

APPLICAZIONI E TRATTAMENTI IN CAMPO INGEGNERISTICO E INDUSTRIALE

Prof. Ing. Renato Mancini

Politecnico di Torino – Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Ambiente e Geotecnologie

www.polito.it

Collaboratori: **Prof. Ing. Mauro Fornaro, Phd. Ing. Giovanna Antonella Dino**

Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino

CAPITOLO 1

IMPATTO AMBIENTALE DEI FINI DI SEGAGIONE

L'interesse generale a smaltire in maniera controllata i fanghi derivanti dalla lavorazione lapidea è dovuto, in prima battuta, alla loro granulometria fine: è possibile infatti incorrere in problemi di stabilità nelle discariche ad opera del dilavamento delle acque meteoriche, con possibile inquinamento di acque superficiali e di falda.

I fanghi da lavorazione sono inerti dal punto di vista tossicologico, quindi in passato era prassi comune smaltirli direttamente nei corsi d'acqua senza previo trattamento a monte. Attualmente invece sussiste l'impegno a depurare le acque di trattamento prima di smaltirle nelle reti fognarie.

Nel caso specifico della lavorazione di pietre ornamentali si devono tenere in considerazione gli aspetti elencati nei paragrafi 1.1 e 1.2.

1.1. Acque di scarico

La Legge Merli (n. 319/76) rappresenta la prima legge organica in materia di tutela delle acque dall'inquinamento e prevede, tra l'altro, un'unica disciplina sugli scarichi valida su tutto il territorio nazionale (R. RUGGERI, T. LEALI, 1994).

I limiti di accettabilità degli scarichi sono stati formulati sul principio della tutela diretta della vita acquatica e possono essere raggruppati in tre classi a seconda della loro pericolosità:

- a. potenzialmente tossici ed accumulabili negli ecosistemi acquatici: arsenico, cadmio, cromo esavalente, mercurio, piombo, selenio e pesticidi;
- b. potenzialmente tossici ma non accumulabili: alluminio, bario, boro, cromo trivalente, ferro, manganese, nichel, rame, zinco, cianuri, cloro, fosforo, olii minerali, aldeidi, tensioattivi;
- c. con nocività facilmente attenuata dalle risorse del corpo idrico: pH, Temperatura, colore, materiali sedimentabili, materiali in sospensione, BOD, COD, solfuri, solfati, solfiti, cloruri, fluoruri, ammoniaca, grassi ed oli vegetali ed animali, nitriti e nitrati

I rischi ambientali che derivano dallo scarico di acque non trattate sono strettamente connessi con il corpo recettore:

- in un corpo d'acqua superficiale si verifica una modifica dei parametri chimici, fisici e biologici con conseguenti ripercussioni sulla flora e sulla fauna; l'impatto negativo viene valutato con specifiche metodologie, ad esempio il sistema EBI (*Environmental Biotic Index*) di ricerca quali/quantitativa di macroinvertebrati quali indicatori di vita acquatica;
- in fognatura si può avere una degradazione dell'efficienza del sistema depurativo;
- sul suolo o nel sottosuolo vi può essere una modifica dei terreni interessati con conseguente diversa destinazione d'uso.

Si cita ad esempio il caso della Carriona di Carrara, che scorreva "bianco come il latte", a causa del riversamento dei fanghi provenienti dal bacino estrattivo di Carrara, e che col tempo ha modificato il litorale. Attualmente, grazie al recepimento di leggi, la Legge Merli (n. 319/76) prima ed il D.Lgs 152/99 poi, che hanno regolamentato l'immissione di acque di scarico direttamente nei corsi d'acqua, si è via via ridotta l'immissione dei fanghi nei corsi d'acqua. Ciò ha permesso, da un lato, di poter nuovamente avere a disposizione fiumi limpidi con un conseguente nuovo "rifiore" di flora e fauna, e dall'altro il mancato

deposito di materiali molto fini su rive di fiumi e litorali. Caso non ultimo il materiale addirittura quasi “melmoso” che, depositandosi sui litorali della Versilia, doveva periodicamente essere rimosso per non compromettere la florida attività turistica della zona.

Nella gestione delle acque di scarico vi è stata un’evoluzione che ha seguito gli obiettivi previsti dalla normativa citata, riassumibili come:

- **1° fase** (precedente alla L.319/76): scarico delle acque di lavorazione senza trattamenti in corpi d’acqua superficiali, in pubbliche fognature o in fosse scavate nel terreno;
- **2° fase** (attuazione della L.319/76): scarico delle acque in corpo d’acqua superficiale o pubbliche fognature, a seguito di trattamento di depurazione, nel rispetto delle tabelle A e C della L.319/76, scarico in fosse;
- **3° fase** attuazione delle norme regionali che hanno fissato norme più restrittive per lo scarico sul suolo.

La ripartizione in classi di pericolosità è ripresa anche **in tabella 3 Allegato 5 del D.Lgs 152/99**.

Nel caso specifico dei materiali lapidei si fa riferimento ai danni provocati dal solido in sospensione ed alla variazione di pH, tipologie quindi appartenenti alla terza classe.

Vi sono però due carenze della legge 152/99: non si fa riferimento alle portate scaricate ed alle caratteristiche del corpo recettore. La soluzione dovrebbe essere quella di costruire gli impianti pensando già ad un possibile riciclo delle acque trattate.

1.2. Separazione solido-liquido

Per lo smaltimento si fa riferimento al Decreto Ronchi ed al Decreto 13 marzo 2003. La composizione dei fanghi di segazione è funzione, oltre che della composizione della pietra, anche dal processo (segazione in telai a graniglia metallica e segazione con utensili diamantati). Sarebbe utile il trattamento separato delle torbide provenienti da reparti dove operino utensili diamantati e di quelle provenienti da lavorazione con torbida abrasiva, anche se ciò è difficilmente realizzabile in pratica.

Poiché i residui di lavorazione delle pietre si presentano sotto forma di fanghi, il loro smaltimento in discarica richiede che siano preventivamente resi palabili: questa caratteristica viene raggiunta se l’umidità è inferiore al 25% circa. I fanghi di segazione vengono scaricati con una concentrazione di solido in massa dell’ordine del 40% (i fanghi di taglio e lucidatura sono ancora più diluiti), si rende quindi necessaria l’adozione di un idoneo processo di disidratazione.

Se il fango decanta efficacemente fornendo acqua chiara senza l’aggiunta di additivi flocculanti, si ottiene un addensato ad elevata concentrazione di solido (dell’ordine del 70%) che tenderà ad asciugarsi e compattarsi ulteriormente nel tempo. In questo caso si può ricorrere a vasche di decantazione e successive vasche di stoccaggio dei fanghi addensati, i quali possono essere estratti saltuariamente con mezzi meccanici.

Nel caso in cui il fango non decanti naturalmente in modo efficace oppure vi siano notevoli quantitativi di residui da disidratare (nel caso di grandi impianti), oppure per limitare il volume dei bacini di decantazione, è indispensabile l’impiego di flocculanti.

I fanghi così ottenuti presentano una concentrazione di solido in massa dell’ordine del 50%, e soprattutto non tendono ad addensarsi ulteriormente o a compattarsi nel tempo a causa della struttura dei flocculi, che provoca la ritenzione di molta acqua.

L’impiego di flocculanti quindi, consente di risolvere il problema della chiarificazione dell’acqua, riducendo notevolmente il volume del bacino di sedimentazione, ma il fango addensato così ottenuto è molto fluido, e manterrà questa caratteristica per un lungo periodo se non si interviene con una disidratazione meccanica tramite filtropressa.

Da alcuni anni a questa parte si è passati in tutto il bacino Ossolano, nella maggior parte dei casi, dalla semplice decantazione delle acque reflue in “masconi” alla disidratazione dei fanghi filtropressa.

La depurazione delle acque ed il trattamento dei fanghi avviene tramite un'operazione in impianto riassumibile principalmente in due fasi:

- addensamento dei fanghi per decantazione con scarico di acque chiare che ritornano in ciclo;
- disidratazione e compattazione dei fanghi addensati.

Nella **prima fase** si possono riconoscere (figura 1):

a. Il pozzo per la raccolta delle acque reflue

Raccoglie le acque provenienti dalle diverse lavorazioni eseguite nello stabilimento di produzione e serve quale vasca polmone per il pompaggio e il trasferimento dell'acqua nel depuratore. È possibile avere un unico pozzetto, ove vengono convogliate tutte le acque; è altresì possibile avere diversi pozzetti per i diversi tipi di lavorazione.

La vasca è realizzata normalmente sotto il livello del pavimento e può avere un volume compreso tra 1 e 20 m³. Al centro della vasca è situata una pompa ad immersione per l'invio della torbida al silos di decantazione.

b. Centralina per il flocculante

È generalmente un gruppo premontato di preparazione/miscelazione del reagente chimico (polielettrolita biodegradabile ed atossico). Per la flocculazione dell'acqua torbida vengono mediamente disciolti a pioggia 2-3 grammi di prodotto flocculante per metro cubo di acqua da depurare. L'impianto automatico per la preparazione del flocculante lavora secondo il sistema tricamerale: nella prima camera vengono miscelati automaticamente la polvere flocculante e la relativa quantità di acqua; questa soluzione viene agitata e poi condotta per stramazzo nella camera di maturazione. La soluzione viene qui mantenuta alla giusta consistenza per mezzo di un secondo agitatore. La terza camera serve per lo stoccaggio della soluzione ed il conseguente dosaggio, che avviene per mezzo di pompe dosatrici.

c. Silos di decantazione (Depuratore statico a flusso verticale)

È costituito da un serbatoio al quale è inviata la torbida additivata da flocculante. L'ingresso della torbida avviene in un tubo spegni-pressione posto al centro del depuratore che ha la doppia funzione di ridurre la pressione e di orientare il flusso idraulico in direzione verticale verso il basso, non permettendo all'acqua torbida di diffondersi in superficie dove invece si ha lo stramazzo di acqua perfettamente depurata. All'estremità inferiore del cono del depuratore si trova la valvola di scarico fango la quale viene comandata attraverso impulso pneumatico; il fango addensato viene così scaricato dal depuratore per semplice caduta libera.

d. Condotta per lo scarico delle acque chiare nel serbatoio di stoccaggio

Convoglia l'acqua depurata che tracima dal depuratore in un silos di raccolta, consentendo poi il suo ritorno in circolo nel ciclo produttivo, grazie anche all'aiuto del battente idraulico, costituito dall'altezza del depuratore, oppure mediante l'ausilio di una pompa.

Nella **seconda fase** invece sono presenti (figura 1):

e. una vasca di raccolta fango

Posta sotto il depuratore, raccoglie il fango addensato, il quale è mantenuto omogeneo per mezzo di un agitatore. Nell'agitatore sono presenti sonde che rilevano sia il "troppo pieno" sia quando si raggiunge il limite inferiore. La sonda di "troppo pieno" serve per dare il segnale di invio dei fanghi presenti all'interno dell'agitatore alla filtropressa, mentre quando si raggiunge il livello minimo la sonda entra in funzione e richiama, mediante una pompa, il fango decantato sul fondo del silos di decantazione (l'operazione è spesso in automatico, ma talvolta si può ricorrere alla regolazione manuale).

È presente inoltre un rilevatore dell'intorbidamento, il quale regola il dosaggio del prodotto flocculante.

f. pompa fanghi

Serve per trasferire il fango liquido dalla vasca di raccolta (d) alla filtropressa.

g. filtropressa a piastre

La filtro-pressa è dotata di un telaio costituito da una robusta struttura metallica. Le piastre di filtrazione per il ciclo di pressatura vengono chiuse idraulicamente a 280 bar

Il fango da filtrare viene compresso dalla mandata della pompa e le parti solide vengono trattenute all'interno delle camere delle piastre filtranti, mentre l'acqua filtra attraverso le tele e, percorrendo le scanalature, raggiunge il foro di scarico posto alla base delle piastre, essa viene poi recuperata in canaline,

che la convogliano verso la vasca delle acque reflue. Nelle canaline laterali esiste una sonda che rileva l'assenza di acqua quando il fango è stato completamente compresso; in tal caso, automaticamente, le piastre si aprono permettendo alle "torte di fango" di cadere (sia per gravità che, in diversi casi, grazie anche all'aiuto di un sistema "albero-battitore").

L'acqua filtrante è ricondotta, per mezzo di una tubazione, nel pozzo di raccolta delle acque torbide; il fango disidratato viene invece fatto cadere in una vasca posta sotto la filtro-prensa a piastre (figura 3).

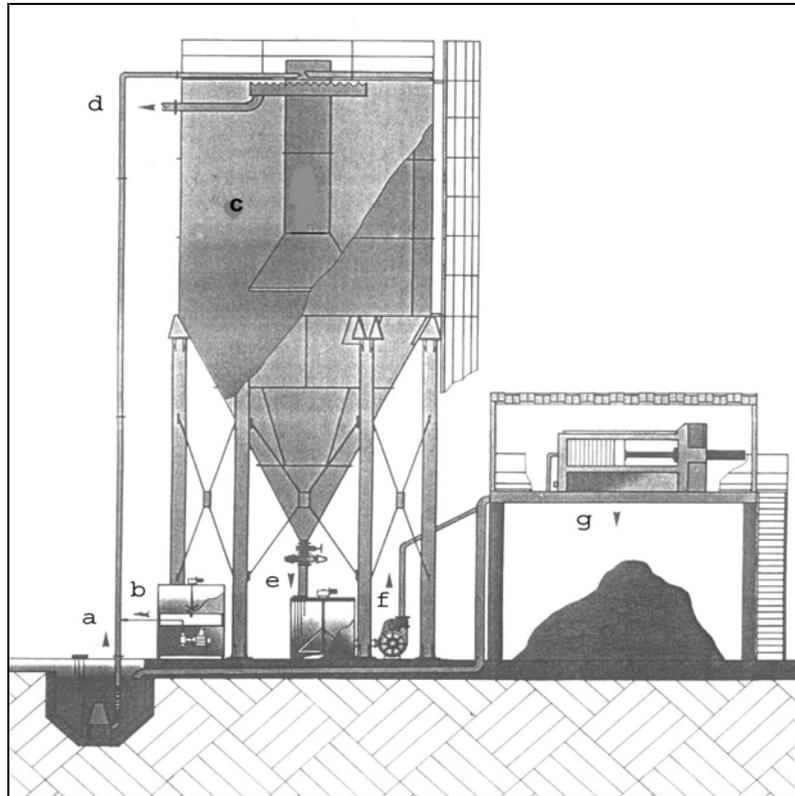


Figura 1: impianto di depurazione acque e compattazione fanghi



Figura 2: impianto di depurazione acque e compattazione fanghi



Figura 3: filtro-prensa a piastre

CAPITOLO 2

CARATTERISTICHE DEI FANGHI

La composizione dei fanghi di segagione dei materiali lapidei è innanzitutto legata al tipo di materiale trattato ed è inoltre correlabile alla metodologia di taglio utilizzata.

Bisogna allora distinguere tra i fanghi provenienti da impianti che trattano solo materiali locali, contraddistinti da caratteristiche chimico-fisiche simili e costanti nel tempo, ed i fanghi provenienti da stabilimenti che trattano materiali granitici di diversa provenienza; in questo caso le caratteristiche dei fanghi non solo risultano diverse da quelle di cui sopra, ma risultano anche estremamente variabili nel tempo a seconda del materiale che di volta in volta viene segato e lavorato. Un'ulteriore differenza sta nel tipo di lavorazione che li ha prodotti: fanghi provenienti da telai multilama che utilizzano graniglia metallica abrasiva e fanghi provenienti da frese a lama diamantata. In questi due casi si hanno sostanziali differenze nelle caratteristiche chimico-fisiche del materiale; i fanghi da telaio sono caratterizzati infatti da una concentrazione in ferro (associato a Mn, Cr, Cu, ecc.. costituenti la graniglia) maggiore rispetto ai fanghi da disco diamantato, e da una distribuzione granulometrica più "grossolana".

Negli impianti che effettuano segagione con tecniche miste (telaio + fresa) i fanghi presentano caratteristiche intermedie rispetto a quelli presi in considerazione. In tabella 1 sono riportati alcuni dati relativi ad alcuni campioni di fanghi provenienti da Val d'Ossola e bacino estrattivo della Pietra di Luserna (tali materiali risultano infatti avere caratteristiche simili: tutti i campioni sono stati prelevati a valle della filtropressa).

Tabella 1: caratterizzazione di fanghi prodotti da alcune aziende (DINO ET AL, 2003; GAMBELLI, 2002; TESTORI, 2000).

	CAMPIONE		TIPO DI LAVORAZIONE	TRATTAMENTO DEL FANGO PRESENZA DI FLOCCULANTE
BACINO DELLA PIETRA DI LUSERNA	Fanghi di segagione da Disco	D1	Disco diamantato	Filtropressa
		D2	Disco diamantato	Filtropressa
		D3	Disco diamantato	Filtropressa
		D4	Disco diamantato	Filtropressa
	Fanghi di segagione da Telaio	T1	Telaio a graniglia	Filtropressa
		T2	Telaio a graniglia	Filtropressa
BACINO ESTRATTIVO DELLA VAL D'OSSOLA	Fanghi di segagione da Disco	D5	Disco diamantato	Filtropressa
	Fanghi di segagione da Telaio	T3	Telaio a graniglia	Filtropressa
		T4	Telaio a graniglia	Filtropressa
		T5	Telaio a graniglia	Filtropressa

I fanghi filtropressati da telaio tradizionale e quelli da disco hanno un'umidità variabile attorno al 20-40% in base ai tempi di permanenza sui piazzali di stoccaggio provvisorio. I materiali sono stati campionati direttamente dal cumulo prodotto dalla filtropressa.

2.1. Analisi granulometriche dei fanghi di segagione

Di seguito si riportano le granulometrie relative ad esami su tre campioni di fango da segagione a telaio (T2 dal bacino della Pietra di Luserna, T3 da azienda ossolana che tratta solo materiali locali e T4 da azienda ossolana che lavora graniti locali, nazionali ed internazionali) ed uno da segagione a disco diamantato (D4 dal bacino della Pietra di Luserna) (tabella 2 e figura 4).

Tabella 2: distribuzione granulometrica cumulativa dei fanghi di segagione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	FREQUENZA CUMULATIVA, SUL TRATTENUTO (%)			
	D4	T2	T3	T4
>2,384	0,0	0,0	0,5	0,0
2,384 - 1,410	0,0	0,1	0,7	0,8
1,410 - 0,707	0,0	0,3	2,1	1,8
0,707 - 0,295	0,1	1,2	5,4	3,5
0,295 - 0,147	0,2	4,9	10,3	7,9
0,147 - 0,074	0,6	13,6	19,8	15,8
0,074 - 0,037	3,0	21,4	32,0	23,4
0,037 - 0,025	9,3	35,6	42,0	44,1
< 0,025	100,0	100,0	100,0	100,0

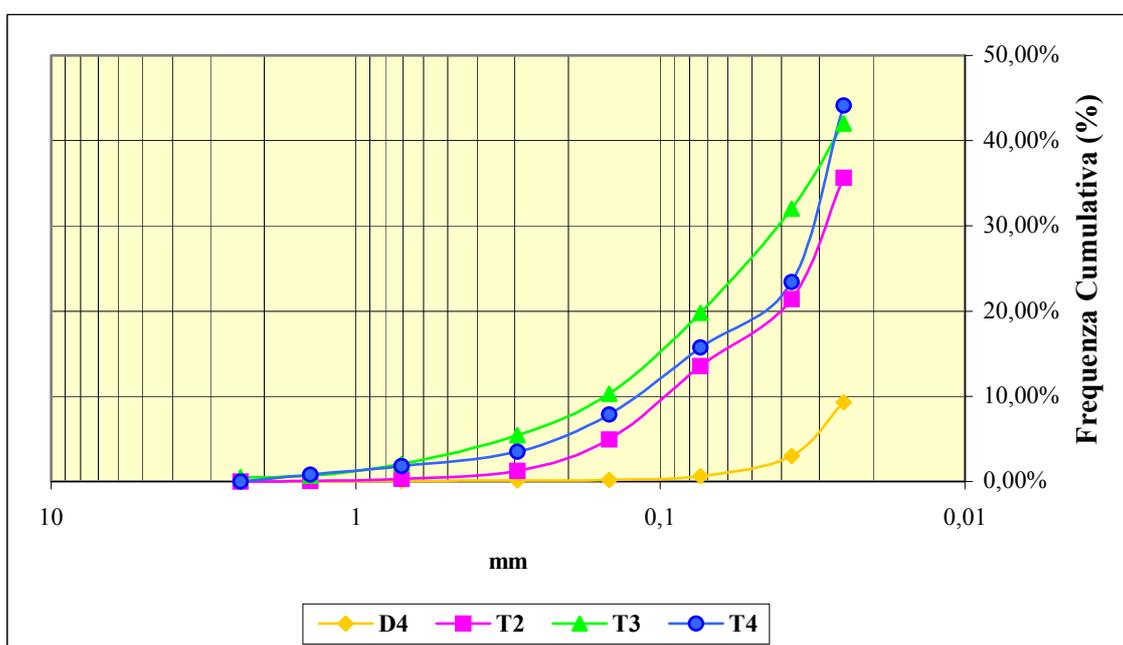


Figura 4: curve granulometriche di 4 campioni

Dalle curve granulometriche, riportate in figura 4, risulta che il fango da disco ha una distribuzione granulometrica più ristretta e più fine rispetto ai fanghi da telaio. Questi ultimi hanno infatti quantità non trascurabili di grani di dimensioni maggiori di 0,5 mm, a causa della presenza degli sfridi di graniglia d'acciaio, che sono il costituente prevalente nelle classi superiori a 0,1 mm.

2.2. Parametri fisici dei fanghi di segazione

Si tratta di materiali dall'aspetto grigiastro, più scuro o più chiaro a seconda che siano fanghi relativi al taglio a telaio o al taglio a disco diamantato, si presentano come materiale "solido palabile", con un tenore di umidità mediamente del 30 - 40%, una massa volumica di circa 1.5-1.8 t/m³, considerando il 30-40% di acqua presente ed un pH basico. Per i fanghi ossolani sono stati determinati anche alcune caratteristiche relative alla classificazione CNR - UNI 10006 (tabella 3).

Tabella 3: parametri fisici su fanghi ossolani (ASSOCAVE, 1995)

PARAMETRI FISICI	FANGHI OSSOLANI
pH	8.8
Limite Liquido	31
Limite Plastico	Non determinabile
Indice di Gruppo	8
Classificazione CNR UNI 10.006	A4

2.3. Parametri chimico mineralogici dei fanghi di segazione

Le prove di laboratorio per la caratterizzazione chimica del materiale sono state effettuate in presso il Dipartimento di Scienze Mineralogiche e Petrologiche dell'Università di Torino (spettrometria al plasma in emissione ottica ICP-AES), in parte presso il Laboratorio Ambiente del DIGET – Politecnico di Torino (spettrofotometria ad assorbimento atomico), ed in parte presso il Laboratorio della Minerali Industriali S.p.A. di Cacciano (BI) (spettrofotometria con fluorescenza RX Siemens SRS 303).

Dal confronto tra la roccia di partenza (Pietra di Luserna e materiali locali ossolani) e corrispettivi fanghi è possibile evidenziare, per i fanghi da telaio in uscita dall'impianto, un aumento sostanziale di calcio e magnesio (legato all'aggiunta di calce), mentre il forte arricchimento in ferro e manganese è dovuto all'utilizzo di graniglie metalliche abrasive (tabella 5). Il processo di taglio con disco diamantato non determina sostanziali arricchimento o impoverimento in ossidi tra la roccia e i fanghi, ad eccezione di un insolito arricchimento in Na₂O, a cui è difficile dare un significato preciso (tabella 5).

Tabella 4: composizione chimica elementi maggiori su fanghi da taglio a disco (D) e fanghi da telaio (T) (DINO – 2003; GAMBELLI – 2002, SASSONE 1996)

OSSIDI (% massa)	D1	D2	D3	D4	T1	T2	T3	T4
SiO ₂	77.1				60.3		60.6	49.4
TiO ₂	0.1				0.1		0.4	0.7
Al ₂ O ₃	12.0				13.8		13.0	7.8
Fe ₂ O ₃	1.2	1.1	1.4	1.1	11.0	12.2	15.6	22.6
MgO	0.8	0.6	0.4	0.4	1.9	2.2	0.9	5.7
CaO	0.7	0.8	0.6	0.6	2.5	2.9	3.6	10.4
Na ₂ O	5.7	5.5	5.9	4.2	3.5	3.3	3.4	1.4
K ₂ O	5.1	5.0	5.3	5.2	4.4	4.1	2.1	1.3
P.F.	0.5				2.3		0.4	0.8

Tabella 5: composizione chimica elementi maggiori (DINO et al., 2003)

Confronti tra Ossidi (% massa)	Serizzo	Fango di prodotti locali ossolani tagliati a telaio	Pietra di Luserna	Fango di Pietra di Luserna tagliata al telaio	Fango di Pietra di Luserna tagliata al disco
SiO ₂	64.5-68.1	60.6	71.6-75.8	60.3	77.1
TiO ₂	0.4-1.1	0.4	0.1-0.2	0.1	0.1
Al ₂ O ₃	18.3-19.0	13.0	13.1-15.6	13.8	12.0
Fe ₂ O ₃	2.4-4.1	15.6	0.8-1.9	8.6	1.2
MgO	0.8-1.3	0.9	0.4-1.1	3.9	0.6
CaO	2.7-3.8	3.6	0.8-1.2	3.7	0.7
Na ₂ O	2.8-3.8	3.4	2.9-4.7	3.1	5.3
K ₂ O	2.6-3.2	2.1	3.7-5.2	4.2	5.1
P.F.	0.9-1.0	0.4	0.6-0.9	2.3	0.5

Per quanto riguarda gli elementi in traccia, il confronto tra la roccia (campione VSU 53 per la Pietra di Luserna e campione di Serizzo, da HUNZIKER, 1966) e i fanghi da telaio evidenzia un arricchimento notevole in Co, Cr, Cu e Ni; un arricchimento analogo è evidenziabile anche i fanghi da taglio a disco diamantato, ad eccezione del Ni: questo fatto potrebbe essere imputabile alle leghe metalliche che

costituiscono le lame dei telai e i dischi. Tuttavia non si hanno a disposizione dati sufficientemente completi per poter valutare a pieno la questione (tabella 7).

Tabella 6: analisi chimiche di elementi in tracce maggiori su fanghi da taglio a disco (D) e fanghi da telaio (T) (DINO et al, 2003; GAMBELLI - 2002)

ELEMENTI	TENORE IN PPM						
	D1	D2	D3	D4	T1	T2	T4
Cd	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 2.0
Co	140.0	76.0	78.0	180.0	8.0	8.0	10.0
Cr	5.0	36.0	20.0	26.0	112.0	114.0	160.0
Cu	162.0	230.0	162.0	110.0	184.0	164.0	120.0
Mn	114.0	100.0	82.0	90.0	720.0	880.0	910.0
Ni	2.0	3.0	3.4	3.0	92.0	100.0	80.0
Pb	82.0	78.0	72.0	72.0	26.0	24.0	< 2.0
Zn	100.0	98.0	92.0	106.0	82.0	86.0	50.0

Tabella 7: Analisi chimiche di elementi in tracce (DINO et al., 2003).

ELEMENTI	TENORE IN PPM				
	SERIZZO	FANGO DI MATERIALI OSSOLANI TAGLIATI A TELAIO	PIETRA DI LUSERNA	FANGO DI PIETRA DI LUSERNA TAGLIATA AL TELAIO	FANGO DI PIETRA DI LUSERNA TAGLIATA AL DISCO
Cd	n.d.	< 2.0	n.d.	< 1.0	< 1.0
Co	0-13	10.0	5.0	8.0	118.5
Cr	0-27	160.0	10.0	113.0	21.7
Cu	n.d.	120.0	13.0	174.0	166.0
Mn	500	910.0	350	880	100
Ni	5-60	80.0	n.d.	96.0	2.85
Pb	n.d.	< 2.0	n.d.	25.0	76.0
Zn	n.d.	50.0	n.d.	168.0	99.0

Sono state inoltre eseguite analisi chimiche sulle diverse frazioni granulometriche appartenenti ai campioni in esame; i risultati ottenuti sono riassunti in tabella 8.

Il tenore di metalli è stato ottenuto mediante spettrofotometria ad assorbimento atomico, mentre il tenore in silice è stato determinato con analisi chimica tradizionale.

Tabella 8: Composizione chimica dei campioni T5 e D5 (TESTORI, 2000)

CLASSE GRANULOMETRICA (mm)	TENORE (% IN MASSA)							
	>0.147		0.147-0.074		0.074-0.037		<0.037	
	D5	T5	D5	T5	D5	T5	D5	T5
SiO₂	59.10	25.84	54.68	61.24	69.58	75.03	69.90	71.10
Fe	9.58	56.50	7.96	34.07	3.18	1.57	1.80	3.22
Na	0.42	0.03	0.22	0.14	0.44	0.32	0.50	0.55
K	3.94	0.62	2.56	1.00	1.62	1.04	1.00	0.82
Ca	0.06	0.04	0.07	0.06	0.25	0.28	0.35	1.00
Mg	2.74	0.38	2.10	0.66	1.00	0.62	0.63	1.28
Al	3.84	0.59	3.00	1.32	2.04	1.46	1.55	1.32

I due campioni considerati si riferiscono ad un campione di fango ottenuto con taglio a disco diamantato (D5), ed ad uno ottenuto con taglio a telaio (T5).

Per quanto riguarda il contenuto di silice e di calcio, si nota un generale aumento nelle classi fini, con conseguente diminuzione del contenuto di ferro; ciò vale sia per i campioni provenienti da taglio a telaio che a disco diamantato. Per gli altri metalli analizzati le concentrazioni variano a seconda del campione.

Sono inoltre state eseguite **analisi ottiche** mediante un microscopio da petrografia (TESTORI, 2000). Queste analisi sono state eseguite sulle classi granulometriche con frequenza elementare superiore all'1% (preparato disperso in eugenolo). La composizione mineralogica è stata valutata mediante conteggio e riconoscimento dei grani minerali, mediando su 5 campi per ogni campione. I valori così ottenuti sono stati trasformati in composizione volumetrica mediante l'utilizzo di appositi coefficienti correttivi.

I minerali riconosciuti sono:

- quarzo;
- feldspato;
- biotite;
- muscovite;
- graniglia acciaiosa;
- accessori.

Al fine di avere un'analisi completa si deve passare dalle composizioni superficiali a quelle in massa; ciò implica un ulteriore errore causato dall'impiego di coefficienti correttivi.

Sono affette da un errore maggiore a causa della dispersione delle dimensioni dei grani e delle difficoltà di identificare i grani più piccoli.

Si riporta di seguito un'analisi relativa al contenuto di minerali di un campione rappresentativo (figura 5).

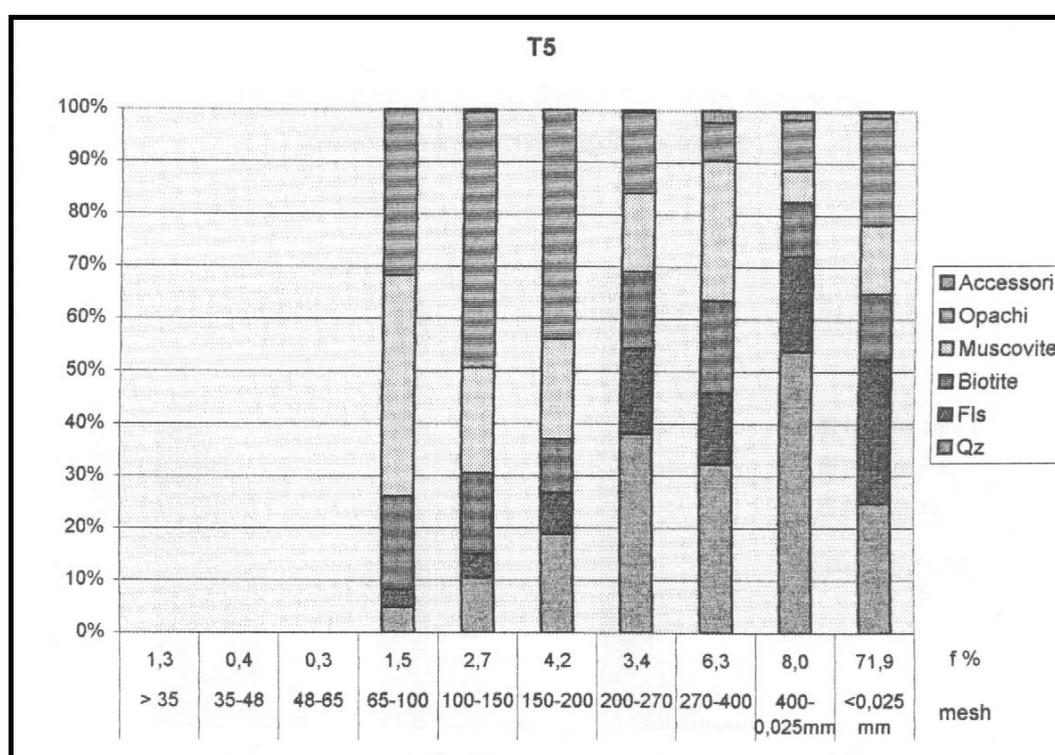


Figura 5: analisi ottico microscopica di un campione rappresentativo derivante da taglio a telaio (TESTORI, 2000)

Si può notare una diminuzione di contenuto in graniglia e miche, ed il conseguente aumento del tenore in feldspati e quarzo, nel passare da classi granulometriche più grossolane alle più fini.

CAPITOLO 3

PRECEDENTI STUDI ED ESPERIENZE PER IL RIUTILIZZO DEI FANGHI DI SEGAGIONE

Negli ultimi anni sono stati intrapresi diversi studi sui possibili impieghi dei fanghi di segagione sia a livello nazionale che a livello locale: dove si esaminava il problema del riutilizzo principalmente in campo edile e civile sia nel bacino ossolano (ASSOCAVE, 1995; DIADI, 2000), che in quello di Luserna (FORNARO & LAPIDUS, 1991; SASSONE & DANASINO, 1995).

3.1. Riutilizzo in campo civile-edile

L'utilizzo dei fanghi come stabilizzato per sottofondi e rilevati stradali, murature di contenimento, ecc... è l'ipotesi più concreta e maggiormente realizzata applicabile sia ai fanghi di segagione che a quelli di lavorazione/rifinitura. Il fango filtropressato viene essiccato, disgregato, miscelato insieme ad altri materiali, ed utilizzato per la produzione di uno stabilizzato per opere stradali. A questo vanno aggiunti altri impieghi che verranno di seguito brevemente trattati.

