



Strada J. F. Kennedy, 504
15122 Castelceriolo (AL)
tel. 0131586010 – fax 0131585963
P.E.C.: aral-spa@legalmail.it
P.I. 02021620063



Provincia di Alessandria

Dipartimento ambiente territorio e
infrastrutture (Pianificazione – Difesa del
Suolo – V.I.A. – I.P.P.C. – Servizi Tecnici)

Comune di Solero

Comune di Alessandria
Località Regione “Calogna”

**MODIFICHE NON SOSTANZIALI RIFERITE AGLI INTERVENTI DI GESTIONE
OPERATIVA PRODROMICI ALLA PROCEDURA DI CHIUSURA
DELLA DISCARICA PER RIFIUTI SPECIALI NON PERICOLOSI**

RAPPORTO TECNICO - ILLUSTRATIVO

Febbraio 2024

I consulenti tecnici
Ingg. Francesco e Michele Melidoro



Sommario

| | |
|--|----|
| 1. LO STATO DI FATTO GESTIONALE E AUTORIZZATIVO DELLA DISCARICA..... | 3 |
| 2. LE MODIFICHE PROGETTUALI NON SOSTANZIALI DI ADEGUAMENTO DELLA DISCARICA ALLE PRESCRIZIONI DEL D.LGS. N. 121/2020 | 9 |
| 3. DEFINIZIONE E NATURA GIURIDICA DEGLI INTERVENTI GESTIONALI EX ANTE COPERTURA DEFINITIVA DELLA DISCARICA..... | 11 |
| 4. STIMA DELL'ASSESTAMENTO MEDIO GENERALIZZATO E DEGLI ASSESTAMENTI MASSIMI DI OGNI SINGOLO SETTORE DELLA DISCARICA..... | 17 |
| 4.1 L'assestamento medio generalizzato | 20 |
| 4.2 I massimi assestamenti di ogni singolo settore di discarica | 21 |
| 5. L'OTTIMIZZAZIONE DELL'UMIDITA' INTERNA DEL CORPO DEI RIFIUTI | 23 |
| 6. STIMA DEI CEDIMENTI SECONDARI E DETERMINAZIONE DELLE QUOTE MASSIME DI RICARICA DEI RIFIUTI NEI QUATTRO SETTORI DI COLTIVAZIONE DELLA DISCARICA..... | 31 |
| 6.1 Premessa | 31 |
| 6.2 Le proprietà fisiche caratteristiche dei sovralli dei rifiuti urbani indifferenziati e speciali. | 31 |
| 6.3 Considerazioni preliminari sui fenomeni di assestamento dei rifiuti solidi urbani indifferenziati..... | 36 |
| 6.4 Il modello per il calcolo dei cedimenti secondari | 42 |
| 6.4.1 Il modello di Sowers e i parametri di calcolo | 45 |
| 6.5 Le analisi geotecniche di laboratorio..... | 50 |
| 6.6 Il calcolo dei cedimenti di consolidazione secondari | 52 |
| 6.6.1 Premessa | 52 |
| 6.6.2 Il cedimento di consolidazione secondaria dei singoli settori..... | 52 |
| 6.7 Considerazioni conclusive..... | 57 |

Elenco documenti allegati

| | |
|-------------|--|
| DOCUMENTO 1 | Relazione R-24400-01 del 12/01/2024 di Emendo Srl. |
| DOCUMENTO 2 | Report sulla discarica cessata di Vizzolo Predabissi (MI). |
| DOCUMENTO 3 | Bibliografia specialistica sulle proprietà meccaniche e di deformabilità dei rifiuti urbani indifferenziati. |
| DOCUMENTO 4 | Analisi di laboratorio: prove geotecniche sui rifiuti di Aral SpA e Gaia SpA. |
| DOCUMENTO A | Alcune autorizzazioni discariche nella Regione Piemonte |

MODIFICHE NON SOSTANZIALI RIFERITE AGLI INTERVENTI DI GESTIONE OPERATIVA PRODROMICI ALLA PROCEDURA DI CHIUSURA DELLA DISCARICA PER RIFIUTI SPECIALI NON PERICOLOSI

1. LO STATO DI FATTO GESTIONALE E AUTORIZZATIVO DELLA DISCARICA

Preliminarmente occorre riferire, in sintesi, come il sito in oggetto sia ubicato in località Calogna sulla sponda orografica destra del fiume Tanaro su di una area pianeggiante posta a nord - nord/est del concentrico abitato di Solero, tra l'Autostrada A21 /E70 "Torino / Piacenza" e la strada provinciale n° 50 Alessandria - Casale, e che l'accesso al sito di discarica avviene impegnando la rotonda stradale sulla SP 50 a nord della discarica.

L'area complessiva a servizio della discarica, identificabile sulla carta tecnica regionale alla sezione 176070-Solero, ha una superficie complessiva di 180.191 mq di cui 106.805 mq sono stati destinati all'impianto di smaltimento rifiuti.



Immagine satellitare Google Earth ® - 16/03/2021

Il fondo dell'invaso della discarica è stato suddiviso in quattro settori sull'asse longitudinale nord-sud.

Mentre il 1° settore è posto a sud, il 4° settore della discarica è stato individuato a nord, in corrispondenza dell'area servizi.

Ogni settore è a sua volta suddiviso in due sub-settori gestionali est-ovest, detti anche «*lotti*».

Tale ultima definizione discende dal fatto che ogni singolo sub-settore è stato impostato alla base come un vero e proprio lotto, cioè come un comparto o corpo di discarica autonomo sino ad un'altezza di circa 3 mt dal piano posa rifiuti.

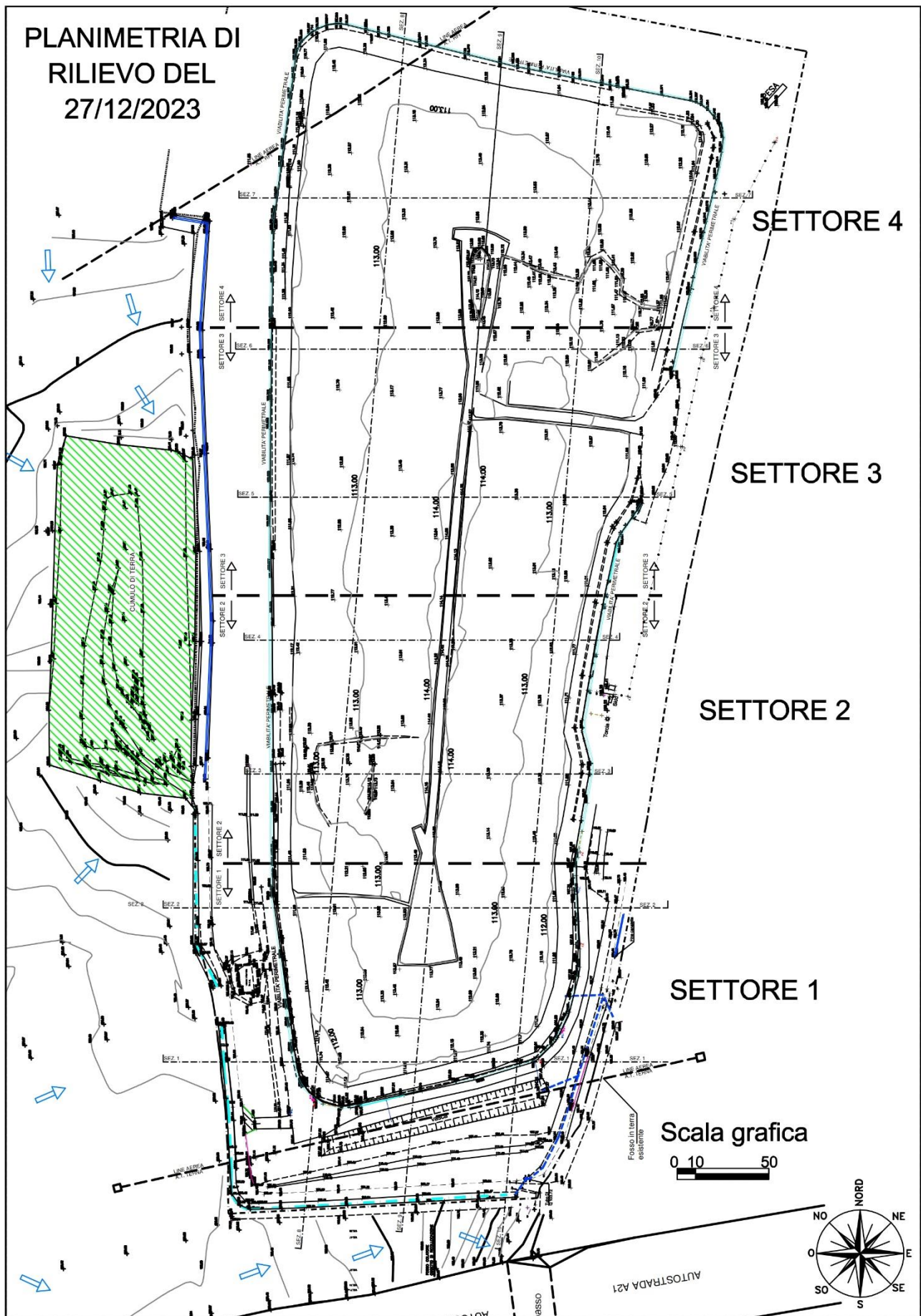
Procedendo in elevazione oltre tale quota tutti gli 8 sub-settori sono uniti costituendo *de facto un unicum* impianto di smaltimento rifiuti.

Rispetto all'ingresso dell'impianto, la discarica è stata costruita e gestita in successione partendo dal 4° settore sino a raggiungere il 1° settore posto in prossimità dell'autostrada A21.

Attualmente, la coltivazione del sito di discarica impegna tutti i settori mediante la posa dell'ultimo strato di rifiuti autorizzato in elevazione.

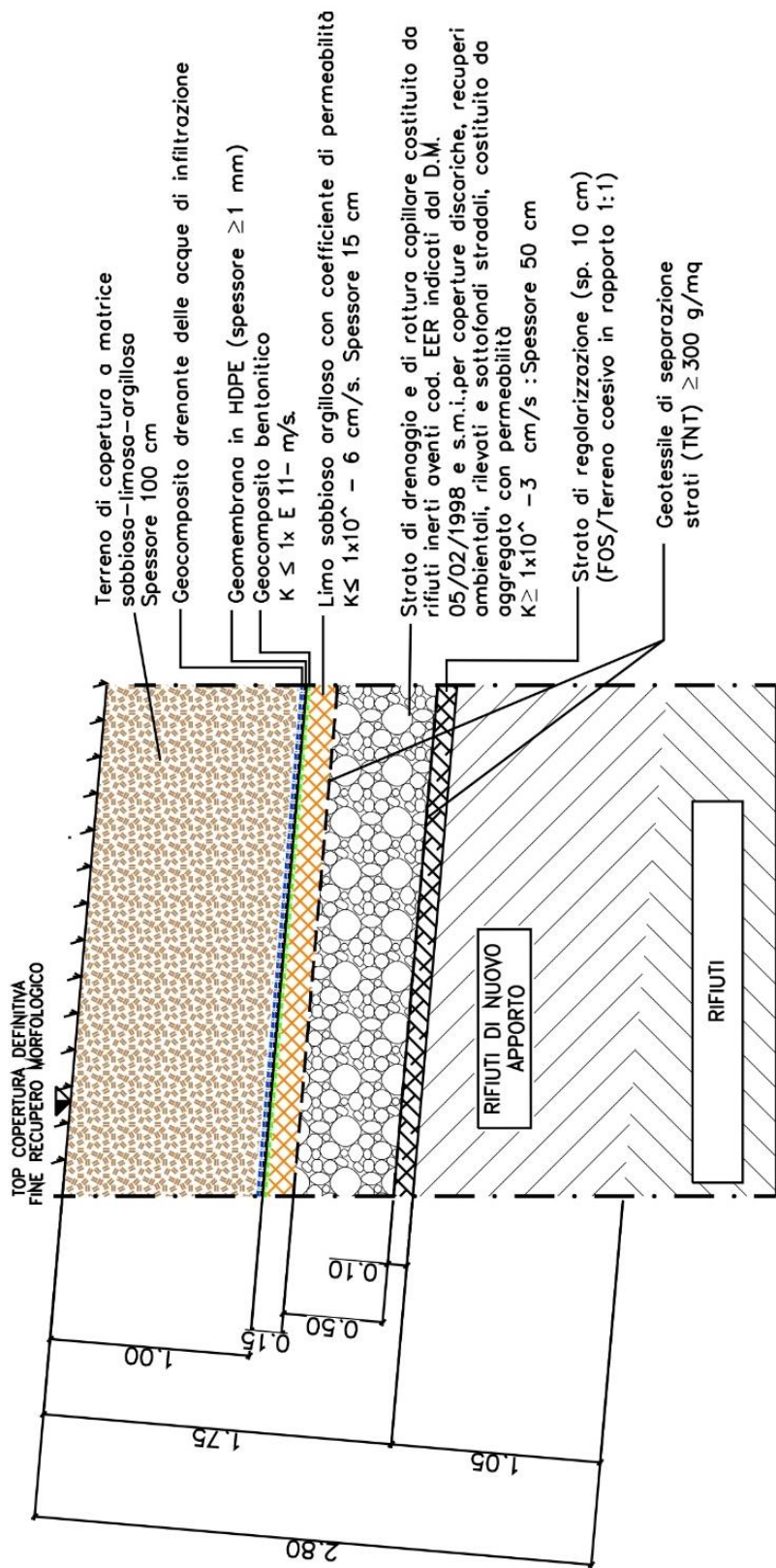
Sotto tale ultimo profilo si precisa come previo giudizio positivo di compatibilità ambientale espresso dal Presidente della Provincia di Alessandria con Decreto n. 145 del 22/07/2022, il Dirigente della Direzione Ambiente, Viabilità 1 - Trasporti del medesimo Ente, con Determinazione DDVA3-574-2022 del 29/07/2022 a seguito di riesame per modifica sostanziale ha proceduto a rinnovare ai sensi dell'art. 29-*octies* del d.lgs. 152/06 l'Autorizzazione Integrata Ambientale della discarica rilasciata con Determinazione Dirigenziale DDAP1-512-2011 del 17/11/2011 e s.m.i. alla ditta A.R.A.L. SpA.

PLANIMETRIA DI RILIEVO DEL 27/12/2023



L'autorizzazione provinciale con prescrizioni della modifica sostanziale del 29/07/2022 ha riguardato in particolare:

- l'adeguamento progettuale al d.lgs. 36/03 così come modificato dal d.lgs. 3 settembre 2020, n. 121 – mediante variazione della stratigrafia della copertura superficiale finale, secondo lo schema progettuale di seguito riportato;
- l'incremento di rifiuti conferibili per un quantitativo pari a 112.145 m³, mantenendo costante la quota massima della copertura superficiale finale sul colmo individuato sull'asse longitudinale nord-sud (ndr: pari a 115,90 m.s.l.m.), così come già approvata con determinazione dirigenziale DDAB1-1014-2017, n.p.g. 82208 del 04/12/2017 e ss.mm.ii.



Nella seguente tabella sinottica si riporta l'evoluzione dei dati principali caratteristici dell'impianto di smaltimento.

