolazione in un possibile riutilizzo stradale, presenta rilasci maggiori rispetto al test a singolo stadio nel caso di nitrati, fluoruri, cloruri, vanadio e COD; viceversa altri parametri quali bario, rame e zinco mostrano un maggior rilascio nel test a doppio stadio.

Analizzando l'effetto del pH sulla lisciviazione (UNI CEN/TS 14429) è stato osservato che i metalli quali rame, zinco, cobalto, nichel e piombo presentano un rilascio elevato a pH fortemente acido e a pH fortemente basico.

Per quanto riguarda invece il bario ed il cadmio, per tutti i materiali analizzati, è stato notato che i rilasci sono elevati in condizioni di pH acide, per poi decrescere all'aumentare del pH.

Il valore di pH a cui avvengono rilasci elevati è estremamente importante nel caso in cui vada a inserire i manufatti oggetto della sperimentazione nell'ambiente circostante.

Sviluppi futuri

Ulteriori approfondimenti potrebbero riguardare la valutazione dell'ecocompatibilità, mediante l'effettuazione di test di tossicità acuta e cronica allo scopo di analizzare, rispettivamente, gli effetti tossici a breve e lungo

termine. Si potrebbero, per esempio, testare una serie di organismi scegliendo tra i diversi citati in letteratura, quali la *Daphnia magna* (crostaceo d'acqua dolce), i *Vibrio fischeri* (batteri marini bioluminescenti) e la *Pseudokirchneriella subcapitata* (alga verde monocellulare).