I campi di utilizzo in campo civile ed edile risultati essere i più interessanti sono principalmente (ASSOCAVE, 1995; SASSONE & DANASINO, 1995; SASSONE, 1996):

- filler per conglomerati bituminosi;
- smagrante di impasti per manufatti in laterizio;
- carica di base per la produzione di pietre agglomerate;
- materiale di carica per la produzione di manufatti decorativi;
- fondente in impasto per gres colorato.

Per le quattro opportunità di riutilizzo sono richieste caratteristiche simili, quali:

- distribuzione granulometrica del materiale costante;
- composizione e qualità del materiale costanti;
- tenore di umidità non superiore al 2-3%. Per ridurre i costi si può pensare all'impiego di combustibili a basso costo (RDF)¹ o al recupero di calorie da impianti termici già esistenti nella zona in cui si pensa di realizzare l'impianto di trattamento;
- assenza di elementi ferrosi.

3.1.1. Filler per conglomerati bituminosi

Nella realizzazione di pavimentazioni stradali, tra la massicciata stradale ed il manto di usura superficiale, è necessario uno strato di collegamento di conglomerato bituminoso, la cui composizione è riassunta in tabella 9.

¹ RDF: Refuse Derived Fuel. Sono rifiuti che subiscono trattamenti tali da incrementare il loro potere calorifero. Vengono pallettizzati ed utilizzati come combustibili aggiunti per gli inceneritori; favoriscono infatti i processi di combustione all'interno del bruciatore.

Tabella 9: composizione media di un conglomerato bituminoso

COMPONENTI DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO	FUSO GRANULOMETRICO RICHIESTO	PERCENTUALE RICHIESTA
Pietrischetto	10-25 mm	Circa 18% in massa
Graniglia	2-20 mm	Circa 35% in massa
Sabbia	0.075 – 2 mm	Circa il 38 % in massa
Bitume		Circa il 4% in massa
Filler	< 0.18 mm con almeno l'85% in massa < 0.075 mm e 50% in massa < 0.05 mm	Circa il 5% in massa Nello strato superficiale può raggiungere anche il 7% in massa

3.1.2. Smagrante di impasti per manufatti in laterizio

Da parte del mercato esiste una certa richiesta di prodotti smagranti a base silicea, che consentono di ridurre la tendenza di certe argille, utilizzate nella fabbricazione di coperture in laterizio, a presentare un ritiro elevato, a deformarsi e a fessurarsi durante l'essiccazione oltre che a presentare difficoltà nel portare a termine l'essiccazione stessa. Le composizioni dei laterizi possono avere percentuali variabili secondo quanto riportato in tabelle 10 e 11.

Tabella 10: composizione mineralogica di laterizi (TESTORI, 2000)

COMPOSIZIONE MINERALOGICA	%
Minerali argillosi	15-50
Sabbia quarzosa	15-40
Calcare e dolomia	3-30
Ossidi di ferro	4-7
Ossidi alcalini	2-5
Sostanze organiche	1-3

Tabella 11: composizione chimica di laterizi (TESTORI, 2000)

	PIÙ FREQUENTE %	MENO FREQUENTE %
p.c.	12-15	5-20
SiO ₂	44-54	40-59
Al ₂ O ₃ +TiO ₃	10-16	8-18
Fe ₂ O ₃	4-7	4-10
CaO	10-15	5-21
MgO	1.5-3.5	1-8
K ₂ O	1.5-3	-
Na ₂ O	0.5-1.5	-

Le fasi del ciclo di produzione, peraltro diversificato in funzione della tipologia del laterizio creato e del tipo di stabilimento, possono essere sinteticamente riassunte in quattro stadi:

- la **preparazione dell'impasto** avviene generalmente per via umida, secondo una linea di lavorazione che presenta in successione i seguenti *step*: rompizolle, laminatoi, mescolatore/bagnatore ed eventuali fasi di deposito e stagionatura interposte agli altri trattamenti;
- la **foggiatura** viene eseguita per estrusione allo stato plastico, raramente per stampatura a mano in pasta molle, con contenuti in acqua nell'impasto compresi tra il 15% ed il 28%;
- la **fase di essiccamento** ha durata variabile, in genere compresa tra le 20 e le 72 ore e si realizza in impianti statici a camere o in impianti a tunnel a ciclo continuo o semicontinuo;
- la **cottura** è effettuata in forni a tunnel alimentati a metano o ad olio combustibile; le temperature ed i tempi variano di intensità e durata a seconda del prodotto.

I fanghi da aggiungere devono soddisfare tutta una serie di caratteristiche a partire da limiti logistici come la loro palabilità, la possibilità di stoccaggio su piazzali, la presenza di un'umidità compresa tra il

20% ed il 40% per favorire la miscelazione a umido. Un altro fattore da tenere in considerazione è il costo del trasporto, che va mantenuto entro una certa soglia di convenienza.

Superati questi aspetti vanno valutati le variazioni cromatiche, l'assorbimento in acqua e il ritiro dopo cottura, che si verificano in un impasto che ha percentuali crescenti di fanghi nella sua composizione. Sassone (1996) nella sua tesi di dottorato ha valutato la fattibilità dell'utilizzo dei fanghi di segagione della Pietra di Luserna preparando dei provini mediante impastatura manuale di argilla con il 2% di fanghi, il 4%, il 6 % ed il 10%, che sono stati confrontati con campioni costituiti esclusivamente da argilla o da fango da telaio miscelati con acqua.

A cottura ultimata non si notavano particolari variazioni cromatiche in seguito alla miscelazione. I valori ottenuti nell'assorbimento d'acqua e nel ritiro dei campioni dopo essiccazione e cottura in fornace sono riassunti in tabella 12.

Tabella 12: caratteristiche di assorbimento e ritiro dei campioni realizzati con addizione progressiva di fanghi da telaio provenienti dal bacino di Luserna all'argilla naturale

COMPOSIZIONE NELL'IMPASTO (%)		ASSORBIMENTO D'ACQUA (% IN MASSA)	RITIRO DOPO COTTURA (%)
Argilla	Fango da telaio		
100	-	10	7
98	2	10	7
96	4	12	7
94	6	12.5	6.5
90	10	14	6.0
-	100	20	3.5

I risultati mostrano un eccessivo assorbimento per addizioni superiori al 2%; quindi solo per impasti con una percentuale inferiore il prodotto finale risulta possedere caratteri entro gli standard richiesti. Le percentuali di ritiro sono invece sempre mediamente accettabili, in particolare incrementando il quantitativo di fango nell'impasto si ha la tendenza ad una diminuzione del ritiro dopo cottura; ciò dà una chiara indicazione di come questo materiale abbia le caratteristiche di uno smagrante particolarmente adatto nel caso in cui si debba trattare un'argilla plastica ad elevato ritiro.

L'aspetto più interessante è la capacità dei fanghi da telaio di migliorare le caratteristiche meccaniche dei manufatti in laterizio. Sui campioni precedenti, opportunamente stagionati, si sono valutate le variazioni della resistenza a flessione. La prova con carico concentrato in mezzeria o a tre appoggi, prevede che il campione, prismatico e di dimensioni note, poggi su due coltelli, di interasse 100 mm, con un coltello in mezzeria che applica un carico centrale di intensità crescente. Nella tabella 13 sono riportati i risultati delle prove di resistenza a flessione.

Tabella 13: Valori medi della resistenza a flessione su barrette di laterizio preparate con l'addizione di percentuali crescenti di fanghi da telaio.

COMPOSIZIONE NELL'IMPASTO (%)		RESISTENZA A FLESSIONE (MPa)
Argilla	Fango da telaio	
100	-	11.5
98	2	12.2
96	4	11.4
94	6	10.8
90	10	9.5
-	100	1.9

Il dato che emerge da queste analisi è che sembra esistere un aumento della resistenza a flessione nei provini a cui si è addizionato il 2% di fanghi (i risultati delle prove mostrano un valore medio della resistenza a flessione che passa da 11,5 MPa per il campione con argilla al 100% a 12.2 MPa nel caso del campione con il 2% di fanghi) e che l'aggiunta di porzioni di fanghi fino al 4% probabilmente non peggiora la resistenza a flessione, infatti il valore medio della resistenza nel campione al 4% di fango corrisponde in pratica a quello con argilla al 100% (11.4 contro 11.5 MPa). Utilizzando i fanghi negli

impasti per coperture in laterizio, si consentirebbe quindi una riduzione, seppur limitata, dei consumi di materia prima pregiata, mantenendo comunque inalterate le caratteristiche del prodotto finito.

Nel caso di mattoni e trafiletti per murature, è possibile l'introduzione di percentuali maggiori di fanghi, visto che la porosità del prodotto finale può essere più elevata; si può ipotizzare che almeno il 5% di fanghi potrebbero entrare negli impasti senza sostanziali alterazioni nel materiale finito e nel ciclo produttivo. In questi casi, evidentemente, l'industria in grado di smaltire le produzioni dei fanghi lapidei necessita tuttavia di disporre di notevoli e stabili quantità di materiali da miscelare.

3.1.3. Materiale di base per la produzione di pietre agglomerate

Nelle industrie per la produzione di materiali per pavimentazione e rivestimento, si possono spesso utilizzare manufatti realizzati con impasti di cemento, materiale di carica e graniglia (pietre agglomerate). L'impiego in questo campo dei fanghi di segagione ha già trovato largo impiego nel bacino di Carrara. Si potrebbe pensare di impiegare anche i fanghi di matrice silicatica per questo impiego; alcune prove sono state già condotte utilizzando fanghi della Pietra di Luserna quale *filler* ottenendo delle "pietre agglomerate" di qualità piuttosto scadente, non tanto dal punto di vista tecnico, quanto piuttosto dal punto di vista estetico. Tuttavia si potrebbero proporre studi più approfonditi in merito.

3.1.4. Materiale di base per la produzione di manufatti decorativi e di arredo

L'ipotesi di riutilizzo può riguardare la realizzazione di blocchi per muratura, masselli autobloccanti, oggetti di arredo urbano o cordoli, arredamenti per interni (tavoli, colonne, capitelli, frontali per camini) e manufatti decorativi in genere, caratterizzati dal costo estremamente ridotto dei materiali, soprattutto di riciclo degli scarti. Si tratta di un impiego sperimentale dei fanghi al fine di ottenere un'accettabile miscela fango di segagione/cemento. Si miscelano sfridi, cocci, polveri, ecc... a cementi che vengono eventualmente arricchiti da resine ed additivi.

Inerti tanto fini, quali sono i fanghi di segagione, non possono essere miscelati solo con leganti (cemento o calce), ma devono essere uniti a particolari additivi di compensazione notoriamente molto più costosi dei leganti stessi: ciò causa indubbiamente un notevole aumento dei costi di produzione. Al fine di ridurre questi costi, potrebbe essere opportuno introdurre nelle miscele, oltre ai leganti cementanti, anche inerti di classi granulometriche maggiori atti a ridurre i ritiri ed aumentare le resistenze meccaniche del prodotto, riducendo però in misura proporzionale l'impiego dei fanghi, con conseguente decremento delle quantità impiegate e quindi "smaltite".

Per ottenere i risultati voluti non è necessaria una sua essiccazione al 100%. Da dati Assocave (1995) è stato possibile ricavare alcune indicazioni circa la possibilità di impiegare anche i fanghi ossolani quale materiale di carica per la produzione di manufatti decorativi per arredi urbani (tabella 14).

Tabella 14: valori relativi a prove eseguite su fanghi ossolani.

	MALTA CEMENTIZIA (PROVINI CUBICI DA 1000 cm ³)		
	Cemento	Polvere di serizzo	Acqua
	1 parte in peso	4 parti in peso	2.33 parti in peso
Tempo di stagionatura	28 giorni		
Massa volumica naturale	1.69 kg/dm ³		
Massa volumica satura	1.78 kg/dm ³		
Massa volumica dopo essiccazione	1.52 kg/dm ³		
Resistenza a compressione (UNI 132-72)	C ₀ =30 kg/cm ²		
Assorbimento d'acqua alla pressione atmosferica (UNI 7699) con riferimento alla massa	acqua assorbita: 5.3%		
	acqua totale di saturazione: 17.1%		
Assorbimento d'acqua alla pressione atmosferica (UNI 7699) con riferimento al volume	acqua assorbita: 9.1%		
	acqua totale di saturazione: 26.6%		

Uno studio più recente (DIADI, 2000) basato sulla formulazione di 50 diverse miscele, solo 9 (sei con fanghi da taglio a telaio e 3 con fanghi da taglio a disco diamantato) delle quali risultate adatte ad un eventuale impiego, ha mostrato l'applicabilità di questo materiale quale base per la produzione di manufatti per arredo urbano. I due tipi di leganti impiegati appartengono alle categorie: cementi Portland ad elevata resistenza meccanica e cementi Pozzolatici. In ciascuna formulazione sono stati variati in modo differente, sia percentualmente che in combinazione tra loro, i leganti e gli additivi di compensazione, in numero, tipo e percentuale. I fanghi introdotti oscillano tra il 65-70% in peso, ovvero costituiscono circa i 2/3 del prodotto finiti.

Di ogni formula sperimentata sono stati verificati preventivamente il peso specifico apparente sia dei fanghi "tal quali" che di quelli "battuti", sia delle miscele finite che dell'impasto pronto per l'impiego e maturato a 28 giorni secondo norma.

La selezione delle migliori formulazioni, ovvero i campionamenti che hanno raggiunto i risultati più elevati sotto il profilo chimico, fisico e di presa, necessitava di una serie di test meccanici, finalizzati ad individuare i valori di resistenza a compressione e carichi di rottura di ogni prodotto maturato, nonché di test di permeabilità e di resistenza all'azione del fuoco.

Per la determinazione della resistenza a compressione e flessione ci si era attenuti a quanto prescritto dalla UNI EN 196-1 sulle malte. Va detto che la norma di riferimento non è stata concepita espressamente per i prodotti in esame ma bensì per le malte di cemento; tale precisazione è doverosa se si considera che più volte si è dovuto ricercare un criterio di adattabilità delle prescrizioni normative alle caratteristiche degli impasti.

Il fango è stato preventivamente essiccato e disgregato, quindi si è proceduto alla miscelazione con legante ed additivi.

Per l'esecuzione delle prove si è operato realizzando diversi provini di dimensioni standard (40x40x160 mm) mantenuti in laboratorio a condizioni ambientali standard (pressione 1 atm, e temperatura dell'aria tenuta costantemente a 20°C.²). In fase di sperimentazione si è notato un elevato ritiro del materiale in miscela, con conseguenti fenomeni di microfratturazione e talvolta di fessurazioni a livello strutturale. Le nove miscele, risultate di caratteristiche buone, non presentano fenomeni di elevato ritiro; solo però se si sottopongono i provini a standard operativi leggermente diversi da quelli relativi alla Norma UNI EN 196. Nel caso in esame si potrà operare eseguendo alcune prove su tre differenti provini:

- uno mantenuto per 28 giorni allo stato naturale (umidità pari al 70%);
- uno mantenuto per i primi 14 giorni in acqua e per i restanti 14 giorni mantenuto allo stato naturale (umidità pari al 70%);
- uno mantenuto per 28 giorni in acqua.

La miscelazione è stata eseguita mediante mescolatrice meccanica modello HOBART N-50 a tre velocità. La norma prescrive l'avvio della mescolatrice alla velocità minima per 60 secondi, successiva pausa 90 secondi, quindi nuova mescolazione per altri 60 secondi alla seconda velocità³. A seguito della miscelazione vengono preparati i provini, con riempimento degli stampi in due momenti distinti intervallati da 60 colpi di assestamento al termine di ogni fase, e la costante spalmatura dell'impasto per la distribuzione uniforme dello stampo fino al bordo superiore. Nel caso in esame la formatura dei provini è avvenuta dopo 48 ore, sufficienti affinché l'impasto assumesse una consistenza tale da permettere la sformatura.

² Nel caso in esame solo due provini su tre sono stati immersi per 28 giorni in acqua; il terzo, relativo ad ogni campione, è stato tenuto a maturare all'aria in ambiente umido. Questa variazione, rispetto alla prescrizione normativa, ha consentito di verificare la consistenza giorno dopo giorno dei diversi provini, confermando i dubbi circa la validità della norma per impasti diversi dalle malte comuni. È stato constatato che dopo 18 giorni di maturazione i provini in immersione risultavano avere un'evidente minor resistenza meccanica comprovata dall'esecuzione di test. Si è quindi deciso di procedere con 3 differenti provini: uno maturato ad aria, uno maturato per 18 giorni in immersione e 10 in ambiente umido al 70% u.r. ed uno per 28 giorni in immersione.

³ Nel caso in esame la seconda velocità è risultata troppo rapida con eccessiva azione centrifuga, elevata dispersione sui bordi e rigonfiamento dell'impasto. Si è pertanto ritenuto di continuare la seconda miscelazione a bassa velocità, onde evitare la formazione di bolle d'aria nell'impasto con conseguente minor coesione e perdita della resistenza.

I provini, relativi alle 9 miscele che hanno dato risultati positivi, sono poi stati immersi in acqua a temperatura costante (20°C) per 28 giorni. Di seguito si riportano i dati relativi alle miscele selezionate per il campionamento dei test specifici (tabelle 15 e 16).

Tabella 15: dati relativi agli impasti selezionati (DIADI, 2000)

	1/A	2/B	3/C	4/D2	6/F
COMPOSIZIONE					
FANGHI DA TELAIO	100 g (67.7% sul totale)	100 g (68.1% sul totale)	100 g (67.7% sul totale)	100 g (65.2 % sul totale)	100 g (68.1% sul totale)
TOTALE LEGANTI ALTA RESISTENZA	40 g (27% sul totale)	40 g (27.3% sul totale)	40 g (27% sul totale)	43 g (28% sul totale)	40 g (27.3% sul totale)
TOTALE ADDITTIVI	7.75 g (5.2% sul totale)	6.75 g (4.6% sul totale)	7.75 g (5.2% sul totale)	10.4 g (6.8% sul totale)	6.75 g (4.6% sul totale)
TOTALE	147.75 g (32.2% di leganti)	146.75 g (31.9% di leganti)	147.75 g (32.2% di leganti)	153.4 (34.8% di leganti)	146.75 g (31.9% di leganti)
PESO SPECIFICO FANGHI "NON BATTUTI"	860 g/l	860 g/l	860 g/l	860 g/l	860 g/l
PESO SPECIFICO FANGHI "BATTUTI"	936 g/l	936 g/l	936 g/l	936 g/l	936 g/l
PESO SPECIFICO IMPASTO	1656 g/l	1650 g/l	1650 g/l	1680 g/l	1700 g/l
PESO SPECIFICO IMPASTO MATURO (A 28 GG)	1160 g/l	1050 g/l	960 g/l	1270 g/l	1180 g/l
QUANTITÀ DI ACQUA PER L'IMPASTO	63 g (29.9% del peso totale finale dell'impasto)	66.5 g (31.2% del peso totale finale dell'impasto)	71.7 g (32.7% del peso totale finale dell'impasto)	51.7 g (25.0% del peso totale finale dell'impasto)	59 g (28.7% del peso totale finale dell'impasto)
PREPARAZIONE IMPASTO	Prima velocità del mescolatore	Prima velocità del mescolatore	Prima velocità del mescolatore	Prima velocità del mescolatore	Velocità del mescolatore minima
TEMPO DI MISCELAZIONE	120 secondi	120 secondi	120 secondi	120 secondi	120 secondi
COLPI ASSESTATORE	70 colpi in prima battitura e 60 colpi nella seconda	70 colpi in prima battitura e 60 colpi nella seconda	70 colpi in prima battitura e 60 colpi nella seconda	70 colpi in prima battitura e 60 colpi nella seconda	70 colpi in prima battitura e 60 colpi nella seconda

Tabella 16: dati relativi agli impasti selezionati (DIADI, 2000)

	7/G		8/H	9/I	10/K
COMPOSIZIONE		COMPOSIZIONE			
FANGHI DA TELAIO	100 g (68.1% sul totale)	FANGHI DA DISCO	84 g (64.2% sul totale)	80 g (62.6% sul totale)	162 g (69.5 % sul totale)
TOTALE LEGANTI ALTA RESISTENZA	40 g (27.3% sul totale)	TOTALE LEGANTI ALTA RESISTENZA	40 g (30.6% sul totale)	40 g (31.3% sul totale)	40 g (17.2% sul totale)
TOTALE ADDITTIVI	6.75 g (4.6% sul totale)	TOTALE ADDITTIVI	6.75 g (5.2% sul totale)	7.75 g (6.1% sul totale)	31 g (13.3% sul totale)
TOTALE	146.75 g (31.9% di leganti)	TOTALE	130.75 g (35.8% di leganti)	127.75 g (37.4% di leganti)	233 g (30.5% di leganti)
PESO SPECIFICO FANGHI "NON BATTUTI"	860 g/l	PESO SPECIFICO FANGHI "NON BATTUTI"	718 g/l	718 g/l	718 g/l
PESO SPECIFICO FANGHI "BATTUTI"	936 g/l	PESO SPECIFICO FANGHI "BATTUTI"	956 g/l	956 g/l	956 g/l

PESO SPECIFICO IMPASTO	1690 g/l	PESO SPECIFICO IMPASTO	1642 g/l	1500 g/l	1580 g/l
PESO SPECIFICO IMPASTO MATURO (A 28 GG)	1370 g/l	PESO SPECIFICO IMPASTO SOLIDIFICATO (A 28 GG)	1265 g/l	1170 g/l	1020 g/l
QUANTITÀ DI ACQUA PER L'IMPASTO	59.25 g (28.8% del peso totale finale dell'impasto)	QUANTITÀ DI ACQUA PER L'IMPASTO	62 g (32.1% del peso totale finale dell'impasto)	60.4 g (32.1% del peso totale finale dell'impasto)	165.25 g (41.5% del peso totale finale dell'impasto)
PREPARAZIONE IMPASTO	Velocità del mescolatore minima	PREPARAZIONE IMPASTO	Velocità del mescolatore minima	Velocità del mescolatore minima	Velocità del mescolatore minima
TEMPO DI MISCELAZIONE	120 secondi	TEMPO DI MISCELAZIONE	120 secondi	120 secondi	120 secondi
COLPI ASSESTATORE	70 colpi in prima battitura e 60 colpi nella seconda	COLPI ASSESTATORE	70 colpi in prima battitura e 60 colpi nella seconda	70 colpi in prima battitura e 60 colpi nella seconda	70 colpi in prima battitura e 60 colpi nella seconda

In base ad i risultati ottenuti dalle prove di resistenza meccanica è possibile dire che la totale immersione dei provini in acqua per 28 gg non consente una vera “presa” della massa, dando origine a valori di resistenza scarsi, o comunque nettamente inferiori a quelli relativi ai provini maturati in ambiente misto o totalmente umido. Inoltre risulta più difficile tracciare un andamento regolare e preciso dei diversi comportamenti dei provini, in quanto le modifiche apportate non hanno consentito alla fine di ottenere almeno tre provini per ciascuna maturazione.

In linea di principio si può tuttavia affermare che i valori più elevati sono stati ottenuti sui provini maturati in ambiente umido o misto. Le prove di compressione hanno segnato resistenze fino a **16.3 MPa** con valori medi oscillanti intorno a **8.5 MPa**, mentre le prove di flessione hanno fornito valori medi di **3.5 MPa**. Indici comparabili con quanto riportato nella classificazione indicata dalla normativa dei materiali da costruzione che, per le malte tradizionali, fornisce valori compresi tra **2.5 MPa per la classe M4** e **12 MPa per la classe M1**.

In base a valutazioni economiche (DIADI, 2000), in linea di massima, il costo del formulato medio oscilla intorno ai **0.15 €/kg** di prodotto finito, relativamente alla sola percentuale media dei leganti e degli additivi impiegati (30-35%). Un costo che risulta essere decisamente elevato, soprattutto se confrontato con quello dei premiscelati tradizionali esistenti sul mercato dell'edilizia convenzionale.

3.1.5. Fondente in impasti per grès colorato

Un possibile, ma non ottimale, campo di impiego è quello quale fondente per impasti di gres colorato, tale sperimentazione è stata condotta nel 1995 (SASSONE & DANASINO, 1995). L'impiego dei fanghi da telaio e da disco della Pietra di Luserna, nel settore dei prodotti in grès, è stata verificata mediante prove di greificazione a 1180°C, effettuate mediante un ciclo di riscaldamento e raffreddamento in forno industriale dei provini per la durata di 70 ore: questo ha permesso di valutare la capacità del prodotto di fondere alle temperature standard del processo industriale e di controllare il colore ottenibile.

Per i fanghi da telaio, ad un ottimo comportamento in termini qualitativi (di fusibilità) non è corrisposto un altrettanto buon risultato in termini di colorazione finale, a causa del loro contenuto in ferro, quindi la loro utilizzazione in questo campo va limitata al grès colorato.

Anche per i fanghi da taglio a disco, nonostante il minor tenore in ferro, le caratteristiche di colore e capacità di greificazione sono analoghe alle precedenti; quindi la loro colorazione è troppo scura per l'inserimento in miscele a pasta chiara, potendo invece diventare potenziali ingredienti per le miscele di grès colorato.

Un altro problema per questo potenziale utilizzo è che in Piemonte, attualmente, sono presenti poche industrie che potrebbero utilizzarli. Inoltre a causa della loro ubicazione (così a Luserna come in Ossola), i costi legati al trasporto sarebbero piuttosto alti: questo fattore esclude ogni possibilità di forniture ragionevoli.

CAPITOLO 4

PROVE DI TRATTAMENTO PER SEPARARE LA GRANIGLIA METALLICA PRESENTE NEI FINI DI SEGAGIONE DA TAGLIO A TELAIO

Al fine trovare nuove alternative per il recupero dei fanghi di segazione da telaio a torbida abrasiva, sono state condotte alcune prove per la separazione della frazione relativa alla graniglia metallica. Da tale separazione si sono ottenuti due sottoprodotti (“concentrato di graniglia” e “depurato di graniglia”) da poter impiegare come sottoprodotti in altri processi produttivi. La graniglia recuperata, per le sue caratteristiche di distribuzione granulometrica e per la forma arrotondata dei grani costituenti, può essere reimpiegata quale abrasivo per sabbiature industriali, mentre il “depurato” potrebbe essere reimpiegabile quale costituente di terreni agricoli, oppure in diversi campi d’applicazione civili-edili e come materiale impermeabilizzante per discariche di inerti.

La sperimentazione si è articolata in tre fasi:

1. prove di separazione magnetica ad umido a “basso campo” con separatore a nastro sommerso tipo *Crockett*;
2. prove di separazione idrogravimetrica mediante tavola a scosse;
3. prove di separazione idrogravimetrica con spirale di *Humphreys*.

Le sperimentazioni si sono svolte in parte presso il Laboratorio di preparazione dei Minerali del DIGET, in parte presso un impianto pilota del DIGET presso la sede della Minerali Industriali S.p.A. di Cacciano (BI) ed infine presso lo stabilimento dell’Internazionale Graniti di Masera (VB).

4.1. Prove di separazione magnetica

La separazione magnetica è un metodo d’arricchimento in cui grani minerali sono sottoposti all’azione simultanea di forze d’attrazione e repulsione magnetica e di forze di tipo gravitazionale, d’attrito, centrifughe e fluidodinamiche. Le forze, però, che maggiormente influenzano questo processo sono quella magnetica e quella gravitazionale.

Sotto l’azione combinata di queste forze, grani di minerali dotati di differenti proprietà magnetiche, assumono traiettorie diverse. Si sfrutta ciò per separare i differenti grani; condizione necessaria e sufficiente è che le forze magnetiche risultino sufficientemente differenziate dalle altre almeno per uno dei minerali componenti il grezzo. Risulta quindi che, per la separazione magnetica di un mezzo eterogeneo, ci si deve basare sulla differente suscettibilità magnetica cui sono soggetti i materiali litoidi componenti.

Le grandezze che caratterizzano i diversi materiali sono la suscettività magnetica χ o, alternativamente, la permeabilità magnetica $\mu = 1 + 4\pi\chi$. In base ai valori che queste assumono, le sostanze si possono classificare come:

- sostanze ferromagnetiche: χ positivo con valori maggiori a 0.1 fino a 10^4 (es. nichel, ferro e magnetite);
- sostanze paramagnetiche: χ positivo con valori compresi tra $10^{-4} - 10^{-6}$;
- sostanze diamagnetiche: χ negativo e con valori molto piccoli.

Nelle sostanze ferromagnetiche χ dipende dal campo magnetico H mediante la relazione:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$$

Dove:

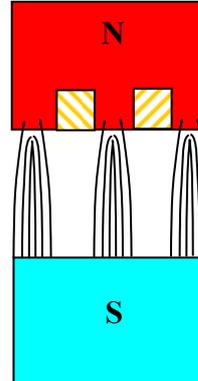
H = campo magnetico

B = induzione in un corpo ferromagnetico

μ = permeabilità magnetica della sostanza in esame, è pari alla pendenza, variabile, della curva d'isteresi (varia quindi anche la χ)



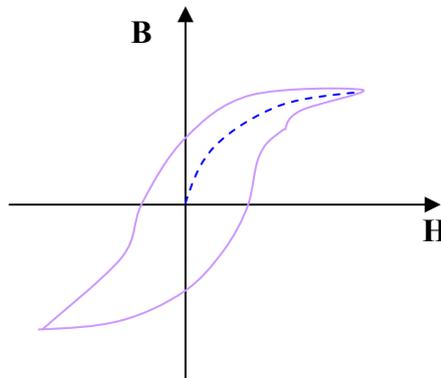
Campo convergente in cui il **polo negativo (N)** è puntiforme ed il **polo positivo (S)** è piatto. Le linee di forza sono quindi convergenti verso N.



Campo convergente in cui il **polo positivo (S)** è piatto mentre il **polo negativo (N)** è costituito da parti alternate di materiale magnetico e amagnetico. Le linee di forza risultano quindi convergenti verso diversi punti di N.

Inoltre la χ può variare notevolmente, a seconda delle interferenze dovute alla presenza di impurità metalliche eventualmente presenti all'interno del grano analizzato, anche nell'ambito della stessa sostanza.

Affinché si possa avere la separazione magnetica è necessario che sia presente un campo magnetico con gradiente¹ diverso da zero, altrimenti non sussisterebbero le forze ponderomotrici, necessarie al movimento dei grani. Per questo scopo si utilizzano campi magnetici convergenti, i quali sono ottenuti mediante l'impiego di magneti permanenti o di elettrocalamite.



Ogni grano presente nel campione analizzato è sottoposto, durante il passaggio al di sotto del magnete, ad una forza magnetica, F_m (forza ponderomotrice), diretta lungo la stessa direzione, ma in verso opposto, alla forza peso, F_p . Queste due forze, unite alla forza fluidodinamica (trascurabile in questo caso) determinano lo spostamento del flusso e quindi la separazione magnetica.

$$F_m = \mu_0 \chi v H \text{ grad}H$$

e

$$F_p = \rho v g$$

¹ Rappresenta la variazione del campo magnetico lungo una direzione.

Con:

g = accelerazione di gravità

μ_0 = permeabilità magnetica nel vuoto

v = volume del grano in esame

H_{gradH} = campo magnetico

ρ = massa volumica del ferro

χ = suscettività magnetica

A prevalere è la forza magnetica qualora il tenore di ferro sia superiore ad un certo valore. Nella condizione d'equilibrio, nell'istante in cui il grano sta per sollevarsi, si ottiene:

$$F_m = F_p$$

$$\mu_0 \chi v H_{gradH} = \rho v g$$

E' quindi possibile ricavare la relazione che lega la variazione del campo magnetico (H_{gradH}) con la densità del ferro (ρ) e con la suscettività magnetica (χ):

$$H_{gradH} = K \rho / \chi$$

Dove:

$$K = g / \mu_0$$

Teoricamente non vi sono limitazioni, di tipo granulometrico, al processo di separazione magnetica: unica limitazione formale è che sul materiale fine (< 0.1 mm) è necessario operare ad umido, infatti i fini tendono ad aggregarsi causando difficoltà nella separazione tra grani magnetici e grani amagnetici; con l'impiego di separatori magnetici ad umido si ottiene quindi un prodotto più pulito con una minore perdita di fini.

Nel caso in esame è stato utilizzato un **separatore magnetico** analogo al **Crockett**; questo tipo di separatore ha trovata vasta applicazione nei processi di concentrazione di minerali ferro-magnetici (come magnetite, ilmenite). Vengono inoltre impiegate negli impianti di separazione per densità e per la rigenerazione dei mezzi densi ferromagnetici. L'efficienza magnetica di questo tipo di apparecchiatura è pari a circa il 99%.

A livello industriale questo tipo di separatore può trattare grani con dimensione compresa tra 5 ed 1.651 mm, e con portate comprese tra 0.5 – 80 t/h, con larghezze di nastro comprese tra 0.15 – 1.2 m. Sia la portata che la larghezza del nastro variano a seconda della granulometria di alimentazione del materiale.

L'apparecchiatura consiste in un nastro la cui parte inferiore scorre a contatto con una serie di magneti, per lo più permanenti, a poli alternati; questa parte del nastro risulta sommersa in una vasca in cui è raccolto il materiale da separare disperso in torbida. La torbida viene diluita in un serbatoio, in misura tale da essere idonea al processo di separazione magnetica, mantenuta costantemente in sospensione mediante l'impiego di agitatore e quindi alimentata al separatore tramite una tramoggia.

L'intensità del campo diminuisce dal lato d'alimentazione a quello di scarico: è quindi possibile raccogliere in due compartimenti successivi gli sterili ed i misti, mentre i minerali fortemente magnetici vengono trascinati, aderenti al nastro, finché il nastro scorre aderendo ai magneti. A questo punto il nastro è sottoposto a getto d'acqua e spatolatura al fine di favorire il distacco dei grani magnetici. Il concentrato viene quindi convogliato, mediante tramoggia, in una vasca di raccolta (dopo essere passato per uno smagnetizzatore).

Dal processo si ottengono tre prodotti:

- amagnetico - sterile (AM);
- misto;
- magnetico (M).

Il separatore di laboratorio utilizzato per le prove modello HMS LAB (figure 6) con campo magnetico di 1200 gauss era predisposto per fornire due soli prodotti: magnetico ed amagnetico (figura 7).