EVOLUZIONE DEI DATI PRINCIPALI CARATTERISTICI DELL'IMPIANTO DI SMALTIMENTO

| N. | DESCRIZIONE CARATTERISTICA | DDAP1-512-2011 | DDAB1-1014-2017 | DDAP2-1025-2019 | DDVA3- 574-2022 |
|----|--|--|--|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Sviluppo del perimetro delle aree di proprietà interessate dalla discarica | 1.885,00 m | 1.885,00 m | invariato | invariato |
| 2 | Profondità max di scavo invaso (quote): <ul style="list-style-type: none"> settore 1 (lotto est/lotto ovest) settore 2 (lotto est/lotto ovest) settore 3 (lotto est/lotto ovest) settore 4 (lotto est/lotto ovest) | 100,95/100,95 m.s.l.m. 100,65/100,65 m.s.l.m. 100,65/100,65 m.s.l.m. 100,70/101,45 m.s.l.m. | 100,95/100,95 m.s.l.m. 100,65/100,65 m.s.l.m. 100,65/100,65 m.s.l.m. 100,70/101,45 m.s.l.m. | invariato | invariato |
| 3 | Quota min. piano posa rifiuti: <ul style="list-style-type: none"> settore 1 (lotto est/lotto ovest) settore 2 (lotto est/lotto ovest) settore 3 (lotto est/lotto ovest) settore 4 (lotto est/lotto ovest) | 101,50/101,50 m.s.l.m. 101,20/101,20 m.s.l.m. 101,20/101,20 m.s.l.m. 101,25/102,00 m.s.l.m. | 101,50/101,50 m.s.l.m. 101,20/101,20 m.s.l.m. 101,20/101,20 m.s.l.m. 101,25/102,00 m.s.l.m. | invariato | invariato |
| 4 | Quota max argine perimetrale di mitigazione paesaggistica | - | 111,50 m.s.l.m. | invariato | invariato |
| 5 | Quota max coronamento perimetrale invaso in elevazione | 110,60 m.s.l.m. | 113,80 m.s.l.m. | invariato | invariato |
| 6 | Quota max a recupero naturalistico ultimato | 112,60 m.s.l.m. | 115,90 m.s.l.m. | invariato | 115,90 m.s.l.m. |
| 7 | Quota max abbancamento rifiuto | - | 113,10 m.s.l.m. | invariato | 114,15 m.s.l.m. |
| 8 | Quota caposaldo di progetto (Qp) | 108,50 m.s.l.m. | 108,50 m.s.l.m. | invariato | invariato |
| 9 | Quote caposaldo definitive (coordinate Gauss – Boaga) PF1 (Est = 1.461.865; Nord = 4.975.100) PF2 (Est = 1.462.059; Nord = 4.976.019) | PF1 = 106,845 m.s.l.m. PF2 = 105,596 m.s.l.m. | PF1 = 106,845 m.s.l.m. PF2 = 105,596 m.s.l.m. | invariato | invariato |
| 10 | Superficie massima interessata dal progetto di sopraelevazione (copertura finale) | 108.479,87 m ² | 105.825,00 m ² | 106.805 m ² | 106.805 m ² |
| 11 | Superficie area servizi principale (con esclusione strada di servizio discarica) | 1.200,00 m ² | 1.200,00 m ² | invariato | invariato |
| 12 | Superficie strada di servizio discarica interna asfaltata | 3.586,00 m ² | 4.570,00 m ² | invariato | invariato |
| 13 | Superficie strada di servizio discarica interna sterrata (ad uso occasionale) | - | 10.730,00 m ² | invariato | invariato |
| 14 | Volume arginello perimetrale di contenimento in terreno coesivo di $k \leq 10^{-7}$ cm/s | - | 13.085 m ³ | invariato | invariato |
| 15 | Volume copertura finale recupero naturalistico della discarica | 287.713,00 mc ⁽¹⁾ | 296.310,00 m ³ (1) | 299.054 m ³ (2) | 186.988 m ³ (4) |
| 16 | Riduzione volume conferimento rifiuti Settore 1 (comprensivo degli infrastrati) rispetto al progetto autorizzato DDAP1 – 512 - 2011 | - | 13.700,00 m ³ | 8.770 m ³ | invariato |
| 17 | Volume netto rifiuti in sopraelevazione da 109,80 m.s.l.m. a 113,10 m.s.l.m. | - | ≈ 295.380,00 m ³ | 297.420 m ³ | 297.420 m ³ |
| 18 | Incremento di rifiuti per <i>modifica capping</i> 2022 | - | - | - | 112.145 m ³ |
| 19 | Volume infrastrato per sopraelevazione | - | 28.430 m ³ | invariato | invariato |
| 20 | Volume complessivo (compresi infrastrati) autorizzato a seguito delle modifiche | <u>435.362 m³</u> | <u>869.248 m³</u> | <u>874.178 m³</u> | <u>986.323 m³</u> |
| 21 | Volume invaso comprensivo della copertura finale di tipo naturalistico, della massa dei rifiuti, del materiale di copertura giornaliera. | 846.851 m³ | 1.165.558 m³ | 1.173.232 m³ | 1.173.311 m³ |

⁽¹⁾ Volume copertura finale determinato con un multistrato di potenza pari a ≈ 2,80 mt

⁽²⁾ Volume copertura finale determinato con un multistrato di potenza pari a ≈ 1,75 mt

2. LE MODIFICHE PROGETTUALI NON SOSTANZIALI DI ADEGUAMENTO DELLA DISCARICA ALLE PRESCRIZIONI DEL D.LGS. N. 121/2020

Allo scopo di mantenere nel tempo costante il volume totale, le quote plano-altimetriche e, quindi, il profilo morfologico della discarica, autorizzati in ultimo dalla Provincia di Alessandria con decreto n. 145 del 22/07/2022 e DDVA-574-2022 del 29/07/2022, si ritiene necessario procedere in fase gestionale e prima della realizzazione della copertura finale della discarica alla posa in opera di un piccolo strato di rifiuti non pericolosi di ricarica in grado di assorbire quota parte dei fisiologici cedimenti secondari di consolidazione e degli assestamenti dovuti alla trasformazione in biogas della massa dei rifiuti, predisponendo altresì sul *plateau* della discarica un sistema di ottimizzazione dell'umidità interna del corpo di rifiuti smaltiti finalizzato a ridurre i tempi di tale fenomenologia.

Altrimenti detto, i cedimenti e gli assestamenti del corpo dei rifiuti con l'aggiunta di un piccolo strato di rifiuti di ricarica di spessore variabile per ogni settore saranno tali da ricondurre nel breve-medio periodo¹ la volumetria e le quote del profilo morfologico della discarica a quelli attualmente autorizzati, relegando così alle fasi di post-gestione di cui al d.lgs. 36/03 gli interventi di competenza, tra cui quelli di manutenzione della copertura della discarica (ndr: al p.to 5.7 recante "*morfologia della discarica*" è previsto infatti che "(...) *in fase di gestione post-operativa devono essere valutati gli assestamenti e la necessità di conseguenti ripristini della superficie, secondo la periodicità minima previste in tabella 2*").

L'adeguamento progettuale proposto con la seguente modifica si rende oltremodo necessario e doveroso per il caso di specie, ove si consideri che, per la particolare configurazione geometrica della discarica avente superficie d'ingombro molto estesa (~ 106.805 mq per un'altezza utile massima di soli circa 10,55 mt), **anche modeste variazioni depressive nel profilo della discarica potranno essere causa del mancato mantenimento nel tempo delle quote di progetto attese, con la conseguente inottemperanza delle pendenze minime previste per il deflusso e la regimentazione delle acque meteoriche sul plateau della discarica.**

¹ Ragionevolmente di stima in circa 8 (otto) anni a far data dalla posa in opera della copertura finale il termine nel quale cautelativamente si presuppone che i cedimenti/assestamenti siano in gran parte avvenuti e che pertanto la morfologia della discarica sia quella definitiva.

Ciò è tanto più vero allorquando si tenga conto che i cedimenti/assestamenti avverranno certamente in maniera differenziata, considerata la eterogeneità dei *cluster* di conferimento di rifiuto abbancato nel tempo nei singoli lotti e i loro diversi tempi di coltivazione.

3. DEFINIZIONE E NATURA GIURIDICA DEGLI INTERVENTI GESTIONALI EX ANTE COPERTURA DEFINITIVA DELLA DISCARICA.

Nell'ambito degli interventi propedeutici al procedimento di chiusura della discarica, il comma 2 dell'art. 12 del d.lgs. 36/2003, così come integrato e modificato dal d.lgs. 121/2020, specifica che “(...) *la procedura di chiusura della discarica può essere attuata solo dopo la verifica della **conformità della morfologia della discarica** e, in particolare, della capacità di allontanamento delle acque meteoriche, a quella prevista nel progetto di cui all'articolo 9, comma 1, tenuto conto di quanto indicato all'articolo 8, comma 1, lettere c), e) e f-bis)*”.

In particolare, tra gli interventi richiesti dal decreto legislativo di attuazione della direttiva (Ue) 2018/850 vi sono anche quelli operativi gestionali afferenti alla copertura superficiale finale della discarica, ivi compreso la manutenzione degli impianti di biogas e del percolato.

Altrimenti detto, dovrà essere garantito il controllo dell'efficienza e dell'integrità dei seguenti presidi ambientali nella fase post-gestionale della discarica: sistemi barriera, di raccolta percolato, di captazione biogas, etc...

Sotto tal profilo, particolare attenzione, secondo i dettami normativi, dev'essere riposta agli interventi che garantiscono, prima dell'installazione della copertura finale, il raggiungimento delle **condizioni di stabilità meccanica e biologica del corpo di discarica**.

Detti interventi da definirsi progettualmente, a mente dell'Allegato 1, p.to 2.4.3 del d.lgs. 36/03 devono necessariamente tener conto del processo degradativo dei rifiuti, incluse le frazioni cellulosiche.

Or bene, posto che tale fenomenologia “(...) *comporta la trasformazione in biogas di parte della massa dei rifiuti², la valutazione degli assestamenti dovrà tenere conto di tali variazioni, soprattutto in funzione della morfologia della copertura finale*”.

Ne consegue, secondo sempre il dettato normativo, che la copertura superficiale “(...) deve tener conto degli assestamenti previsti (...)” per «tutto il tempo necessario» al raggiungimento delle predette condizioni di stabilità biologica e meccanica [leggasi:

² Circa 1/3 secondo l'originario d.lgs. 36/03.

resistenza agli assestamenti ed ai fenomeni di subsidenza localizzata (cfr. p.to 2.4.3 dell'Allegato 1 del d.lgs. n. 121/2020)].

Concetto ribadito al p.to 2.5 del citato Allegato 1 del d.lgs. 36/03 recante “*controllo del gas*”, laddove il Legislatore ha precisato che gli impianti per l'estrazione del gas devono garantire «la massima efficienza di captazione del biogas» tenendo conto del «naturale assestamento della massa dei rifiuti depositati».

In linea con tali principi si è pronunciato più volte il MinAmbiente rispondendo a diverse istanze di interpelli di cui all'art. 3-septies del d.lgs. 152/2006. Vediamoli.

a) Con risposte ad interpelli Mite, 8 febbraio 2022, prot. n. 14980 (ndr: Provincia di Alessandria) e Mase, 3 gennaio 2024, n. 1032 (Provincia di Barletta-Andria-Trani), il Ministero ha chiarito definitivamente come sia “(...) *rimesso alla discrezionalità del gestore dell'impianto di discarica la scelta di procedere alla copertura finale per come progettata e già autorizzata, ovvero di presentare all'autorità competente al rilascio del titolo abitativo una proposta di modifica della copertura finale con adeguamento ai nuovi criteri costruttivi*. Quest'ultima ipotesi non è quindi preclusa per le discariche esistenti, purché le scelte progettuali siano in linea con le disposizioni di nuova introduzione e che le stesse garantiscano la tutela dell'ambiente e della salute, senza alcun pregiudizio per la gestione post operativa della discarica”.

b) Più propriamente per il caso che ci occupa, Confindustria, con istanza prot. n. 0155540 del 12 dicembre 2022 ha posto una serie di quesiti tra cui anche quelli rivolti alle modalità operative della posa in opera della copertura finale della discarica in relazione alla valutazione dei cedimenti e alla sua tempistica. In particolare, sono stati posti i seguenti tre quesiti:

“b.1) se la modifica normativa introdotta al paragrafo 2.4.1, Allegato 1, d.lgs. 36/2003 introdotta dal d.lgs. 121/2020, che dispone: “dopo due anni dall'ultimo conferimento, a seguito della valutazione di eventuali cedimenti secondari del corpo discarica, deve essere predisposto il sistema di copertura finale, da completarsi entro i successivi 36 mesi”, non debba essere applicabile alle discariche autorizzate precedentemente all'entrata in vigore dello stesso;

- b.2)** *se il biennio occorrente per la valutazione degli eventuali cedimenti, nonché la tempistica necessaria per la realizzazione della copertura finale, debbano essere ricompresi all'interno del periodo di gestione operativa della discarica oppure in quello di gestione post-operativa. In particolare, si chiede conferma che le operazioni successive alla chiusura della discarica (ivi compresa la realizzazione della copertura superficiale finale eventualmente preceduta dalla copertura temporanea) siano ricomprese all'interno della gestione post-operativa;*
- b.3)** *se il termine di due anni dall'ultimo conferimento per la predisposizione della chiusura definitiva debba essere considerata come tempistica massima, dando pertanto la facoltà al gestore, dopo aver verificato l'assenza di assestamenti sul corpo discarica, di effettuare una copertura definitiva in un tempo inferiore".*

Le risposte ai tre quesiti sono state le seguenti:

rif. b.1) Previo rinvio alla risposta dell'interpello della Provincia di Alessandria sub a), il Ministero ha nuovamente ricordato come sia rimesso alla discrezionalità del gestore dell'impianto di discarica la scelta di procedere alla copertura finale per come progettata e già autorizzata, ovvero di presentare all'autorità competente una proposta di modifica della copertura finale con adeguamento ai nuovi criteri costruttivi, ipotesi consentita dal d.lgs. 121/2020, **purché il sistema di copertura finale tenga conto degli assestamenti del corpo discarica**, come peraltro già previsto all'allegato 1, punto 2.4.3 del d.lgs. 36/2003 ex-ante d.lgs. 121/2020.

Più precisamente il MinAmbiente ha così chiarito (si riporta testualmente): **"Resta fermo che il sistema di copertura finale deve comunque tener conto degli assestamenti del corpo discarica, come peraltro già previsto all'allegato 1, punto 2.4.3 del d.lgs. n. 36/2003, prima delle modifiche intervenute con il d.lgs. n. 121/2020: «... omissis ... Poiché la degradazione dei rifiuti biodegradabili, incluse le componenti cellulosiche, comporta la trasformazione in biogas di circa un terzo della massa dei rifiuti, la valutazione degli assestamenti dovrà tenere conto di tali variazioni, soprattutto in funzione alla morfologia della copertura finale. La copertura superficiale finale come sopra descritta deve garantire l'isolamento della discarica anche tenendo conto degli assestamenti previsti ed**

a tal fine non deve essere direttamente collegata al sistema barriera di confinamento. La copertura superficiale finale della discarica nella fase di post esercizio può essere preceduta da una copertura provvisoria, la cui struttura può essere più semplice di quella sopra indicata, finalizzata ad isolare la massa di rifiuti in corso di assestamento. Detta copertura provvisoria deve essere oggetto di continua manutenzione al fine di consentire il regolare deflusso delle acque superficiali e di minimizzare l'infiltrazione nella discarica. La copertura superficiale finale deve essere realizzata in modo da consentire un carico compatibile con la destinazione d'uso prevista. ... omissis ...»”.

rif. b.2) Con riferimento al secondo quesito il MinAmbiente ha rinviato alla ben nota procedura di chiusura dettagliata all'articolo 12, d.lgs. 36/2003, a mente del quale la chiusura della discarica avviene dopo l'ispezione degli enti di controllo, verifica che non elimina la responsabilità del gestore anche nella fase successiva alla chiusura, in ordine a manutenzione, sorveglianza e controllo nella fase di gestione post-operativa per tutto il tempo durante il quale la discarica può comportare rischi per l'ambiente.