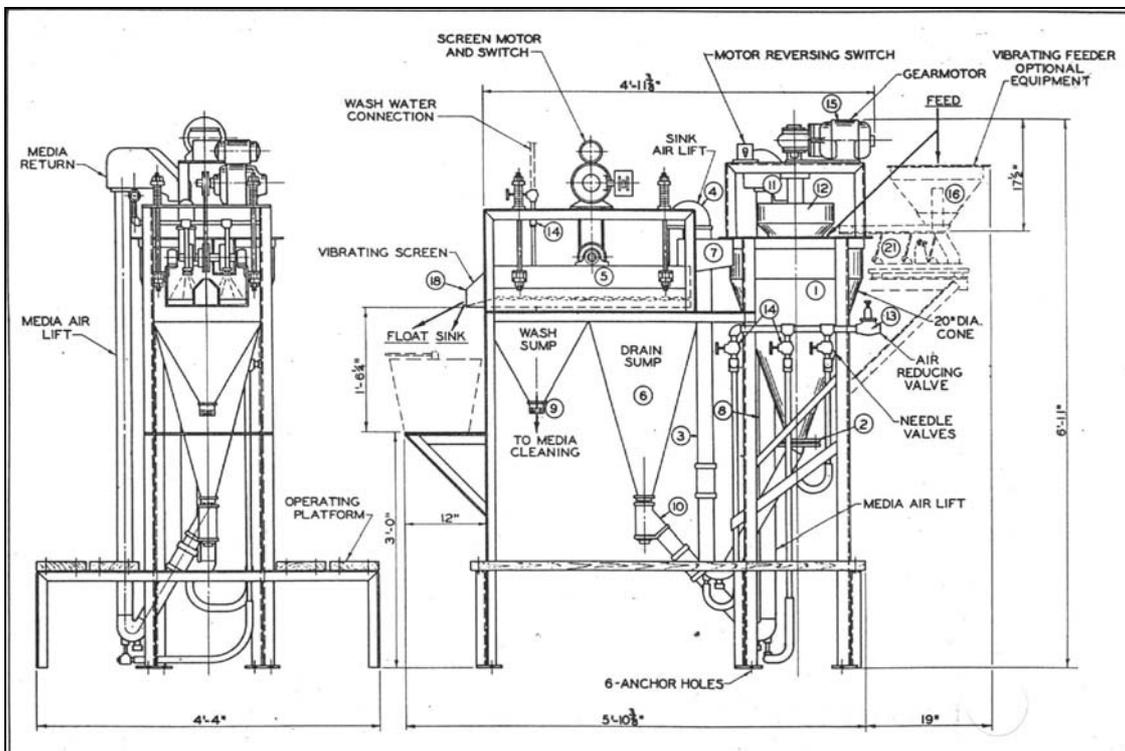


Figura 6.a: schema di un separatore magnetico tipo Crockett



Figura 6.b: foto separatore modello HMS LAB, presso l'impianto della Minerali Industriali

Sui prodotti di ogni prova sono stati eseguiti esami di laboratorio (esami granulometrici, separazioni magnetiche manuali sulle singole classi granulometriche ed analisi chimiche).

Le prove sono state eseguite su campioni di fango, prelevati direttamente nel bacino di raccolta dello spurgo dei telai a torbida abrasiva di due diversi stabilimenti ossolani: uno che lavora granitici di diversa provenienza (fanghi di **tipo A**), ed uno che invece lavora solo materiali locali quali serizzi e beole (fanghi di **tipo B**).

Le prove sono state condotte con differenti diluizioni di torbida o diversa portata di alimentazione (tabelle 17 e 18).

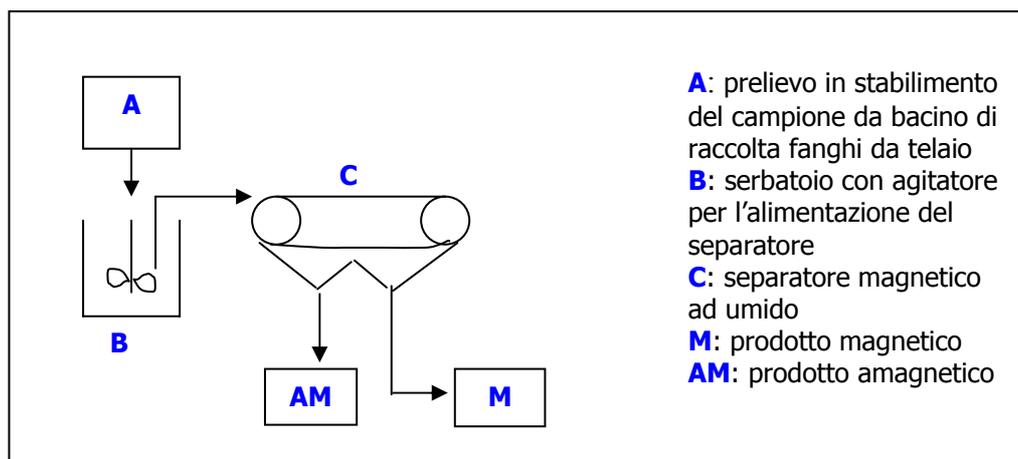


Figura 7: schema del ciclo di separazione magnetica

Sui due prodotti (M ed AM) sono state determinate la distribuzione granulometrica, separazioni magnetiche manuali sulle singole classi granulometriche, analisi chimiche e tenore in Fe del concentrato magnetico ($T_{M/M}$), tenore in Fe del concentrato amagnetico ($T_{M/AM}$), recupero (η), resa nel concentrato di ferro (ρ_M) e resa del [concentrato] depurato (ρ_{AM}).

Le prove sono state eseguite su tre campioni di materiale proveniente dallo stabilimento dell'Internazionale Graniti di Masera (Campioni A SM) e su tre campioni di materiale proveniente dallo stabilimento ditta Martinelli di Mergozzo (Campioni B SM). I campioni di partenza sono stati prelevati in stabilimento e successivamente diluiti in impianto e mantenuti costantemente omogenei mediante un agitatore.

Tabella 17: dati relativi alla separazione magnetica di fango proveniente dallo stabilimento dell'Internazionale Graniti di Masera (A SM) e sul fango proveniente dallo stabilimento della ditta Martinelli di Mergozzo (B SM)

	CAMPIONE A1 (SM)	CAMPIONE A2 (SM)	CAMPIONE A3 (SM)	CAMPIONE B1 (SM)	CAMPIONE B2 (SM)	CAMPIONE B3 (SM)
Volume iniziale di torbida (l)	15,0	6,0	25,0	6,0	7,0	7,5
Contenuto di solido (g)	15.418,0	4.509,0	9.548,09	3.506,0	3.964,0	3.869,0
Diluizione (g/l)	1.027,9	751,5	381,9	584,3	566,3	515,9
Portata torbida (l/min)	1,3	0,6	0,6	0,9	1,0	1,0
Torbida in uscita (l)	130,0	70,0	75	40,0	40,0	30,0
Diluizione seconda passata (g/l di torbida)	118,6	64,4	-	-	-	-
Portata ripasso (l/min)	1,5	1,7	-	-	-	-
Portata acqua di trattamento (l/min)	7,7	6,4	6.1	6,8	6,6	5,6

Tabella 18: risultati relativi alla separazione magnetica di fango proveniente dallo stabilimento dell'Internazionale Graniti di Masera (A SM) e sul fango proveniente dallo stabilimento della ditta Martinelli di Mergozzo (B SM)

	CAMPIONE A1 (SM)	CAMPIONE A2 (SM)	CAMPIONE A3 (SM)	CAMPIONE B1 (SM)	CAMPIONE B2 (SM)	CAMPIONE B3 (SM)
Alimentazione	15.418,0	4.509,0	9548.09	3.506,0	3.964,0	3.869,0
1° prodotto magnetico (g)	4.328,0	1.722,0	1781.32	1.214,0	1.159,0	884,0
1° prodotto amagnetico (g)	11.090,0	1.387,0	7766.77	2.292,0	2.805,0	2.985,0
2° prodotto amagnetico (ripasso) (g)	-	1.400,0	-	3.506,0	3.964,0	3.869,0
Resa magnetico (%)	28,1%	38,2%	18,7%	34,6%	29,2%	22,8%

In due casi (A1 e A2) è stata eseguita una seconda passata: sulla frazione magnetica (campione A1) e su quella amagnetica (campione A2).

Dopo inquartature successive sui prodotti M (magnetico) e AM (amagnetico) di ogni prova filtrati ed essiccati, sono state ottenute due porzioni rappresentative, sulle quali sono stati eseguiti esami granulometrici (figura 8) ed ulteriori separazioni magnetiche manuali sulle diverse classi granulometriche (tabella 19).

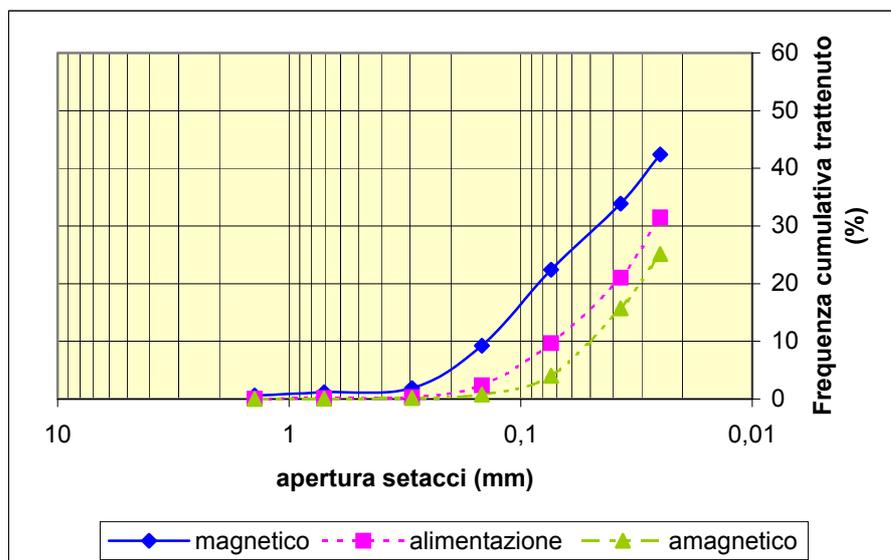


Figura 8.a: curve relative ai campioni prelevati durante la prova A1SM: curve granulometriche dell'alimentazione, della frazione magnetica ed della frazione amagnetica.

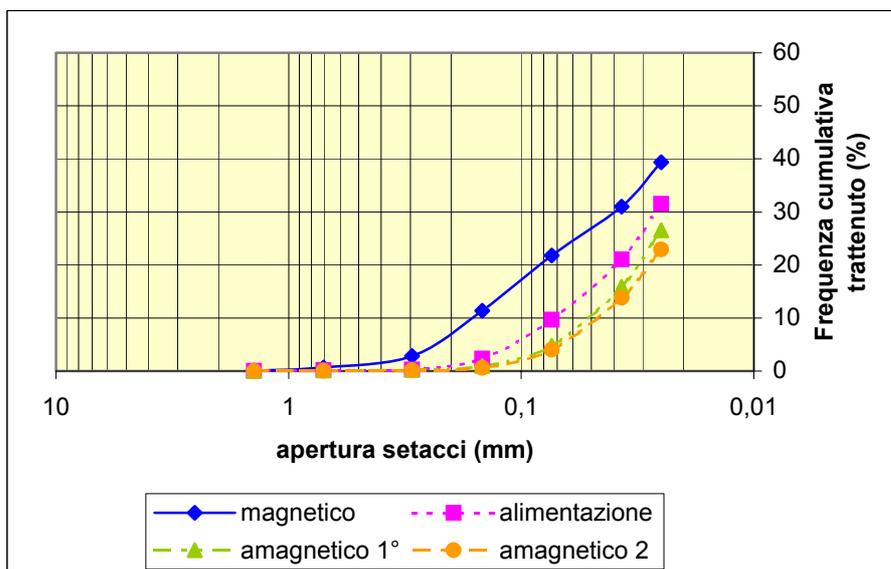


Figura 8.b: curve relative ai campioni prelevati durante la prova A2SM: curve granulometriche dell'alimentazione, della frazione magnetica ed della frazione amagnetica.

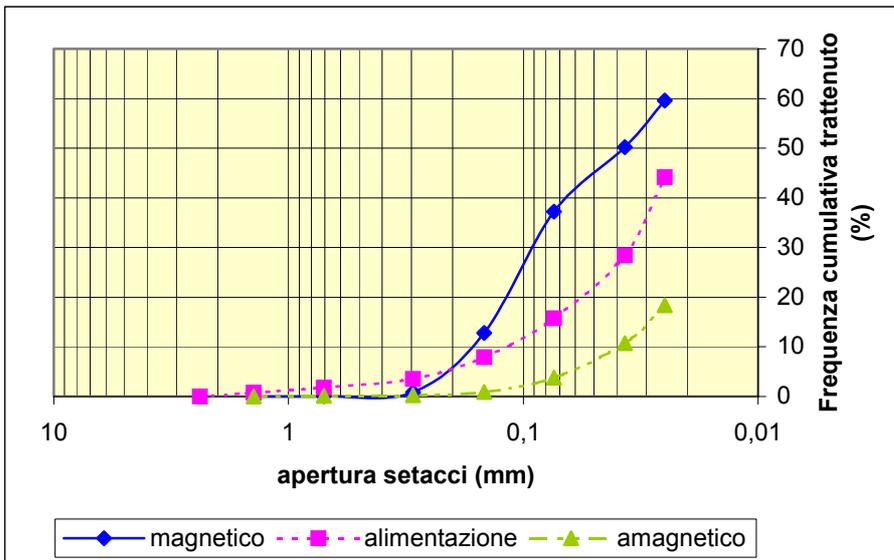


Figura 8.c: curve relative ai campioni prelevati durante la prova A3SM: curve granulometriche dell'alimentazione, della frazione magnetica ed della frazione amagnetica.

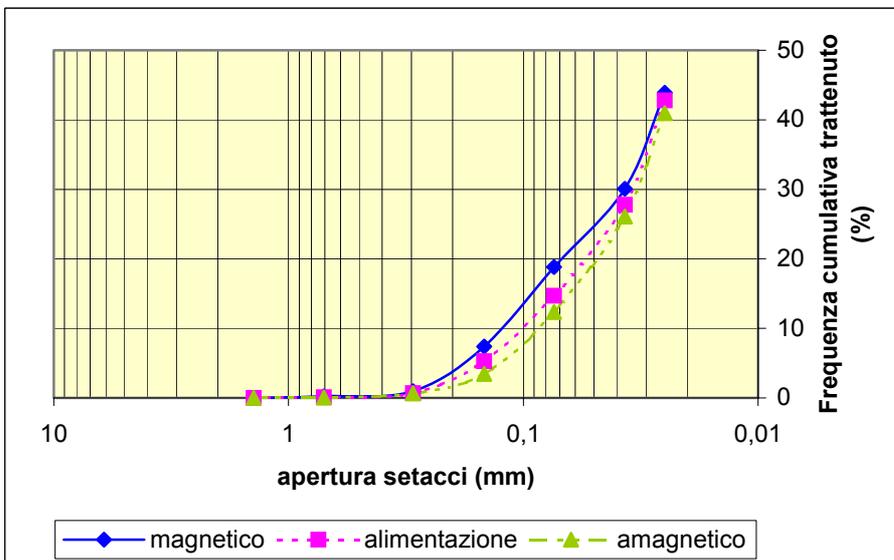


Figura 8.d: curve relative ai campioni prelevati durante la prova B1SM: curve granulometriche dell'alimentazione, della frazione magnetica ed della frazione amagnetica.

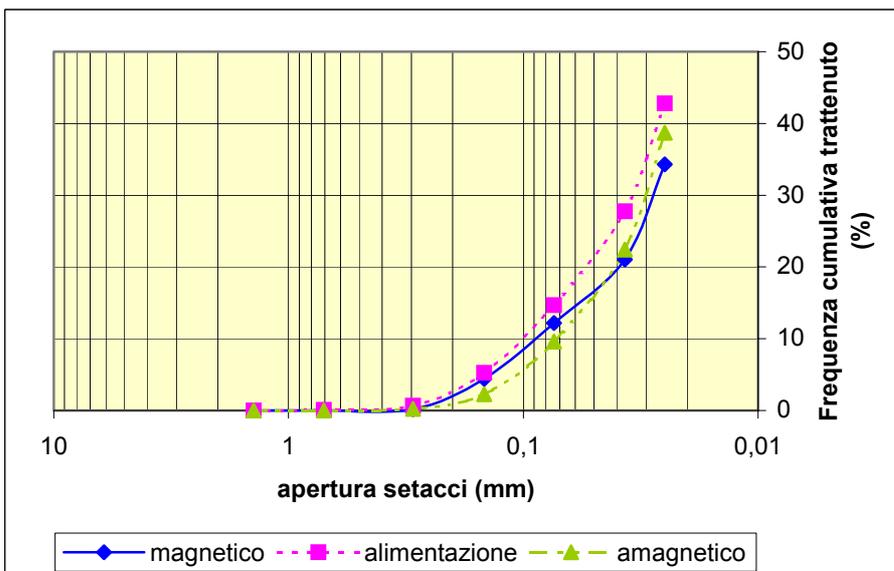


Figura 8.e: curve relative ai campioni prelevati durante la prova B2SM: curve granulometriche dell'alimentazione, della frazione magnetica ed della frazione amagnetica.

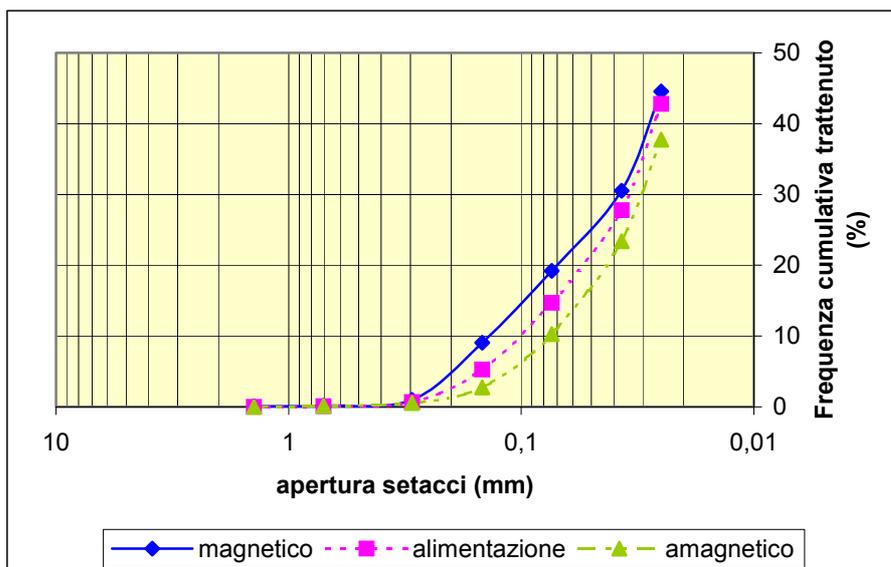


Figura 8.f: curve relative ai campioni prelevati durante la prova B3SM: curve granulometriche dell'alimentazione, della frazione magnetica ed della frazione amagnetica.

La separazione magnetica manuale è stata eseguita, mediante calamita, su ogni classe ottenuta dall'analisi granulometrica dell'alimentazione e dei due prodotti ottenuti; ciò ha permesso di determinare la frazione magnetica relativa a ciascuna classe e quella totale dei campioni al fine di poter determinare il tenore di ferro presente, il recupero e la resa del trattamento.

Tabella 19.a: campione AISM: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dei due prodotti ottenuti (magnetico M ed amagnetico AM).

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI COSTITUENTI MAGNETICI NELL'ALIMENTAZIONE NEI PRODOTTI DELLA SEPARAZIONE MAGNETICA		
	ALIMENTAZIONE (%)	PRODOTTO AMAGNETICO (%)	PRODOTTO MAGNETICO (%)
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	0,00	0,00	0,00
0,707 - 0,295	60,00	0,00	71,05
0,295-0,147	68,35	7,41	95,21
0,147-0,074	37,50	3,38	89,94
0,074-0,037	20,18	1,51	65,26
0,037 - 0,025	13,97	5,61	45,85
< 0,025	12,42	1,00	17,03
TOTALE	16,49	1,61	41,04

Tabella 19.b: campione A2SM: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dei due prodotti ottenuti (magnetico M ed amagnetico AM).

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI COSTITUENTI MAGNETICI NELL'ALIMENTAZIONE NEI PRODOTTI DELLA SEPARAZIONE MAGNETICA			
	ALIMENTAZIONE (%)	PRODOTTO AMAGNETICO (%)	PRODOTTO AMAGNETICO (RIPASSO) (%)	PRODOTTO MAGNETICO (%)
> 1,410	0,00	0,00	0,00	0,00
1,410 - 0,707	0,00	0,00	0,00	0,00
0,707 - 0,295	60,00	0,00	0,00	97,27
0,295-0,147	68,35	0,00	15,79	95,66
0,147-0,074	37,50	1,56	5,37	88,11
0,074-0,037	20,18	1,24	1,85	58,64
0,037 - 0,025	13,97	6,84	5,47	49,18
< 0,025	12,42	2,89	2,65	18,63
TOTALE	16,49	3,05	2,97	40,89

Tabella 19.c: campione A3SM: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dei due prodotti ottenuti (magnetico M ed amagnetico AM).

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI COSTITUENTI MAGNETICI NELL'ALIMENTAZIONE NEI PRODOTTI DELLA SEPARAZIONE MAGNETICA		
	ALIMENTAZIONE (%)	PRODOTTO AMAGNETICO (%)	PRODOTTO MAGNETICO (%)
> 1,410	0,00	0,00	0,00
1,410 - 0,707	26,32	0,00	85,19
0,707 - 0,295	42,86	0,00	96,00
0,295-0,147	54,55	0,00	98,45
0,147-0,074	33,96	3,75	97,49
0,074-0,037	13,73	3,26	90,13
0,037 - 0,025	10,38	4,27	81,38
< 0,025	4,61	1,18	24,73
TOTALE	11,99	1,62	62,76

Tabella 19.d: campione B1SM: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dei due prodotti ottenuti (magnetico M ed amagnetico AM).

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI COSTITUENTI MAGNETICI NELL'ALIMENTAZIONE NEI PRODOTTI DELLA SEPARAZIONE MAGNETICA		
	ALIMENTAZIONE (%)	PRODOTTO AMAGNETICO (%)	PRODOTTO MAGNETICO (%)
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	50,00	0,00	50,00
0,707 - 0,295	41,18	0,00	83,33
0,295-0,147	58,53	2,08	80,95
0,147-0,074	30,13	1,97	53,72
0,074-0,037	8,15	0,64	19,57
0,037 - 0,025	6,98	2,95	15,42
< 0,025	6,12	5,26	13,15
TOTALE	11,43	3,86	23,78

Tabella 19.e: campione B2SM: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dei due prodotti ottenuti (magnetico M ed amagnetico AM).

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI COSTITUENTI MAGNETICI NELL'ALIMENTAZIONE NEI PRODOTTI DELLA SEPARAZIONE MAGNETICA		
	ALIMENTAZIONE (%)	PRODOTTO AMAGNETICO (%)	PRODOTTO MAGNETICO (%)
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	50,00	0,00	0,00
0,707 - 0,295	41,18	0,00	66,67
0,295-0,147	58,53	2,70	88,64
0,147-0,074	30,13	1,88	62,86
0,074-0,037	8,15	0,22	20,22
0,037 - 0,025	6,98	3,40	12,47
< 0,025	6,12	4,28	19,29
TOTALE	11,43	3,40	24,87

Tabella 19.f: campione B3SM: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dei due prodotti ottenuti (magnetico M ed amagnetico AM).

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI COSTITUENTI MAGNETICI NELL'ALIMENTAZIONE NEI PRODOTTI DELLA SEPARAZIONE MAGNETICA		
	ALIMENTAZIONE (%)	PRODOTTO AMAGNETICO (%)	PRODOTTO MAGNETICO (%)
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	50,00	0,00	75,00
0,707 - 0,295	41,18	0,00	70,37
0,295-0,147	58,53	3,85	79,06
0,147-0,074	30,13	5,75	79,71
0,074-0,037	8,15	1,75	70,00
0,037 - 0,025	6,98	3,01	58,30
< 0,025	6,12	2,96	24,32
Totale	11,43	3,02	44,70

I risultati ottenuti dalle singole prove sono riassunti in tabella 20.

Tabella 20: tenore di magnetico nei prodotti ottenuti dalle diverse prove

N° PROVA	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	ALIMENTAZIONE (%)	FRAZIONE AMAGNETICA (%)	FRAZIONE MAGNETICA (%)
Prova A1SM	16,49	1,61	41,04
Prova A2SM	16,49	3,05 (1°) 2,97 (2°)	40,89
Prova A3SM	11,99	1,62	62,76
Prova B1SM	11,43	3,86	23,78
Prova B2SM	11,43	3,40	24,87
Prova B3SM	11,43	3,02	44,70

Dai dati riportati nelle tabelle 17,18 e 19 è stato possibile calcolare i tenori in ferro per i prodotti e le rese e i recuperi delle prove (riportati in tabella 21):

- $T_{M/M}$ = tenore in Fe del concentrato magnetico
- $T_{M/AM}$ = tenore in Fe del concentrato amagnetico
- η_M = Recupero di ferro nel prodotto magnetico
- η_{AM} = Recupero di ferro nel prodotto amagnetico
- ρ_M = Resa del prodotto magnetico (massa del prodotto magnetico)/(massa totale del campione)
- ρ_{AM} = Resa del prodotto amagnetico (massa del prodotto amagnetico)/(massa totale del campione)

Tabella 21: Risultati raggiunti dopo la separazione magnetica

	A1SM	A2SM	A3SM	B1SM	B2SM	B3SM
Totale magnetico nella frazione magnetica	1800.5 g	704.1 g	1118.0 g	288.7 g	288.2 g	395.1 g
Totale magnetico nella frazione amagnetica	178.5 g	(1°) 42.3 g	125.8 g	88.5g	95.4 g	90.1 g
		(2°) 41.6 g				
$T_{M/M}$	41.04%	40.89%	62.76%	23.78%	24.87%	44.70%
$T_{M/AM}$	1.61%	(1°) 3.05%	1.62%	3.86%	3.40%	3.02%

		(2°) 2.97%				
η_M	91.0%	89.3%	90.0%	76.5%	75.1%	81.4%
η_{AM}	9.0%	(1°) 5.4%	10.0%	23.5%	24.9%	18.6%
		(2°) 5.3%				
ρ_M	28.1%	38.2%	18.7%	34.6%	29.2%	22.8%
ρ_{AM}	71.9%	61.8%	81.3%	65.4%	70.8%	77.2%

I risultati più promettenti risultano essere quelli relativi ai campioni A1, A3 ed il B3; risultato confermato dai valori ottenuti per la resa magnetica e per l'efficienza del trattamento.

Può essere interessante inoltre fornire alcuni dati relativi alle analisi chimiche fatte sul materiale tal quale, sul magnetico e sull'amagnetico dei Campioni A e B, si riporteranno a confronto innanzitutto le concentrazioni ottenute per i campioni A3 e B3, risultati essere quelli per i quali ha funzionato meglio la separazione magnetica (tabelle 22 e 23).

Si riportano inoltre le analisi chimiche sugli elementi maggiori, relative ai campioni A1 e A2 (tabelle 24) e B1 e B2 (tabella 25).

Tabella 22: risultati delle analisi chimiche degli elementi maggiori (A/A – alimentazione A3; A/M – frazione magnetica; A/AM – frazione amagnetica; B/A – alimentazione B3; B/M – frazione magnetica; B/AM – frazione amagnetica). (analisi eseguite presso la sede della Minerali Industriali di Cacciano – Biella)

	A3SM/A (%)	A3SM/M (%)	A3SM/AM (%)	B3SM/A (%)	B3SM/M (%)	B3SM/AM (%)
SiO ₂	60.4	n.d.	65.9	60.6	n.d.	68.0
TiO ₂	< 1	n.d.	0.2	< 1	n.d.	< 1
Al ₂ O ₃	13.0	n.d.	12.0	13.0	n.d.	14.5
Fe ₂ O ₃	18.1	90.0	4.8	15.6	25.1	4.9
MgO	< 1	n.d.	1.9	< 1	n.d.	< 1
CaO	3.5	n.d.	4.1	3.6	3.6	3.9
Na ₂ O	3.6	n.d.	3.6	3.4	n.d.	3.9
K ₂ O	3.3	n.d.	3.6	2.1	n.d.	2.3
P.F.	0.4	n.d.	n.d.	0.5	n.d.	1.1

Tabella 23: risultati delle analisi chimiche degli elementi in tracce (A/A – alimentazione A3; A/M – frazione magnetica; A/AM – frazione amagnetica; B/A – alimentazione B3; B/M – frazione magnetica; B/AM – frazione amagnetica). (analisi eseguite presso la sede della Minerali Industriali di Cacciano – Biella)

	A3SM/A (ppm)	A3SM/M (ppm)	A3SM/AM (ppm)	B3SM/A (ppm)	B3SM/M (ppm)	B3SM/AM (ppm)
Cd	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 2	< 2	< 2
Co	10	50	10	10	14	6
Cr	180	1000	100	160	320	37
Cu	240	1410	60	120	195	32
Mn	1080	4400	480	910	1500	410
Ni	140	790	50	80	150	20
Pb	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 2	< 2	< 2
Zn	60	60	60	50	100	60

Tabella 24: risultati delle analisi chimiche degli elementi maggiori (A/A – alimentazione A3; A/M – frazione magnetica; A/AM – frazione amagnetica). (analisi eseguite presso la sede della Minerali Industriali di Cacciano –Biella)

	ASM/A (%)	AISM/M (%)	AISM/AM (%)	A2SM/M (%)	A2SM/AM1 (%)	A2SM/AM2 (%)
SiO ₂	49.4	n.a	55.6	n.a	55.2	54.8
TiO ₂	< 1	n.a	< 1	n.a	< 1	< 1
Al ₂ O ₃	7.8	n.a	9.1	n.a	8.8	9.2
Fe ₂ O ₃	22.6	50.8	10.4	24.3	10.5	10.3
MgO	5.7	2.6	7.4	n.a	8.2	7.9
CaO	10.4	6.4	11.5	3.6	11.7	11.3
Na ₂ O	1.4	n.a	1.3	n.a	1.3	2.2
K ₂ O	1.3	n.a	1.4	n.a	1.3	1.4
P.F.	0.8	n.a	2.3	n.a	2.2	2.2

Tabella 25: risultati delle analisi chimiche degli elementi maggiori (; B/A – alimentazione B3; B/M – frazione magnetica; B/AM – frazione amagnetica). (analisi eseguite presso la sede della Minerali Industriali di Cacciano –Biella)

	BSM/TQ (%)	BISM/M (%)	BISM/AM (%)	B2SM/M (%)	B2SM/AM (%)
SiO ₂	60.6	n.a	67.8	n.a	68.2
TiO ₂	< 1	n.a	< 1	n.a	< 1
Al ₂ O ₃	13.0	n.a	15.2	n.a	14.5
Fe ₂ O ₃	15.6	24.3	3.9	24.3	4.2
MgO	< 1	n.a	1.0	n.a	1.0
CaO	3.6	3.3	3.9	3.6	3.9
Na ₂ O	3.4	n.a	4.0	n.a	3.9
K ₂ O	2.1	n.a	2.4	n.a	2.4
L.O.I.	0.5	n.a	1.5	n.a	1.6

La prova che in assoluto ha dato i risultati migliori è stata la prova sul campione **A3**, in cui si è ottenuto nel concentrato amagnetico un tenore di magnetico pari all'1,62% (partendo dal 12% circa di magnetico nell'alimentazione), con un recupero pari al 90% circa. La buona riuscita della separazione è anche testimoniata dalla distribuzione granulometrica dei due prodotti ottenuti rispetto a quella dell'alimentazione: si nota infatti la netta diversità tra la curva relativa alla frazione magnetica, caratterizzata da dimensioni molto più grossolane, dovute al maggior tenore di graniglia metallica, e quella relativa al concentrato amagnetico, di dimensioni molto più fini.

Tale tipo di separazione risulta facilmente applicabile nei singoli impianti di lavorazione delle pietre ornamentali, a patto di metter a punto separatori magnetici a nastro di nuova concezione per un loro impiego in questo particolare settore: al momento infatti i separatori a nastro tipo Crockett sono fuori produzione, e la loro ricomparsa sul mercato sarebbe giustificata solo nel caso che al trattamento dei fanghi di segazione corrispondesse un guadagno dalla vendita dei prodotti ottenuti.

4.2. Prove di separazione idrogravimetrica con tavola a scosse

In alternativa alla separazione magnetica si è considerata la separazione della graniglia per via idrogravimetrica. In una prima fase sono state eseguite prove di separazione in laboratorio con tavola a scosse per poi passare a prove in impianto pilota con spirale di Humphreys.

La separazione mediante tavola a scosse si basa sul trascinamento dei grani (di dimensione inferiore a 1 mm) all'interno di un velo fluido che corre lungo la tavola inclinata. Il comportamento dei grani al fondo di un sottile velo fluido in movimento dipende dai seguenti fattori:

- l'inclinazione della tavola;
- lo spessore del velo;
- la portata del fluido;
- la viscosità del fluido;
- il coefficiente d'attrito tra i grani e la tavole;

- la massa volumica dei grani;
- la forma dei grani;
- la scabrezza della tavola.

Il funzionamento della tavola a scosse è schematizzato in figura 9: in testa alla tavola vi è l'alimentazione **A**, accanto alla quale, lungo tutta la direzione longitudinale della tavola stessa, vi è un tubo trasversale con degli ugelli, per l'irrorazione dell'acqua sulla superficie della tavola (lungo la direzione **B**): si deve sempre garantire la presenza di un velo fluido costante costituito dall'acqua e dalle particelle di materiale che vengono trascinate in sospensione dal flusso d'acqua.

Le tavole a scosse non sfruttano solo le proprietà reologiche dei sottili veli fluidi testé esposte, ma anche due differenti principi:

- l'accelerazione asimmetrica: le tavole sono infatti dotate di un moto alternativo in direzione orizzontale perpendicolare al moto del velo fluido e caratterizzato da un'accelerazione asimmetrica che provoca uno spostamento intermittente dei grani (in direzione **C**);
- l'impiego di listellature **D** sulla superficie di scorrimento (*riffles*): sono generalmente orientati nel senso del moto della tavola e trasversalmente alla direzione del moto del velo fluido, la loro altezza tende a diminuire partendo dalla bocca di alimentazione verso lo scarico. Hanno la funzione di aumentare la portata, infatti una tavola fornita di listellature può trattare un letto di materiale più spesso, costituito da più strati monogranulari sovrapposti (fenomeno analogo a quanto avviene nei crivelli). L'accelerazione asimmetrica è tale da far sì che i grani pesanti restino fermi entro le listellature **D**, infatti lo strato di fondo è costituito da grani di piccola dimensione pesanti, seguiti dai medi pesanti (vedi figura 10), i quali acquisteranno una maggiore velocità longitudinale rispetto ai grani grossi e leggeri che si trovano in superficie. L'avanzamento del minerale in direzione della massima pendenza è dovuto in parte all'arrivo della nuova alimentazione che permette il passaggio del materiale da un listello al seguente. Si avrà quindi una distribuzione delle velocità dei grani analoga a quella riportata in figura 10. con conseguente differenziazione dei prodotti in uscita dalla tavola, i quali si divideranno in leggeri, pesanti e misti.

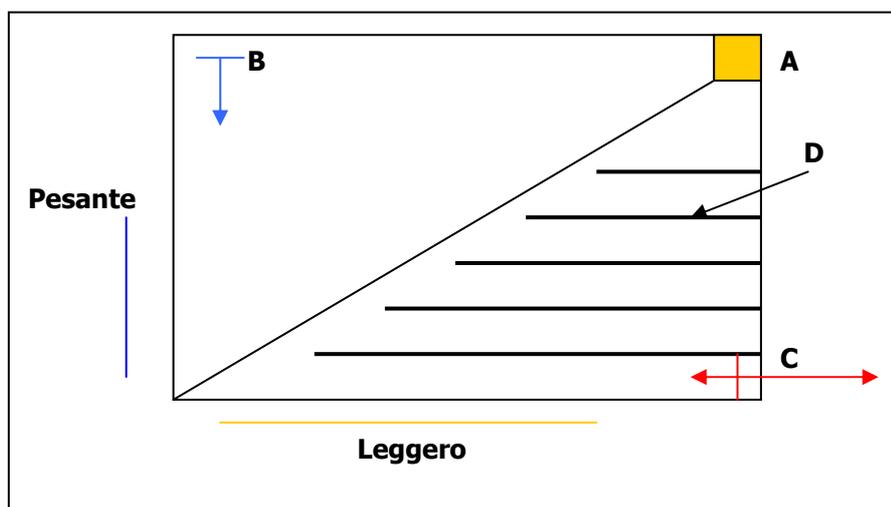


Figura 9: schematizzazione della tavola a scosse (A: alimentazione; B: direzione di scorrimento del velo fluido; C: direzione dell'accelerazione asimmetrica; D: listelli/riffles).

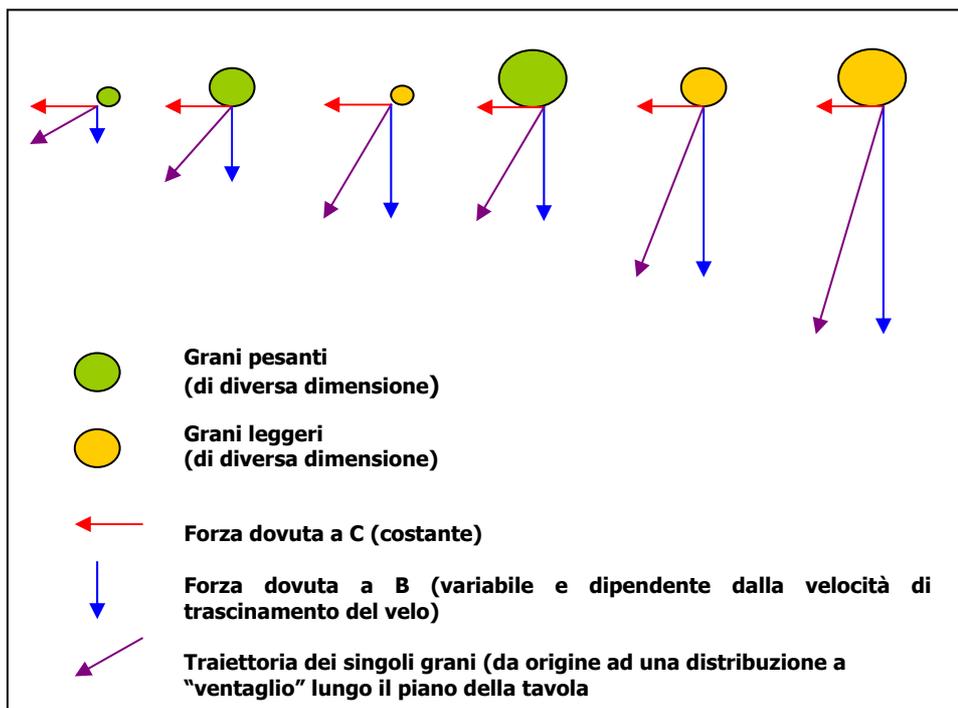


Figura 10: schematizzazione della traiettoria delle particelle sulla tavola a scosse

La dimensione massima dei grani in alimentazione non deve superare l'altezza dei *rifless*, e non deve comunque essere superiore ad un terzo della larghezza dei canali delimitati dai *rifless*. Il materiale da trattare non deve avere dimensioni troppo fini in quanto esso verrebbe trascinato dal velo fluido prima ancora di sedimentare sulla tavola, e quindi prima che si possa operare una separazione (tali dimensioni non devono essere inferiori a 10-100 μm , a seconda delle condizioni di regolazione della tavola e della massa volumica del materiale da trattare)..

Le prove con la tavola a scosse sono state eseguite nel laboratorio di trattamento dei solidi del DIGET – Politecnico di Torino su campioni di fango filtropressato di quattro diversi stabilimenti ossolani: due che lavorano sia materiali granitici locali, nazionali ed internazionali (fanghi di **tipo A**), e due che invece lavorano solo materiali locali quali serizzi e beole (fanghi di **tipo B**). In particolare i campioni si riferiscono a:

- A1: campione Internazionale Graniti;
- A2: campione Graniti S. Rocco;
- B1: campione Ditta Martinelli;
- B2: campione Moro Serizzi.

I quattro diversi campioni, di massa mediamente pari a 5000 g, sono stati portati in laboratorio e sottoposti alle seguenti fasi di trattamento:

- essiccazione in stufa a 105-110°C per 12 ore;
- sgrumatura della massa in esame;
- setacciatura ad umido della frazione inferiore ai 400 mesh;
- alimentazione alla tavola a scosse della sola frazione > 400 mesh (0,037 mm) con l'ottenimento di 3 prodotti: pesante, misto, leggero (figure 11 e 12).

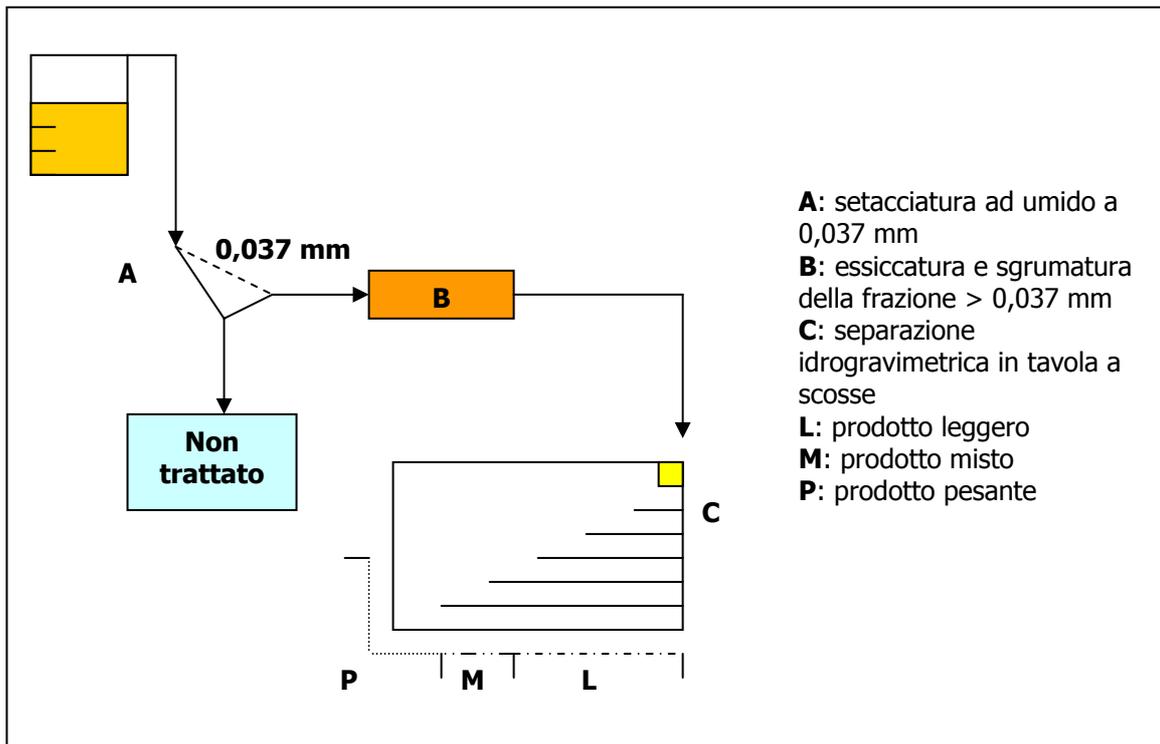


Figura 11: schematizzazione del processo di trattamento in tavola a scosse



Figura 12.a: tavola a scosse (Laboratorio trattamento dei solidi – DIGET – Politecnico di Torino)

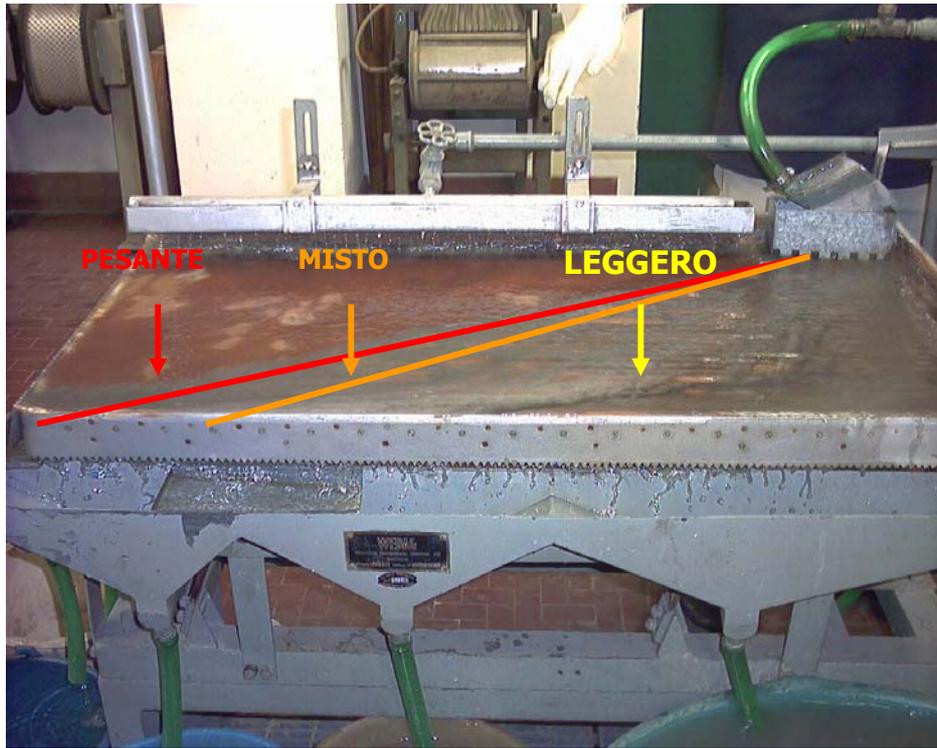


Figura 12.b: prodotti in uscita dalla tavola a scosse

Dai tre prodotti filtrati ed essiccati, sono state ricavate per inquartatura le porzioni rappresentative sulle quali sono stati eseguiti esami granulometrici (figura 13) ed ulteriori separazioni magnetiche manuali sulle diverse classi granulometriche precedentemente individuate (tabella 26).

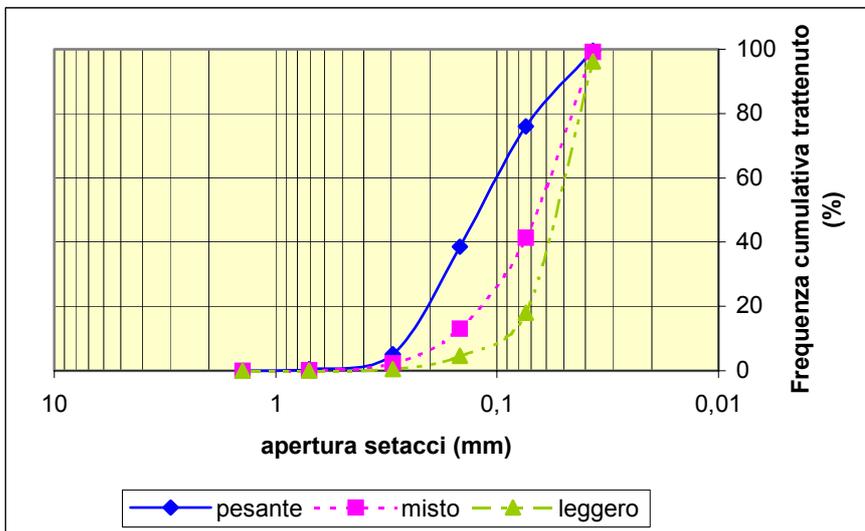


Figura 13.a: curve granulometriche dei prodotti della separazione idrogravimetrica del campione AITS

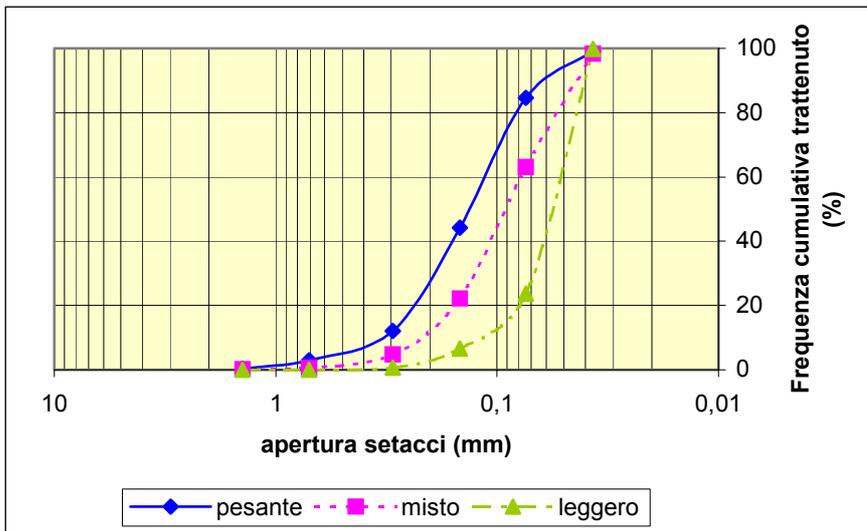


Figura 13.b: curve granulometriche dei prodotti della separazione idrogravimetrica del campione A2TS

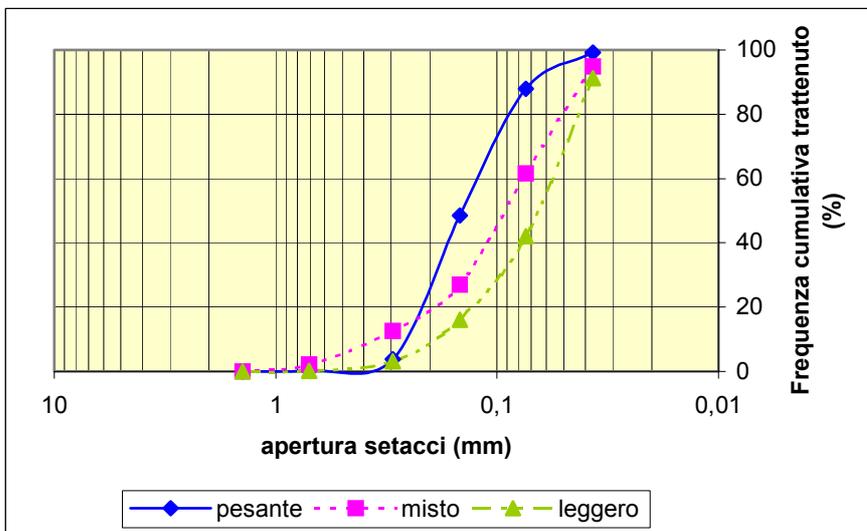


Figura 13.c: curve granulometriche dei prodotti della separazione idrogravimetrica del campione B1TS

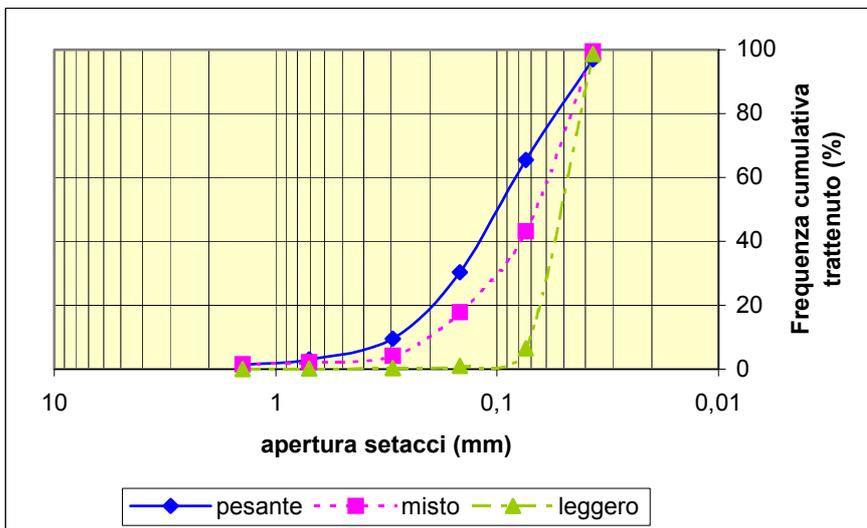


Figura 13.d: curve granulometriche dei prodotti della separazione idrogravimetrica del campione B2TS

Si ricorda che le prove sono eseguite solo sulla frazione > 400 mesh (0,037 mm) pari mediamente al:

- 37,4% del totale nel caso del campione A1TS;
- 30,1% del totale nel caso del campione A2TS;
- 42,8% del totale nel caso del campione B1TS;
- 10,1% del totale nel caso del campione B2TS.

Tabella 26.a: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dell'alimentazione ed dei prodotti della separazione del campione A1TS (pesante, misto e leggero)

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)			
	PESANTE (%)	MISTO (%)	LEGGERO (%)	ALIMENTAZIONE (%)
> 1,410	-	-	-	-
1,410 - 0,707	53,85	33,33	-	0,00
0,707 - 0,295	86,29	45,00	4,00	50,00
0,295-0,147	92,54	43,73	20,68	63,69
0,147-0,074	85,35	17,17	7,33	35,55
0,074-0,037	65,56	4,92	1,28	9,18
0,037 - 0,025	6,67	1,56	0,48	4,44
< 0,025	-	-	-	5,44
Totale	82,57	13,42	2,90	11,16

Tabella 26.b: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dell'alimentazione ed dei prodotti della separazione del campione A2TS (pesante, misto e leggero)

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)			
	PESANTE (%)	MISTO (%)	LEGGERO (%)	ALIMENTAZIONE (%)
> 1,410	37,50	-	-	-
1,410 - 0,707	94,19	21,88	0,00	50,00
0,707 - 0,295	86,43	58,47	44,41	58,33
0,295-0,147	70,94	56,83	43,64	40,74
0,147-0,074	41,29	17,57	16,05	20,94
0,074-0,037	40,32	5,17	1,07	23,60
0,037 - 0,025	57,41	18,18	0,00	6,99
< 0,025	-	-	-	1,79
Totale	56,33	21,71	6,46	7,39

Tabella 26.c: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dell'alimentazione ed dei prodotti della separazione del campione B1TS (pesante, misto e leggero)

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)			
	PESANTE (%)	MISTO (%)	LEGGERO (%)	ALIMENTAZIONE (%)
> 1,410	-	-	-	-
1,410 - 0,707	88,00	55,56	-	50,00
0,707 - 0,295	99,12	11,90	19,39	41,18
0,295-0,147	98,79	43,10	22,85	58,53
0,147-0,074	95,35	52,14	7,34	30,13
0,074-0,037	87,93	60,45	2,15	8,15
0,037 - 0,025	82,05	80,95	1,67	6,98
< 0,025	-	-	-	6,12
Totale	96,06	50,99	6,65	11,43

Tabella 26.d: tenore di magnetico presente nelle singole classi granulometriche dell'alimentazione ed dei prodotti della separazione del campione B2TS (pesante, misto e leggero)

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)			
	PESANTE (%)	MISTO (%)	LEGGERO (%)	ALIMENTAZIONE (%)
> 1,410	-	-	-	-
1,410 - 0,707	48,15	27,69	-	0,00
0,707 - 0,295	61,39	37,64	0,00	25,00
0,295-0,147	58,36	54,65	25,00	27,27
0,147-0,074	42,65	27,77	13,13	11,11
0,074-0,037	42,83	4,65	2,32	2,13
0,037 - 0,025	43,75	21,62	0,00	2,68
< 0,025	-	-	-	6,55
Totale	46,76	18,29	3,01	6,24

I risultati ottenuti dalle singole prove sono riassunti in tabella 27.

Tabella 27: tenore di magnetico nei prodotti ottenuti nelle quattro prove

N° PROVA	TENORE DI MAGNETICO (%)			
	PESANTE (%)	MISTO (%)	LEGGERO (%)	ALIMENTAZIONE (%)
Prova A1TS	82,57	13,42	2,90	11,16
Prova A2TS	56,33	21,71	6,46	7,39
Prova B1TS	96,06	50,99	6,65	11,43
Prova B2TS	46,76	18,29	3,01	6,24

Da quanto visto si può notare come due prove su quattro (A1 e B1) abbiano dato risultati buoni di separazione della graniglia presente nel fango di origine, sulla sola frazione > 0,037 mm. In particolare si può evidenziare come si sia riusciti ad ottenere un concentrato “pesante” al 96% di frazione magnetica (prova B1). La prova B2 è risultata poco significativa, non tanto per i risultati ottenuti dalla separazione, quanto piuttosto, dal fatto che la frazione esaminata corrisponde al solo 10% del campione totale.

Si riportano inoltre le analisi chimiche relative ai prodotti A1 e B2, tabelle 28 (elementi maggiori) e 29 (elementi in tracce), e quelle relative ai soli elementi in tracce del campione B1 (tabella 30)

Tabella 29.a: analisi chimiche degli elementi maggiori relativi alla prova A1TS (analisi eseguite presso Acme analytical laboratories ltd. Vancouver, Canada)

	TENORI (%)				
	alimentazione	pesante	misto	leggero	< 0,037mm
SiO₂	61,06	15,61	64,09	64,65	62,98
TiO₂	0,37	0,29	0,26	0,47	0,36
Al₂O₃	13,95	2,74	13,46	14,97	14,73
Fe₂O₃	12,45	75,41	12,2	7,24	6,61
MgO	2,16	1,49	1,76	1,99	2,22
CaO	4,48	2,02	4,25	3,38	4,93
Na₂O	3,27	0,55	3,35	3,19	3,51
K₂O	2,59	0,21	1,95	3,15	2,75

Tabella 28.b: analisi chimiche degli elementi maggiori relativi alla prova B2TS (analisi eseguite presso Acme analytical laboratories ltd. Vancouver, Canada)

	TENORI (%)				
	alimentazione	pesante	misto	leggero	<0,037mm
SiO ₂	61,81	35,55	65,0	62,15	61,02
TiO ₂	0,57	0,61	0,41	0,73	0,57
Al ₂ O ₃	14,86	8,55	13,85	14,64	15,38
Fe ₂ O ₃	7,4	59,72	9,77	8,57	6,19
MgO	1,55	0,42	0,98	2,29	1,51
CaO	5,48	5,08	4,33	3,68	6,2
Na ₂ O	3,41	1,75	3,38	2,91	3,62
K ₂ O	2,62	0,56	1,97	3,2	2,75

Tabella 29.a: analisi chimiche degli elementi in tracce relativi alla prova AITS (analisi eseguite presso Acme analytical laboratories ltd. Vancouver, Canada)

	TENORI (ppm)				
	alimentazione	pesante	misto	leggero	<0,037mm
Ba	644	86	483	670	708
Cd	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cr	70	820	102	34	< 34
Co	17,3	88,9	15,6	11,9	12,4
Cu	192,1	1626,2	173,8	70,1	139,3
Mn	930	6350	1010	700	620
Ni	105	1158	130	43	57
Pb	6,1	9,9	2,4	3,3	8
Zn	37	52	38	90	41

Tabella 29.b: analisi chimiche degli elementi in tracce relativi alla prova B2TS (analisi eseguite presso Acme analytical laboratories ltd. Vancouver, Canada)

	TENORI (ppm)				
	alimentazione	pesante	misto	leggero	<0,037mm
Ba	822	191	631	840	888
Cd	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cr	34	1505	34	< 34	< 34
Co	15,4	44,9	11,9	16,5	15,1
Cu	67,9	874,4	151,1	59,5	56,1
Mn	697	4570	852	852	620
Ni	60,0	573	100	30	37
Pb	1,9	16,5	3,5	3,5	2,5
Zn	63	110	58	162	94

Tabella 30: analisi chimiche degli elementi in tracce relativi alla prova BITS (analisi eseguite presso i laboratori della Facoltà di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino)

	TENORI (ppm)				
	alimentazione	pesante	misto	leggero	<0,037mm
Cd	< 2	12	< 2	< 2	< 2
Co	10	40	2,4	5,6	< 2
Cr	160	1350	65	60	36
Cu	120	1150	88	56	34,5
Mn	910	5900	2400	460	300
Ni	80	520	270	25,5	< 5
Pb	< 2	28	17,6	< 2	< 2
Zn	50	50	70	72	56

Com'era atteso nel concentrato pesante si è avuto un arricchimento dei metalli legati alla graniglia (Fe, Mn, Cr, Co, Cu e Ni) a fronte di un impoverimento degli elementi che costituiscono la roccia (silice, allumina, calcio, sodio, potassio e bario).

In base ai risultati ottenuti si è deciso di eseguire alcuni saggi mediante spirale di Humphreys. Se si riuscisse, infatti, ad ottenere risultati simili su scala industriale, senza previa separazione della frazione <0,037 mm, si potrebbe pensare di recuperare, da un lato, la frazione pesante (composta prevalentemente da graniglia di dimensioni < 0,4 mm²) e, dall'altro, la frazione leggera da impiegare in campo civile o per recuperi ambientali.

4.3. Prove di separazione idrogravimetrica con spirale di Humphreys

La spirale di Humphrey è un apparecchio concentratore in velo fluido nel quale interviene la forza centrifuga. È costituito da una serie d'elementi di sezione ellittica in ghisa fusa o in plastica, uniti e montati in modo da formare un canale elicoidale. Sono composti di una serie di spire, generalmente variabili tra tre e sei (figura 17).

In testa alla spirale si ha l'alimentazione in torbida diluita (10-15% in peso solido): i grani più pesanti sedimentano subito sul fondo del canale dove la velocità del fluido è minima e l'azione frenante connessa con l'attrito è massima. A causa della loro ridotta velocità la tendenza a centrifugare è minima. I grani più leggeri, che sedimentano più lentamente, raggiungono e mantengono più facilmente la velocità tangenziale dell'acqua e sono centrifugati verso il bordo esterno del canale. L'acqua di lavaggio, incanalata appositamente entro scanalature che fanno sì che essa passi da un canale interno a quello principale, serve a far sì che si completi la differenziazione tra i grani di diversa densità respingendo i leggeri verso l'esterno e reintegrando il flusso asportato dalla bocchetta di spillamento. Il prodotto pesante è prelevato attraverso aperture regolabili situate sul fondo del canale ad intervalli costanti: le prime producono concentrati ad alto tenore, le ultime invece contengono misti (figure 14 e 15). Lo sterile è invece scaricato alla fine del canale. La dimensione di alimentazione massima è pari a 1.5-3 mm; si possono recuperare grani pesanti sino a dimensioni di 0.074 mm.

Le spirali sono generalmente apparecchi sgrezzatori, installati di regola in batterie (da 6 elementi).

Per ciò che riguarda il ciclo di trattamento (figura 20), si opera con materiale in torbida, la cui distribuzione granulometrica è mediamente compresa tra 10-150 mesh.

Nel caso in esame, nonostante il materiale risulti essere troppo fine rispetto agli standard richiesti per l'impiego di una spirale, si è deciso tuttavia di provare ad eseguire alcuni saggi di prova per poter valutare se un trattamento di separazione gravimetrica sia del tutto fuori luogo, o se, con successive opportune modifiche, tale trattamento si possa applicare anche ai fanghi di segazione. In tal senso è stata installata presso lo stabilimento dell'Internazionale Graniti di Masera, la spirale in dotazione al DIGET, in precedenza in giacenza presso lo stabilimento della Minerali Industriali di Cacciano (BI). Essa è stata sistemata presso l'impianto di filtropressatura, al fine di poter campionare in uscita evitando di disperdere nell'ambiente i fanghi trattati con la spirale, ed invece convogliandoli direttamente nella vasca di raccolta dei fanghi prima della filtropressatura. L'alimentazione della macchina è stata garantita dall'installazione di una pompa ad immersione in dotazione alla ditta, caratterizzata da un diametro della girante pari a 15 cm, un diametro in uscita da 2" ed una prevalenza di 9 m (la lunghezza del tubo di collegamento dalla vasca all'alimentazione della spirale è pari a 50 m), sistemata direttamente all'interno della vasca di raccolta della torbida in uscita dai telai, a monte dell'impianto di filtropressatura. L'installazione e la messa a regime della macchina hanno richiesto diverse prove non andate a buon fine e diversi giorni di lavoro.

Ad ogni singola prova sono stati abbinati sistematici esami di laboratorio (esami granulometrici, separazioni magnetiche manuali sulle singole classi granulometriche al fine di controllare dove principalmente si concentrano i minerali magnetici ed analisi chimiche).

Le prove sono state eseguite su campioni di fango non filtropressato, prelevati direttamente nel punto di raccolta dello spurgo dei telai a torbida abrasiva di uno stabilimento ossolano che lavora sia materiali

² Si deve ricordare che negli stabilimenti, a valle dei telai, sono presenti dei cicloni che operano un taglio granulometrico a 0,4 mm, al fine di riciclare la frazione maggiore di 0,4 mm per il taglio.

granitici locali, nazionali ed internazionali (fanghi di **tipo A**, come visto nel caso della separazione magnetica).

A seguito della separazione si sono ottenuti due prodotti:

- frazione leggera (L);
- frazione pesante (P).

Sulle due frazioni sono state determinate distribuzioni granulometriche (figure 18), separazioni magnetiche manuali sulle singole classi granulometriche (tabelle 32), analisi chimiche (tabella 33) e tenore in Fe del concentrato magnetico ($T_{M/M}$), tenore in Fe del concentrato amagnetico ($T_{M/AM}$), rendimento (η), resa nel concentrato di ferro (μ_M) e resa del [concentrato] depurato (μ_{AM}) (tabella 34).

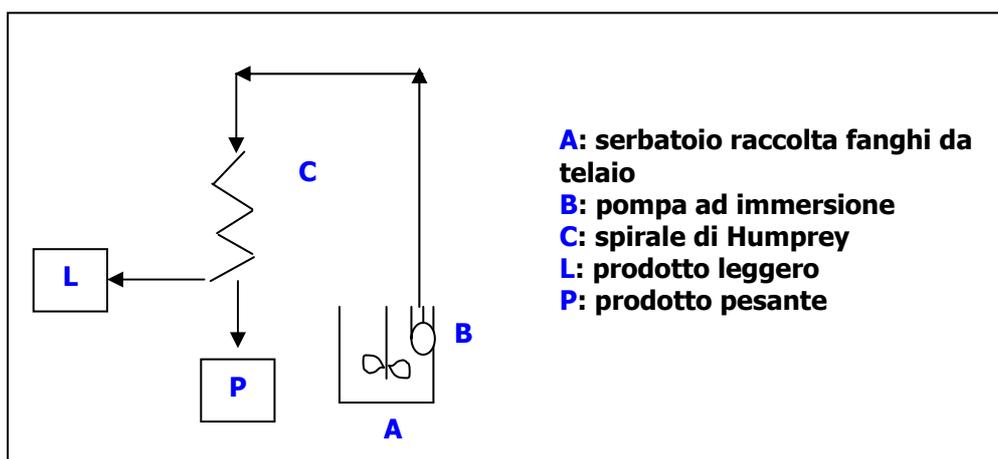


Figura 14: ciclo di trattamento con spirale di Humphreys

Tabella 31.a: dati relativi alle prove di separazione gravimetrica con spirale di Humphreys, condotte con materiale in torbida in uscita dai telai a torbida abrasiva presenti nello stabilimento dell'Internazionale Graniti di Masera (VB)

	CAMPIONE A1SH	CAMPIONE A2SH	CAMPIONE A3SH	CAMPIONE A4SH
Torbida campionata (l)	5	10	7,1	6,3
Contenuto di solido (g)	1730,1	5430,2	643,1	1853,2
Diluizione (g/l)	339	543	90,5	294,2
Portata di torbida (l/s)	0,8	0,5	0,2	0,5
Massa della frazione Pesante (g)	129,5	1511	152	95
Massa della frazione Leggero (g)	1594,5	3908,5	491	1758
Frazione pesante residua (g)	6,0	10,5	-	-
Totale	1730	5430	643	1853
Resa del prodotto Pesante (%)	7,5%	27,8%	23,6%	5,1 %
Posizione coppelle sagomate	Posizione 6/7/9/10/11 aperte	Posizione 6/7/9/10/14 aperte	Posizione 4/6/9/10/11 Molto aperte	Posizione 4/6/9/10/11 Poco aperte

Tabella 31.b: dati relativi alle prove di separazione gravimetrica con spirale di Humphreys, condotte con materiale in torbida in uscita dai telai a torbida abrasiva presenti nello stabilimento dell'Internazionale Graniti di Masera (VB)

	CAMPIONE A5SH	CAMPIONE A6SH	CAMPIONE A7SH	CAMPIONE A8SH
Torbida campionata (l)	3,5	6,2	6,5	6,7
Contenuto di solido (g)	330,8	1127,9	831,8	437,9
Diluizione (g/l)	94,5	182	128	65,4
Portata di torbida (l/sec)	0,04	0,24	0,29	0,25
Massa della frazione Pesante (g)	171,6	144,3	86,8	57,3
Massa della frazione Leggero (g)	159,2	983,6	745,0	380,6
Resa del prodotto Pesante (%)	51,9%	12,8%	10,4%	13,1%
Posizione coppelle sagomate	Posizione 6,9,11 (poco aperte)	Posizione 5,8,11 (poco aperte)	Posizione 5,8,11 (poco aperte)	Posizione 5,8,11,14 (poco aperte)

Tabella 31.c: dati relativi alle prove di separazione gravimetrica con spirale di Humphreys, condotte con materiale in torbida in uscita dai telai a torbida abrasiva presenti nello stabilimento dell'Internazionale Graniti di Masera (VB) [] con magnete

	CAMPIONE A9SH	CAMPIONE A10SH	CAMPIONE A11SH
Torbida campionata (l)	7	7,5	6,6
Contenuto di solido (g)	2712,7	948,5	236,5
Diluizione (g/l)	387,5	126,5	35,83
Portata di torbida (l/sec)	0,32	0,20	0,34
Massa della frazione Pesante (g)	438,7	310,3	40,2
Massa della frazione Leggero (g)	2274,0	638,2	196,3
Resa del prodotto Pesante (%)	16,2%	32,7%	17%
Posizione coppelle sagomate	Posizione 5,[8],11,14 (poco aperte)	Posizione 5,[8],11,14 (più aperte di ash9)	Posizione 5 (molto aperta),[8],14(poco aperte)



Figura 15: regolazione delle "coppelle sagomate" di prelievo del prodotto pesante.