Dall'esame degli allegati al d.lgs. 36/2003 il Ministero ha confermato, sotto il profilo giuridico, “(...) che la fase di chiusura della discarica, intesa come la copertura finale definitiva dell'invaso, è ricompresa nel piano di gestione operativa, mentre la gestione post-operativa, da mettersi in atto dopo il ripristino ambientale, consiste in attività di manutenzione e controllo delle opere e dei presidi”.

rif. b.3) Il terzo quesito è stato risolto dal MinAmbiente affermando come “(...) la realizzazione della copertura definitiva è condizionata dalla verifica dell'assenza di eventuali cedimenti secondari i cui tempi di norma non sono standardizzabili essendo legati primariamente alla degradazione della componente biodegradabile presente nei rifiuti”. Il termine minimo di due anni dall'ultimo conferimento dei rifiuti è dunque puramente indicativo. Esso è stato introdotto al fine di dare riscontro al parere della Commissione Parlamentare Ambiente, Territorio e Lavori Pubblici del 29 luglio 2020 sulla “(...) necessità di

*stabilire una tempistica certa per l'«**inizio della valutazione per la predisposizione della copertura finale**» al fine di garantire un periodo minimo di assestamento del corpo discarica³, individuando un periodo minimo di 2 anni, a partire dal quale debba essere valutata l'esistenza delle condizioni tecniche per la realizzazione della copertura finale”.*

In ultimo, ma non per questo meno importante, sull'argomento si è pronunciata anche la giurisprudenza del Consiglio di Stato. La Sez. IV, con decisione n. 5766 del 02 ottobre 2020 ha evidenziato come “(...) il quantitativo di rifiuti abbancabili in discarica dipenda dalla volumetria disponibile e dagli assestamenti della massa dei rifiuti. La discarica è considerata esaurita esclusivamente con riferimento al raggiungimento delle quote dei profili autorizzati di progetto e non al raggiungimento di determinati quantitativi di rifiuti autorizzati (...) dipendendo - il concetto giuridico di esaurimento - da un elemento «mobile» (ossia, il raggiungimento delle quote dei profili autorizzati, suscettibili di eventuale abbassamento per assestamento), anziché da un elemento predeterminato e fisso (ossia, il raggiungimento di determinati quantitativi di rifiuti autorizzati)”.

Ne consegue, in definitiva, che **ogni valutazione sottesa alla cd. «chiusura della discarica» non può assolutamente e oggettivamente prescindere anche da questa ulteriore circostanza di fatto dalla quale si ritiene che non sia lecito discostarsi.**

* - * - *

Alla luce di quanto sopra, tenendo conto in particolare, a mente del d.lgs. 36/2003, che:

- la degradazione dei rifiuti biodegradabili, incluse le componenti cellulosiche, **comporta la trasformazione in biogas (di circa un terzo) della massa dei rifiuti;**
- la valutazione degli assestamenti dovrà tener conto delle variazioni di cui sopra;

³ Questo periodo preparatorio alla realizzazione delle opere definitive di chiusura della discarica, può risultare particolarmente rilevante in termini temporali sicuramente negli impianti in cui il fenomeno dei cedimenti risulta importante e difficilmente compatibile con la realizzazione del sistema multistrato del capping di chiusura in tempi brevi, tant'è che risulta necessario attendere l'attenuarsi (se non il quasi esaurimento) del cedimento per poter realizzare le opere di chiusura finale.

- la copertura superficiale finale deve garantire l'isolamento della discarica anche tenendo conto degli assestamenti previsti,

occorre in definitiva per il caso che ci occupa:

- a) procedere ad una valutazione assoluta e differita dell'aliquota degli assestamenti correlati alla produzione del biogas per ogni singolo settore di discarica;
- b) previa oggettiva valutazione dell'umidità interna del corpo dei rifiuti, predisporre un sistema modulare di ottimizzazione del fattore di umidità interna della discarica;
- c) procedere ad una valutazione complessiva dei cedimenti tenendo conto anche dell'aliquota sub a);
- d) procedere ad una definitiva valutazione degli interventi tecnico-operativi e gestionali da mettere in campo prima della posa ultima della copertura finale della discarica, ovvero valutare lo spessore dello strato di rifiuti di ricarica da posizionare al di sotto di detta copertura affinché si possa ragionevolmente raggiungere e mantenere nel medio-lungo termine (cioè allorquando i cedimenti secondari e quota parte degli assestamenti dovuti alla trasformazione in biogas della massa dei rifiuti si saranno in gran parte esauriti) le quote altimetriche di progetto autorizzate e, conseguentemente, la morfologia della discarica.

Di tutto quanto sopra risponde, nel prosieguo, il seguente rapporto tecnico.

4. STIMA DELL'ASSESTAMENTO MEDIO GENERALIZZATO E DEGLI ASSESTAMENTI MASSIMI DI OGNI SINGOLO SETTORE DELLA DISCARICA.

Nel rinviare alla lettura della relazione specialistica redatta da Emendo Srl il 12/01/2024 recante “*Valutazione produttività del biogas e stima degli assestamenti ad esso relativi*” (**doc. 1**), di seguito verranno richiamati solo i dati e i risultati desunti da tale dettagliata analisi al fine di determinare con sufficiente approssimazione gli assestamenti massimi dovuti dalla sola trasformazione in biogas della massa dei rifiuti conferiti a tutto il 2023 nella discarica di Solero, a partire dal calcolo dell'assestamento medio generalizzato dell'intera discarica.

E' utile precisare come tali assestamenti rappresentino solo un'aliquota dell'intero spostamento generalizzato, dovendo tale complessiva deformazione comprendere anche i cedimenti secondari di consolidazione della massa dei rifiuti per effetto di molteplici fattori più oltre illustrati, ivi compreso quelli dovuti al dilavamento nella fase di lisciviazione dei rifiuti ad opera del flusso idrico delle acque meteoriche che, penetrando all'interno del corpo di discarica, generano il cd. «*percolato*»⁴.

Dall'analisi merceologica sulla composizione dei rifiuti ai fini della produttività del biogas di cui alla citata relazione specialistica del 12/01/2024 della ditta Emendo Srl (cfr. **doc. 1**) si apprende, infatti, come a fronte dei 763.420 tonnellate di rifiuti non pericolosi conferiti in discarica nel periodo 2012-2023, e precisamente:

1° settore: 158.919 tonn;

2° settore: 195.442 tonn;

3° settore: 203.411 tonn;

4° settore: 205.648 tonn,

i rifiuti assimilabili ai cd. «*non putrescibili*» (RNP) costituiscano mediamente il 62,40% del totale smaltito.

⁴ Ai sensi dell'art. 2, comma 1, lett. m) del d.lgs. 36/2003 si definisce «*percolato*»: “*qualsiasi liquido che si origina prevalentemente dall'infiltrazione di acqua nella massa dei rifiuti o dalla decomposizione degli stessi e che sia emesso da una discarica o contenuto all'interno di essa*”.

A tale importante componente è associato in particolare il cedimento secondario.

Per contro, i rifiuti assimilabili a quelli velocemente putrescibili (RVP) si attestano mediamente sul 5,52% mentre quelli lentamente putrescibili (RLP) oscillano tra il 33,76% e il 30,38% (valore medio = 32,07%) del totale.

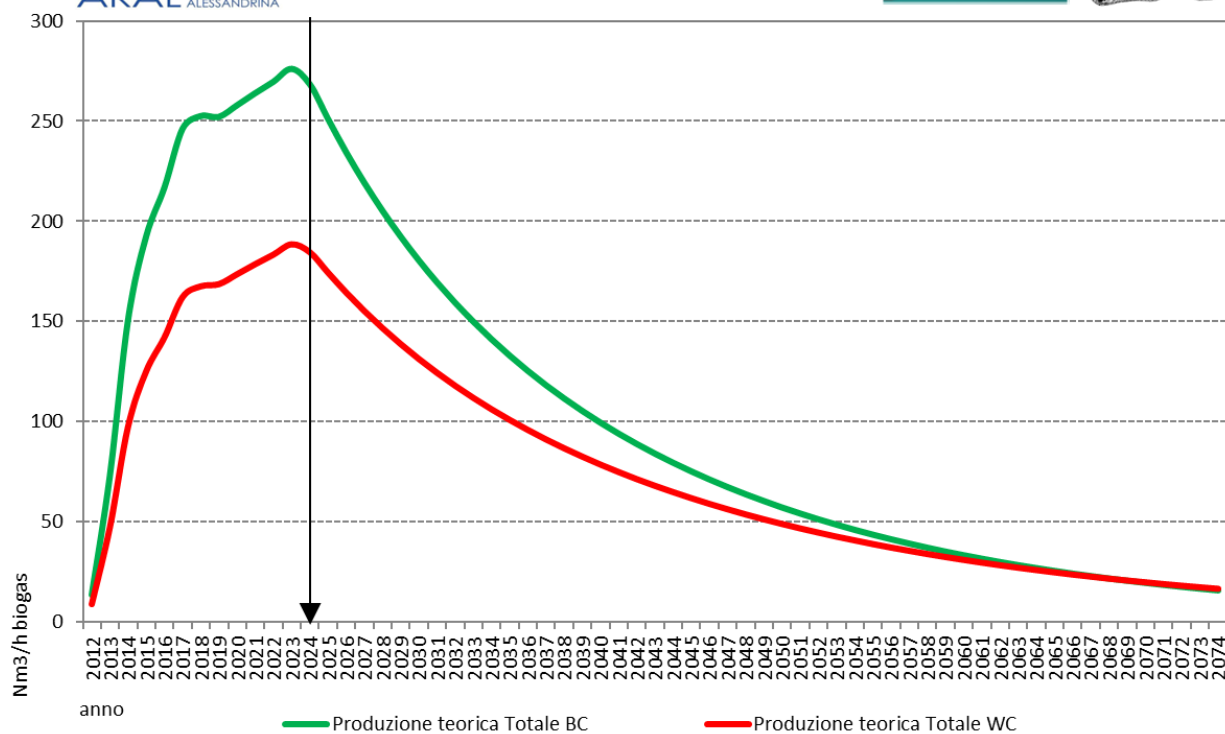
A queste due ultime frazioni, invece, è associato sia la produzione specifica (e quindi complessiva) del biogas, intesa come «*la capacità complessiva di una tonnellata di rifiuto a produrre biogas al variare della composizione e delle condizioni fermentative*⁵», sia gli assestamenti dovuti alla loro trasformazione in biogas.

Adottando il modello di calcolo BIO-7, Emendo ha determinato la produzione di biogas nei due casi limite estremi, considerando rispettivamente valori “*ottimistici*” (**Best case**) e “*pessimistici*” (**Worst case**) in ordine all’assunzione di parametri variabili.

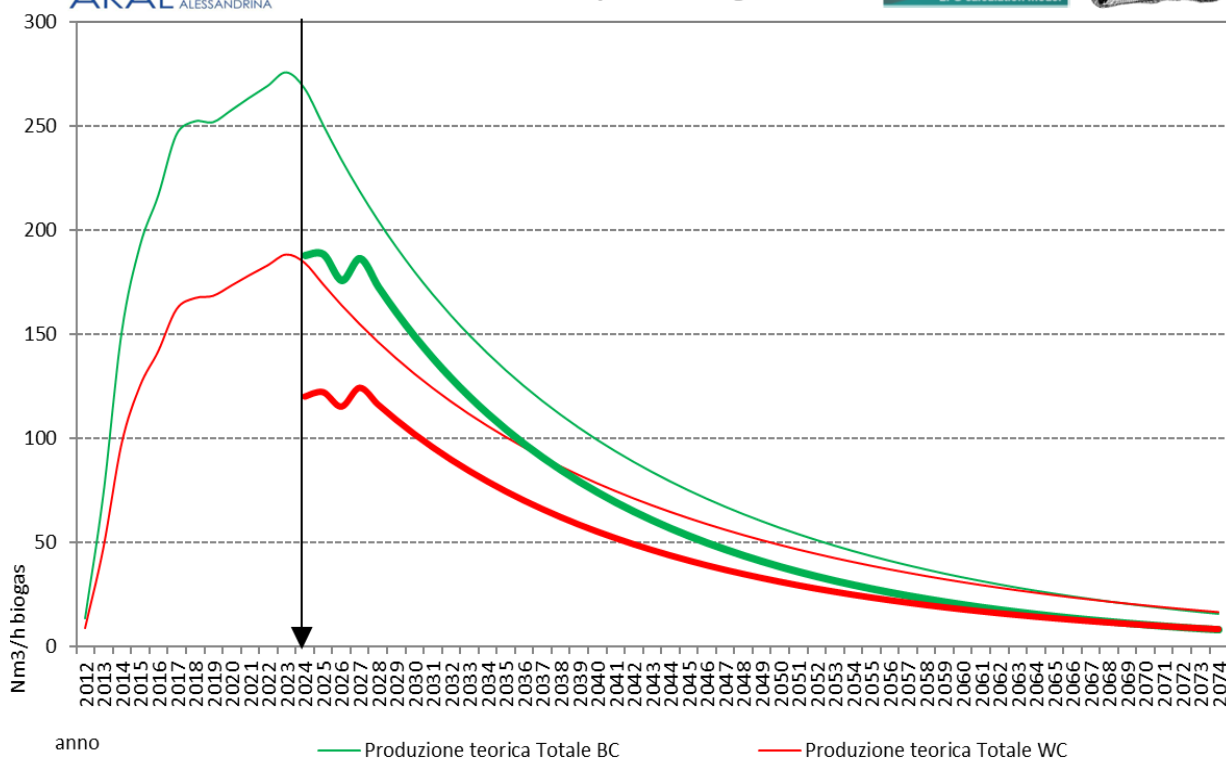
Altrimenti detto, ai fini della produzione di biogas sono stati identificati due scenari: quello afferente alla maggior produttività e quello relativo alla peggior produttività.

Di talché l’andamento della «*reale produttività e captabilità del biogas*» sarà sicuramente ricompresa all’interno di questi due possibili scenari limite.

⁵ Al variare delle condizioni effettive e delle caratteristiche della discarica all’interno della quale avviene il fenomeno di trasformazione della massa dei rifiuti in biogas (dimensionali, tipologiche, costruttive, gestionali e di localizzazione geografica ed ambientale) si hanno differenti produzioni di biogas a parità di quantità di rifiuto velocemente e lentamente putrescibile smaltito.



Produzione teorica biogas discarica complessiva



Da quest'ultimo grafico si evince come dal 2024, anno di massima produttività, la captabilità del biogas dalla discarica sia compresa tra un minimo di 120 ad un massimo di 190 Nm³ LFG50⁶ per poi progressivamente regredire negli anni successivi.

4.1 L'assestamento medio generalizzato

Dalla citata relazione allegata R-24400-01 del 12/01/2024 redatta dalla ditta Emendo Srl in ordine a tale specificità (cfr. **doc. 1**), a cui nuovamente si rimanda per un esame di dettaglio, arrivano precise risposte anche in merito agli assestamenti dovuti alla trasformazione in biogas della massa dei rifiuti.

In particolare, considerando che mediamente 1 tonnellata di rifiuto smaltito in discarica produce 68,76 Nm³ LFG50 e che 1 Nm³ LFG50 = 1,050 Kg, per ogni tonnellata di rifiuto smaltito si produrranno 72,23 Kg di biogas LFG50 equivalenti al 7,22%.

Considerando infine che la produzione teorica complessiva del biogas a partire dal 2012 (anno di inizio conferimento rifiuti) sino a tutto al 2074 è pari a 51.922.996 Nm³ di biogas LFG50 e che quella generata a tutto il 2023 è stata pari a 17.990.811 Nm³ LFG50, ne consegue che il 34,65% del fenomeno degradativo si è già verificato e che, conseguentemente, l'assestamento correlabile a tale trasformazione si sia ipoteticamente già esaurito.

A complemento, quindi, gli assestamenti futuri che verranno generati dalla sola produzione di biogas corrisponderanno al 65,32% dell'intero fenomeno degradativo/ossidativo.

Di talché, tenendo conto dello spessore massimo dei rifiuti conferiti, pari a 10,55 mt, l'assestamento medio generalizzato dovuto alla sola trasformazione in biogas della massa dei rifiuti dell'intero sito di discarica, inteso quest'ultimo come un *unicum* lotto, sarà pari a:

$$10,55 \text{ m} \times 7,223\% \times 65,35\% = 0,498 \text{ mt}$$

⁶ L'unità di misura del biogas e il Nm³ LFG50, ovvero di una miscela di biogas con metano al 50% (LFG = LandFill Gas).

4.2 I massimi assestamenti di ogni singolo settore di discarica

Ripetendo il calcolo sopra esposto su ogni singolo settore di discarica, assumendo il relativo spessore massimo di rifiuti e valutando l'incidenza della produttività teorica di biogas in relazione alla diversa cronologia dei conferimenti dei rifiuti (1° settore: più recente; 4° settore: più vecchio) è possibile determinare gli assestamenti massimi di ogni singolo settore.

In particolare, si osserva come, in ragione delle configurazioni topografiche di fondo vasca, degli 8 (otto) lotti costituenti i 4 (quattro) settori di discarica (ndr: 2 lotti per ogni settore) le massime altezze di progetto autorizzato dei rifiuti (e quindi dei cedimenti/assestamenti conseguenti) risultino collocate in 7 (sette) lotti su 8 (otto) in prossimità del perimetro della discarica e non nella zona «colmo», così come i seguenti dati testimoniano in tutta evidenza:

a) zona «colmo» della discarica: $(114,15 - 104,00) = 10,15$ mt costante per tutti i 4 settori;

b) zona «perimetrale» della discarica:

- $112,05 - 101,50 = 10,55$ m Settore 1 (lato autostrada)
- $112,05 - 101,20 = 10,85$ m Settore 2 (centrale)
- $112,05 - 101,20 = 10,85$ m Settore 3 (centrale)
- $112,05 - 102,00 = 10,05$ m lotto ovest del Settore 4 (più vecchio)
- $112,05 - 101,25 = 10,80$ m lotto est del Settore 4 (lato pesa ingresso)

Or bene, considerando che l'incidenza analitica della produzione di biogas (al netto di quella già avvenuta) per ogni singolo settore è pari a:

1° settore: 82,96%

2° settore: 62,50%

3° settore: 60,66%

4° settore: 59,30% ,

si ottengono i seguenti massimi assestamenti in corrispondenza della zona perimetrale:

$$1^{\circ} \text{ settore: } 10,55 \text{ m} \times 7,223\% \times 82,96\% = 0,63 \text{ m}$$

$$2^{\circ} \text{ settore: } 10,85 \text{ m} \times 7,223\% \times 62,50\% = 0,49 \text{ m}$$

$$3^{\circ} \text{ settore: } 10,85 \text{ m} \times 7,223\% \times 60,66\% = 0,48 \text{ m}$$

$$4^{\circ} \text{ settore: } 10,80 \text{ m} \times 7,223\% \times 59,30\% = 0,46 \text{ m}$$

Per contro, l'assestamento in corrispondenza del colmo sarà pari a:

$$1^{\circ} \text{ settore: } 10,15 \text{ m} \times 7,223\% \times 82,96\% = 0,61 \text{ m}$$

$$2^{\circ} \text{ settore: } 10,15 \text{ m} \times 7,223\% \times 62,50\% = 0,46 \text{ m}$$

$$3^{\circ} \text{ settore: } 10,15 \text{ m} \times 7,223\% \times 60,66\% = 0,44 \text{ m}$$

$$4^{\circ} \text{ settore: } 10,15 \text{ m} \times 7,223\% \times 59,30\% = 0,43 \text{ m}$$

5. L'OTTIMIZZAZIONE DELL'UMIDITA' INTERNA DEL CORPO DEI RIFIUTI

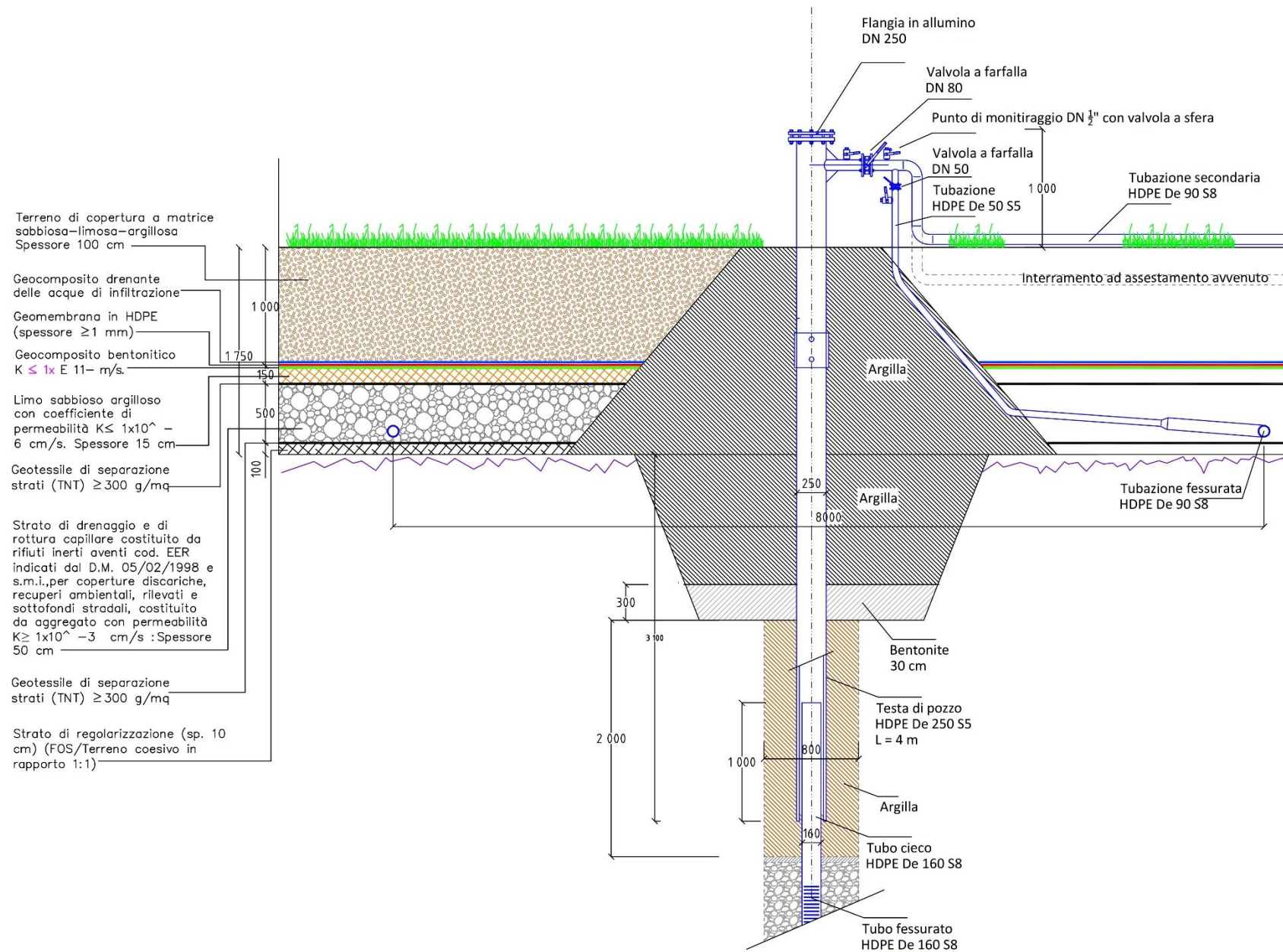
Con il duplice scopo di ottemperare alle disposizioni del d.lgs. 36/03 che *«impongono l'obbligo»* dell'estrazione del biogas dalla discarica con la **massima efficienza di captazione** e di utilizzarlo preferibilmente per produrre energia, ovvero di sottoporlo a termodistruzione in idonea camera di combustione in caso d'impossibilità del recupero energetico, e di comprimere i tempi della produzione del biogas e, quindi, degli assestamenti dovuti alla trasformazione in biogas della massa dei rifiuti, si ritiene di dotare i pozzi duali di captazione del biogas e del percolato della discarica di un sistema corticale superficiale immerso all'interno dello strato drenante di rottura capillare in grado di:

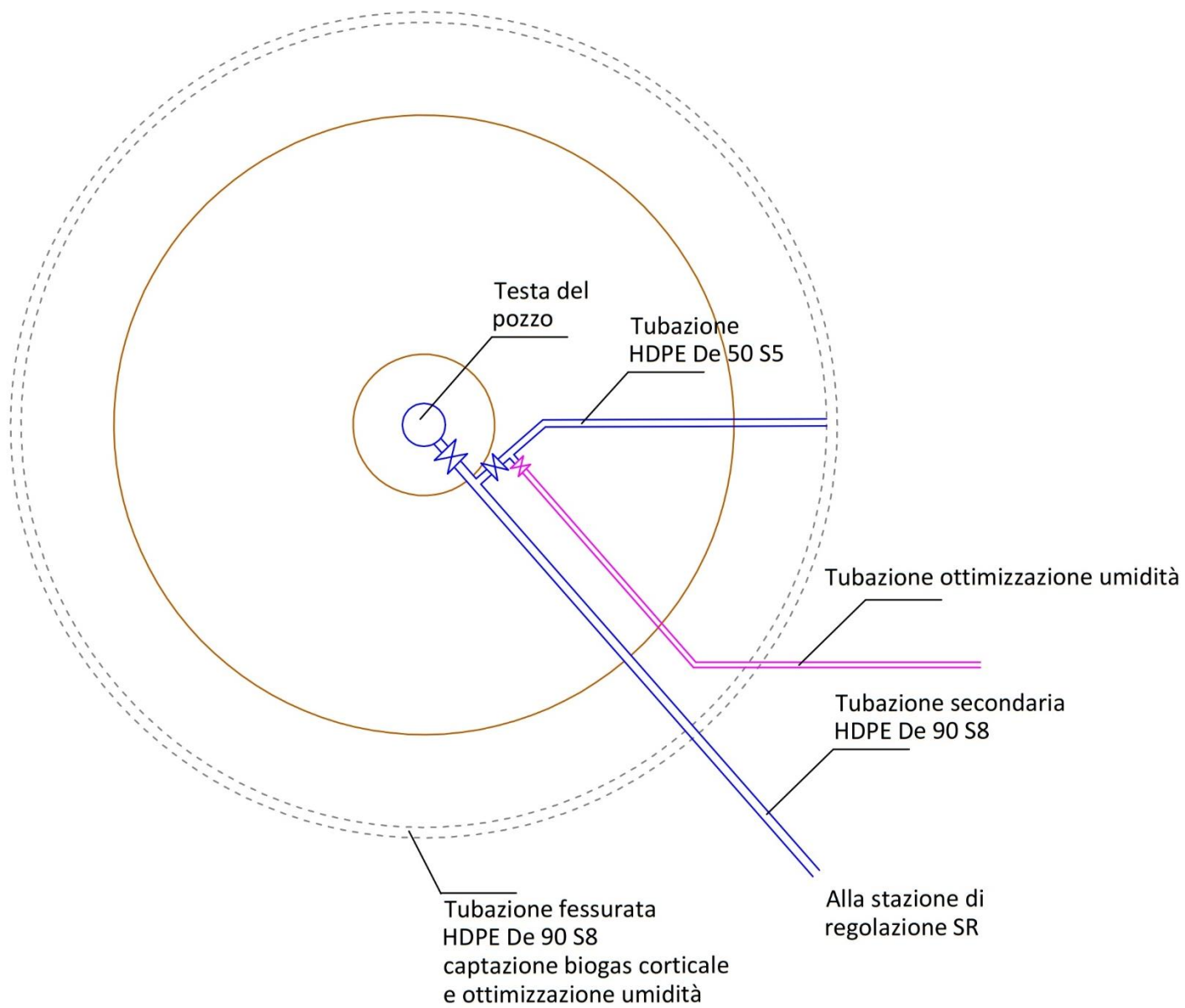
- a) captare e convogliare il biogas residuo che si potrebbe accumulare all'interno di tale strato;
- b) modulare e ottimizzare l'umidità relativa dei rifiuti addizionandola nei periodi più siccitosi con la condensa e/o il percolato prodotto attraverso una tubazione fessurata in HDPE De 90 S8 concentrica di diametro 8,00 mt secondo il seguente schema progettuale, peraltro già in dotazione in diverse discariche piemontesi per rifiuti speciali non pericolosi (Cerro Tanaro, Cambiano, Piasco e Venasca, ecc..., **doc. A**)⁷.

Con questa tecnica tutto l'incremento di umidità apportato ai rifiuti verrà trasformato nella fermentazione, senza quindi incrementare la produzione dei percolati.

⁷

– Autorizzazioni discarica di Cerro Tanaro (AT): D.D. n. 1008 del 08/05/2018 e D.D. n. 1011 del 08/05/2018.
– Autorizzazioni discarica di Piasco/Venasca (CN): prot. n. 293/402/2022 del SUAP-Unione Montana Valle Varaita del 22/01/2024; Parere favorevole del 29/12/2023 in ordine al riesame con valenza di rinnovo AIA della Provincia di Cuneo.
– Autorizzazione discarica Cambiano (TO); località Benne: D.D. n. 1354 del 29/03/2021 della Città Metropolitana di Torino.





Sull'argomento corre l'obbligo precisare quanto segue.

Com'è noto, la cinetica di produzione del biogas varia in funzione dell'umidità relativa dei rifiuti, soprattutto quelli lentamente putrescibili (RLP):

- quando il rifiuto è “*secco*” la cinetica rallenta ed il potenziale organico degrada molto lentamente;
- quando invece il rifiuto è “*umido*” la cinetica accelera ed il potenziale organico viene degradato rapidamente favorendo la mineralizzazione dei rifiuti e la trasformazione in biogas della massa dei rifiuti.

L'umidità interna di una discarica è inoltre condizionata sia da fattori caratteristici dei rifiuti conferiti che da fattori ambientali, quali le precipitazioni meteo. Questi due fattori di “*apporto*” di umidità al bilancio idrologico vengono contrastati da altri fattori di “*sottrazione*” di umidità; tra i più rilevanti: la captazione dei percolati ed il “consumo” di acqua dallo stesso processo fermentativo.

In ordine alle precipitazioni atmosferiche si osserva come negli ultimi 30 anni la media delle precipitazioni per la Provincia di Alessandria abbia fatto registrare 650 mm di pioggia annuale.

Per contro, la stazione meteo ubicata presso la discarica di Solero, operativa solo dal 2020, ha fatto registrare nell'ultimo triennio 2020-2023 valori estremamente bassi, dell'ordine dei 450 mm.

Se a tale dato si aggiunge che con la realizzazione della copertura definitiva della discarica i rifiuti *ob torto collo* ridurranno ulteriormente il fattore di umidità relativa, si può ben comprendere come i tempi di trasformazione in biogas della massa dei rifiuti possano addirittura raddoppiare.