Figura 16: separazione idrogravimetrica con spirale a regime

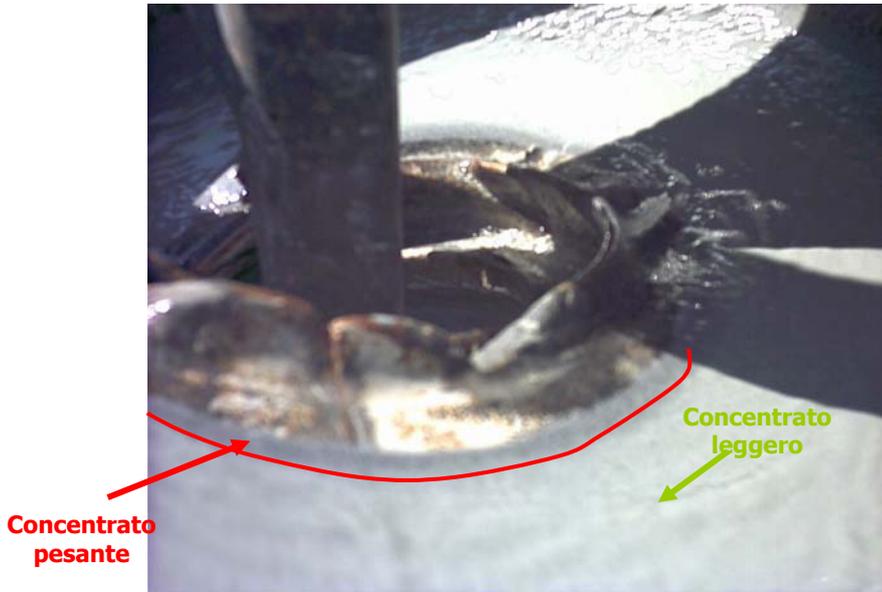


Figura 17: prodotti della separazione gravimetrica in spirale

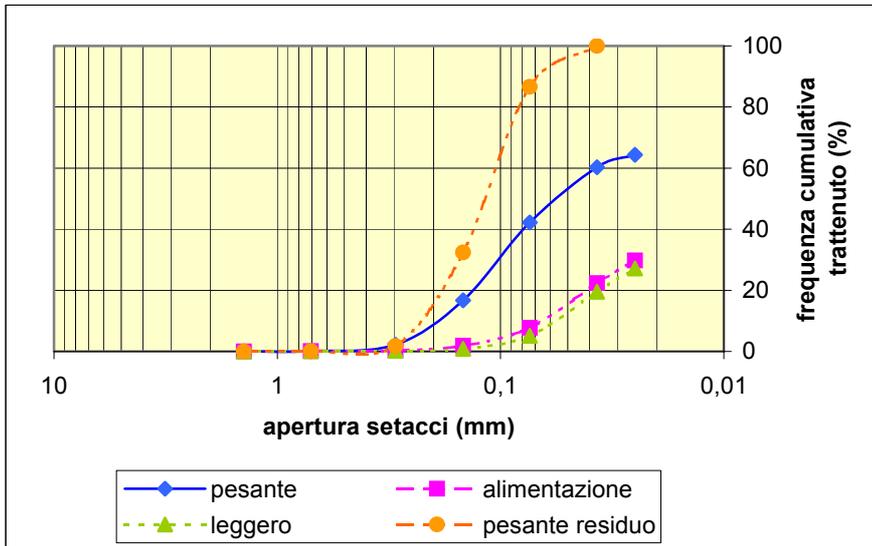


Figura 18.a: curve granulometriche relative al campione A1SH: frazione pesante, leggero, pesante residuo ed alimentazione.

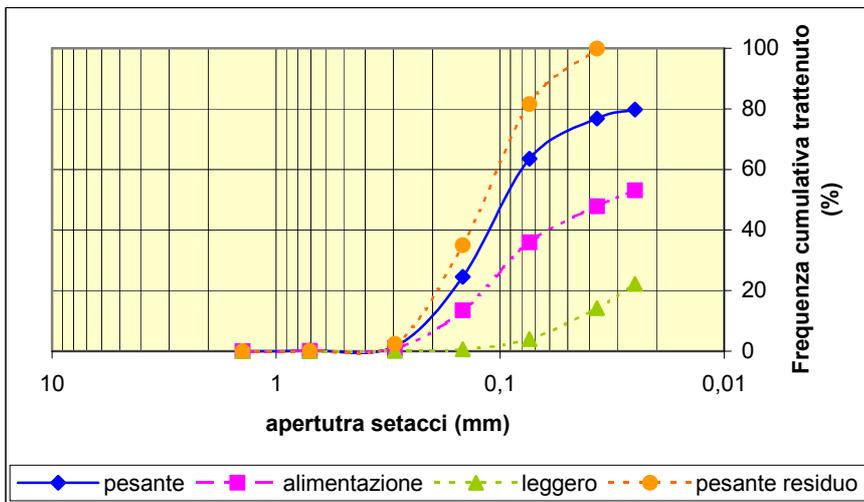


Figura 18.b: curve granulometriche relative al campione A2SH: frazione pesante, leggero, pesante residuo, ed alimentazione

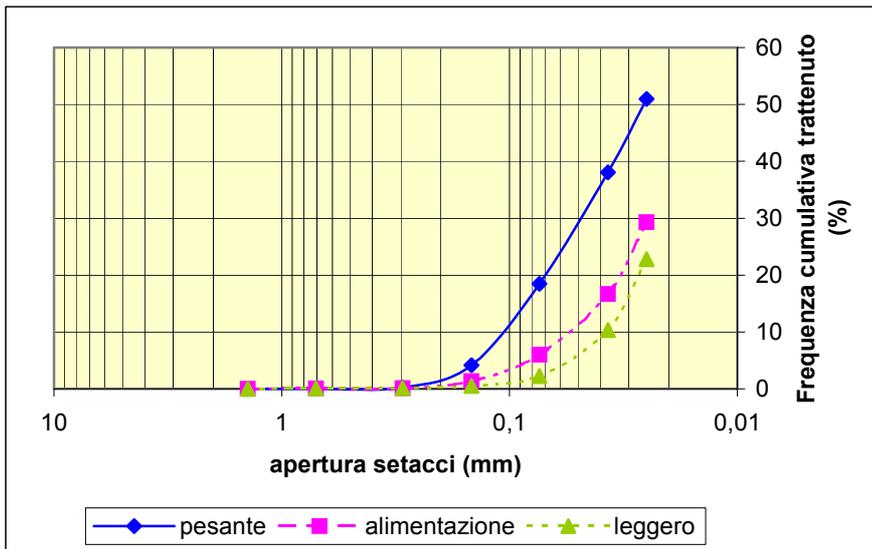


Figura 18.c: curve granulometriche relative al campione A3SH: frazione pesante, leggero ed alimentazione.

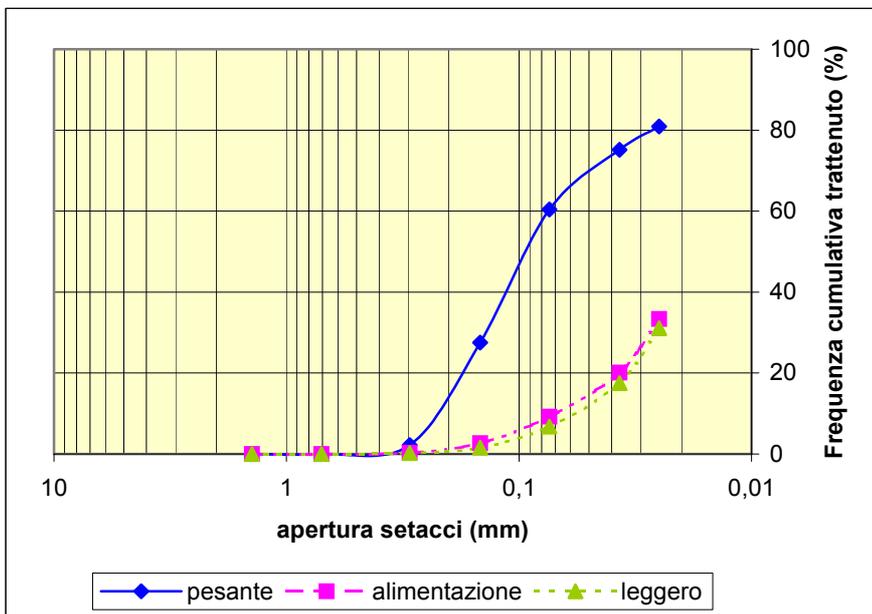


Figura 18.d: curve granulometriche relative al campione A4SH: frazione pesante, leggero ed alimentazione.

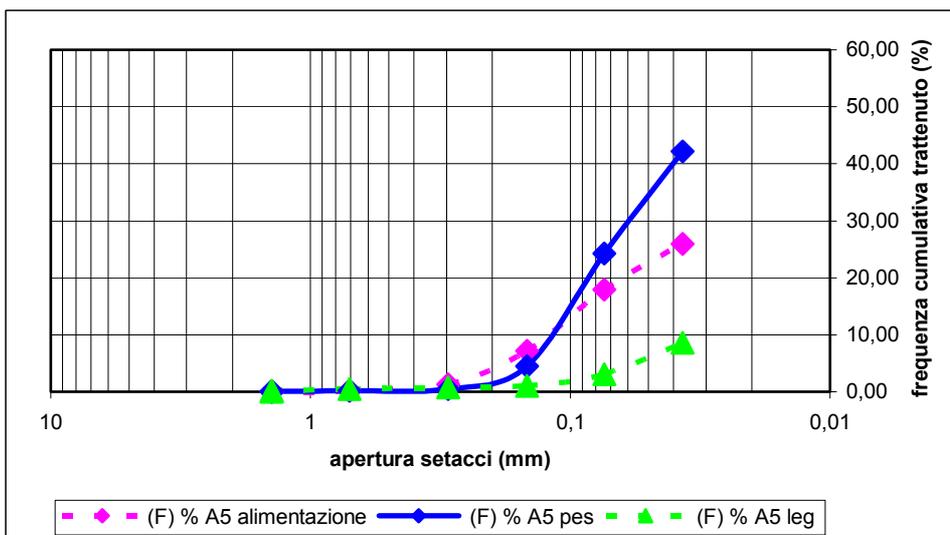


Figura 18.e: curve granulometriche relative al campione A5SH: frazione pesante, leggero ed alimentazione.

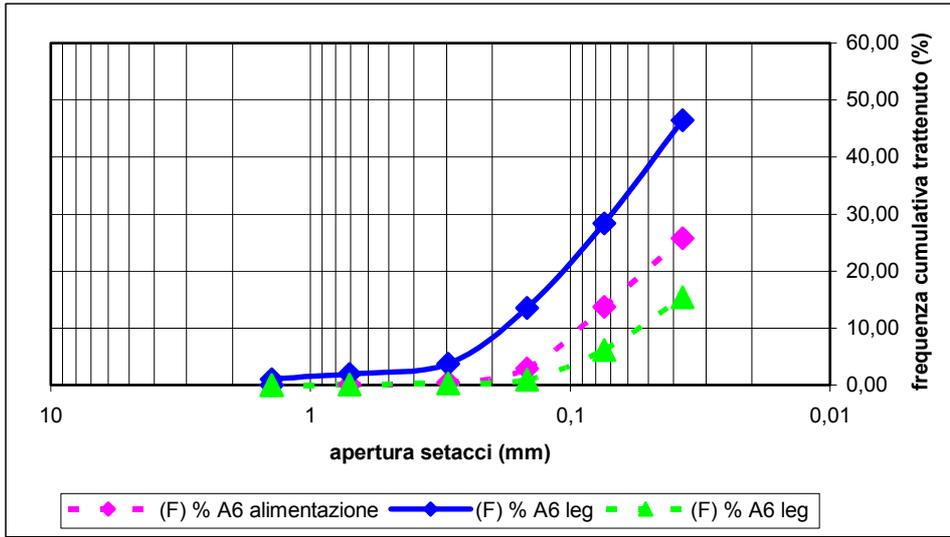


Figura 181.f: curve granulometriche relative al campione A6SH: frazione pesante, leggero ed alimentazione

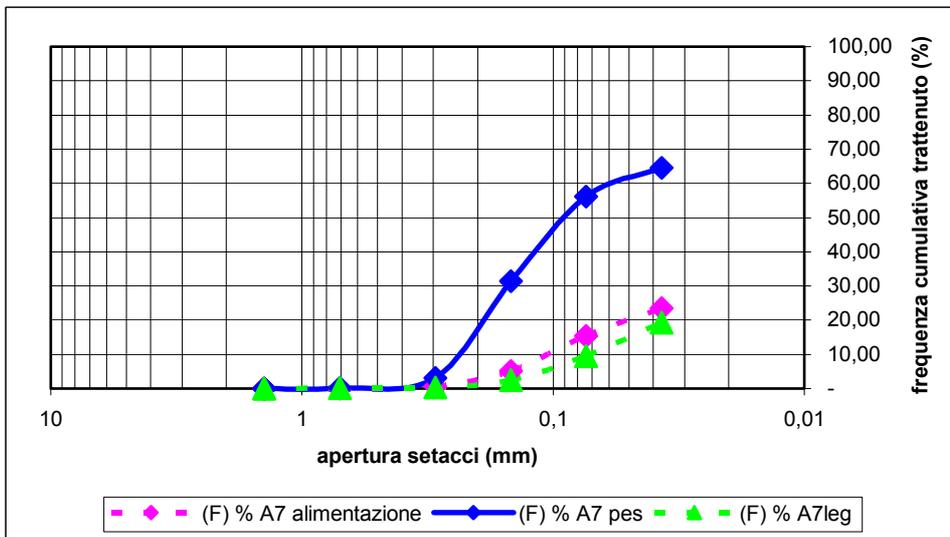


Figura 18.g: curve granulometriche relative al campione A7SH: frazione pesante, leggero ed alimentazione.

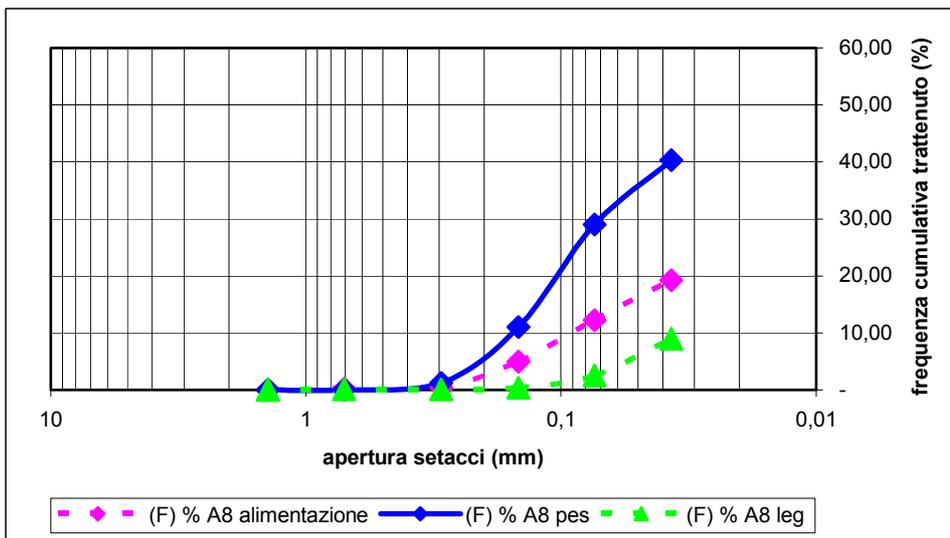


Figura 18.h: curve granulometriche relative al campione A8SH: frazione pesante, leggero ed alimentazione.

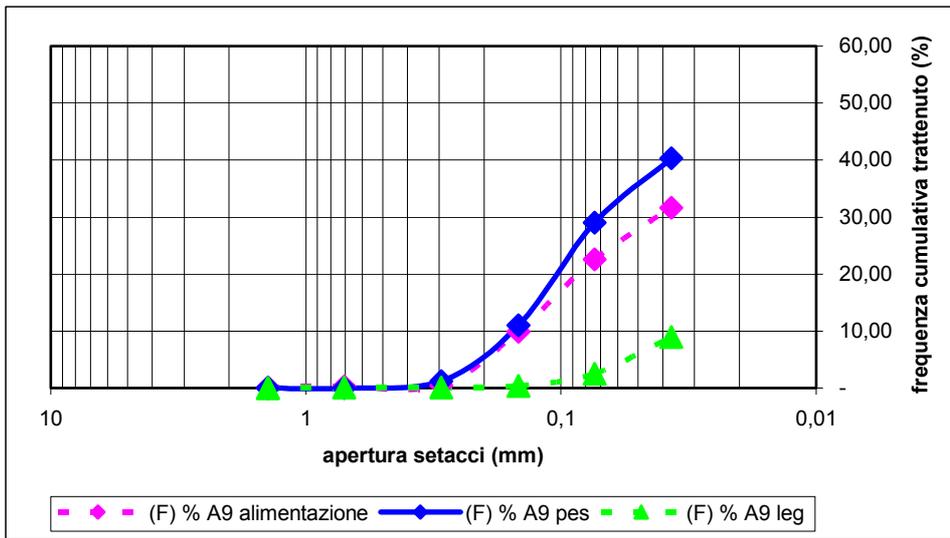


Figura 18.i: curve granulometriche relative al campione A9SH: frazione pesante, leggero ed alimentazione.

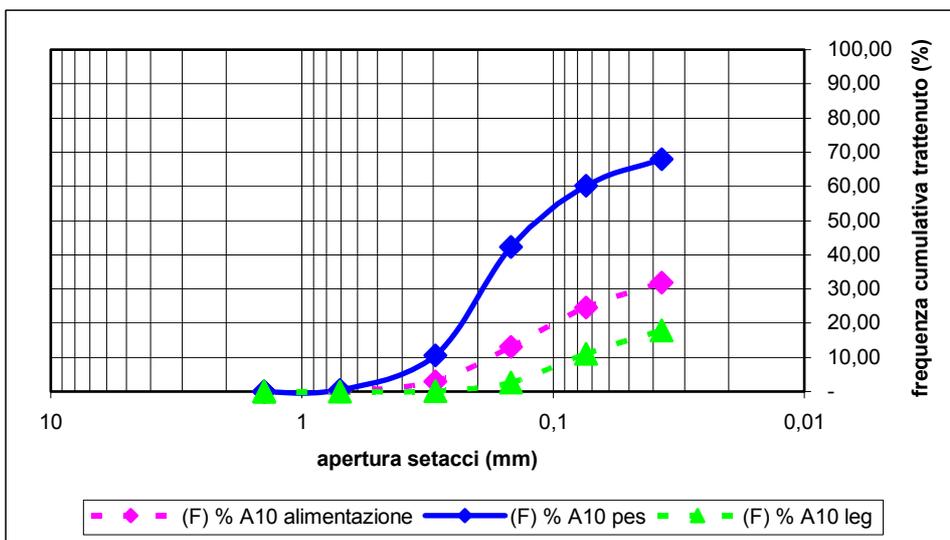


Figura 18.l: curve granulometriche relative al campione A10SH: frazione pesante, leggero ed alimentazione.

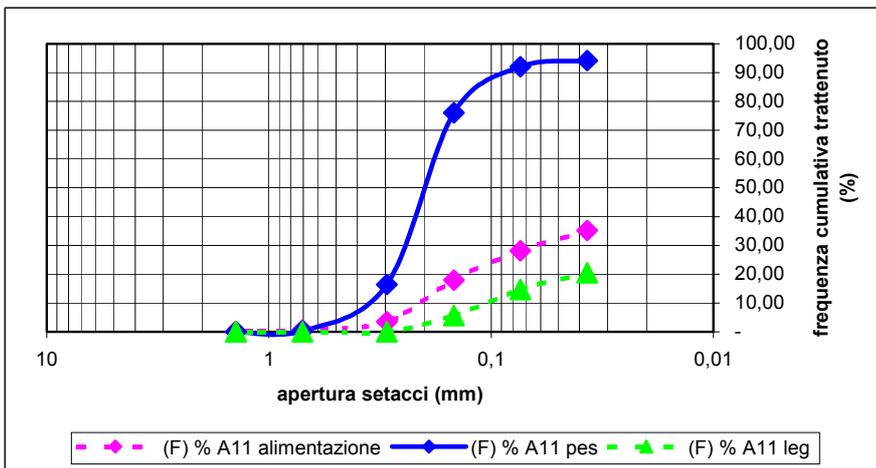


Figura 18.m: curve granulometriche relative al campione A11SH: frazione pesante, leggero ed alimentazione.

Tabella 32.a: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A1SH (pesante, leggero e pesante residuo) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)			
	PESANTE	LEGGERO	RESIDUO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-	-
1,410 - 0,707	42,86%	0,00%	81,82%	0,00%
0,707 - 0,295	31,36%	0,00%	71,32%	23,08%
0,295-0,147	61,32%	4,26%	95,18%	38,32%
0,147-0,074	51,89%	8,97%	97,13%	19,34%
0,074-0,037	30,19%	5,37%	79,21%	7,39%
0,037 - 0,025	11,54%	3,07%	0,00%	3,41%
< 0,025	6,43%	3,22%	-	3,32%
Totale	31,09%	3,76%	93,68%	5,46%

Tabella 32.b: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A2SH (pesante, leggero e pesante residuo) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)			
	PESANTE	LEGGERO	RESIDUO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-	-
1,410 - 0,707	100,00%	-	50,00%	25,00%
0,707 - 0,295	80,68%	0,00%	72,41%	21,51%
0,295-0,147	84,38%	6,67%	89,05%	23,05%
0,147-0,074	76,17%	13,48%	86,03%	20,39%
0,074-0,037	39,42%	3,08%	46,92%	7,47%
0,037 - 0,025	13,76%	3,50%	0,00%	2,91%
< 0,025	8,43%	2,78%	-	2,08%
Totale	57,71%	3,24%	79,41%	9,70%

Tabella 32.c: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A3SH (pesante, leggero) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	PESANTE	LEGGERO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	-	0,00	0,00
0,707 - 0,295	46,67	0,00	25,00
0,295-0,147	52,86	6,45	41,49
0,147-0,074	30,08	4,48	22,66
0,074-0,037	11,29	2,28	6,17
0,037 - 0,025	27,67	4,18	9,80
< 0,025	13,39	2,71	4,43
Totale	18,84	2,90	6,61

Tabella 32.d: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A4SH (pesante, leggero) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	PESANTE	LEGGERO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	100,00	0,00	0,00
0,707 - 0,295	80,29	16,67	44,44
0,295-0,147	80,82	5,68	42,68
0,147-0,074	73,86	6,25	21,81
0,074-0,037	81,43	6,03	10,73
0,037 - 0,025	71,98	9,85	10,39
< 0,025	58,09	4,15	4,86
Totale	73,77	5,28	8,34

Tabella 32.e: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A5SH (pesante, leggero) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	PESANTE	LEGGERO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	0,00	0,00	-
0,707 - 0,295	0,00	0,00	0,00
0,295-0,147	35,71	15,38	20,69
0,147-0,074	20,44	8,33	19,94
0,074-0,037	5,64	2,35	10,10
0,037 - 0,025	15,77	5,61	15,30
< 0,025	5,23	7,82	7,82
Totale	7,89	7,57	9,51

Tabella 32.f: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A6SH (pesante, leggero) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	PESANTE	LEGGERO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	36,17	-	0,00
0,707 - 0,295	36,84	0,00	0,00
0,295-0,147	20,25	0,00	20,00
0,147-0,074	20,51	6,25	11,30
0,074-0,037	7,49	1,84	2,82
0,037 - 0,025	20,94	7,74	9,54
< 0,025	4,80	3,59	3,56
Totale	10,56	3,89	4,45

Tabella 32.g: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A7SH (pesante, leggero) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	PESANTE	LEGGERO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	33,33	0,00	-
0,707 - 0,295	25,00	0,00	0,00
0,295-0,147	11,81	0,00	5,88
0,147-0,074	11,12	11,70	9,79
0,074-0,037	5,76	2,91	5,86
0,037 - 0,025	35,68	15,51	22,27
< 0,025	6,91	4,14	5,70
Totale	10,43	5,31	7,24

Tabella 32.h: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A8SH (pesante, leggero) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	PESANTE	LEGGERO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	-	-	0,00
0,707 - 0,295	0,00	0,00	0,00
0,295-0,147	17,02	0,00	8,33
0,147-0,074	18,75	16,67	26,34
0,074-0,037	7,62	4,49	3,39
0,037 - 0,025	39,63	15,12	19,30
< 0,025	7,29	4,47	3,87
Totale	12,22	5,18	5,96

Tabella 32.i: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A9SH (pesante, leggero) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	PESANTE	LEGGERO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	0,00
1,410 - 0,707	-	-	0,00
0,707 - 0,295	40,35	0,00	12,50
0,295-0,147	44,11	22,22	18,18
0,147-0,074	35,16	18,66	28,14
0,074-0,037	27,04	8,31	17,13
0,037 - 0,025	38,60	20,23	26,89
< 0,025	6,40	4,98	4,82
Totale	23,43	7,10	10,61

Tabella 32.l: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A10SH (pesante, leggero) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	PESANTE	LEGGERO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	-	-	-
0,707 - 0,295	34,78	0,00	0,00
0,295-0,147	40,73	0,00	25,00
0,147-0,074	38,13	18,89	33,33
0,074-0,037	23,15	8,36	15,76
0,037 - 0,025	39,70	14,54	24,06
< 0,025	6,15	3,66	5,24
Totale	25,60	5,18	11,18

Tabella 32.m: tenore di magnetico nelle singole classi granulometriche dei prodotti ottenuti dalla prova A11SH (pesante, leggero) rispetto all'alimentazione.

CLASSI GRANULOMETRICHE (mm)	TENORE DI MAGNETICO (%)		
	PESANTE	LEGGERO	ALIMENTAZIONE
> 1,410	-	-	-
1,410 - 0,707	-	-	33,33
0,707 - 0,295	29,41	0,00	29,17
0,295-0,147	44,08	0,00	36,22
0,147-0,074	42,61	35,97	38,41
0,074-0,037	38,28	8,96	15,71
0,037 - 0,025	46,92	23,62	25,90
< 0,025	19,85	4,11	4,66
Totale	40,88	7,46	13,22

Utilizzando i risultati delle prove e delle analisi sui prodotti separati sono state calcolate le rese ed i recuperi (tabella 33).

In particolare, nel caso della prova A3, l'alimentazione è stata molto diluita raggiungendo una diluizione pari a circa 90 g/litro di torbida a fronte di una portata molto bassa (pari a 0,2 l/min). Inoltre si sono regolati in posizione molto aperta le coppelle sagomate corrispondenti alle bocchette n. 6/7/9/10/11. Ciò ha consentito di ottenere un prodotto leggero piuttosto puro (2,9% di tenore in Fe) a fronte però di un prodotto pesante (concentrato magnetico) molto ricco di elementi non magnetici (solo il 18,8% circa di tenore in Fe magnetico). Al contrario per la prova A4 si è regolata una portata superiore, pari a 0,5 l/min, a fronte di una diluizione pari a circa 295 g/l, anche in questo caso si sono tenute aperte le bocchette n. 6/7/9/10/11, tuttavia in questo caso esse sono state regolate su una posizione molto più chiusa, che permettesse di prelevare solo la frazione più pesante (magnetico), permettendo quindi di ottenere un prodotto pesante (concentrato magnetico) con un tenore in Fe magnetico pari al 74% circa, a fronte tuttavia di un prodotto leggero caratterizzato dalla maggiore presenza di Fe (tenore pari al 5,2% circa). Risultati molto buoni si sono poi ottenuti nelle prove ASH9, ASH10 ed ASH11, per le quali si è utilizzato un magnete posto sopra la bocchetta di selezione n. 8. L'ultima prova ha dato risultati ottimi, pur

impiegando una diluizione notevolmente spinta con conseguente impiego di un grosso quantitativo d'acqua per il trattamento.

Tabella 33.a: Risultati della separazione idrogravimetrica con spirale Humphreys

	A3SH	A4SH
Contenuto di magnetico nella frazione pesante	28,6 g	70,1 g
Contenuto di magnetico nella frazione leggera	14,2 g	92,8 g
T _{M/P} (%)	18,84	73,77
T _{M/L} (%)	2,90	5,28
η _{Fe} nel pesante (%)	67	45,4
ρ _P (%)	23,6	5
ρ _L (%)	76,4	95

I risultati delle analisi chimiche degli elementi in tracce fatte sull'alimentazione, sul pesante e sul leggero dei Campioni A3SH e A4SH figurano in tabella 34.

Tabella 33.b: Risultati della separazione idrogravimetrica con spirale Humphreys

	A5SH	A6SH	A7SH	A8SH	A9SH	A10SH	A11SH
Contenuto di magnetico nella frazione pesante	13,5 g	15,2 g	9,1 g	7,0 g	102,8 g	79,4 g	16,4 g
Contenuto di magnetico nella frazione leggera	12 g	38,3 g	39,6 g	19,7 g	161,5 g	33,1 g	14,6 g
T _{M/P} (%)	7,89	10,56	10,43	12,22	23,43	25,60	40,88
T _{M/L} (%)	7,57	3,89	5,31	5,18	7,10	5,18	7,46
η _{Fe} nel pesante (%)	52,91	28,48	18,62	26,21	38,90	70,61	52,88
ρ _P (%)	51,88	12,79	10,44	13,09	16,17	32,71	17,00
ρ _L (%)	48,12	87,21	89,56	86,91	83,83	67,29	83,00

Tabella 34: risultati delle analisi chimiche elementi in tracce relativi alla prova A3SH ed A4SH ed all'alimentazione (analisi eseguite presso i laboratori della Facoltà di Scienze della Terra – Università di Torino)

	A3SH/leggero (ppm)	A3SH/pesante (ppm)	A4SH/leggero (ppm)	A4SH/pesante (ppm)
Cd	<2	<2	<2	<2
Co	6,5	6,5	6,4	22
Cr	26	88	46	47
Cu	36	98	66	630
Mn	330	480	390	1750
Ni	20	40	25	280
Pb	< 5	< 5	< 5	13
Zn	40	35	35	30
Fe	28000	59000	42000	280000

Le analisi confermano quanto già si poteva dedurre dai risultati delle separazioni magnetiche manuali condotte in laboratorio: si nota, infatti, nei due concentrati pesanti (ed in particolar modo nel caso della prova A4SH) un'elevata concentrazione di Fe associata ad un'elevata concentrazione di Cu, Mn e Ni.

CAPITOLO 5

SPERIMENTAZIONI PER POSSIBILI IMPIEGHI DEI FINI DI SEGAGIONE

Nell'ambito del progetto Interreg III A "Valorizzazione dei fanghi di segazione derivanti dalla lavorazione lapidea" (tra VCO e Canton Ticino), dopo aver eseguito diverse prove per la separazione contestuale della graniglia metallica, ci si è concentrati su due ambiti d'applicazione che si sono dimostrati essere quelli di più immediata attuazione e di più semplice gestione: il riutilizzo quale impermeabilizzante per discariche di inerti ed RSU e il riutilizzo quale costituente terreni vegetali per recuperi ambientali.

Per entrambe questi utilizzi, tuttavia, si deve pensare a monte ad un trattamento di separazione magnetica/separazione gravimetrica, al fine di recuperare la graniglia metallica e di liberare i fanghi da elementi potenzialmente inquinanti quali: Nichel, Cromo, Rame, Piombo, ecc.. spesso associati al Ferro costituente la graniglia.

5.1. L'utilizzo del fango di granito quale impermeabilizzante nelle discariche di rifiuti solidi urbani

Da fonti bibliografiche si sa che da prove sperimentali eseguite al Politecnico di Torino (FRISA MORANDINI & VERGA, 1990) è risultato che i fanghi possiedono buone capacità di autoimpermeabilizzazione; questa tendenza aumenta naturalmente con il grado di addensamento del fango, fino a raggiungere valori di permeabilità dell'ordine di 10^{-7} cm/s, per valori di umidità inferiori al 20%. Altre prove di laboratorio hanno inoltre stabilito che, con l'aggiunta di modeste quantità di bentonite (intorno al 2 - 3%), si riduce ulteriormente la conducibilità idraulica.