A titolo esemplificativo, se si pone a confronto una massa di rifiuti con una «*bassa*» umidità relativa (UR), ad esempio del 35%, con una identica massa di rifiuti ma con una «*media*» umidità relativa, ad esempio del 55%, i tempi di semi-trasformazione dei rifiuti velocemente putrescibili (RVP) e dei rifiuti lentamente putrescibili (RLP) saranno i seguenti:

Ipotesi discarica secca (ipotesi UR 35%):

- Tempo di semi-trasformazione componente RVP: 4,827 anni
- Tempo di semi-trasformazione componente RLP: 14,481 anni

Ipotesi discarica umida (ipotesi UR 55%):

- Tempo di semi-trasformazione componente RVP: 2,604 anni
- Tempo di semi-trasformazione componente RLP: 7,812 anni

Poiché l'umidità relativa non influisce sulla produzione complessiva di biogas che, com'è noto, è legata principalmente alla composizione del rifiuto, ne consegue che, a parità di biogas prodotto, la cinetica del fenomeno degradativo di una massa di rifiuti di media umidità relativa sarà tale da dimezzare i tempi di semi-trasformazione in biogas.

Alla luce di quanto sopra non vi è chi non veda come sia fondamentale, in ragione delle condizioni ambientali, modulare ed ottimizzare l'umidità relativa della discarica.

E ciò, si badi, non solo nello scenario della propagazione degli assestamenti nel tempo, ma anche in quello dell'impegno storico di gestione in post-chiusura della discarica.

Correttamente Emendo Srl ha fatto notare come rallentare o addirittura “sospendere” forzatamente il fenomeno fermentativo dei rifiuti voglia dire trasferire alle prossime generazioni l'impegno di gestione dei biogas. Concetto in contrasto con quello fondamentale di massima efficienza e, quindi, di riduzione e di esaurimento degli impatti della discarica entro i tempi di post-gestione.

Si consiglia pertanto di verificare oggettivamente lo stato di umidità interna della discarica, preferibilmente nel momento delle prossime perforazioni dei rifiuti per la costruzione dei pozzi duali (unica occasione valida di riscontro della umidità) e di attuare procedure di ottimizzazione della stessa finalizzate al controllo e allo sviluppo del fenomeno di fermentazione.

Infine, si precisa che “*ottimizzazione*” della umidità interna alla discarica **non vuole dire solo ed esclusivamente “ricircolo dei percolati”**, tecnica ovviamente da evitare, ma vuole dire anche e soprattutto “*controllo della umidità interna della discarica*”.

Sotto tale ultimo aspetto si richiama il recente intervento relativo al «rispristino post-operativo della discarica cessata di Vizzolo Predabissi (MI)» a cura della Città Metropolitana di Milano, apparso sulla rivista “Rifiuti, bollettino di informazione normativa n. 324 (02/24)” del febbraio 2024 (doc. 2).

Tra gli interventi del progetto esecutivo vi è anche quello di “*adeguamento funzionale del sistema di captazione del biogas al nuovo capping, con possibilità di applicare sub-irrigazione di percolato e/o acqua e air venting*”.

In particolare si apprende come “(...) *nello studio sulla produzione del biogas siano state sviluppate diverse valutazioni di fattibilità e che a seguito di considerazioni emerse è stato scelto per il progetto elaborato l'adeguamento del sistema di captazione del biogas al nuovo capping, associato ad interventi atti a consentire la sub-irrigazione dei rifiuti, laddove necessario, al fine di ottimizzare il fenomeno fermentativo con un apporto mirato di umidità così da accelerare e favorire i processi di «mineralizzazione»*”, oltre alla captazione corticale del biogas (distinta da quella profonda).

Sempre dal citato “Studio sulla produzione di biogas” è stato evidenziato come: “*lo scopo di una efficiente copertura finale è principalmente quello di ridurre la produzione del percolato e quindi il conseguente rischio potenziale di inquinamento delle falde o dei corpi idrici superficiali (il Lambro); ma una eccessiva perdita di umidità della massa dei rifiuti potrebbe implicare una riduzione od addirittura la “sospensione” dei fenomeni di fermentazione anaerobica dei rifiuti e quindi la “proroga”, a tempi indeterminabili, della naturale degradazione della componente organica contenuta nella massa dei rifiuti.*

Ne consegue che un perfetto sistema di copertura impermeabile garantisce una adeguata salvaguardia a protezione delle falde ma rischia di “prorogare” ad un tempo indefinibile il potenziale di impatto ambientale della stessa discarica. Sulla base di tale concetto si è ritenuto necessario studiare e proporre un sistema di ottimizzazione della umidità interna alla discarica mediante un progetto di sub-irrigazione. Il maggior beneficio atteso dalla applicazione del progetto di sub-irrigazione riguarda quindi la sostanziale accelerazione dei processi di stabilizzazione della sostanza organica contenuta nei rifiuti”.

E' stato dunque realizzato il sistema precedentemente descritto che "(...) *consente la regolazione del contenuto di umidità dei rifiuti della discarica, associata ad una attenta ed ottimale gestione dell'impianto di captazione del biogas* (...)".

L'azione di sub-irrigazione progettata è stata prevista esclusivamente come locale, senza estensione planimetrica. In pratica il percolato soggiacente sul fondo dei pozzi (zona presumibilmente satura) potrà essere semplicemente "*spostato*" nella parte superiore, nel contorno del pozzo, dove è presente una condizione di carenza di umidità (zona secca). La logica è quindi quella di "*distribuire razionalmente*" l'umidità nel contorno del pozzo incrementando la produzione di biogas e riducendo la produzione di percolati per effetto della trasformazione biochimica.

Tale sistema inoltre non ha solo la finalità di ottimizzare l'umidità della discarica ed accelerarne la degradazione biochimica ma anche la funzione di captazione dei biogas intercettati dal sistema sub-corticale di captazione del biogas.

Se si ritiene, per converso, che la soluzione di ottimizzazione dell'umidità relativa prospettata per la discarica di Solero non sia assentibile, vuol dire dunque che la Provincia di Alessandria accetta sotto la sua stretta ed esclusiva responsabilità che quote parti di anidride carbonica CO₂ e di metano CH₄ possano liberarsi in atmosfera, allorquando cioè la concentrazione di metano non sarà tale da innescare le condizioni della combustione del gas prodotto⁸ ($\leq 25\%$).

Sotto tal profilo, giova ricordare come la produzione e l'emissione di quantitativi di gas climalteranti si pongano in contrasto con l'obiettivo generale individuato:

- a) dall'articolo 1 della direttiva 1999/31/CE del 26 aprile 1999 relativa alle discariche di rifiuti, confermato dalla direttiva (UE) 2018/850 del 30 maggio 2018 volto a "*(...) a prevenire o a ridurre il più possibile le ripercussioni negative sull'ambiente, in particolare l'inquinamento delle acque superficiali, delle acque di falda, del suolo e dell'aria, e sull'ambiente globale, compreso l'effetto serra, nonché i rischi per la*

⁸ La mancata captazione e/o combustione della quota di metano, cd. «*effetto serra*», comporta un quantitativo di emissione equivalente di anidride carbonica CO₂ eq. moltiplicando tale dato per il fattore «28», ovvero per il potenziale di surriscaldamento globale determinato dal Global Warming Potential (GWP).

salute umana risultanti dalle discariche di rifiuti, durante l'intero ciclo di vita della discarica";

b) dall'articolo 13 della direttiva 2008/98/CE del 19 novembre 2008, secondo cui *"gli Stati membri prendono le misure necessarie per garantire che la gestione dei rifiuti sia effettuata senza danneggiare la salute umana, senza recare pregiudizio all'ambiente e, in particolare:*

b.1) senza creare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo, la flora o la fauna;

b.2) senza causare inconvenienti da rumori od odori e

b.3) senza danneggiare il paesaggio o i siti di particolare interesse".

6. STIMA DEI CEDIMENTI SECONDARI E DETERMINAZIONE DELLE QUOTE MASSIME DI RICARICA DEI RIFIUTI NEI QUATTRO SETTORI DI COLTIVAZIONE DELLA DISCARICA

6.1 Premessa

Ai fini del calcolo dei cedimenti secondari di seguito illustrato, sono state prese in considerazione le caratteristiche di laboratorio dei sovvalli dei rifiuti urbani indifferenziati e speciali oggetto di smaltimento nelle discariche di Regione Calogna sita nel Comune di Solero (AL) e di C.na Boschetto sita nel Comune di Cerro Tanaro (AT).

Inoltre, nel determinare i coefficienti di compressibilità primaria e secondaria si è tenuto conto dell'evoluzione cronologica dei conferimenti nei singoli settori della discarica in esame, delle condizioni microbiche, del contenuto d'organico e delle condizioni di saturazione dei vari strati di rifiuti.

6. 2 Le proprietà fisiche caratteristiche dei sovvalli dei rifiuti urbani indifferenziati e speciali.

Tra le più importanti caratteristiche fisiche dei rifiuti urbani indifferenziati (R.U.I.) oggetto di trattamento presso l'impianto di TMB di Castelceriolo in dotazione ad Aral SpA che sono stati conferiti nella discarica in progetto e quelli ancora da smaltire possiamo annoverare il contenuto d'acqua, il peso dell'unità di volume ed il contenuto di sostanza organica.

Nel determinare tali proprietà bisogna tenere presente le caratteristiche specifiche dei materiali da discarica; infatti i rifiuti generalmente contengono molti tipi di costituenti, usualmente molto porosi e non completamente saturi.

Landva & Clark (1990) hanno messo in evidenza come a causa della natura porosa di alcuni costituenti sia necessario distinguere tra vuoti intraparticellari (all'interno delle particelle) ed interparticellari (tra le particelle).

È possibile avere, per esempio, i vuoti intraparticellari parzialmente o completamente saturi e i vuoti interparticellari secchi o viceversa.

In ogni caso, sebbene sia ormai possibile determinare le caratteristiche fisiche dei R.U.I., la loro classificazione in senso geotecnico è ancora una procedura alquanto complessa.

La determinazione delle proprietà indice è, infatti, estremamente difficile.

Fra l'altro, poiché si tratta spesso di materiali molto compressibili, le proprietà come il peso dell'unità o la permeabilità devono essere determinate in funzionalità della porosità, la quale a sua volta è una funzione del metodo di messa in opera del materiale, del sovraccarico e dell'età della discarica.

I vari tipi di rifiuti vengono comunemente divisi in due gruppi:

- ✓ *rifiuti simili ai terreni*, definiti come rifiuti granulari, per i quali le prove meccaniche convenzionali e le teorie della meccanica dei terreni sono in gran parte applicabili anche se con evidenti limiti;
- ✓ *altri rifiuti*, il cui comportamento meccanico deve essere definito caso per caso.

Nelle discariche il contenuto d'acqua è fortemente dipendente da diversi fattori tra loro correlati, i quali includono: la composizione iniziale dei rifiuti, le condizioni climatiche locali, le procedure operative, la presenza di un sistema di raccolta del percolato, la storia di ricoprimento, la quantità di percolato generato dai processi biologici nella discarica e la quantità di percolati sottratta dai gas (Mitchell et. al, 1995).

Huitric et. al (1981) e Tchobanoglous et al. (1993) hanno mostrato che, per molte discariche attive negli USA, il contenuto d'acqua varia tra il 15% ed il 40%, in funzione della composizione dei rifiuti, del periodo dell'anno, dell'umidità naturale e delle condizioni meteorologiche, in particolare della pioggia.

Non si deve dimenticare che gli strati di ricoprimento intermedi, costituiti mettendo in opera strati di terreno, hanno contenuto d'acqua diverso da quello dei R.U.I., ed in genere minore.

Una determinazione del peso dell'unità di volume e del contenuto ottimo d'acqua tramite prove di costipamento è utile per stabilire i valori più probabili del peso dell'unità di volume dei R.U.I. in sito.

La figura 1 fornisce una relazione tra peso secco dell'unità di volume e contenuto d'acqua, ottenuta con una prova Proctor standard. Il massimo peso secco dell'unità di volume è stato stimato in 9.3 kN/m^3 ad un contenuto d'acqua ottimo del 31%.

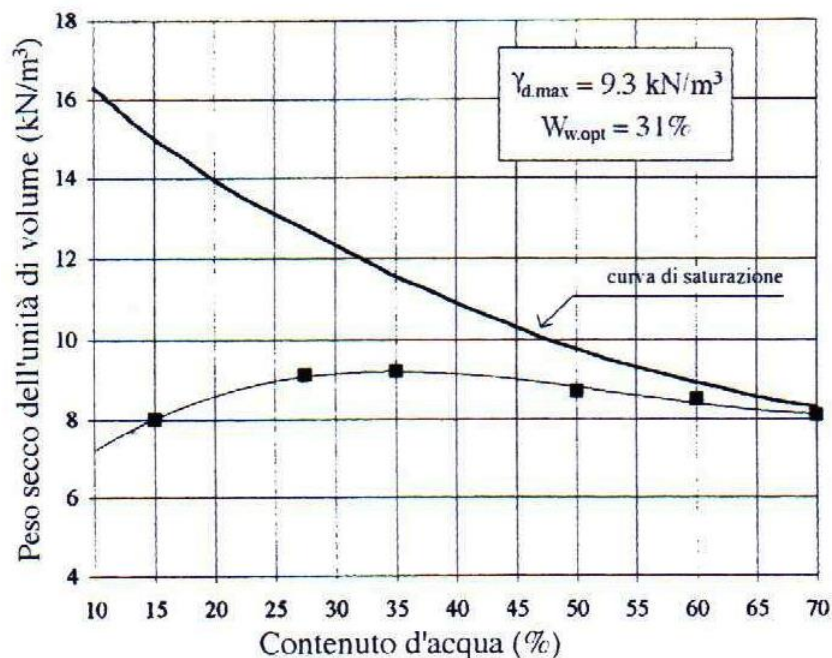


Figura 1 –Curva di costipamento e valori del massimo peso secco dell'unità di volume e del contenuto d'acqua ottimo.

La variazione del peso dell'unità di volume con il contenuto d'acqua è simile a quella osservata per i terreni. La completa saturazione è stata raggiunta per un contenuto d'acqua di circa il 70%, con un peso dell'unità di volume pari a circa 8 kN/m^3 .

Partendo da un contenuto d'acqua di costipamento del 31%, le condizioni di completa saturazione corrisponderebbero ad un valore del peso dell'unità di volume di 12 kN/m^3 .

Il peso dell'unità di volume varia attraverso tutta la discarica ed è difficile da determinare a causa della variabilità nella composizione, nel metodo di posa, nell'invecchiamento, nella profondità e nel contenuto d'acqua locale dei rifiuti.

Il peso dell'unità di volume medio del singolo costituente dei rifiuti dipende dal peso specifico della sostanza solida dello stesso costituente e dalla sua porosità e grado di saturazione.

Il peso dell'unità di volume di molti costituenti (per es. rifiuti alimentari, scarti di potatura, carta, tessuti, legno, ecc.) aumenta quando questi vengono esposti all'acqua.

Una composizione tipica di un materiale da discarica è riportata in tabella 1, insieme ai pesi dell'unità di volume tipici dei costituenti nelle condizioni secche e sature.

Il possibile campo di variazione del peso dell'unità di volume medio può essere determinato dalla combinazione dei materiali più leggeri con il loro peso secco, oppure dei materiali più pesanti con in loro peso saturo.

| Categoria | Percentuale in peso | Peso unitario secco (kN/m^3) | Peso unitario saturo (kN/m^3) |
|-----------|---------------------|--|---|
| Cibi | 5 ÷ 42 | 1.0 | 1.0 |
| Vegetali | 4 ÷ 20 | 0.3 | 0.6 |
| Carta | 20 ÷ 55 | 0.4 | 1.2 |
| Plastica | 2 ÷ 15 | 1.1 | 1.1 |
| Tessuti | 0 ÷ 4 | 0.3 | 0.6 |
| Legno | 0.4 ÷ 15 | 0.45 | 1.0 |
| Metallo | 6 ÷ 15 | 6.0 | 6.0 |
| Vetro | 2 ÷ 15 | 2.9 | 2.9 |
| Ceneri | 0 ÷ 15 | 1.8 | 2.0 |

Tabella 1 -Composizione tipica dei rifiuti adattata da Van Impe, 1996.

La combinazione più leggera porta ad un peso dell'unità di volume medio di 3.8 kN/m^3 e la combinazione più pesante fornisce 16.3 kN/m^3 . E' opportuno sottolineare ancora una

volta che questi sono i pesi unitari delle particelle costituenti e non il peso dei rifiuti aggregati. Quest'ultimo può essere calcolato solo se si conosce la porosità interparticellare dei rifiuti ed il contenuto d'acqua dei "vuoti" (per i rifiuti posti al di sopra del livello del percolato, il contenuto d'acqua sarà funzione della capacità di ritenere l'acqua). Usando tale metodo, sono stati ottenuti valori del peso dell'unità di volume che variano da 7 a 14kN/m³ in funzione della composizione e del contenuto d'acqua.

E' generalmente riconosciuto che il peso dell'unità di volume dei R.U.I. aumenta con la profondità.

Infatti, il peso iniziale aumenterà con la compressione immediatamente conseguente all'applicazione del sovraccarico dovuto alla messa in opera di ulteriori rifiuti.

Il peso dell'unità di volume può inoltre aumentare in seguito ad una compressione aggiuntiva che avviene nel tempo. Fasset et. al (1994) hanno mostrato che, al di sotto di circa 10 m di profondità, il peso dell'unità di volume di uno strato inizialmente poco compattato raggiungerà quello di uno strato compattato.

A scopo meramente conoscitivo si riporta un'analisi merceologica fatta eseguire dallo scrivente su un campione di rifiuti prelevato a valle del sistema di vagliatura finale dell'impianto di trattamento di Castelceriolo. L'analisi condotta da Idrocons S.r.l., ora Iren SpA, sebbene non recente ebbe ad evidenziare i seguenti risultati:

| | |
|---|------------|
| Plastica | 7÷33,5% |
| Carta | 15,9÷70,5% |
| Ferro (metalli: ferro, alluminio, etc...) | 2,2÷7,3% |
| Scarti vegetali (foglie, erba) | 1,5÷40,2% |
| Legno | 3,0÷10% |
| Tessuti (stoffa) | 0,2÷13,5% |
| Vetro | 10,7÷12,2% |
| Materiali inerti (sassi e mattoni) | 11,6÷18,8% |
| Sostanza organica | < 5% |

Con tale composizione tipica dei rifiuti, ove assumessimo un contenuto d'acqua $W_n = 10\%$ e γ_{dmax} (Proctor Standard) di $9,3 \text{ kN/m}^3$ (v.si fig. 1), si otterrebbe un peso unitario di volume $\gamma_n = \gamma_d(1 + W_n) \cong 10,2 \text{ kN/m}^3$.

Tenendo conto, infine, anche del peso di volume dei singoli strati intermedi di copertura giornaliera, il massimo peso di volume unitario medio generalizzato (rifiuti + terreno di copertura giornaliera) dell'ammasso dei rifiuti potrebbe raggiungere anche i 13 kN/m^3 .

6.3 Considerazioni preliminari sui fenomeni di assestamento dei rifiuti solidi urbani indifferenziati.

Il rifiuto solido urbano indifferenziato è un composto fortemente eterogeneo, con caratteristiche di variabilità difficilmente prevedibili. Esso presenta un'elevata deformabilità di insieme dovuta sia alle caratteristiche fisiche e meccaniche dei suoi componenti, sia alla decomposizione biochimica subita dalla sostanza organica.

La componente organica, ove presente, è inoltre soggetta a fenomeni di degradazione, per cui le sue caratteristiche e la sua consistenza risultano estremamente variabili nel tempo.

Le grandi deformazioni, sia istantanee, sia dilazionate nel tempo, alle quali è soggetto un cumulo di rifiuti in una discarica controllata pongono problemi gestionali, non trascurabili, dovuti anche al fatto che i cedimenti sono di entità variabile da punto a punto e pertanto del tipo "*differenziale*". All'interno di una discarica, dunque, si verificano rilevanti effetti distorsivi, che potrebbero portare alla:

- ✓ rottura dei dispositivi di raccolta e rimozione del percolato e del biogas;
- ✓ rottura della copertura finale e dei dispositivi di raccolta e rimozione dell'acqua superficiale;

- ✓ difficoltà nel recupero finale dell'area (Sowers, 1973);
- ✓ difficoltà nello stimare la capacità totale effettiva della discarica.

Gli elevati cedimenti a cui sono soggetti i rifiuti e la loro disomogeneità possono produrre inoltre variazioni della pendenza di progetto della copertura finale, con accumuli di acqua piovana indesiderati che possono contribuire al raggiungimento di stati limite di rottura localizzati.

Il rifiuto solido urbano è caratterizzato da un'elevata deformabilità, dipendente da una serie di fattori quali (Edil et al, 1990; Grisolia et al, 1993):

- ✓ la composizione iniziale;
- ✓ il contenuto di sostanza organica;
- ✓ l'età del rifiuto;
- ✓ la densità iniziale o l'indice dei vuoti iniziale;
- ✓ il metodo di posa in opera;
- ✓ l'altezza del cumulo dei rifiuti;
- ✓ la quantità di materiale usato per la copertura giornaliera;
- ✓ la produzione di percolato, il suo livello sulla barriera impermeabilizzante di fondo e la sua permeabilità all'interno della massa dei rifiuti;
- ✓ i fattori ambientali, quali il grado di umidità, la temperatura, la produzione di biogas ed il suo grado di smaltimento.

Tutti questi fattori sono indipendenti tra loro pur influenzandosi l'un con l'altro (*Fig. 2*).

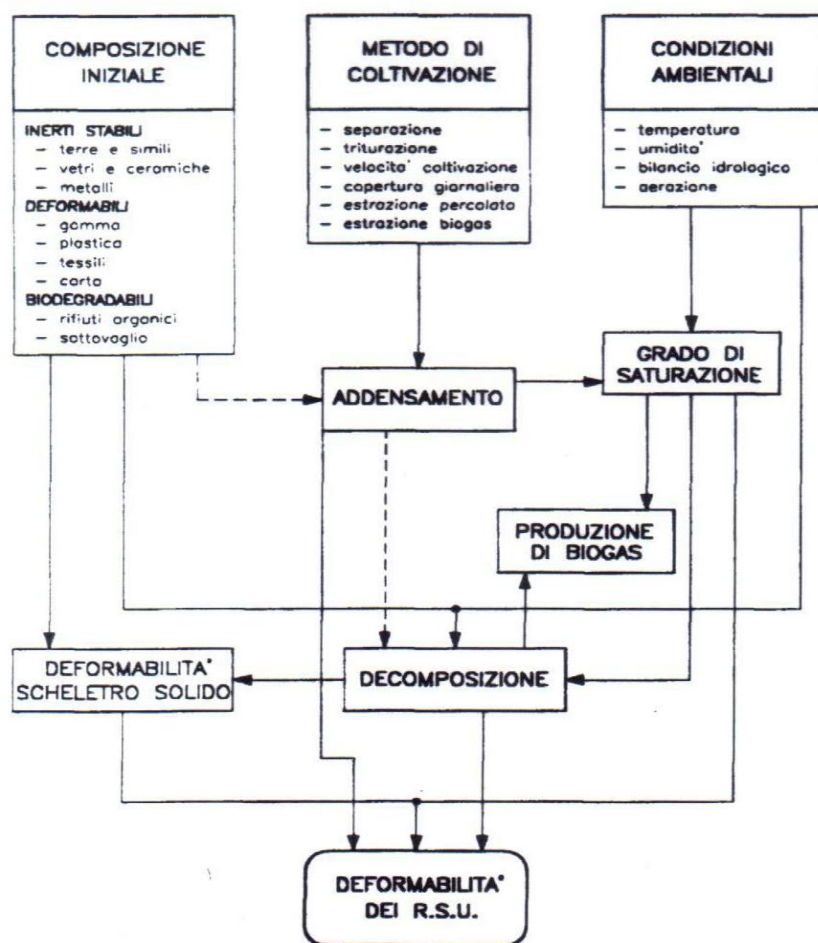


Figura 2 – *Fattori che regolano la deformabilità di un cumulo di rifiuti (Grisolia et. al, 1995).*

Da sottolineare infine l'azione dell'acqua (o di altri liquidi) presente nell'ammasso di R.U.I. che può condizionare la deformabilità complessiva del cumulo oltre a quella dei singoli componenti. Variazioni del contenuto d'acqua possono modificare le caratteristiche intrinseche di alcuni elementi idrosensibili (carta ed i suoi derivati) e le condizioni ambientali dalle quali dipendono l'entità e la velocità dei processi di degradazione della sostanza organica (Grisolia et al, 1995).

I fenomeni che regolano la deformabilità dei rifiuti solidi urbani sono numerosi e complessi. Ciò è dovuto alla natura stessa dei rifiuti e, precisamente, all'eterogeneità della loro composizione, alla instabilità fisico-chimica dei componenti organici, al ruolo dei fluidi in essi compresi, ecc...

Il rifiuto è un mezzo multifase, composto da tre fasi distinte: solido, liquido e gas. La frazione solida può essere così schematicamente differenziata (Grisolia et al, 1993):

- ✓ inerti stabili: comprendono ceramiche, vetri, metalli, terre e simili;
- ✓ altamente deformabili: gomma, plastica, tessili e carta;
- ✓ biodegradabili: rifiuti organici, vegetali e legno.

I meccanismi che determinano lo sviluppo della deformazione di un R.U.I. possono essere così illustrati (Sowers, 1973):

- ✓ *meccanico*: distorsione, flessione e riorientazione delle particelle, meccanismo simile alla consolidazione delle terre organiche;
- ✓ *erosione e trasporto*: migrazione degli elementi più piccoli all'interno dei vuoti presenti nei materiali di dimensioni maggiori;
- ✓ *variazioni fisico-chimiche*: corrosione, ossidazione e combustione;
- ✓ *decadimento biochimico*: fermentazione e decomposizione, in condizioni sia aerobiche che anaerobiche;
- ✓ *interazione*: il metano prodotto dalla decomposizione può favorire la combustione grazie al calore prodotto dalla biodegradazione; gli acidi organici possono favorire la corrosione; i cambiamenti di volume dovuti al primo meccanismo possono favorire il secondo.

Il rifiuto cede e si deforma sia a causa del peso proprio che sotto l'azione di carichi esterni tra i quali: lo strato di copertura giornaliera e la copertura finale.

Sebbene la deformabilità di questo materiale non sia regolare, essa manifesta molte analogie con quella delle terre organiche, soprattutto le torbe.

Nella fase iniziale di un'ideale prova di compressibilità su un campione medio di rifiuti si può ritenere, ragionando in termini di volume occupato, che gli elementi più deformabili e degradabili siano prevalenti sugli inerti. Il contatto diretto fra questi ultimi sarebbe limitato a pochi punti. Al crescere del carico applicato gli elementi molto deformabili producono la maggior parte della diminuzione del volume dell'ammasso.

Gli inerti stabili tendono invece a traslare all'interno del cumulo fino ad una configurazione pressoché definitiva. La sostanza organica e i materiali deformabili impediscono in questa fase il contatto diretto fra più elementi stabili.

Con il passare del tempo, la deformazione del cumulo dipende dallo sviluppo di fenomeni viscosi (*creep* ossia deformazione lenta a carico costante) e dalla trasformazione della sostanza organica. La rilevanza e la durata di questi fenomeni dalla composizione del rifiuto, dai carichi applicati e dalle condizioni ambientali più o meno favoriscono la biodegradazione. Una volta esauriti tutti i processi di decomposizione, la rigidità e la compressibilità del cumulo potranno essere simili a quelli di un terreno sciolto naturale (Grisolia et al, 1995b).

La figura 3 seguente riporta una curva di consolidazione ideale di un ammasso di R.U.I. ottenuta dall'interpolazione di dati sperimentali di laboratorio: essa presenta notevoli analogie con quelle ottenute con alcune terre naturali contenenti sostanza organica, quali le torbe.

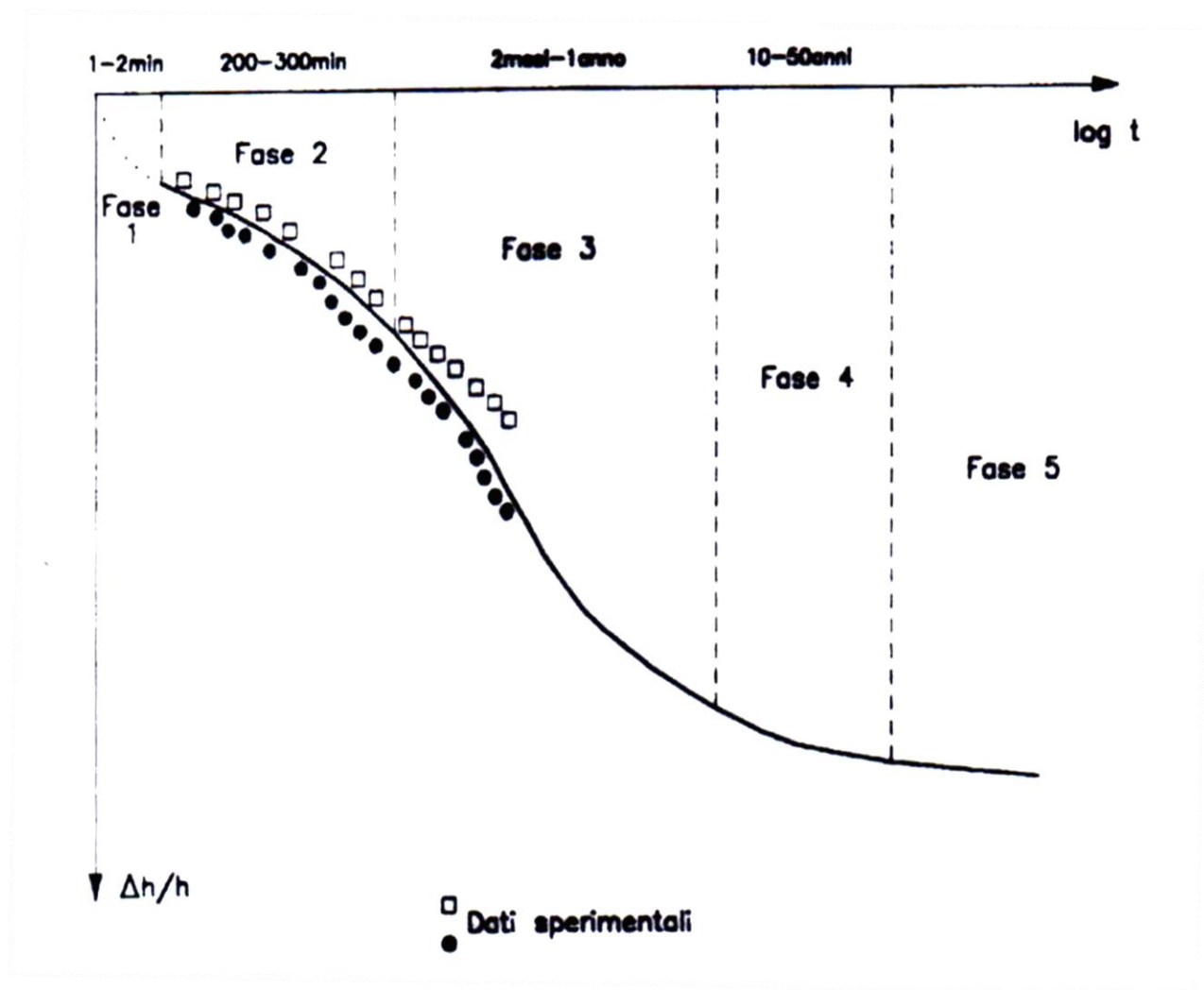


Figura 3 – Curva di consolidazione ideale (Grisolia et. al, 1995b).