Risulta quindi che i fanghi di segazione possono essere utilizzati per l'impermeabilizzazione dei bacini di discarica: con cinque strati di 20 cm di spessore e con il 3% di bentonite la permeabilità può essere $< 10^{-9}$ cm/s. Alla fine dell'operazione si ottiene la creazione di un fondo dello spessore di circa un metro con una permeabilità inferiore ai 10^{-9} cm/sec. Questo modo di procedere permette di porre in assoluta sicurezza le discariche per fanghi provenienti dalla lavorazione di rocce ornamentali; tale sicurezza risulta infatti essere intrinseca, in quanto sfrutta, oltre alla capacità impermeabilizzante della miscela, anche l'elevata attività di scambio ionico delle argille bentonitiche, che sono in grado di assorbire, e quindi trattenere, grandi quantità di cationi metallici. Questa tipologia di realizzazione delle discariche garantirebbe, in conclusione, un'assoluta sicurezza ambientale consentendo inoltre di ottenere notevoli benefici economici; in tal modo, infatti, diventerebbero superflue le continue e costose analisi sui fanghi che, in ogni caso sulla base delle numerose determinazioni effettuate, sono fuori norma solo per pochi elementi, ben individuabili sulla base dell'esame dei cicli di lavorazione. Non si ritiene di poter consigliare l'uso di questi fanghi come materiale infrastrato nelle discariche di prima categoria sia per le scarse caratteristiche geotecniche, sia per insufficiente permeabilità, che non consentirebbe la realizzazione di un'iniziale maturazione aerobica dei rifiuti e il loro dilavamento per percolazione.

La realizzazione d'apposite discariche consortili per rifiuti solidi urbani o per inerti permetterebbe di ottenere impianti che pur essendo di minima incidenza economica, assicurerebbero un elevato standard di sicurezza.

E' da notare inoltre però che in una discarica per rifiuti solidi urbani potrebbero realizzarsi condizioni di ambiente acido, con la possibilità di una indesiderata mobilitazione degli elementi metallici pesanti; più auspicabile sarebbe quindi pensare ai fanghi quale componente dello strato di base di discariche di inerti,

o quale strato impermeabilizzante per le coperture delle discariche di RSU, in tal caso infatti l'eventuale percolato verrebbe trattenuto dallo strato impermeabile di base della discarica stessa.

5.1.1: Modellizzazione per l'utilizzo di fanghi di segazione del bacino estrattivo ossolano quale impermeabilizzazione per discarica

I dati bibliografici sulla conducibilità idraulica (k, m/s) dei fanghi di segazione sono stati ricavati dalla relazione "Ampliamento discariche Torriente (Pinerolo, Torino). Campo prova – Relazione finale" prodotta dallo Studio Golder Associates nell'Ottobre 2000.

Nell'ambito di tale studio sono state realizzate prove di permeabilità in laboratorio sia su campioni ricostruiti sia su campioni indisturbati sottoposti a compattazione in situ.

Le **prove di permeabilità in laboratorio su campioni ricostruiti** sono state eseguite in cella edometrica, con pressioni di consolidazione variabili tra 50 e 200 kPa. I campioni erano stati ricostruiti con peso di volume naturale dell'ordine di 19.7 kN/m³ ed umidità di circa 30%. Tali condizioni di densità sono state ritenute sufficientemente cautelative con riferimento alle possibili condizioni d'applicazione del materiale in situ. Le prove di permeabilità in cella edometrica hanno permesso di valutare i valori di k riportati in tabella 35.

Al fine di valutare la possibilità di ottenere in situ condizioni di addensamento comparabili con quelle raggiunte in laboratorio, essendo la permeabilità influenzata dalla condizioni di addensamento del materiale, è stato eseguito un campo prova.

Tabella 35: conducibilità idraulica relativa a prove di permeabilità

Pressione di consolidazione su campioni (kPa)	Conducibilità idraulica k (cm/s)
50	3.06*10 ⁻⁷
100	2.59*10 ⁻⁷
200	2.41*10 ⁻⁷
Campioni relativi al campo prova	Conducibilità idraulica k (cm/s)
Campione 1	4.81*10 ⁻⁷
Campione 2	2.58*10 ⁻⁷

5.1.1.a. Normativa in materia di discariche

La normativa in materia di discariche a cui si è fatto riferimento per la presente Attività di Ricerca è il Decreto Legislativo 13 gennaio 2003, n. 36: Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti.

Nell'Allegato 1 (Criteri costruttivi e gestionali degli impianti di discarica) di tale Decreto vengono differenziati i criteri costruttivi per gli impianti di discarica per rifiuti inerti, e per rifiuti non pericolosi e pericolosi.

Impianti di discarica per rifiuti inerti

Al fine di assicurare la protezione del suolo, delle acque freatiche e delle acque superficiali, gli impianti di discarica per rifiuti inerti devono essere realizzati mediante la combinazione di una barriera geologica e di un eventuale rivestimento della parte inferiore durante la fase di esercizio e mediante l'aggiunta a chiusura della discarica di una copertura della parte superiore durante la fase postoperativa.

La barriera geologica è determinata da condizioni geologiche e idrogeologiche al di sotto e in prossimità della discarica tali da assicurare una capacità di attenuazione sufficiente per evitare rischi per il suolo e le acque superficiali e sotterranee. Il substrato della base e dei lati della discarica deve consistere in una formazione geologica naturale che risponda a requisiti di permeabilità e spessore almeno equivalente a quello risultante dai seguenti criteri:

- conducibilità idraulica $k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s;
- spessore ≥ 1 m.

Le caratteristiche di permeabilità della barriera geologica naturale devono essere accertate mediante apposita indagine in sito.

La barriera messa in opera artificialmente deve avere uno spessore non inferiore a 0,5 metri.

La copertura superficiale finale della discarica deve rispondere ai seguenti criteri:

- isolamento dei rifiuti dall'ambiente esterno;
- minimizzazione delle infiltrazioni d'acqua;
- riduzione al minimo della necessità di manutenzione;
- minimizzazione dei fenomeni di erosione;
- resistenza agli assestamenti ed a fenomeni di subsidenza localizzata.

La copertura deve essere realizzata mediante una struttura multistrato costituita, dall'alto verso il basso, almeno dai seguenti strati:

1. strato superficiale di copertura con spessore ≥ 1 m che favorisca lo sviluppo delle specie vegetali di copertura ai fini del piano di ripristino ambientale e fornisca una protezione adeguata contro l'erosione e consenta di proteggere le barriere sottostanti dalle escursioni termiche;
2. strato drenante con spessore ≥ 0.5 m in grado di impedire la formazione di un battente idraulico sopra le barriere di cui ai successivi punti 3) e 4);
3. strato minerale superiore compattato di spessore ≥ 0.5 m e di bassa conducibilità idraulica;
4. strato di regolarizzazione per la corretta messa in opera degli elementi superiori e costituito da materiale drenante.

In relazione alle condizioni meteorologiche devono essere prese misure adeguate per:

- limitare la quantità di acqua di origine meteorica che penetra nel corpo della discarica;
- impedire che le acque superficiali e sotterranee entrino nel corpo della discarica.

Deve essere inoltre previsto, ove ritenuto necessario dall'autorità competente, un sistema di raccolta delle acque di percolazione. La gestione di detto sistema deve minimizzare il battente idraulico di percolato sul fondo della discarica al minimo compatibile con i sistemi di sollevamento e di estrazione. Il percolato raccolto deve essere avviato ad idoneo impianto di trattamento al fine di garantirne lo scarico nel rispetto dei limiti previsti dalla normativa vigente in materia.

5.1.1.b. Modellizzazione del flusso di percolato mediante codice di calcolo

Per la modellizzazione della produzione del flusso di percolato è stato utilizzato il codice di calcolo Visual HELP (LASAGNA, 2005).

La modellizzazione è stata eseguita ipotizzando la costruzione di una discarica in tre località piemontesi (Figura 19), ubicate in tre Province e differenti per condizioni termo-pluviometriche e di radiazione solare: Domodossola (VB), Pinerolo (TO) e Vercelli (VC).

Il modello ricostruito ha inoltre simulato differenti profili della discarica. In particolare è stato ipotizzato un corpo rifiuti potente 20 m e costituito da materiale ghiaioso e da materiale sabbioso grossolano.

La conducibilità idraulica attribuita ai fanghi di segazione che costituiscono la barriera geologica e la copertura della discarica, sulla base della relazione dello Studio Golder Associates, è stata considerata pari a $3.7 \cdot 10^{-9}$ m/s. Tale valore è compatibile con la conducibilità idraulica della barriera geologica richiesta dal Decreto Legislativo 13 gennaio 2003, n. 36 per quanto concerne gli impianti di discarica per rifiuti inerti ($k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s).

La simulazione di un corpo rifiuti costituito da RSU non è stata condotta in quanto le caratteristiche di conducibilità idraulica dei fanghi di segazione non sono compatibili con tale tipologia di discarica. In effetti il Decreto Legislativo 13 gennaio 2003, n. 36 prevede, per gli impianti di discarica per rifiuti non pericolosi e per rifiuti pericolosi, una barriera geologica con conducibilità idraulica inferiore o uguale a 10^{-9} m/s.

Lo spessore dei fanghi di segazione, che costituiscono l'impermeabilizzazione di base della discarica, è stato fatto variare da 0.5 m e 1 m, in accordo con i criteri costruttivi per gli impianti di discarica per rifiuti inerti del Decreto Legislativo 13 gennaio 2003, n. 36.

Lo strato minerale compattato che costituisce la copertura a bassa permeabilità della discarica è stato modellizzato con uno spessore pari a 0.5 m e costituito da fanghi di segazione.

La simulazione della produzione di percolato e del flusso dello stesso attraverso la barriera impermeabile costituita dai fanghi di segagione è stata condotta simulando un periodo di 10 anni.

In figura 20 è riportato un generico profilo di discarica, con indicazione degli strati simulati.

In dettaglio, la copertura superficiale della discarica è stata modellizzata sulla base dei requisiti richiesti dal Decreto Legislativo 13 gennaio 2003, n. 36 ed è rappresentata da una struttura multistrato, costituita dall'alto verso il basso da:

- uno strato superficiale di copertura con spessore pari a 1 m che favorisca lo sviluppo delle specie vegetali di copertura ai fini del piano di ripristino ambientale, fornisca una protezione adeguata contro l'erosione e consenta di proteggere le barriere sottostanti dalle escursioni termiche;
- uno strato drenante con spessore pari a 0.5 m in grado di impedire la formazione di un battente idraulico sopra le barriere rappresentata dai due strati sottostanti;
- uno strato minerale superiore compattato di spessore pari a 0.5 m, costituito da fanghi di segagione;
- uno strato di regolarizzazione per la corretta messa in opera degli elementi superiori.

Lo strato superficiale di copertura è stato simulato con un'inclinazione di 8°, in modo da facilitare il ruscellamento delle acque al di sopra del corpo della discarica.

La simulazione del flusso di percolato attraverso lo stato d'impermeabilizzazione di base è stata eseguita considerando nulle le estrazioni di percolato.

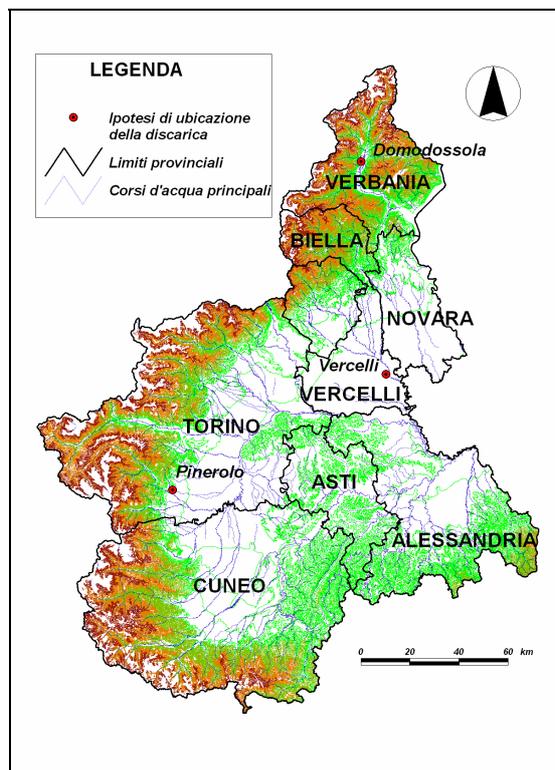


Figura 19: ubicazione della discarica modellizzata mediante codice di calcolo.

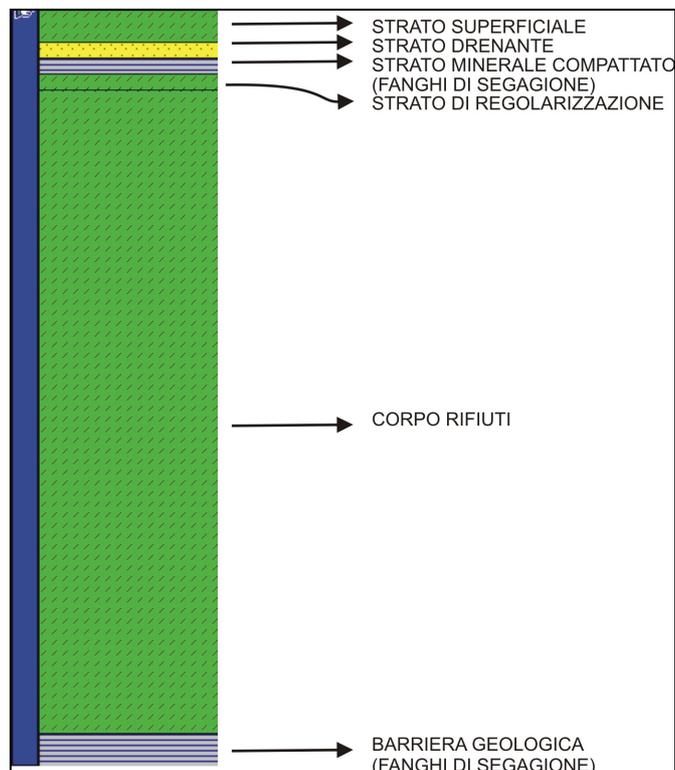


Figura 20: schematizzazione del profilo simulato della discarica.

5.1.1.c. Simulazione della discarica in località Domodossola (VB)

La simulazione della produzione di percolato e del flusso dello stesso attraverso la barriera geologica costituita dai fanghi di segagione è stata condotta in prima istanza ipotizzando la costruzione della discarica nel Comune di Domodossola.

La modellizzazione ha quindi richiesto l'approfondimento dei dati termo-pluviometrici e di radiazione solare di tale area, al fine di valutare, sulla base delle precipitazioni presenti e del tasso di evapotraspirazione, le possibili infiltrazioni di acqua attraverso la copertura superficiale e all'interno del corpo rifiuti.

I dati di precipitazione e temperatura utilizzati nel modello e riportati in figura 21 e figura 22 sono stati tratti da BELLARDONE *et alii* (1998).

La precipitazione media annuale a Domodossola, sulla base dei valori di precipitazione medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986) è pari a 1388.5 mm.

La temperatura media annuale a Domodossola, sulla base dei valori di precipitazione medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986) è pari a 12 °C.

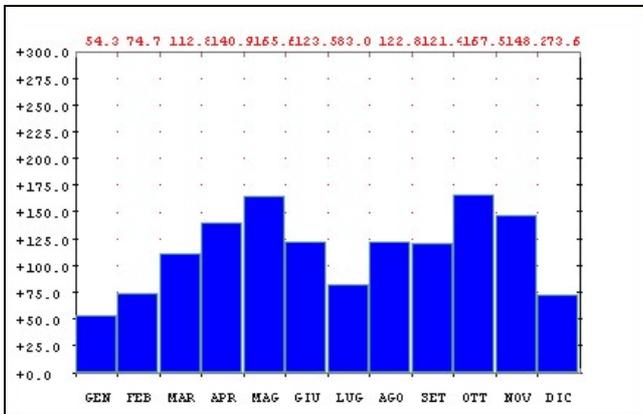


Figura 21: grafico pluviometrico, località Domodossola. In ordinata sono indicati i mm di precipitazione; in alto sono indicati i valori di precipitazione medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986 (da BELLARDONE *et alii*, 1998).

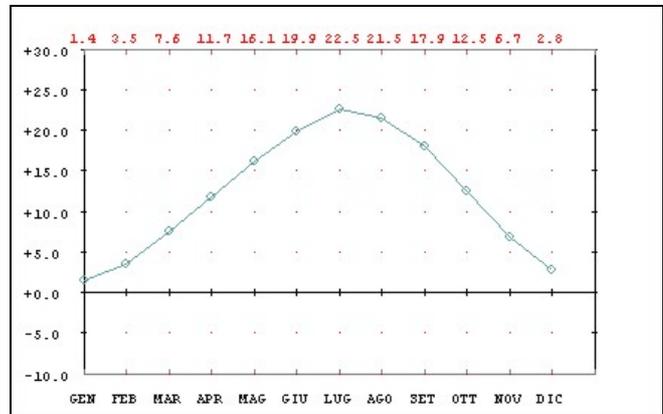


Figura 22: grafico delle temperature, località Domodossola. In ordinata sono indicati le temperature in °C; in alto sono indicati i valori di temperatura medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986 (da BELLARDONE *et alii*, 1998).

In tale contesto termo-pluviometrico è stata eseguita la modellizzazione di quattro differenti situazioni, indicate in tabella 36.

Le situazioni analizzate, denominate Caso Domodossola 1, Caso Domodossola 2, Caso Domodossola 3 e Caso Domodossola 4, differiscono essenzialmente per la composizione del corpo rifiuti (ghiaie o sabbie grossolane) e lo spessore della barriera geologica costituita dai fanghi di segagione (0.5 m o 1 m).

Tabella 36: situazioni analizzate e caratteristiche degli strati per la modellizzazione della discarica in Comune di Domodossola.

		CASO DOMODOSSOLA 1	CASO DOMODOSSOLA 2	CASO DOMODOSSOLA 3	CASO DOMODOSSOLA 4
strato superficiale	spessore (m)	1	1	1	1
	granulometria	Sabbia argillosa con limo			
strato drenante	spessore (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
	granulometria	ghiaie	ghiaie	ghiaie	ghiaie
strato minerale (fanghi di segagione)	spessore (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
strato di regolarizzazione	spessore (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
	granulometria	Sabbia limoso-argillosa	Sabbia limoso-argillosa	Sabbia limoso-argillosa	Sabbia limoso-argillosa
corpo rifiuti	spessore (m)	20	20	20	20
	granulometria	ghiaie	ghiaie	Sabbie grossolane	Sabbie grossolane
barriera geologica (fanghi di segagione)	spessore (m)	1	0.5	1	0.5

Risultati

La modellizzazione di una discarica ubicata a Domodossola e costruita secondo la struttura multistrato descritta in Tabella 36 ha permesso di valutare, per ciascuno dei quattro casi presi in esame, il tasso di percolazione in metri attraverso la barriera geologica di base sia annuale, per un periodo di analisi di 10 anni, sia accumulata per lo stesso intervallo di tempo, in assenza di estrazione di percolato.

In particolare, è emerso che:

- Caso Domodossola 1: il corpo rifiuti è costituito da ghiaie; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 1 m di fanghi di segagione è inferiore a pari a 0.4 m, con l'eccezione dei primi 2 anni simulati, in cui la percolazione è nettamente inferiore; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 3.4 m (Figura 23);
- Caso Domodossola 2: il corpo rifiuti è costituito da ghiaie; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 0.5 m di fanghi di segagione è inferiore a pari a 0.4 m, con l'eccezione dei primi 2 anni simulati, in cui la percolazione è nettamente inferiore; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è circa a 3.5 m (Figura 24);
- Caso Domodossola 3: il corpo rifiuti è costituito da sabbie grossolane; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 1 m di fanghi di segagione è inferiore a pari a 0.4 m, con l'eccezione dei primi 4 anni simulati, in cui la percolazione è nettamente inferiore; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 2.7 m (Figura 25);
- Caso Domodossola 4: il corpo rifiuti è costituito da sabbie grossolane; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 0.5 m di fanghi di segagione è inferiore a pari a 0.4 m, con l'eccezione dei primi 4 anni simulati, in cui la percolazione è nettamente inferiore; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è circa 2.8 m (Figura 26).

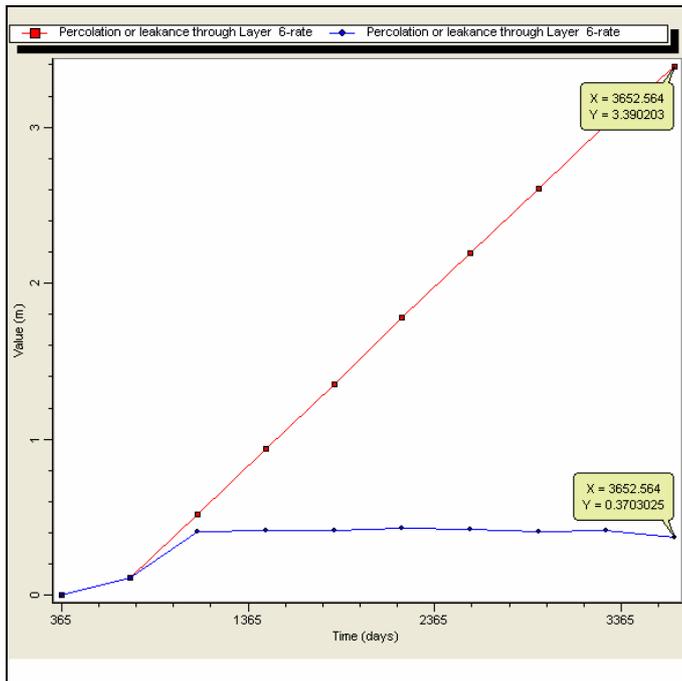


Figura 23: caso Domodossola 1; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

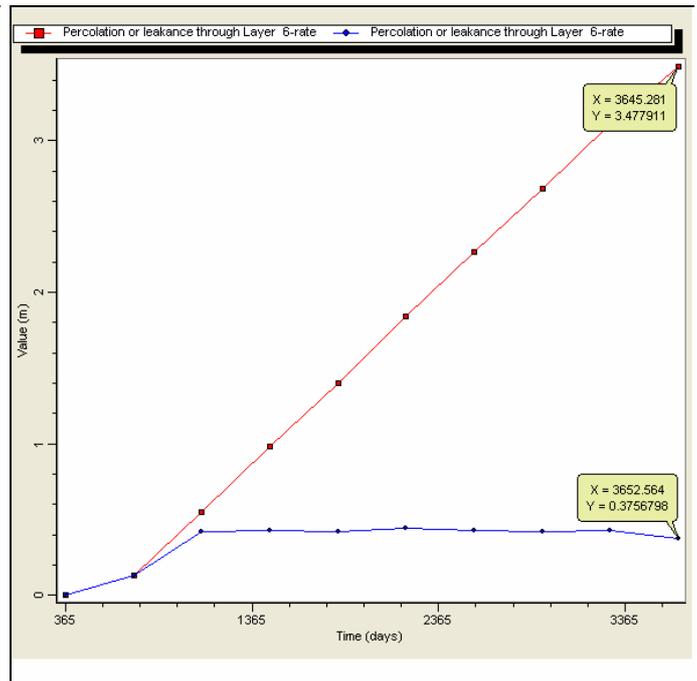


Figura 24: caso Domodossola 2; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

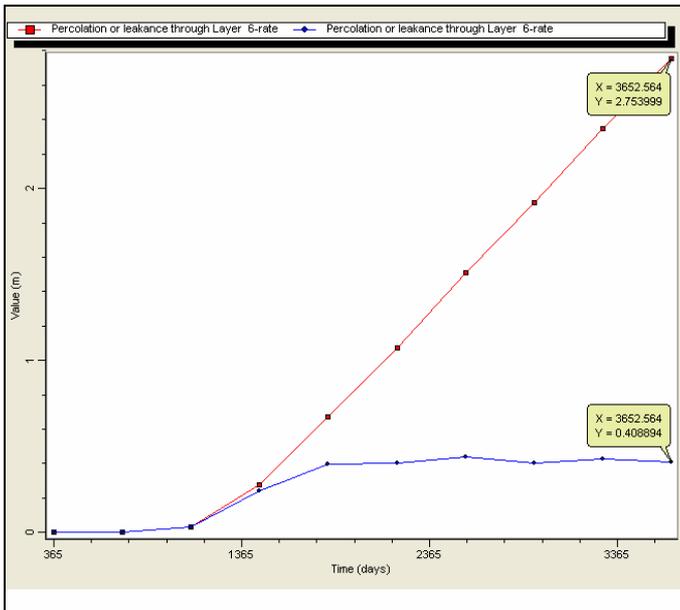


Figura 25: caso Domodossola 3; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

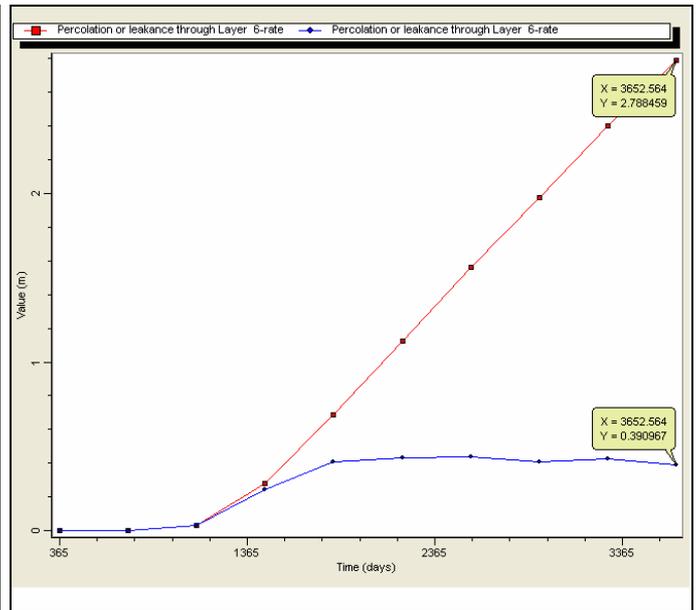


Figura 26: caso Domodossola 4; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

5.1.1.d. Simulazione di una discarica in altre località piemontesi

Al fine di esaminare il possibile utilizzo dei fanghi di segagione come barriera geologica e copertura per discariche in altre realtà territoriali piemontesi, si è condotta una modellizzazione della produzione di percolato e del flusso dello stesso attraverso la barriera geologica di base, costituita dai fanghi di segagione, a Pinerolo, in Provincia di Torino, e a Vercelli. Le simulazioni sono state condotte considerando nulla l'estrazione di percolato.

Simulazione della discarica in località Pinerolo (TO)

Di seguito vengono riportate le caratteristiche termo-pluviometriche relative al territorio di Pinerolo (TO) necessarie per valutare, sulla base delle precipitazioni presenti e del tasso di evapotraspirazione, il tasso di infiltrazione attraverso la copertura superficiale e all'interno del corpo rifiuti.

I dati di precipitazione e temperatura media annuale a Pinerolo (Figura 27 e Figura 28) utilizzati nel modello sono stati tratti da Bellardone *et alii* (1998).

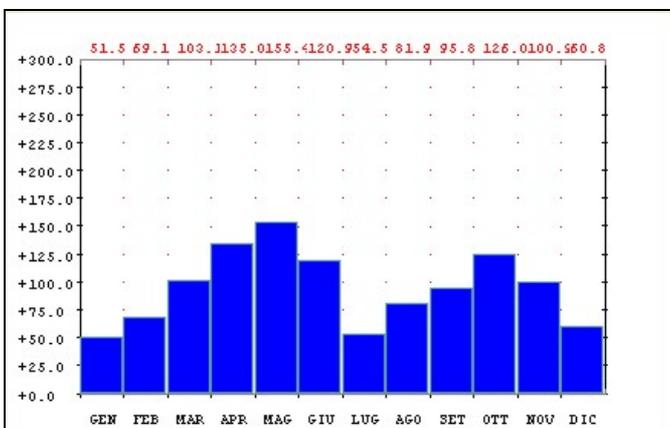


Figura 27: grafico pluviometrico, località Pinerolo (TO). In ordinata sono indicati i mm di precipitazione; in alto sono indicati i valori di precipitazione medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986 (da BELLARDONE *et alii*, 1998).

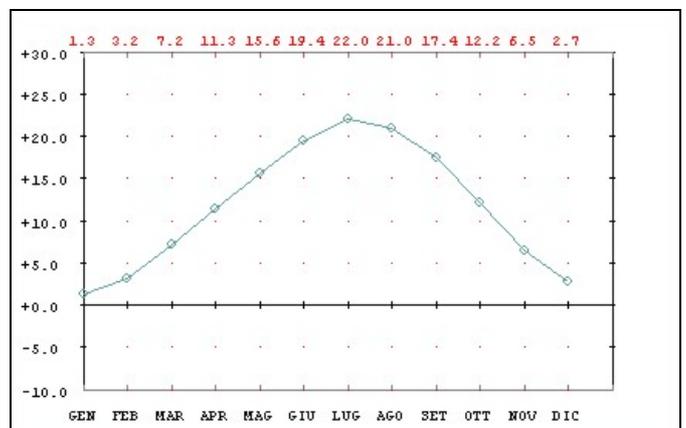


Figura 28: grafico delle temperature, località Pinerolo (TO). In ordinata sono indicati le temperature in °C; in alto sono indicati i valori di temperatura medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986 (da BELLARDONE *et alii*, 1998).

La precipitazione media annuale a Pinerolo, sulla base dei valori di precipitazione medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986) è pari a 1154.9 mm.

La temperatura media annuale a Pinerolo, sulla base dei valori di precipitazione medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986) è pari a 11.6 °C.

In tale contesto termo-pluviometrico è stata eseguita la modellizzazione di quattro differenti situazioni, esplicitate in tabella 37.

I contesti studiati, denominati Caso Pinerolo 1, Caso Pinerolo 2, Caso Pinerolo 3 e Caso Pinerolo 4, differiscono per la composizione del corpo rifiuti (ghiaie o sabbie grossolane) e lo spessore della barriera geologica costituita dai fanghi di segagione (0.5 m o 1 m).

Tabella 37: situazioni analizzate e caratteristiche degli strati per la modellizzazione della discarica in Comune di Pinerolo (TO).

		CASO PINEROLO 1	CASO PINEROLO 2	CASO PINEROLO 3	CASO PINEROLO 4
strato superficiale	spessore (m)	1	1	1	1
	granulometria	Sabbia argillosa con limo			
strato drenante	spessore (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
	granulometria	ghiaie	ghiaie	ghiaie	ghiaie
strato minerale (fanghi di segagione)	spessore (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
strato di regolarizzazione	spessore (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
	granulometria	Sabbia limoso-argillosa	Sabbia limoso-argillosa	Sabbia limoso-argillosa	Sabbia limoso-argillosa
corpo rifiuti	spessore (m)	20	20	20	20
	granulometria	ghiaie	ghiaie	sabbie grossolane	sabbie grossolane
barriera geologica (fanghi di segagione)	spessore (m)	1	0.5	1	0.5

Risultati

La simulazione mediante codice di calcolo della produzione di percolato e del flusso dello stesso attraverso la barriera geologica costituita dai fanghi di segagione nella discarica modellizzata in località Pinerolo ha condotto ai seguenti risultati:

- Caso Pinerolo 1: il corpo rifiuti è costituito da ghiaie; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 1 m di fanghi di segagione è di poco superiore a 0.10 m, con l'eccezione dei primi 5 anni simulati, in cui la percolazione è nettamente inferiore e circa pari a 0 m nei primi 4 anni; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 0.7 m (figura 29);
- Caso Pinerolo 2: il corpo rifiuti è costituito da ghiaie; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 0.5 m di fanghi di segagione è di circa 0.15 m, con l'eccezione dei primi 5 anni simulati, in cui la percolazione è nettamente inferiore, e circa pari a 0 m nei primi 4 anni; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 0.75 m (figura 30);
- Caso Pinerolo 3: il corpo rifiuti è costituito da sabbie grossolane; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 1 m di fanghi di segagione è di 0.10 m il nono e il decimo anno; negli anni precedenti la percolazione è pressoché pari a 0 m; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 0.2 m (figura 31);
- Caso Pinerolo 4: il corpo rifiuti è costituito da sabbie grossolane; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 0.5 m di fanghi di segagione è di 0.10 m il nono e il decimo anno; negli anni precedenti la percolazione è pressoché pari a 0 m; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 0.2 m (figura 32).

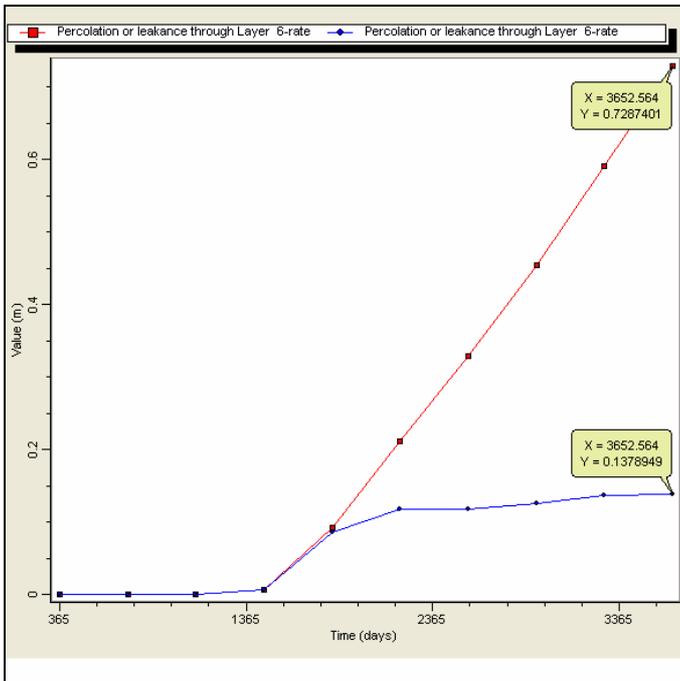


Figura 29: caso Pinerolo 1; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

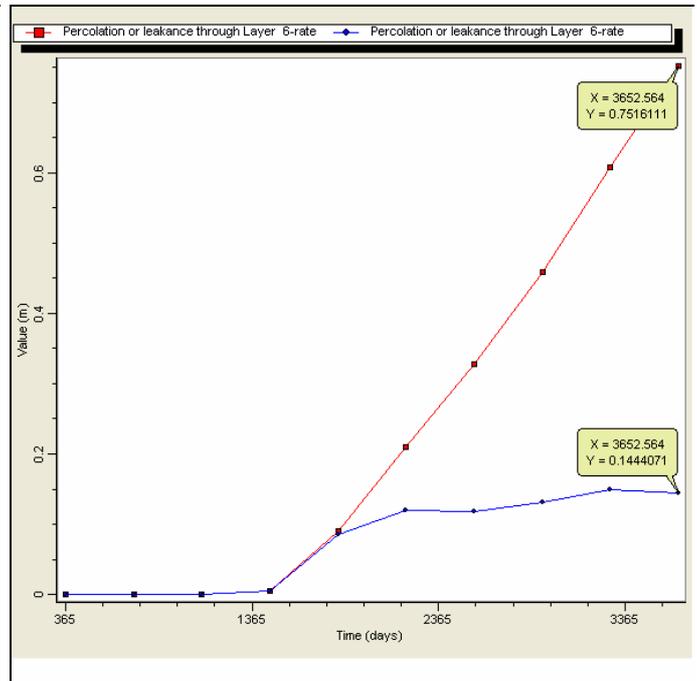


Figura 30: caso Pinerolo 2; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

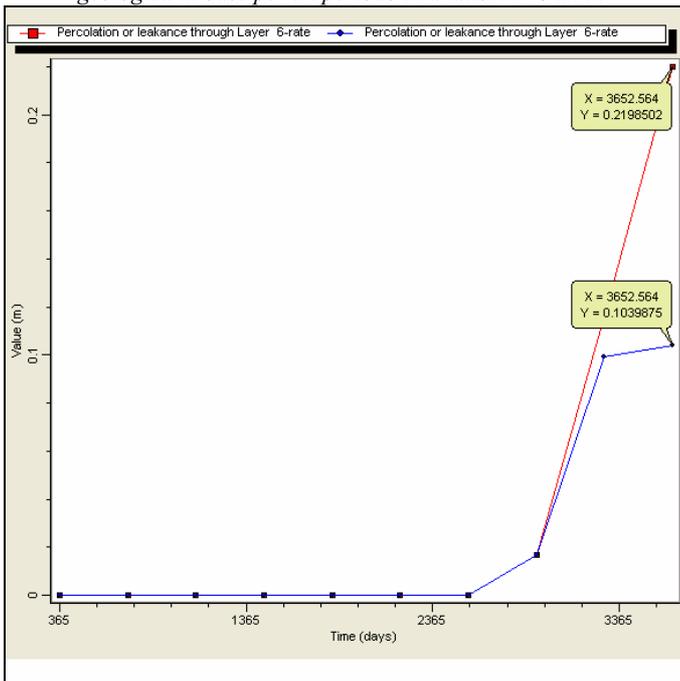


Figura 31: caso Pinerolo 3; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

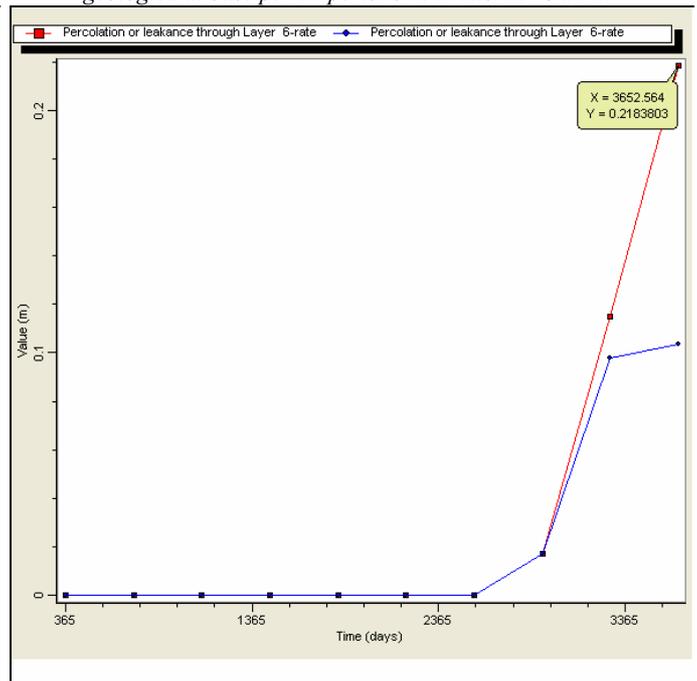


Figura 32: caso Pinerolo 4; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

Simulazione della discarica in località Vercelli (VC)

La simulazione di una discarica ubicata in Comune di Vercelli ha permesso di valutare, come per i modelli precedentemente illustrati, la quantità di percolato che potrebbe attraversare la barriera geologica, costituita da fanghi di segagione, su un periodo modellizzato di 10 anni.

I dati termo-pluviometrici relative al territorio di Vercelli (VC), tratti da Bellardone *et alii* (1998), sono di seguito riportati (figura 33 e figura 34).

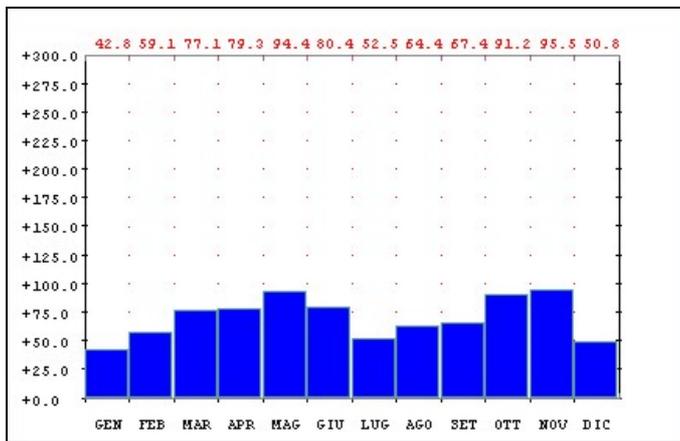


Figura 33: grafico pluviometrico, località Vercelli (VC); in ordinata sono indicati i mm di precipitazione. In alto sono indicati i valori di precipitazione medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986 (da BELLARDONE et alii, 1998).

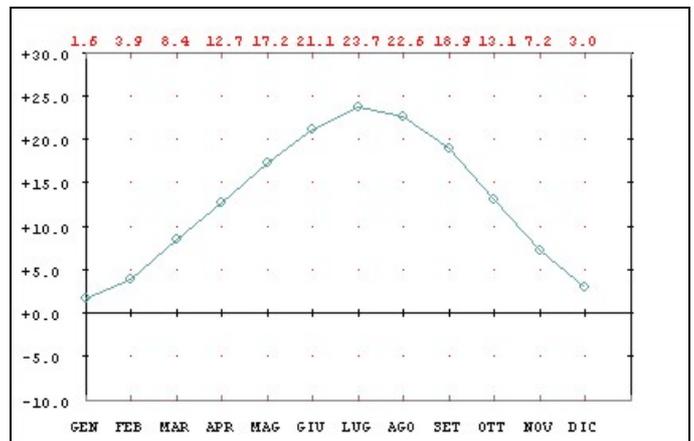


Figura 34: grafico delle temperature, località Vercelli (VC); in ordinata sono indicati le temperature in °C. In alto sono indicati i valori di temperatura medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986 (da BELLARDONE et alii, 1998).

La precipitazione media annuale a Vercelli, sulla base dei valori di precipitazione medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986) è pari a 854.9 mm.

La temperatura media annuale a Vercelli, sulla base dei valori di precipitazione medi mensili (dati climatici medi disponibili relativi al periodo 1951-1986) è pari a 12.8 °C.

In tale contesto termo-pluviometrico è stata eseguita la modellizzazione di quattro differenti situazioni, denominate per la simulazione Caso Vercelli 1, Caso Vercelli 2, Caso Vercelli 3 e Caso Vercelli 4, e descritte in tabella 38.

Tabella 38: situazioni analizzate e caratteristiche degli strati per la modellizzazione della discarica in Comune di Vercelli (VC).

		CASO VERCELLI 1	CASO VERCELLI 2	CASO VERCELLI 3	CASO VERCELLI 4
strato superficiale	spessore (m)	1	1	1	1
	granulometria	Sabbia argillosa con limo			
strato drenante	spessore (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
	granulometria	ghiaie	ghiaie	ghiaie	ghiaie
strato minerale (fanghi di segagione)	spessore (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
strato di regolarizzazione	spessore (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
	granulometria	Sabbia limoso-argillosa	Sabbia limoso-argillosa	Sabbia limoso-argillosa	Sabbia limoso-argillosa
corpo rifiuti	spessore (m)	20	20	20	20
	granulometria	ghiaie	ghiaie	sabbie grossolane	sabbie grossolane
barriera geologica (fanghi di segagione)	spessore (m)	1	0.5	1	0.5

Le quattro simulazioni differiscono per la composizione del corpo rifiuti (ghiaie o sabbie grossolane) e lo spessore della barriera geologica costituita dai fanghi di segagione (0.5 m o 1 m).

Risultati

La simulazione eseguita per la valutazione della produzione di percolato e del flusso dello stesso attraverso la barriera geologica costituita dai fanghi di segagione nella discarica modellizzata in località Vercelli ha condotto ai seguenti risultati:

- Caso Vercelli 1: il corpo rifiuti è costituito da ghiaie; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 1 m di fanghi di segagione è di circa 0.14 m, con l'eccezione dei primi 4 anni simulati, in cui la percolazione è circa pari a 0 m; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 0.73 m (figura 35);

- Caso Vercelli 2: il corpo rifiuti è costituito da ghiaie; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 0.5 m di fanghi di segagione è di circa 0.14 m, con l'eccezione dei primi 4 anni simulati, in cui la percolazione è circa pari a 0 m; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 0.76 m (figura 36);
- Caso Vercelli 3: il corpo rifiuti è costituito da sabbie grossolane; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 1 m di fanghi di segagione è di 0.10 m per quanto concerne il nono e il decimo anno; negli anni precedenti la percolazione è pressoché pari a 0 m; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 0.2 m (figura 37);
- Caso Vercelli 4: il corpo rifiuti è costituito da sabbie grossolane; il tasso di percolazione annuale (metri) attraverso la barriera geologica costituita da 0.5 m di fanghi di segagione è di 0.10 m per quanto concerne il nono e il decimo anno; negli anni precedenti la percolazione è pressoché pari a 0 m; il tasso di percolazione cumulato su 10 anni è pari a 0.2 m (figura 38).

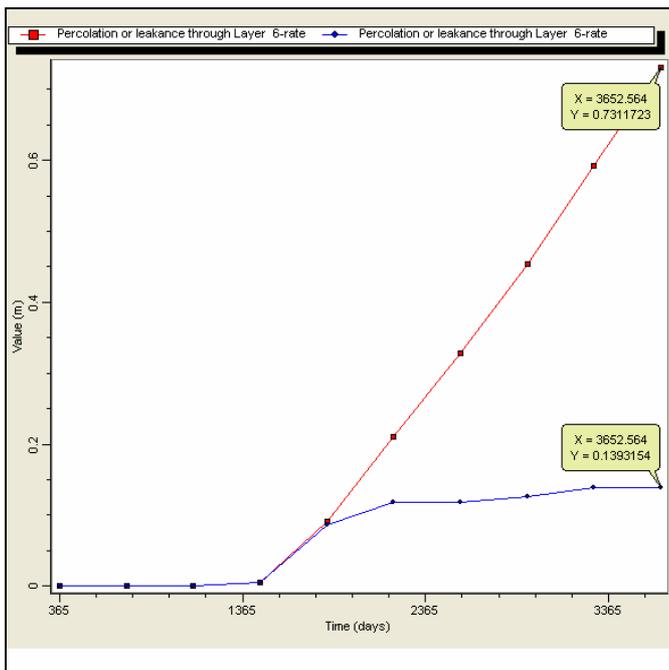


Figura 35: caso Vercelli 1; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

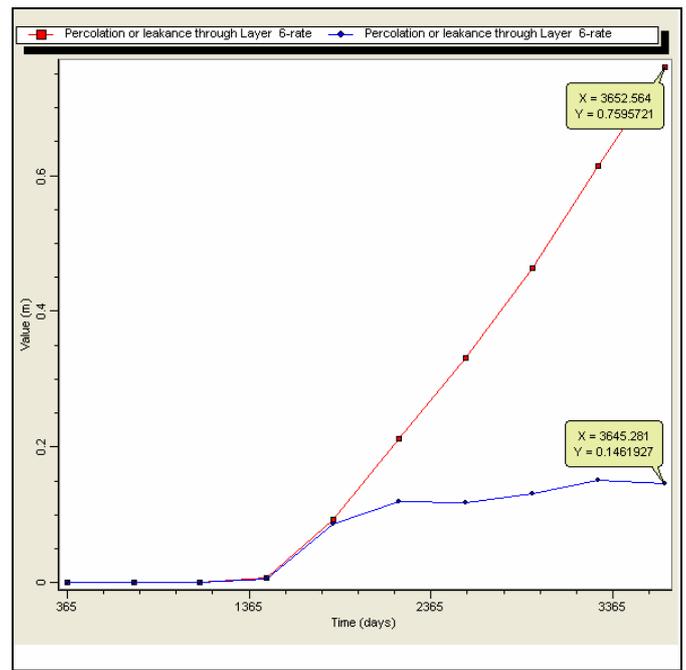


Figura 36: caso Vercelli 2; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

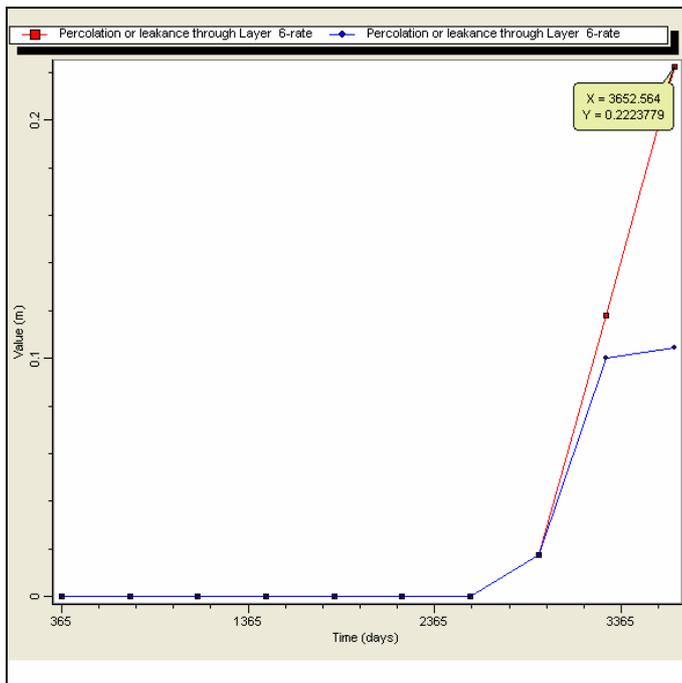


Figura 37: caso Vercelli 3; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

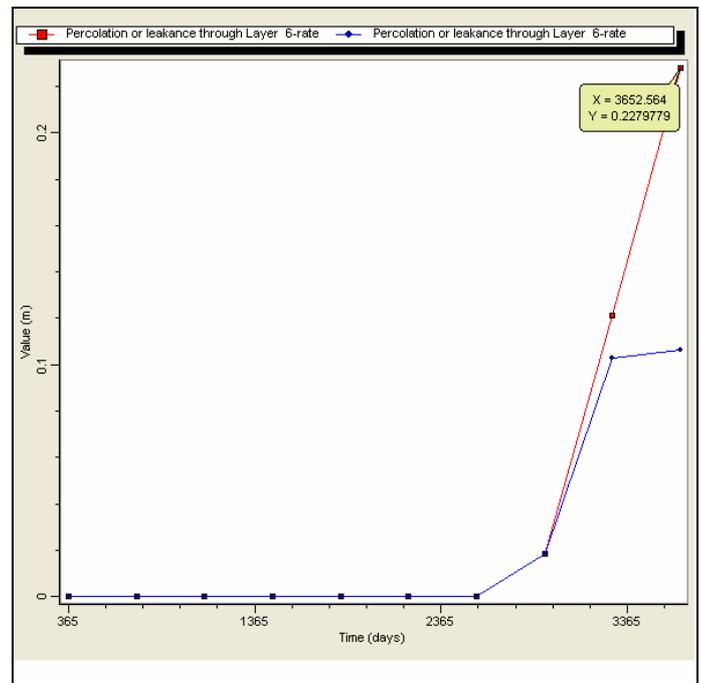


Figura 38: caso Vercelli 4; la linea rossa rappresenta il tasso di percolazione cumulato in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni; la linea blu rappresenta il tasso di percolazione annuale in metri attraverso la barriera geologica di base per un periodo di analisi di 10 anni.

5.1.2 Sperimentazione progressa presso impianti ACEA di Pinerolo

Nel bacino della Pietra di Luserna, ad esempio, in passato i fanghi di segagione locali sono stati impiegati per la ricopertura di una discarica di RSU al fine di una sopraelevazione; tale sperimentazione ha dato buoni risultati a distanza di 4 anni.

In particolare sono state utilizzate diverse tonnellate di materiale quale materiale di copertura di una discarica di RSU, presso gli impianti della soc. ACEA di Pinerolo. Il materiale utilizzato possedeva le seguenti caratteristiche:

- contenuto di argilla > 10%;
- passante al setaccio 200 ASTM: superiore all'85%;
- caratteristiche granulometriche praticamente costanti nel tempo;
- massa volumica: 1.8-2 t/m³;
- umidità media: 30%;
- permeabilità k: 2.4-3*10⁻⁷ cm/s¹;
- limite liquido: 26,1%;
- indice di plasticità: 2,1%;
- contenuto di ghiaia: 0%;
- contenuto di carbonati: n.d. (praticamente assente in relazione alla natura dei materiali di origine del fango);
- il materiale risulta lavorabile al fine di ottenere in sito condizioni di addensamento compatibili con quanto ottenuto in laboratorio;

Le condizioni in cui è stato realizzato il campo prova non sono state ottimali in quanto il rullo utilizzato era liscio e leggero (4 t contro le 10 t di regola richieste). Le condizioni del sottofondo inoltre erano le peggiori prevedibili per il campo di applicazione del materiale (rifiuti praticamente "freschi", con copertura di terreno molto limitata). Le condizioni di umidità erano infine tali per cui il materiale si presentava più umido del necessario. Nonostante questi problemi la lavorabilità del materiale è risultata ottimale, consentendo il raggiungimento di coefficienti di compattazione superiori a quelli limite imposti dalle specifiche (90% della densità ottimale da prova Proctor standard), con un numero di passate ottimali dell'ordine di 8.

¹ Tali valori di permeabilità sono adeguati all'utilizzo del materiale come sottofondo impermeabilizzante.

I campioni indisturbati, prelevati con un campionatore Shelby, hanno consentito di determinare in laboratorio valori di permeabilità dell'ordine di $2.6-4.8 * 10^{-7}$ cm/s, inferiori ai valori richiesti per il materiale di impermeabilizzazione di fondo di nuovi settori di discarica ($k \leq 1 * 10^{-6}$ cm/s). I buoni livelli di permeabilità raggiunti sono principalmente dovuti all'elevata percentuale di materiale fine (85% < 200 ASTM), mentre la buona lavorabilità deriva dal fatto che il materiale risulta essere poco plastico.

I risultati ottenuti in campo prova consentono di utilizzare il materiale in esame non solo per lo strato di fondo, ma anche per la realizzazione della copertura finale a bassa permeabilità delle discariche (spessore complessivo 60 cm).

5.1.3 Possibilità di sinergie tra gruppo ACEA di Pinerolo e Cavatori VCO, nell'ambito del progetto Interreg IIIA

Nell'ambito del presente progetto Interreg IIIA, sono stati presi accordi con la stessa società ACEA di Pinerolo per la fornitura di circa 20.000 m³ di fanghi provenienti dalla Val d'Ossola per un'arginatura ed una conseguente sopraelevazione di una parte della discarica di RSU. I fanghi ossolani verrebbero impiegati per un lavoro di sopraelevazione di un lotto della discarica, ed in particolare per le arginature laterali.

I volumi totali di materiale (argilla e fanghi) da impiegare per la realizzazione di tali arginature sono pari a 60.000 m³: si richiederebbe quindi un quantitativo di fanghi ossolani pari a 20.000 m³ (è ipotizzabile tuttavia anche l'impiego di un quantitativo inferiore). Questa richiesta è al momento rimasta in sospeso e si aspetta di definire la reale possibilità di poter realizzare tale sinergia.

Nel caso in cui decidesse di proseguire in tale direzione, andrebbe presa in considerazione la necessità di eseguire alcune prove di caratterizzazione quali:

- a. Prove in laboratorio: granulometria, limiti di Atterberg, contenuto d'acqua, peso di volume naturale, peso di volume secco, peso di volume saturo, peso specifico dei grani, porosità, indice dei pori, grado di saturazione, test di cessione;
- b. Prove in situ: densità in situ con il metodo della sabbia calibrata (ASTM D1556), curva densità – contenuto di acqua secondo il metodo Proctor Standard (ASTM D698), prova su piastra.

Prima di procedere allo spandimento del materiale si dovranno comunque eseguire accertamenti circa le caratteristiche dello stesso presso un campo prova. Scopo del campo prova è quello di determinare il grado di compattazione raggiungibile in situ e le condizioni operative di posa del materiale limoso. La prova consta di:

- stesura del materiale limoso-argilloso: il materiale dovrà essere steso con macchine a lama e sgrumato con aratri a dischi rotanti. La dimensione massima ammessa per le zolle è di 100 mm. Lo spessore complessivo degli strati compattati non dovrà essere inferiore a 0.6 m; ogni singolo strato steso dovrà essere uniforme ed avere spessore non superiore a 20 cm (per un totale di 60 cm);
- compattazione: le operazioni di compattazione dovranno essere eseguite utilizzando un rullo statico a "piede di pecora" con peso non inferiore a 10 t. la pressione di contatto al piede dovrà essere compreso tra 20-30 kg/cm². Lo spessore dei singoli strati dovrà essere 200 mm, ed il numero minimo di passate è pari a 5;
- controllo del materiale compattato: il grado di compattazione dovrà essere superiore al 90% del valore ottimale risultante da prova Proctor Standard. L'umidità dei campioni prelevati in cantiere dovrà avere uno scarto non superiore al 5% rispetto a quella determinata sul materiale con la prova Proctor Standard. Periodicamente saranno eseguiti controlli sulla densità (metodo del cono di sabbia) e della permeabilità (su campioni indisturbati prelevati in situ con campionatore Shelby).

In base a tale sperimentazione risulta ipotizzabile l'utilizzo sistematico di tali materiali per la realizzazione dello strato a bassa permeabilità facente parte del sistema di impermeabilizzazione delle discariche. Attraverso il campo prova è stato dimostrato che il materiale può essere lavorato, anche se in condizioni non ottimali (umidità superiore a quella consentita, utilizzo di un rullo di peso inferiore alle 10 t richieste), ottenendo buone condizioni di addensamento ed idonee caratteristiche di permeabilità.

Il gruppo ACEA si è dimostrato disponibile a continuare tale sperimentazione anche con i fanghi provenienti dal bacino ossolano. Il materiale verrà utilizzato in miscela con il 5% di cemento, al fine di poter garantire un angolo di scarpata dell'arginatura pari a 45°.

Le tappe per questa possibile cooperazione dovrebbero essere:

- accordo tra ACEA e Provincia VCO per sperimentazione nell'ambito del progetto Interreg III "valorizzazione dei fanghi di segagione derivanti dall'industria dei lapidei";
- raccolta dei dati bibliografici relativi alle caratteristiche dei fanghi in oggetto;
- esecuzione di prove di laboratorio (granulometria, limiti di Atterberg, in primis);
- test di cessione sul materiale da utilizzare;
- trasporto del materiale (20.000 m³);
- posa in opera e gestione del operazione;
- esecuzione di prove in situ una volta avviata la sperimentazione;
- controlli periodici sul percolato: a carico di ACEA. Il percolato in uscita è drenato, incanalato entro connettori ed inviato all'impianto di trattamento delle acque reflue in gestione alla stessa ACEA. I controlli avvengono periodicamente sui 12 pozzi e 20 piezometri a valle della discarica, prima di intercettare la falda.

Si potrebbero ipotizzare inoltre controlli periodici sui fanghi in ingresso, andando a valutare il contenuto dei metalli e degli idrocarburi presenti.

Tale sperimentazione prevederebbe:

- la fornitura del materiale da parte delle ditte operanti in Val d'Ossola: le spese del trasporto A/R a carico delle aziende fornitrici;
- sperimentazione in sede ACEA: progettazione, procedura operativa, stoccaggio, spandimento e prove tecniche a carico della Soc. ACEA;
- supervisione e relazioni tecniche del caso a carico di enti pubblici accreditati (Provincia, Università, ecc..).

Al momento non è stato possibile avviare tale sperimentazione in quanto i costi a carico delle aziende produttrici di fanghi sono risultati essere troppo onerosi. Andrà valutato se procedere su questa strada e cercare possibili fonti alternative per l'approvvigionamento del materiale o la parziale copertura dei costi di trasporto relativi all'utilizzo di fanghi ossolani, o se invece pensare ad una sperimentazione da fare in provincia di Verbania, progettando, avviando e valutando la reale efficienza di un impianto di discarica nel quale si utilizzino sperimentalmente dei fanghi di segagione quale materiale impermeabilizzante.

Si stanno in tal senso valutando possibili siti ove impiantare un impianto di discarica per inerti, chiedendo in Provincia l'autorizzazione all'avviamento di un impianto di sperimentazione per l'impiego dei fanghi di segagione delle pietre ornamentali quale materiale impermeabilizzante per sottofondi di discariche di inerti ai sensi dell'art. 29 del d.legs. 22/97.

5.1.4 Possibilità di impianto sperimentale di discarica

Il progetto e la realizzazione dell'impianto andranno fatti seguendo i criteri di sicurezza sia verso le persone che verso l'ambiente (protezione delle acque superficiali e sotterranee, riduzione del degrado estetico e paesaggistico dell'ambiente, ecc..).

Le principali azioni da compiere per la progettazione mirata della discarica sono:

- definizione del contesto tecnico-normativo. È necessario rispondere alla domanda: si procede come impianto sperimentale seguendo l'art. 29 del d.lgs. 22/97 oppure si importa un campo prova presso una discarica già in attività?
- Definizione dei contesti di qualità e sensibilità ambientale del sito: valutare se il luogo prescelto è adatto per la realizzazione di una discarica, appoggiarsi ad una discarica già in attività?
- Definizione delle tipologie di rifiuto accettabili: rifiuti inerti quali ad es. macerie, inerti di cava, di smarino, ecc..
- Definizione della struttura dell'impianto, delle opere e dei criteri per la protezione ambientale: nel caso in esame si deve impostare il progetto presupponendo che è necessario disporre di:

- Area d'intervento delimitata, divisa in lotti in base all'ordine degli interventi;
 - Rete d'illuminazione;
 - Attrezzature antincendio, recinzione, ecc..;
 - Depositi per attrezzature e mezzi di cantiere;
 - Rete viaria interna e d'accesso;
 - Struttura dell'impianto come riportato in figura 39;
 - Utilizzo dei fanghi di segagione quali impermeabilizzanti per il fondo della discarica;
 - Rete di monitoraggio e captazione del percolato a valle dello strato di impermeabilizzazione;
 - Pozzi di raccolta del percolato captato (per analisi ed invio al depuratore);
 - Alimentazione di f.e.m. per le pompe dei pozzi;
 - Rete di raccolta delle acque meteoriche;
 - Geomembrane a monte dello strato di argilla, a valle della rete di monitoraggio (onde evitare che il percolato permei troppo rapidamente nel terreno naturale sottostante) ed infine ad impermeabilizzare il tetto della discarica. Va infine predisposto un geotessuto per prevenire eventuali lesioni nella geomembrana;
 - Criteri per la chiusura dell'impianto, sistemazione finale e pianificazione per il recupero dell'area;
- Valutazione della compatibilità ambientale dell'impianto ed individuazione delle misure compensative

Si potrebbe pensare di progettare un impianto che possenga le seguenti caratteristiche (fig. 39):

- terreno naturale (possibilmente poco permeabile);
- geomembrana;
- rete di monitoraggio (+ captazione per percolato, da analizzare e smaltire);
- 1 m di argilla compattata, l'argilla, nelle nostre intenzioni, andrebbe sostituita con i fanghi di segagione compattati;
- geomembrana;
- geotessuto (per preservare la geomembrana dal punto di vista meccanico);
- deposizione di circa 1000 m³ di rifiuti inerti;
- impermeabilizzazione superficiale;
- recupero ambientale;

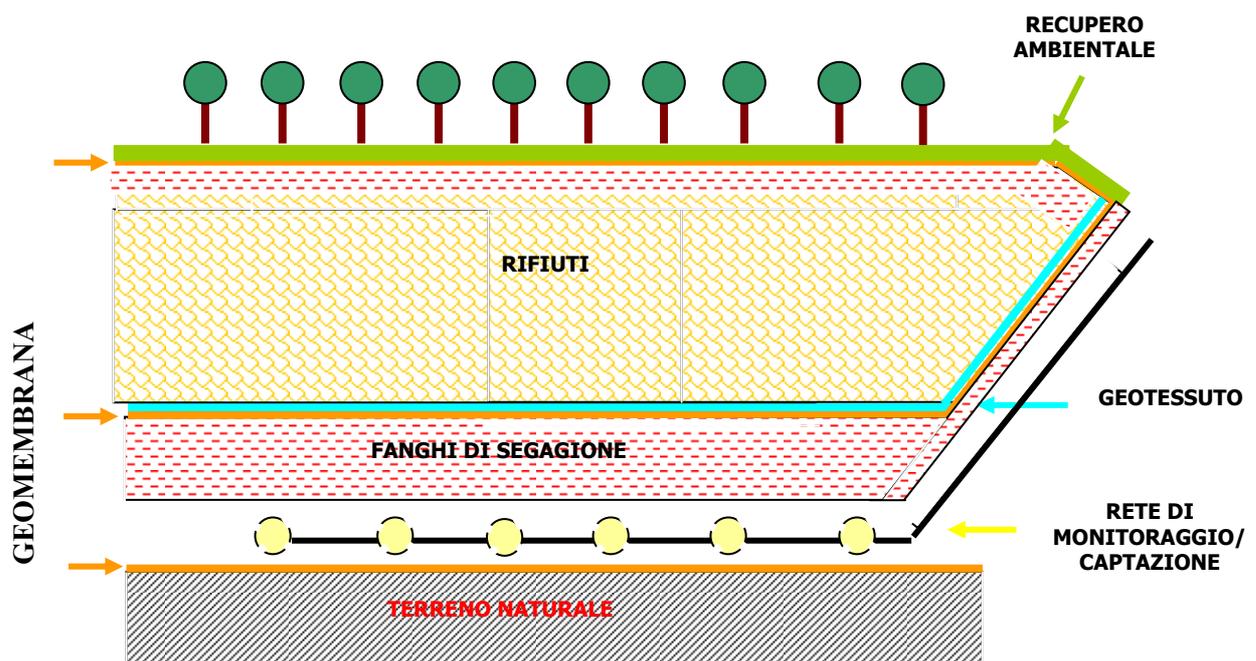


Figura 39: schema di discarica per rifiuti inerti con impiego di fanghi di segagione

Per la progettazione dell'impianto sarà di fondamentale importanza importare correttamente una rete di monitoraggio: distanza tra i tubi e caratteristiche dei tubi. Si può ipotizzare di collocare i tubi a distanza di 15-20 m l'uno dall'altro. Il sistema di drenaggio va pensato a lisca di pesce. La rete di monitoraggio sarà costituita da tubazioni microfessurate in PEAD (diametro 80 mm per i rami secondari e 110 mm per il collettore principale). Lo strato che contiene la rete di monitoraggio è costituito da sabbia di granulometria 0-2 mm, per uno spessore di 0.20 m ed un secondo strato (granulometria 0-60 mm) con spessore di 0.1 m, costituente il piano di posa del fango. Le tubazioni terminano in pozzi di raccolta e rilancio dedicati realizzati con tubazioni in PEAD di diametro 1200 mm. Si deve inoltre prevedere un sistema di pompaggio adatto alla portata del percolato che si prevede di dover raccogliere. Le acque raccolte andranno esaminate e, secondo i risultati ottenuti, si procederà al loro smaltimento nelle acque superficiali o alla depurazione.

In merito alle modalità di deposizione del materiale impermeabilizzante: si pensa di utilizzare dei fanghi di segazione di $K = 10^{-7}$ cm/s (indicativamente). I fanghi saranno conferiti, lavorati con rullo a "piede di pecora" costipato con rullo liscio e di seguito fresata per uno spessore di 10 cm per facilitare l'omogeneità con lo strato superiore. Durante la stesa del materiale sarà data una pendenza del 0.5% per facilitare il deflusso delle acque meteoriche in caso di pioggia, e per la raccolta del percolato monitorato e captato.

Ultimata la stesa dello strato di fango sarà posizionato il telo di impermeabilizzazione artificiale con manto in polietilene ad alta densità PEAD dello spessore di 2 mm; tale manto verrà ancorato in apposite canalette perimetrali posizionato secondo un piano di posa preventivamente approvato, che terrà conto della larghezza dei teli, della stabilità dimensionale, degli sforzi indotti dalle variazioni termiche e dalla posa del materiale. I singoli teli andranno saldati tra loro in base alle norme UNI di riferimento da personale competente e saranno sottoposti a collaudo.

Sopra la geomembrana sarà posto un geotessuto di TNT in polipropilene del peso di 400 g/m². Sopra il geotessuto saranno sistemati i rifiuti da smaltire.

Per l'arginatura si procede con:

- strato di materiale drenante per tubo di raccolta del percolato;
- l'argine è eseguito in fango per costituire una sorta di "catino";
- strato di PEAD di spessore 2 mm avente caratteristiche già specificate;
- strato di TNT del peso di 400 g/m² per evitare punzonamenti dello strato di PEAD;

Per ridurre la produzione di percolato si deve pensare ad un'ideale copertura del rifiuto, facendo sì che le acque meteoriche siano convogliate in apposite canalette senza andare a gravare ulteriormente sul sistema di raccolta del percolato "naturalmente" prodotto dai rifiuti, e successivo recupero ambientale.