Si possono estrapolare le seguenti fasi (Grisolia et al, 1995b):

- ✓ *Fase 1:* rapida deformazione iniziale, con riduzione della macroporosità per effetto dell'assestamento dei materiali molto deformabili;
- ✓ *Fase 2:* assestamento degli elementi molto deformabili;
- ✓ *Fase 3:* deformazioni lente (*creep*) e inizio della decomposizione della componente organica;
- ✓ *Fase 4:* completamento della decomposizione della sostanza organica;
- ✓ *Fase 5:* deformazioni residue.

6.4 Il modello per il calcolo dei cedimenti secondari

Abbiamo appena visto come i meccanismi che governano i cedimenti dei rifiuti solidi urbani siano molteplici e complessi più di quanto non accada per un terreno naturale, a causa dell'eterogeneità dei rifiuti stessi e della deformabilità propria delle particelle e dei vuoti presenti nello stato iniziale.

I principali elementi che contribuiscono alla formazione dei cedimenti studiati da vari autori (Sowers, 1973⁹; Huitric, 1981¹⁰; Gilbert & Murphy, 1987¹¹; Van Impe & Bouazza, 1996¹²), possono essere sintetizzati come segue:

- compressione dovuta alle distorsioni, inflessioni, rotture e riorientazioni delle particelle;
- cedimenti dovuti all'occupazione dei vuoti tra le particelle più grandi da parte delle particelle più piccole;
- comportamento viscoso e fenomeni di consolidazione che coinvolgono sia lo scheletro solido che le singole particelle;
- decomposizione dovuta alla degradazione del materiale organico;
- collasso dovuto a processi fisico-chimici (corrosione, ossidazione e degradazione dei componenti inorganici).

⁹ Sowers G.F. (1973): *"Settlement of waste disposal fills"* – Proc. 8th ICSMFE", Mosca, Russia.

¹⁰ Huitric R. (1981): *"Sanitary landfill settlement rates"* – Technical University of Berlin.

¹¹ Gilbert P.A., Murphy W.L. (1987): *"Prediction and mitigation of subsidence damage to hazardous waste landfill covers"* - EPA 600/2-87-025, PB 87-175386, Cincinnati, Ohio (Usa).

¹² Van Impe W.F., Manassero M., Bouazza A. (1996): *"Waste disposal and containment"* – Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Giappone.

I principali fattori che, invece, influenzano l'entità del cedimento (sotto il peso proprio come sotto l'azione di un sovraccarico) diversi ed interdipendenti tra loro (Edil et al, 1990¹³, Grisolia et. al, 1983) sono così riassunti:

- l'indice dei vuoti iniziale dei rifiuti e dal loro stato di addensamento;
- il contenuto di materiale degradabile;
- l'altezza del riempimento;
- la storia di carico;
- il livello del percolato e la sua variazione;
- i fattori ambientali (contenuto d'acqua, temperatura, ecc).

Huitric (1981) definì tre modalità di cedimento per i R.U.I.:

- consolidazione (variazione delle tensioni efficaci);
- ritiro (decomposizione del materiale organico);
- compattazione (sovraccarico).

Il termine consolidazione, sopra suggerito per descrivere una parte della curva carico cedimento per i R.U.I., si riferisce al cedimento risultante dall'espulsione dell'acqua dai materiali appena depositati. Il ritiro è il processo attraverso il quale i componenti organici e la soluzione sono gradualmente decomposti e convertiti in anidride carbonica e metano, provocando una diminuzione di volume del materiale.

La compattazione è definita come il riorientamento dei solidi in una configurazione più addensata, dovuto alla perdita graduale di rigidità delle particelle solide a causa del *creep* sotto carico o della decomposizione.

¹³ Edil T.B., Ranguette V.J., Wuellner W.W. (1990): "*Settlement of Municipal Refuse – Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*". ASTM Special technical Publication 1070, pp. 225-239.

E' stato inoltre suggerito che tali particelle solide possano inizialmente fungere da ponte tra i vuoti per poi collassare; tale meccanismo è ritenuto il maggior responsabile potenziale dei cedimenti di una discarica.

Generalmente il cedimento finale di una discarica ha caratteristiche di irregolarità; al cedimento iniziale nei primi mesi (uno o due) dopo la costruzione, fa seguito una sostanziale compressione secondaria che si protrae per un esteso lasso di tempo; la velocità di cedimento diminuisce nel tempo e con l'incremento della profondità della discarica. Sotto il peso proprio il cedimento tipicamente varia tra il 5% ed il 30% dello spessore originario del materiale, con gran parte del cedimento che si verifica nei primi uno o due anni. Ciò è confermato dai risultati di prove eseguite da Gandolla et. al (1995).

Secondo Sowers (1973) l'evoluzione del cedimento di una discarica per rifiuti solidi urbani è simile a quella che si verifica nei terreni torbosi, con un primo cedimento molto rapido ed un susseguente cedimento accompagnato da variazioni piccole o nulle delle pressioni neutre. Nel caso dei rifiuti, però, la compressione secondaria comprende anche una significativa componente dovuta alla decomposizione biologica e chimica. La velocità del cedimento secondario generalmente dipende anche dalla quantità di acqua disponibile nel riempimento, poiché l'acqua è necessaria per la decomposizione.

La deformazione dello scheletro solido nel tempo viene solitamente stimata utilizzando uno schema monodimensionale, in cui il cedimento totale viene suddiviso in primario e secondario. Le caratteristiche meccaniche utilizzate nell'analisi dei cedimenti sono in genere costituite dall'indice di compressibilità (C_c) per la stima del cedimento primario, e dall'indice di compressione secondaria (C_α) per la stima del cedimento che si verifica sotto un carico costante, dopo l'esaurimento del cedimento primario. Il cedimento secondario può protrarsi per moltissimi anni dopo la chiusura della discarica (anche 30 anni), e costituire la componente principale del cedimento totale (Coduto, 1990).

Per l'analisi del cedimento immediato indotto dal carico vengono invece utilizzati i metodi derivati dalla meccanica dei terreni, impiegando approcci elastici o leggi del tipo $e\text{-log } \sigma'$ (Sowers, 1973).

6.4.1 Il modello di Sowers e i parametri di calcolo

Riferendoci ora al comportamento degli ammassi di R.U.I. in discarica, il monitoraggio e l'analisi di casi reali consentono di suddividere il cedimento totale in tre componenti principali (Wall et al, 1995):

$$S_{tot} = S_i + S_p + S_s$$

L'entità del cedimento totale S_{tot} può raggiungere mediamente valori compresi tra l'8 e il 15% di altezza H_0 del cumulo di rifiuti con punte anche del 20%.

La prima componente del cedimento totale S_i è dovuta alla cosiddetta compressione iniziale, che si sviluppa immediatamente dopo l'applicazione di un carico esterno. E' generalmente associata alla riduzione dei vuoti dovuti alla compressione istantanea degli elementi costituenti il rifiuto. La componente S_i è analoga alla compressione elastica delle terre: per questo motivo non la si può osservare nei grafici che riportano i cedimenti registrati in discariche reali.

Per il calcolo del cedimento S_i si utilizzano le procedure di calcolo usate per stimare i cedimenti immediati delle fondazioni, basate sulla teoria dell'elasticità e sul modulo di elasticità E_s del rifiuto (modulo di rigidezza):

$$S_i = (\Delta q \cdot H_0) / E_s$$

dove si sono indicati con Δq l'incremento di carico e con H_0 l'altezza iniziale dello strato di rifiuti.

Fino ad oggi, un parametro geotecnico (ad esempio, il modulo di rigidezza) che descriva il comportamento dei R.U.I. nei riguardi dei cedimenti non è ancora entrato nell'uso corrente. Esso potrebbe essere determinato tramite prove di laboratorio, analisi a ritroso (*back analysis*) di cedimenti di discariche o meglio ancora da prove in sito ai corrispondenti livelli di deformazione.

Nel caso di prove di laboratorio, Jessberger&Kockel (1991, **doc. 2**) posero in evidenza come il modulo di rigidezza derivi dalla retta vergine di compressione e, quindi, possono essere

ottenute solo informazioni sui cedimenti di rifiuti che non sono mai stati soggetti a carichi più alti di quelli applicati nelle prove (rifiuti “normalmente consolidati”).

In figura 4 è riportato il campo di valori del modulo di rigidezza dei R.U.I. ottenuti da diversi autori in funzione del carico. I valori del modulo di rigidezza presentano un limite superiore ed un limite inferiore, dipendenti da diversi fattori quali la composizione dei rifiuti, il loro stato di compattazione, la copertura di terreno, il tipo di prova, l'età dei rifiuti e, in alcuni casi, il diametro della piastra.

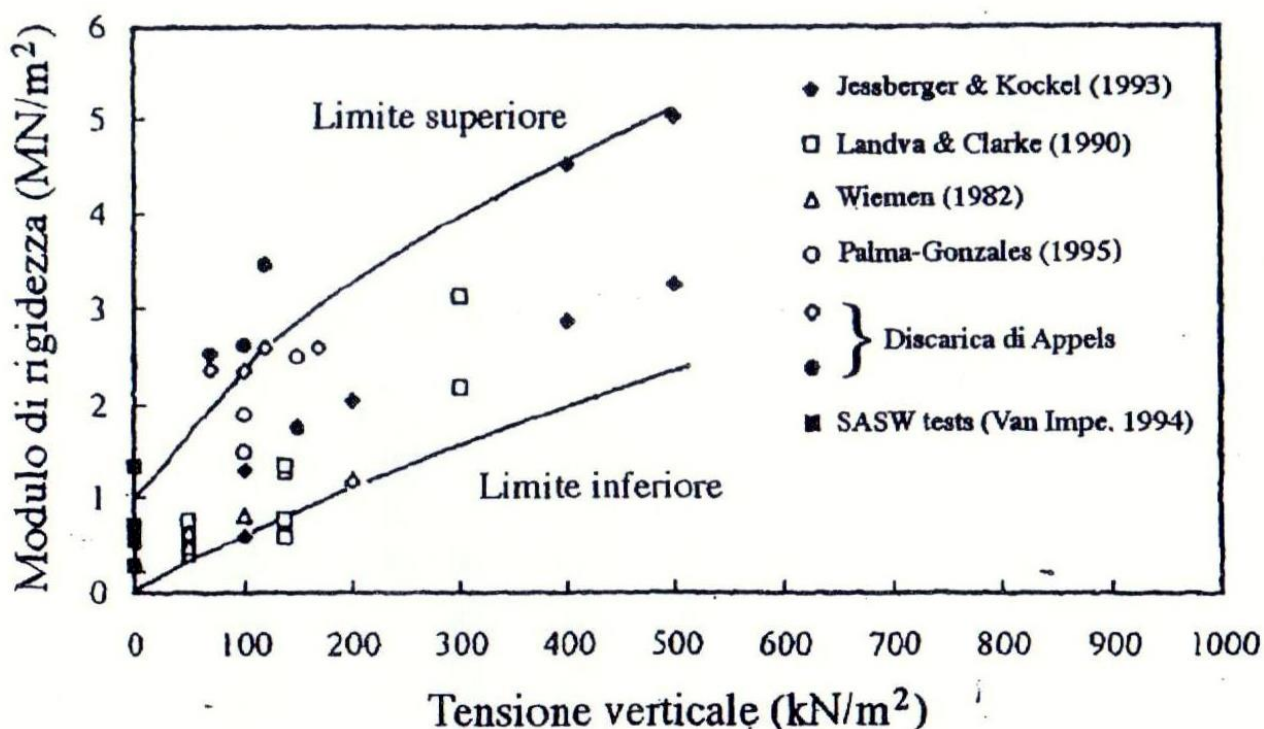


Figura 4 - *Variazione del modulo di rigidezza con lo stato tensionale (Van Impe, 1996).*

Nei depositi in cui la sovrappressione interstiziale può facilmente dissiparsi, come avviene nella maggior parte delle discariche di R.U.I., il cedimento primario può avvenire così rapidamente (di solito entro i primi 30 giorni che seguono l'applicazione del carico, Morris et. al, 1990) da essere contemporaneo alle operazioni di conferimento e costipamento rifiuti con mezzi meccanici idonei; si ritiene pertanto che esso sia sostanzialmente completato al termine della coltivazione della discarica.

Per quanto riguarda invece la stima della seconda S_p e della terza S_s componente del cedimento totale esistono in letteratura diversi modelli, più o meno complessi, derivati dall'applicazione diretta della meccanica delle terre ai rifiuti.

Diversamente da quanto accade per i terreni, la compressione secondaria dei R.U.I. include, oltre al *creep* anche i contributi della decomposizione biologica e chimica.

Il modello di Sowers risulta ancora oggi il più usato, facendo esso ampio riferimento ai concetti della compressione in condizioni edometriche, ben note in campo geotecnico. Sowers (1973) ha infatti ipotizzato un comportamento dei R.U.I. simile alla consolidazione secondaria per i terreni, in cui il cedimento viene posto proporzionale allo spessore H della discarica e linearmente variabile con il logaritmo del tempo. **La compressione secondaria è dunque convenzionalmente calcolata facendo riferimento alla relazione:**

$$S_s = C_\alpha H \log (t_2/t_1)$$

con t_1 e t_2 estremi dell'intervallo temporale e C_α indice di compressione secondaria che tiene conto del comportamento viscoso dello scheletro solido del rifiuto e della biodegradazione della sostanza organica eventualmente presente.

Ad essere rigorosi le tensioni utilizzate nel calcolo dovrebbero essere quelle efficaci: in realtà, la massa di rifiuti di una discarica raramente si trova in condizioni sature (questo può accadere solo in prossimità dello strato impermeabilizzante inferiore, dove è presente una maggior quantità di percolato). Pertanto è accettabile riferirsi alle tensioni totali.

Per quanto riguarda l'indice C_c , Sowers fornisce le seguenti espressioni in funzione dell'indice dei vuoti e_0 e del contenuto di sostanza organica:

- $C_c = 0,15 \cdot e_0$ (basso contenuto organico)
- $C_c = 0,55 \cdot e_0$ (alto contenuto organico)

Per quanto riguarda invece l'indice di compressione secondaria C_α , Sowers suggerisce le seguenti espressioni in funzione delle condizioni ambientali favorevoli o meno alla decomposizione della sostanza organica:

- $C_\alpha = 0,03 \cdot e_0$ (condizioni sfavorevoli, anaerobiche)
- $C_\alpha = 0,09 \cdot e_0$ (condizioni favorevoli, aerobiche)

Esempi tipici di risultati ottenuti mediante tali approcci sono riportati in figura 5 (Gabr&Valero, 1995). I risultati di queste prove, eseguite in apparecchi convenzionali (edometri) sono in buon accordo con i limiti teorici dei vuoti riportati da Sowers.

Tuttavia i valori degli indici dei vuoti riportati da Sowers sono molto più elevati di quelli ottenuti in queste indagini di laboratorio.