Andrà inoltre predisposto un sistema di raccolta di acque meteoriche, le quali possono essere suddivise in due categorie a seconda della differente provenienza:

- acque meteoriche provenienti dalle sponde inerbate e da zone non soggette a passaggi di veicoli o lavorazioni che potranno essere avviate direttamente allo smaltimento in corpo d'acqua superficiale adiacente all'impianto;
- acque meteoriche provenienti da caditoie stradali posizionate in zone di lavorazione e soggette al passaggio di macchine operatrici ed autocarri; in questo caso si prevede la captazione, l'analisi e l'eventuale depurazione prima dell'immissione nelle acque superficiali;

Per la chiusura dell'impianto e la sua sistemazione finale si deve progettare una barriera superficiale contrapposta alle infiltrazioni delle acque meteoriche che agisca direttamente, come anticipato, sull'equazione di bilancio del percolato, riducendone la produzione a valori trascurabili in tempi relativamente brevi. Affinché l'intervento risulti efficace si deve pensare alla modellizzazione delle superfici in modo tale da avere:

- un materassino bentonitico di 6 mm;
- strato impermeabilizzante in fanghi di segazione dello spessore di 30 cm;
- strato di drenaggio in ghiaia di 20 cm;

- strato superficiale con terreno di coltura, spessore 70 cm, idoneo al successivo recupero a verde (si potrebbe pensare di utilizzare il “terreno vegetale” ottenuto dal trattamento di “compostaggio” dei fanghi di segazione;

Sarà infine necessario preveder una valutazione d’impatto ambientale ad hoc.

5.2 Riutilizzo in campo agricolo

In passato sono stati analizzati i fanghi di segazione provenienti dallo stabilimento della Domo Graniti di Trontano al fine di valutare il loro potenziale impiego in campo agricolo. Data però l’affinità esistente tra materiali quali serizzi e beole, è ipotizzabile estendere i risultati ottenuti anche a diverse grandi aziende presenti nella stessa zona. Si è riscontrata, in ogni caso, l’inadeguatezza del materiale “tal quale” dal punto di vista agronomico: anche se presenta un buon contenuto di K ($K_2O = 0.93\%$), un sufficiente contenuto di P ($P_2O_5 = 0.33\%$), un eccellente contenuto di Ca (4.74%) ed un tenore in Fe (4.19%) alto ma ancora tollerabile.

Il problema principale è l’elevato contenuto di particelle di dimensioni del limo ed argilla per cui il materiale è classificato come asfittico, in quanto favorisce la formazione di strati impermeabili che non permettono l’ossigenazione delle radici delle piante.

Si riportano di seguito le indagini effettuate relative a prove granulometriche (vedi tabella 39) ed ad analisi chimico-agronomiche (vedi tabella 40).

Tabella 39: caratteristiche granulometriche fango “tal quale” (BETTA, 1997)

CLASSE GRANULOMETRICA (mm)	PERCENTUALE IN MASSA (%)	CATEGORIA
0.02 – 2 mm	53.8%	Sabbia
0.002 – 0.02 mm	36.8%	Limo
< 0.002 mm	9.4%	Argilla

Tabella 40: analisi chimiche (BETTA, 1997)

ELEMENTO	PERCENTUALE IN MASSA (%)
N	Assente
P_2O_5	0.33
K_2O	0.93
Mg	0.084
Ca	4.74
Fe	4.19
Cu	0.024
Mn	0.038
Sostanze organiche	0.952
pH	8.2

Se però il suddetto materiale venisse “diluito” al 50% con materiale sabbioso si potrebbe ottenere la seguente caratterizzazione granulometrica (vedi tabella 41):

Tabella 41: caratteristiche granulometriche in seguito a miscelazione con 50% di materiale sabbioso (BETTA, 1997)

CLASSE GRANULOMETRICA (mm)	PERCENTUALE IN MASSA (%)	CATEGORIA
0.02 – 2 mm	76.9%	Sabbia
0.002 – 0.02 mm	16.4%	Limo
< 0.002 mm	4.7%	Argilla

Un materiale con queste caratteristiche risulterebbe allora applicabile per i terreni appartenenti all’orizzonte pedologico. Se questo materiale venisse ulteriormente miscelato secondo le proporzioni: 97% di detto materiale e 3% di sostanza organica (che sommato al 1% già presente garantisce un apporto

di sostanza organica pari al 4%), si potrebbe ottenere un ottimo materiale da utilizzare per lo strato superficiale (strato fertile).

Una volta messo in posto si dovrebbero aggiungere:

- 50 g/m² di fosfato minerale 19% per arricchire in fosforo il terreno;
- 50 g/m² di nitrato ammonico per arricchire in azoto il terreno.

Il materiale così ottenuto sarebbe ottimo per il ripristino ambientale delle aree di cava da recuperare (vedi figura 40), senza correre il rischio di un inquinamento ambientale ed eliminando i costi di smaltimento in discarica; questa opzione è già in parte attuata (vedi autorizzazione concessa alla Ditta Motetta di Torntano-Villadossola, per il ripristino ambientale di un'area di una cava di beola. In questo caso si utilizzano i fanghi di segagione, miscelati a scarti più grossolani, quale riempimento del vuoto di coltivazione).



Figura 40: precedenti recuperi ambientali di discariche di cava (1980/90) con impiego di fanghi di segagione miscelati a clasti più grossolani e frazione organica.

Alcune sperimentazioni, inerenti l'impiego dei fanghi di segagione opportunamente miscelati ed attivati per ottenere del "terreno vegetale" da impiegare per recuperi ambientali sia in cava che per interventi sulle opere pubbliche, sono state di recente avviate, ed in parte già concluse, nel Canton Ticino (Svizzera) – dopo un'applicazione in via del tutto preliminare – e soprattutto nel bacino della Pietra di Luserna (Prov. TO-CN). In entrambe i casi il fango in ingresso risulta avere caratteristiche fisico-chimiche similari: si tratta infatti di fanghi di segagione sia da telaio a torbida abrasiva che da taglio a disco diamantato di materiali gneissici (gneiss di Luserna e gneiss elvetici).

Le cave di gneiss del Ticinese sono infatti aperte, al pari della Pietre Ornamentali Ossolane, nelle rocce del Dominio Pennidico, fra l'Elvetico (a Nord ed Ovest) e l'Austroalpino (ad Est), al di sopra della Linea Insubrica che separa il subalpino (a Sud) (COMPAGNONI *et al*, 1991).

Su un fango di segagione, di rocce gneissiche da taglio con utensili diamantati nel periodo compreso tra il 19 luglio ed il 30 settembre 2002, già fu condotta una sperimentazione (FORNARO ET AL., 2003) per l'ottenimento di "terriccio vegetale" impiegabile principalmente per recupero di siti di cava dismessi e rinaturalizzazione di aree degradate. Nella prospettiva di allargare in seguito l'utilizzazione del materiale prodotto per giardini e florovivaismo, architettura del paesaggio, opere in verde in genere e piste da sci, è stata impostata una sperimentazione, analoga, sui fanghi prodotti nel bacino della Pietra di Luserna: essa è stata avviata a gennaio 2005 ed attualmente è in corso di avanzata sperimentazione. Per poter eseguire la prova in oggetto è stato necessario fare richiesta di autorizzazione per l'avvio di una sperimentazione ai sensi dell'articolo 29 del d.lgs. 22/97. Obiettivo è quello di ottenere, partendo da rifiuti potenzialmente inquinati dalla presenza di idrocarburi (valori in ingresso di TPH compresi tra 93 e 283 p.p.m., a fronte di limiti imposti dal DM 471/99 di 50 p.p.m. per terreni ad uso residenziale) e di metalli pesanti (in particolare Rame, Cobalto, Nichel e Cromo), del "terriccio" da poter comunque subito impiegare nel recupero ambientale di siti di cava dismessi e di discariche di cava da sistemare.

In partenza si è proceduto a miscelare quattro diverse formulazioni comprendenti, in diversa percentuale, fanghi di segagione derivanti dalla Pietra di Luserna (da telaio a torbida abrasiva, da disco diamantato e misti), terreno naturale, cippato verde, *compost* prodotto dallo stesso stabilimento ACEA, il tutto adattivato da opportuni attivatori. Le quattro miscele sono state sottoposte ad una prima maturazione accelerata di 4 settimane ed ad ulteriori 8 settimane di maturazione lenta, al fine di ottenere quattro diversi prodotti, di caratteristiche simili.

Il capofila scientifico di tale proposta è stata l'Università degli Studi di Torino (Dipartimento di Scienze della Terra), con il coinvolgimento delle Pubbliche Amministrazioni, del Gruppo ACEA di Pinerolo (TO) e della Società Envirorem di Lugano. Attualmente la ricerca è in itinere: a giugno è terminata la fase di maturazione di 12 settimane presso gli stabilimenti di ACEA a Pinerolo, e si è appena proceduto a stendere in cava parte del materiale prodotto. I valori relativi alle analisi finali dei TPH sono totalmente rientrati, attestandosi su valori poco superiori a 10 ppm s.s. Tale risultato è un buon indicatore della bontà e della riuscita del trattamento di bonifica del materiale ottenuto nel caso delle 4 miscele prodotte. Si deve inoltre osservare come, soprattutto in base ai limiti imposti dalla 748/84 mod. 27/3/98, i contenuti di elementi nocivi/tossici siano sotto la media tollerata. Ciò viene ulteriormente avallato dai risultati agronomici sperimentali ottenuti in laboratorio, a seguito delle prove di germinazione e fitotossicità condotte su campioni delle 4 miscele.

5.3 Presenza di TPH in nel bacino estrattivo della Val d'Ossola

Si sono campionati a spot e random 13 stabilimenti del bacino estrattivo della Val d'Ossola, e sui 13 campioni prelevati è stato valutato il contenuto in idrocarburi pesanti (TPH), mediante metodo analitico **EPA 8440/96**. Dai risultati ottenuti (tabella 42), si evince che 2 campioni su 13 presentano contenuto di idrocarburi superiore a 50 mg/kg (limite imposto per terreni residenziali in base al DM 471/99), a questi va aggiunto un ulteriore campione (A13) il quale presenta un contenuto molto prossimo a 50 ppm.

Si può evidenziare il fatto che i campioni che hanno mostrato maggiori contenuti di idrocarburi appartengono ad impianti di trasformazione i quali operano con macchine non nuove e, probabilmente, più soggette a perdite.

Tale elevata concentrazione di TPH nei fini di segagione fa sì che i fanghi vadano preventivamente bonificati nel caso in cui si pensi di riutilizzarli, opportunamente miscelati e trattati, per recuperi ambientali (ex Art. 33 del D.Lgs. 22/97), oppure vadano smaltiti in discariche controllate. Questo problema di inquinamento dei fanghi può essere in parte arginato se si procede ad un ammodernamento delle macchine in stabilimento ed alla loro costante e puntuale manutenzione, così da impedire perdite di lubrificanti.

Tabella 42: valutazione contenuto in idrocarburi pesanti (TPH) mediante metodo EPA 8440/96.

LIMITE PER DM 471/99 TERRENI RESIDENZIALI	CAMPIONI ESAMINATI												
	A1 da telaio	A2 da disco	A3 da telaio	A4 da telaio	A5 da disco	A6 da telaio	A7 da telaio	A8 da telaio	A9 misto	A10 da telaio	A11 misto	A12 misto	A13 misto
50 mg/kg	<2,85 mg/kg	<2,54 mg/kg	<2,63 mg/kg	10,4 mg/kg	161 mg/kg	5,89 mg/kg	18 mg/kg	<1,54 mg/kg	118 mg/kg	9,82 mg/kg	5,33 mg/kg	29,6 mg/kg	45,1 mg/kg

Tale bonifica può essere opportunamente fatta ipotizzando un trattamento di “*bioremediation*”, mediante il quale si ottiene il doppio vantaggio di bonifica dalla presenza di idrocarburi e di produzione di “terriccio” da utilizzare opportunamente nei recuperi ambientali di aree compromesse, prime tra tutte le aree di cava e di discarica.

CONCLUSIONI

Il progetto PIC Interreg III, approvato nel dicembre 2002, ha previsto lo studio relativo alla “Valorizzazione dei fanghi derivanti dalla lavorazione lapidea”. Il Politecnico di Torino si è prefisso di dipanare gli svariati e molteplici dubbi di partenza e proporre alcune soluzioni alternative alla discarica, viste nell’arco di tre anni, per il problema relativo alla gestione aziendale dei fanghi. In particolare, per il primo anno di ricerca, si è arrivati a quantificare la produzione annuale dei fanghi di segazione nel bacino della Val d’Ossola, risultata pari mediamente a **70.000 t/anno**.

Sono stati quindi campionati i fanghi provenienti da diversi stabilimenti (in parallelo a quanto fatto l’Università Bicocca di Milano), al fine di valutarne la composizione chimica, la granulometria ed il rilascio di eventuali sostanze pericolose (a tal fine si sono raccolte, da diverse ditte operanti in zona, le analisi relative ai test di cessione). Sono altresì stati presi in considerazione alcuni studi pregressi, al fine di valutare possibili soluzioni di riutilizzo, nei settori ritenuti potenzialmente più interessanti dal punto di vista economico e merceologico.

In stabilimento sono prodotte sostanzialmente due categorie di fanghi, caratterizzati entrambi da un elevato tenore d’acqua nei fanghi filtropressati: i fanghi da telaio a torbida abrasiva, che presentano un’elevata concentrazione della frazione metallica (ferro associato a metalli pesanti quali manganese, cromo, nichel e rame) ed i fanghi da disco diamantato, privi della frazione relativa alla graniglia, ma che tuttavia presentano un elevato contenuto di cobalto.

Si sono poi eseguite prove di separazione magnetica ad umido a “basso campo” con separatore a nastro sommerso tipo *crockett*, con sistematici esami granulometrici, al fine di controllare dove principalmente si concentrano i minerali magnetici. In particolare il materiale, è stato portato allo stabilimento della Minerali Industriali a Cacciano (Fraz. Masserano) e trattato con separatore della Wemco (assemblato per le prove di laboratorio), modello HMS LAB. La portata d’alimentazione è stata mediamente mantenuta pari a 0.030 l/s con diluizione di 380 g/litro di torbida nel caso A (fanghi derivanti da rocce granitiche locali, nazionali ed internazionali), e pari a 0.016 l/s con diluizione di 550 g/litro di torbida nel caso B (fanghi derivanti essenzialmente da rocce locali: serizzi e beole). A fine processo è stato quindi possibile distinguere due diverse classi magnetiche: frazione amagnetica (AM) e frazione magnetica (M). Dopo inquartature successive su M e AM filtrati ed essiccati, sono stati ricavati due campioni rappresentativi, sui quali si sono eseguiti esami granulometrici ed ulteriori separazioni magnetiche manuali sulle diverse classi granulometriche precedentemente individuate, dalle quali si è rilevato che la concentrazione di magnetico nella frazione amagnetica (AM) è risultata mediamente compresa tra 1.6-3% a fronte di una percentuale iniziale di magnetico nella frazione tal quale del 10-15% circa. Ottenendo un rendimento della separazione superiore all’80%.

Sono infine state avviate prove di separazione densimetrica sia in laboratorio, con la tavola a scosse, che in stabilimento, con la spirale di Humphreys. Il primo procedimento ha dato ottimi risultati, arrivando ad ottenere una concentrazione di magnetico, nella frazione pesante, maggiore del 96%; questo metodo di separazione risulta essere tuttavia assolutamente non conveniente economicamente. Nel caso invece della spirale di Humphreys, sono state eseguite diverse prove in azienda per valutare la bontà di una separazione di tal tipo.

Dai risultati raggiunti se ne evince che questo tipo di separazione, su materiale preventivamente ciclonato sino ad avere un’alimentazione con una dimensione massima di 0.4 mm, può dare risultati molto positivi e sicuramente migliorabili con rese del prodotto pesante pari al 10-23% nelle prove che hanno dato migliori risultati, partendo da una portata di 0.2-0.5 l/s e da diluizioni molto variabili mediamente comprese tra 35-300 g/l.

Sono poi stati ipotizzati due possibili processi di trattamento, uno a secco ed uno ad umido, per separare la frazione magnetica, la quale potrà essere recuperata e venduta quale abrasivo per sabbiature industriali. In tal senso è stato visitato un impianto nei dintorni di Milano (Desio) che raccoglie fanghi di segazione, derivanti dal taglio dei graniti, provenienti dalla provincia di Verona, e li tratta al fine di ottenere graniglia per sabbiatura industriale.

Ipotizzando la realizzazione d'opportuni impianti di trattamento, si può pensare ad un recupero contestuale (figure 41 e 42) di due diversi prodotti:

- una frazione metallica, impiegabile quale materiale per sabbiatura industriale o quale carica per appesantire manufatti cementizi;
- una frazione litoide, che potrebbe trovare applicazione principalmente in tre campi di utilizzo: *filler* (per conglomerati bituminosi, arredi urbani, ecc.); impermeabilizzante nelle discariche di rifiuti solidi urbani; “terreno vegetale” per recuperi ambientali. In particolare può ritenersi davvero esaustivo un ciclo di produzione lapidea che, riutilizzando i fini di segazione, opportunamente bonificati, ne preveda la trasformazione in materiale rivegetabile, ed il relativo ritorno finale in cava, per un idoneo recupero ambientale dei siti estrattivi.

Non si ritiene invece che siano da perseguire obiettivi quali il reimpiego dei fanghi di segazione a matrice silicatica per:

- materie prime per ceramica;
- substrato per florovivaismo e per piante acidofile coltivate nella zona;
- smagrente di impasti per manufatti in laterizio;
- materiale di base per la produzione di pietre agglomerate;
- fondente in impasti per grés colorato.

Un tale tipo d'impianto potrebbe essere suddiviso in cinque parti:

- deposito fanghi;
- separazione degli sfridi di graniglia metallica;
- disidratazione fanghi e trattamento acque;
- essiccazione;
- stoccaggio.

In particolare si potrebbe agire secondo le due vie precedentemente indicate:

- separazione della graniglia metallica ad umido, direttamente in stabilimento e successiva essiccazione della frazione litoide (figura 41);
- trasporto in impianto centralizzato nel quale raccogliere i fanghi, precedentemente disidratati mediante filtropressa negli impianti di lavorazione della pietra, essiccamento, disgregazione e separazione magnetica a secco (figura 42).

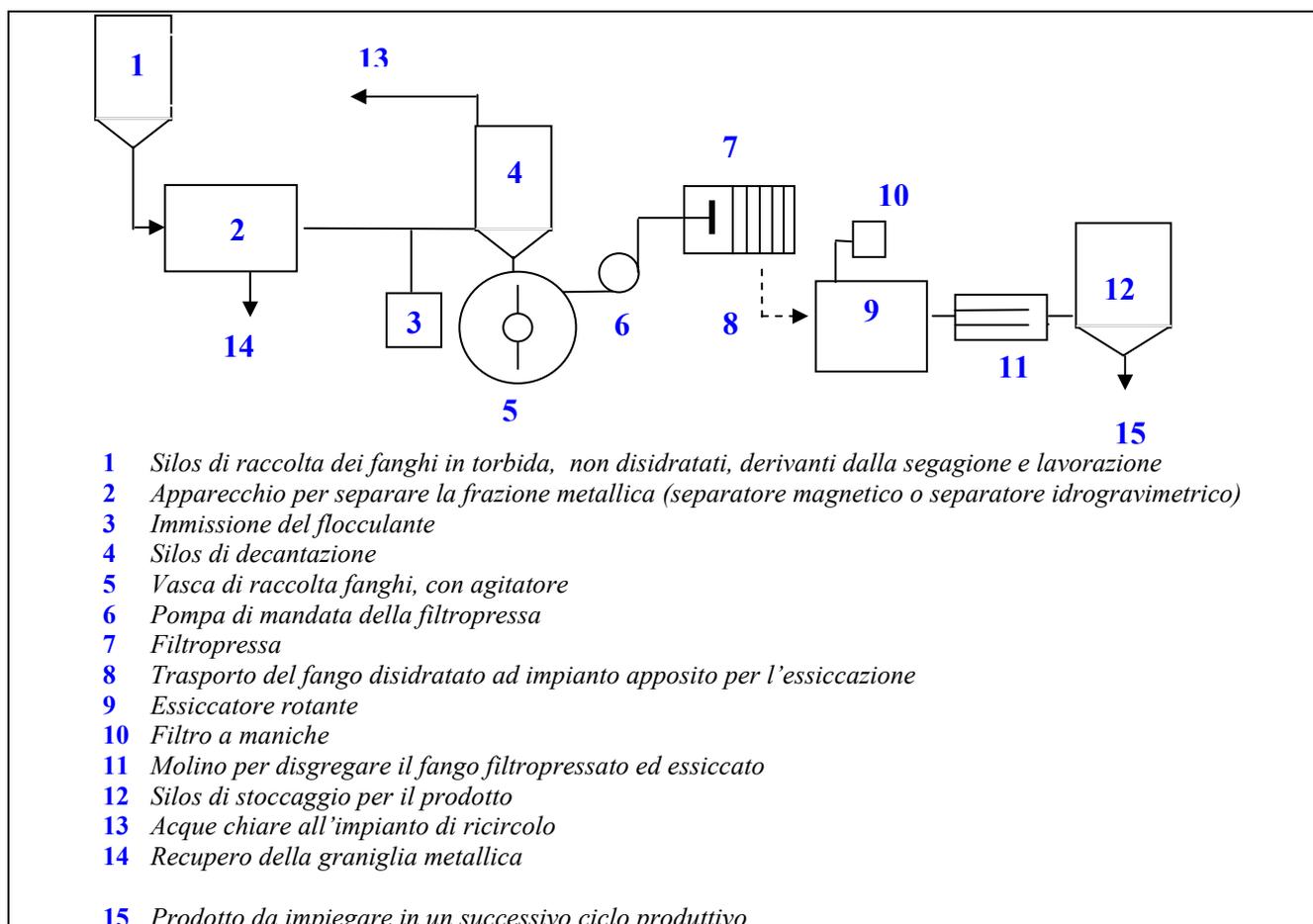


Figura 41: schema dell'impianto pilota per il recupero dei fanghi di lavorazione di pietre (A)

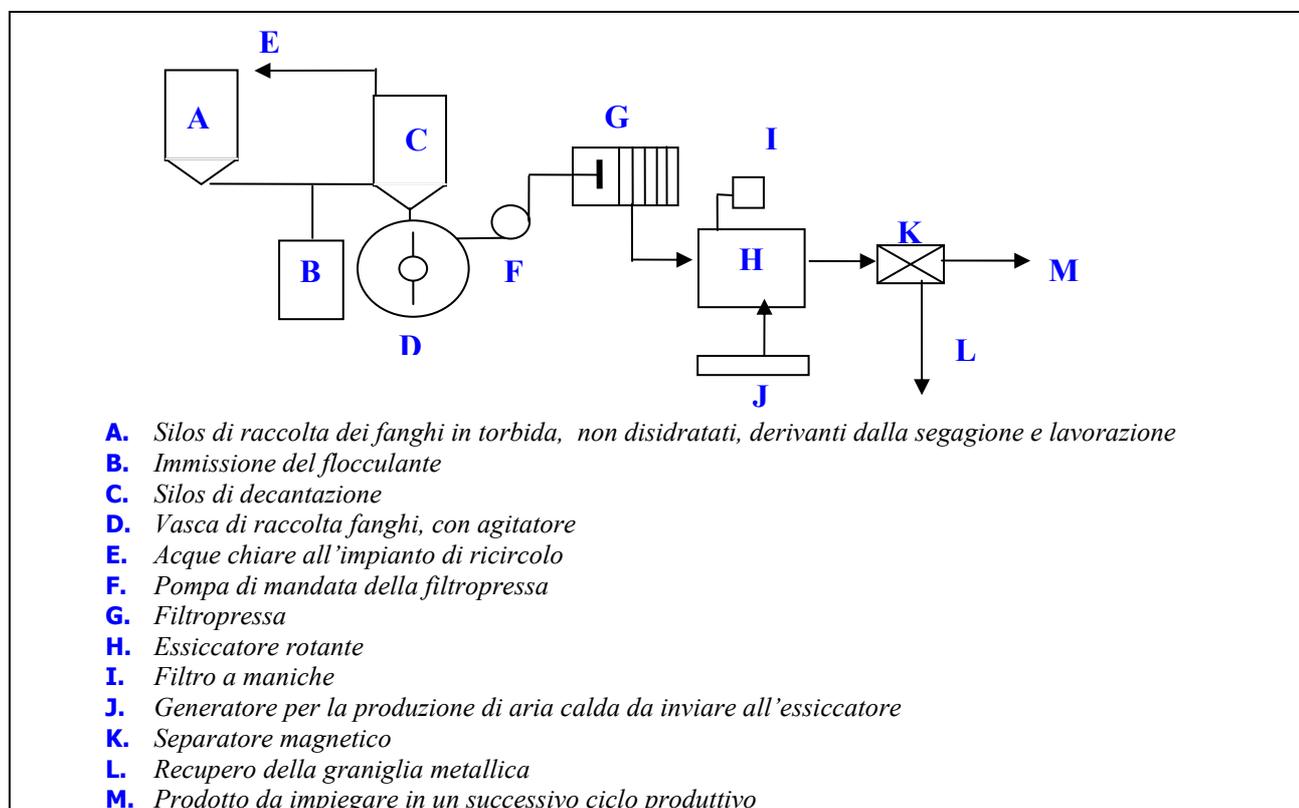


Figura 42: ipotesi di impianto consortile per la raccolta ed il trattamento dei fanghi di segazione (B)

Per quanto concerne i fanghi derivanti dalle lavorazioni a taglio diamantato, si deve pensare ad un trattamento al fine di separare la frazione contenente cobalto; infatti, da nuove disposizioni in corso di perfezionamento ed approvazione, si vede come il problema relativo alla presenza del cobalto stia prendendo sempre maggiore piede. Risolto, comunque, tale problema, mediante opportuni trattamenti, i prodotti depurati ottenuti potrebbero essere reimmessi in ciclo al fine di ottenere i prodotti precedentemente descritti.

Per ciò che concerne il riutilizzo di fini di segazione quale materiale costituente di terreni vegetali si veda quanto studiato dall'Università degli Studi di Torino – Facoltà di Agraria e quanto recentemente proposto dalla stessa Università – Dipartimento di Scienze della Terra. In entrambe i casi si possono riscontrare promettenti sperimentazioni, che, una volta a regime, potrebbero garantire un recupero sistematico dei fini di segazione quali componenti di “terricci” vegetali da impiegare per recuperi ambientali di siti compromessi.

Per ciò che concerne poi il riutilizzo dei fanghi di segazione quali sottofondi per discariche, l'utilizzo della modellistica nel presente lavoro ha permesso di valutare, in differenti contesti piemontesi, il possibile utilizzo di fanghi di segazione provenienti dal bacino estrattivo ossolano come materiale di copertura e impermeabilizzazione per discariche.

La ricerca è stata volta, in particolare, alla valutazione della produzione di percolato e del flusso dello stesso attraverso la barriera geologica di base, costituita dai fanghi di segazione, in tre località piemontesi, ubicate in tre Province diverse e differenti per condizioni termo-pluviometriche e di radiazione solare: Domodossola (VB), Pinerolo (TO) e Vercelli (VC). Le simulazioni sono state condotte considerando nulla l'estrazione di percolato. In particolare è emerso che la situazione maggiormente critica è presente nella discarica simulata a Domodossola. In effetti in tale discarica la produzione di percolato all'interno del corpo rifiuti è risultata largamente superiore alle altre discariche. In particolare, il flusso massimo annuale di percolato attraverso la barriera geologica di base è risultato inferiore a 0.4 m.

Tale situazione è verosimilmente connessa con le condizioni termo-pluviometriche e di radiazione solare presenti a Domodossola, caratterizzate da una più elevata precipitazione media annuale e un basso tasso di evapotraspirazione rispetto alle altre località esaminate.

A Pinerolo e Vercelli, al contrario, è stato valutato un flusso massimo annuale di percolato attraverso la barriera geologica di base pressoché uguale ed inferiore a 0.15 m.

In sintesi, il problema della gestione dei fini di segazione potrebbe trovare una possibile via d'uscita, partendo dalla condizione, necessaria, che la loro gestione sia “normata” in modo tale che, senza possibilità di equivoci, le diverse regioni/province si comportino in modo univoco nei confronti dei produttori di fanghi. Si potrebbe poi azzardare l'ipotesi, certamente fondata, di voler considerare i fini di segazione non come RIFIUTI ma, se opportunamente trattati e controllati, quali “MATERIE PRIME/SECONDE” da impiegare in successivi *step* produttivi, in modo tale da poter ottenere prodotti utili: da un lato, per recuperi ambientali (sia come riempimento che, a seguito di *bioremediation*, come terreno vegetale da piantumare) e, dall'altro, per impieghi civili ed anche come materiale impermeabilizzante per fondi di discariche.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AAVV: *“Ampliamento discariche Torrione (Pinerolo, Torino). Campo prova – Relazione finale”* prodotta dallo Studio Golder Associates nell’Ottobre 2000.

ASSOCAVE (1995): *“Ossola di pietra: i diversi aspetti di una realtà al servizio dell’economia della valle”*. Relazione Inedita.

BELLARDONE G., BIANCOTTI A., BOVO S., CAGNAZZI B., GIACOMELLI L., MARCHISIO C. (1998): *“Precipitazioni e temperature”*. Collana studi climatologici in Piemonte (CD-ROM). Regione Piemonte, Università degli Studi di Torino.

BETTA G. (1997): *“Prove tecnico-agrarie sui fanghi di lavorazione relativi alla Domograniti”*. Relazione Inedita.

BIGIOGGERO B., BORIANI A., GIOBBI ORIGONI E. (1977): *“Microstructure and mineralogy of an orthogneiss (Antigorio Gneiss - Lepontine Alps)”*. Rend. Soc. It. Mineral. Petrol., n. 33. pp. 99-108.

COMPAGNONI R. et al. (1991): *“Studi geoapplicativi in Val d’Ossola per il miglioramento delle coltivazioni della pietra”*. Atti 2° Convegno Geingegneria – Attività Estrattive nelle nostre montagne – AMS – GEAM, Torino.

DIADI (2000): *“Recupero dei fanghi derivanti dalla lavorazione della pietra”*. Tecnoparco del Lago Maggiore. Relazione inedita.

DINO G. A., FIORA L., FORNARO M., GAMBELLI E., SANDRONE R. (2003): *“Sludge Production and Management in the Italian Granite Stone Industry: An Example from Two Granite Basins in the Alps”*. Convegno IMBS 2003 – Istanbul – Turchia 15-18 settembre 2003. pp. 147-158.

DINO G.A., FORNARO M. (2001): *“Progresso tecnico e Ricerca scientifica per lo sviluppo dell’attività estrattiva della Pietra nelle Valli dell’Ossola”*. Atti del Convegno “2002 Anno Internazionale della Montagna” - Domodossola, 24 novembre 2001. pp. 68-86.

DINO G.A. (2004): *“La gestione degli scarti dell’industria dei lapidei”*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Geingegneria Ambientale – Politecnico di Torino.

FORNARO M., LAPIDUS E. (1991): *“Studio di possibili destinazioni dei fanghi derivanti dalla segazione delle rocce ornamentali”*. Relazione inedita.

FORNARO E., FORNARO M., DINO G. A. (2003): *“Residual sludge management: hypothesis of an agricultural reuse”*. Primo Congresso AIGAA, 19-20 febbraio 2003 (Poster).

FRISA MORANDINI A., VERGA G. (1990): *“Problemi connessi con lo smaltimento dei residui di lavorazione delle pietre ornamentali”*. Bollettino della Associazione Mineraria Subalpina, Anno XXVII, numero 1-2. pp. 247-253.

GAMBELLI E. (2002): *“I fanghi della Pietra di Luserna”*. Tesi di Laurea in Scienze Geologiche, Università degli Studi di Torino. pp. 246.

HUNZIKER J.C. (1966): *“Zur Geologie und Geochimie des Gebietes zwischen Valle Antigorio (Prov. di Novara) und Valle di Campo (Kt. Tessin)”*. Schweiz. Mineral. Petrol. Mitt., n. 46. pp. 473-567.

RUGGERI R., LEALI T. (1993): *“Criteri di prevenzione dei rischi ambientali esterni”*. Atti del Convegno Nazionale Materiali Lapidari: la prevenzione dei rischi per l’ambiente e per i lavoratori. Morbegno (Sondrio) 30 settembre – 1 ottobre 1993. pp. 357-367.

SASSONE P. (1996): *“Studio e cartografia del bacino estrattivo della Pietra di Luserna. Applicazione di metodologie G.I.S. per la gestione, programmazione e valutazione tecnica di giacimenti di rocce ornamentali”*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Geingegneria Ambientale. Politecnico di Torino, inedito, pp. 144.

SASSONE P., DANASINO P. (1995): *“Caratterizzazione di fanghi di segazione di Pietra di Luserna per la valorizzazione come materie prime secondarie”*. Atti del 2° Incontro Int. Giovani Ricercatori in Geologia Applicata (I.M.Y.R.A.G.), Peveragno (CN), 11-13 ottobre 1995. pp. 510-515.

TESTORI D. (2000): *“Esame delle possibilità di riutilizzo dei fanghi derivanti dalla lavorazione delle pietre ornamentali nel distretto lapideo dell’ Ossola”*. Tesi di Laurea. Politecnico di Torino.

Normativa

DECRETO LEGISLATIVO 13 gennaio 2003, n. 36: *“Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti”*. Pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 12 Marzo 2003, n. 59.

DECRETO LEGISLATIVO 3 agosto 2005: *“Definizione dei criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica”*. Pubblicato su Gazzetta Ufficiale n. 201 del 30 Agosto 2005

DECRETO LEGISLATIVO 5 febbraio 1997, n. 22: *“Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio”*. Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale del 15 febbraio 1997, n. 38 – Supplemento Ordinario, n. 33.

DECRETO MINISTERIALE 25 ottobre 1999, n. 471: *“Criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell’articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modifiche ed integrazioni”*

DECRETO LEGISLATIVO del 11 maggio 1999, n. 152: *“Disposizioni sulla tutela delle acque dall’inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall’inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole”*. Pubblicato sul Supplemento Ordinario n. 101/L alla Gazzetta Ufficiale del 29 maggio 1999, n. 124.

UNI 10006/2002: *“Costruzione e manutenzione delle strade. Tecnica d’impiego delle terre”*.

LEGGE n. 319 del 10 maggio 1976 (Legge Merli): *“Norme per la tutela delle acque dall’inquinamento coordinate con le modifiche ed integrazioni apportate dalla Legge 8/10/1976 n.690, dalla Legge 24/12/1979, n.650, dalla Legge 23/4/1981, n.153. G.U. n.48 del 21/2/1977”*, pubblicata in Gazzetta Ufficiale 29 maggio 1976 n. 141.