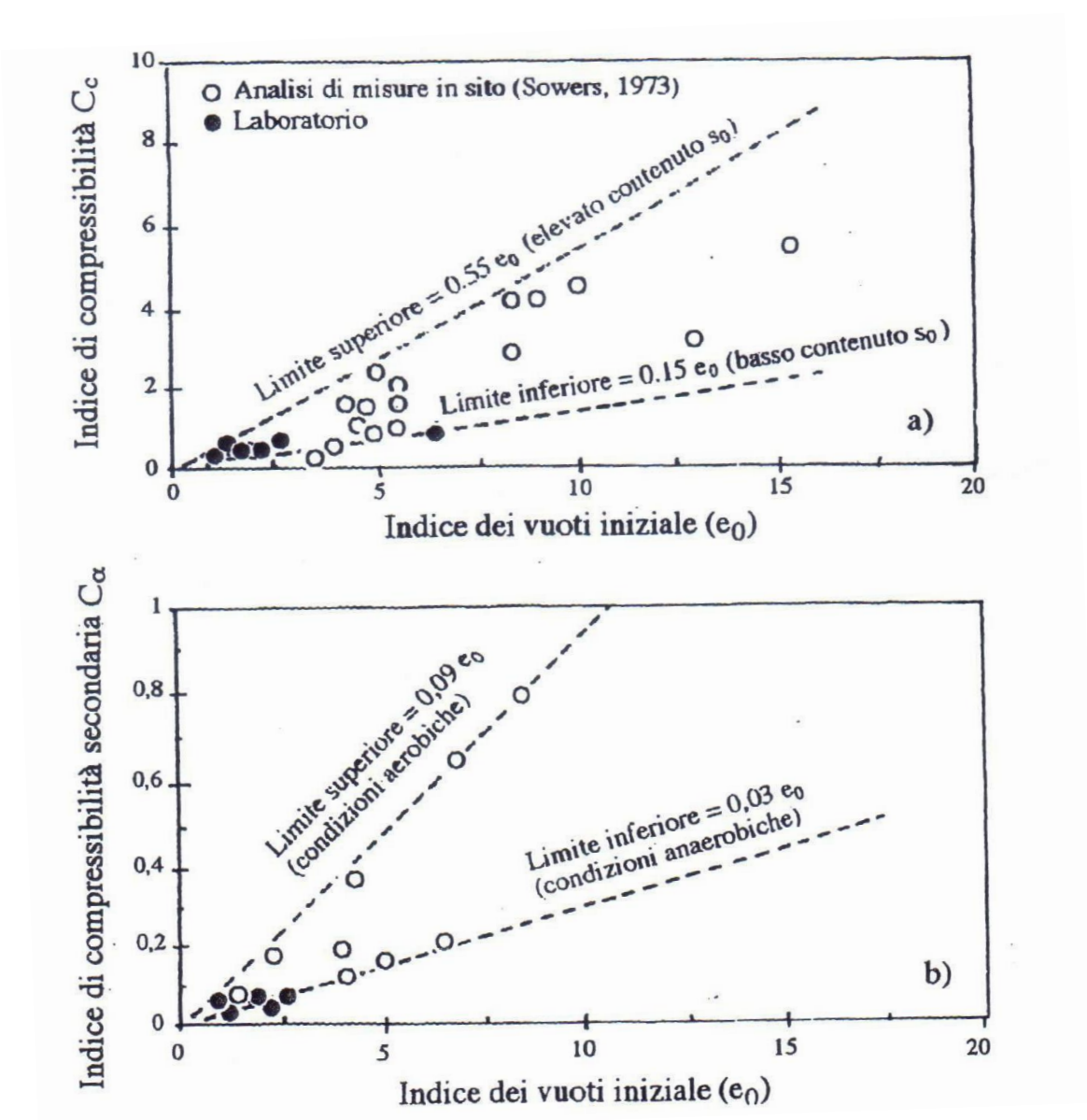


Figura 5 – Indici di compressione primaria C_c e secondaria C_α in funzione dell'indice dei vuoti iniziale.

Per quanto riguarda la valutazione del C_α si possono suggerire anche le seguenti indicazioni basate sull'analisi di un rilevante numero di dati sperimentali (Mesri e Godlewski, 1975; Mesri e Choi, 1985):

$$C_\alpha / C_c = 0.04 \pm 0.01$$

nel caso di argille inorganiche;

$$C_\alpha / C_c = 0.05 \pm 0.01$$

nel caso di argille organiche.

Van Impe e Squeglia (1997)¹⁴ riferiscono che le *“informazioni disponibili per il caso di torba mostrano valori del rapporto $C_\alpha/C_c = 0.05 \pm 10\%$. Cazzuffi et. al (1993) hanno riportato valori di $C_\alpha / C_c = 0.17$ per i RSU (il che sembra in qualche misura paragonabile con il comportamento della torba). Nel caso di RSU di età maggiore di 15 anni, non molto biodegradabili, il rapporto C_α/C_c varia nell'intervallo $0.075 \div 0.17$. E' importante essere molto cauti nella interpretazione delle prove di laboratorio. Infatti gran parte dei risultati descrivono solo il cedimento meccanico, mentre quello dovuto alla degradazione non viene considerato. Quando viene presa in considerazione la biodegradabilità in alcuni tipi di RSU, il rapporto C_α / C_c può aumentare considerevolmente e raggiungere valori superiori all'unità (figura 5)”*.

Recentemente Boutwell & Fiore (1995) hanno descritto un caso in cui il rilevato di prova è stato completamente monitorato. Secondo gli autori il rapporto C_α / C_c varia tra 0,058 e 0,073 (**doc. 3**).

Partendo dal modello di Sowers, F. Olivier et. al. (2003)¹⁵ hanno proposto un nuovo approccio di calcolo basato sull'analisi incrementale (**doc. 3**).

Tale modello, validato dagli autori su 10 discariche francesi, considera il carico e il cedimento totale come somma di carichi e di cedimenti incrementali. In altri termini, il modello di calcolo adottato da Olivier et. al. simula la fase di costruzione incrementale della discarica per strati successivi. Di particolare interesse applicativo rivestono le osservazioni dei cedimenti effettuate dagli autori sulle diverse discariche oggetto di monitoraggio.

¹⁴ W.F. Van Impe, N. Squeglia (1997) in *“Proprietà geotecniche dei rifiuti solidi urbani”*, Hevelius Ed.

¹⁵ F. Olivier, J.P. Gourch, M. L. Munoz, A. Budka and P. Denecheau in *“Validation of an incremental waste settlement prediction model with surface survey data”*, Congresso Sardinia 2003.

Da tali studi si è potuto constatare come il valore medio dell'indice di compressione secondaria C_α possa ragionevolmente essere assunto nel breve termine pari a 0,11.

6.5 Le analisi geotecniche di laboratorio

Su un campione di rifiuto rappresentativo, il sopravaglio proveniente dalla tritovagliatura dei rifiuti solidi urbani dell'impianto di Castelceriolo, codice CER 191212, sono state condotte, a cura della Geotecna S.r.l. di Pavia, alcune prove di laboratorio finalizzate alla determinazione dei seguenti parametri geotecnici necessari sia per il calcolo dei cedimenti secondari sia per quelli iniziali dovuti all'applicazione della sola copertura finale:

e_0 = indice dei vuoti iniziale

γ_d = peso di volume secco

W_n = umidità relativa

C_c = indice di compressibilità

$M = E_{ed}$ = modulo edometrico



Figura 6 – Il sopravaglio cod. CER 191212.

Le stesse analisi sono state poi ripetute su una miscela di rifiuti costituita in peso per 2/3 dal sopravaglio proveniente dalla tritovagliatura dei rifiuti solidi urbani (cod. CER 191212) e per il restante 1/3 da rifiuti provenienti da impianti di trattamento acque reflue (codice CER 190802).

Ciò allo scopo di valutare gli effetti indotti sulle caratteristiche di deformabilità del rifiuto principale dovuti alla presenza di altri rifiuti significativi.

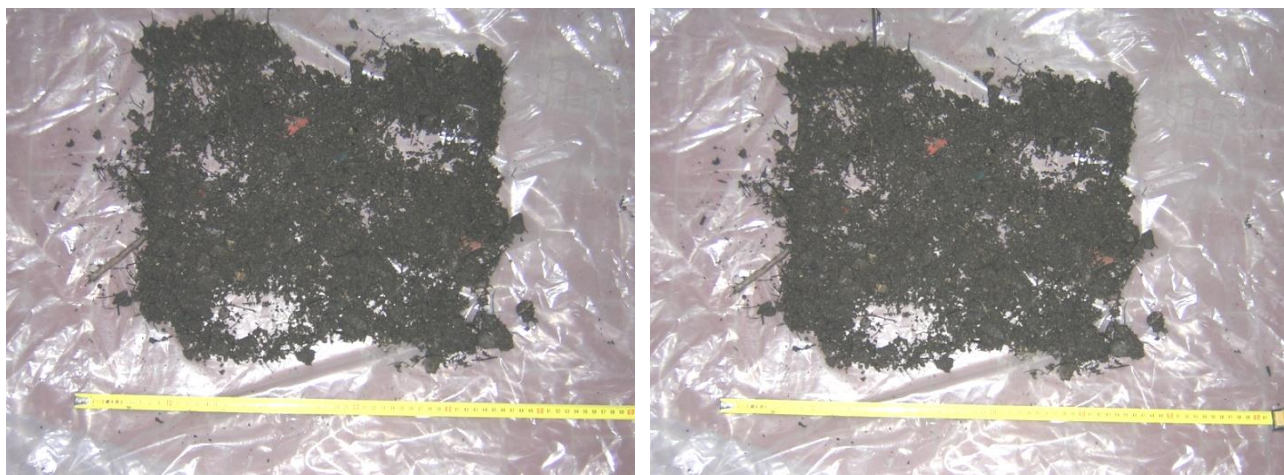


Figura 7 – Il rifiuto cod. CER 190802.

Le prove di laboratorio (**doc. 4**) hanno confermato i dati sperimentali riportati in letteratura: alla variabilità riscontrata negli indici dei vuoti iniziale $e_o = 3,538 \div 11,516$ a seconda del grado di addensamento del materiale ha fatto riscontro quella degli indici di compressibilità $C_c = 1,4 \div 3,0$.

Del pari, anche il modulo di deformazione variabile con il livello dello stato tensionale risultante dalle prove di compressione monoassiale confinate è risultato in linea con quelli suggeriti da Van Impe (1996) e da Jessberger&Kockel (1991).

Anche per la discarica di Cerro Tanaro per rifiuti non pericolosi di provenienza urbana, prevalentemente secchi, lo scrivente ebbe modo di effettuare l'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio (**doc. 4**): ai valori dell'indice dei vuoti iniziale dei R.U.I.: $e_o = 8,403$ e della FOS: $e_o = 3,912$, hanno fatto rispettivamente riscontro i seguenti indici di compressibilità: $C_c = 2,02$ (R.U.I.) e $C_c = 1,34$ (F.O.S.) determinati, al pari del modulo di tipo edometrico, nel tratto di compressione.

6.6 Il calcolo dei cedimenti di consolidazione secondari

6.6.1 Premessa

Preliminarmente occorre riferire come l'impianto di smaltimento oggetto di studio prevede un volume utile di rifiuti pari a 986.323 mc (infrastrati compresi).

Al lordo dei cedimenti di consolidazione ma al netto della copertura finale di 1,75 mt di spessore, le altezze massime dei rifiuti comprensivi di infrastrato giornaliero sono le seguenti:

- a) zona «colmo» della discarica: $(114,15 - 104,00) = 10,15$ mt costante per tutti i 4 settori;
- b) zona «perimetrale» della discarica in elevazione:
 - $112,05 - 101,50 = 10,55$ m Settore 1 (lato autostrada)
 - $112,05 - 101,20 = 10,85$ m Settore 2 (centrale)
 - $112,05 - 101,20 = 10,85$ m Settore 3 (centrale)
 - $112,05 - 102,00 = 10,05$ m lotto ovest del Settore 4 (più vecchio)
 - $112,05 - 101,25 = 10,80$ m lotto est del Settore 4 (lato pesa ingresso)

Di queste altezze, quella massima interrata rispetto al piano strada di riferimento posizionato alla quota di 108,50 m.s.l.m. è risultata di 6,10 mt.

6.6.2 Il cedimento di consolidazione secondaria dei singoli settori

Preliminarmente occorre tener conto dello stato di coltivazione nel tempo dei singoli lotti della discarica poiché tale ultimo parametro esercita un ruolo fondamentale nel calcolo del cedimento di consolidazione secondaria.

Sotto tal profilo, soccorrono le date dei nulla-osta provinciali alla coltivazione dei suddetti lotti che, per facilità di esposizione, qui di seguito si ripropongono:

| STRALCIO | AUTORIZZAZIONE PROGETTO ESECUTIVO | SETTORE | LOTTO (VASCHE) | NULLA OSTA ALLA COLTIVAZIONE | |
|----------|---|---------|-------------------|---------------------------------|--------|
| | | | | DATA | n.p.g. |
| 1° | DDAP1-512-2011 del 17/11/2011 | 4 | 4.1 | 06/02/2013 | 13638 |
| | | 4 | 4.2 | 10/08/2012 | 91355 |
| 2° | DDAP1-301-2013 del 01/08/2013 | 3 | 3.1 | 04/12/2013 | 114069 |
| | | 3 | 3.2 | 29/08/2014 | 81035 |
| 3° | DDAP1-455-2015 del 13/08/2015 | 2 | 2.1 | 30/03/2016 | 21503 |
| | | 2 | 2.2 | 27/07/2016 | 51398 |
| 4° | Decreto Presidente n° 196 del 04/12/2017, DDAB1-1014-2017 del 04/12/2017, DDAB1-310- 2018 del 04/04/2018, nulla osta n.p.g. 81853 del 20/11/2018 e DDAP2-1025- 2019 del 18/11/2019 | 1 | 1.1 lato N-O | 16/12/2016 | 84651 |
| | | | 1.1 lato S-O | 15/12/2017 | 10781 |
| | | | 1.1 | 27/12/2018 | 90409 |
| | | 1 | 1.2 | 18/02/2019 | 11165 |
| | | | | 01/03/2019 | 13.885 |
| | | | | 19/03/2020 | 017601 |

Di talché nelle attuali condizioni di non linearità, discontinuità e lenta coltivazione degli otto lotti di discarica, è necessario differenziare il calcolo della stima dei cedimenti secondari in funzione della durata di coltivazione dei 4 settori (2 lotti per ciascun settore).

Tenendo conto di quanto sopra esposto, nel calcolo dei cedimenti secondari di seguito riportato sono stati assunti cautelativamente i seguenti valori ponderali molto conservativi (cfr. **doc. 3**, prove di laboratorio) differenziati per settori di coltivazione:

a) SETTORI 4, 3 e 2 (già coltivati da tempo):

- indice medio dei vuoti¹⁶ $e_o = (7,527 + 5,9775)/2 = 6,75 \times 0,65 = 4,39$;
- contenuto di sostanza organica “*medio-basso*”;
- $C_c = 0,79$, ovvero $0,18 \times 4,39$ (cfr. anche fig. 5a);
- rapporto $C_\alpha/C_c = 0,058 \div 0,073$ (Boutwell & Fiore, 1995);
- $C_\alpha = (0,058 \div 0,073) \times 0,79 \cong 0,046 \div 0,058$ (cfr. anche Olivier et. al., 2003);
- H = spessore max dei rifiuti = 10,85 m;

¹⁶ Valore medio inferiore assunto tra i valori medi di laboratorio e_o dei rifiuti riferiti alle discariche di Solero e Cerro Tanaro, ridotto ulteriormente del 35% per effetto della parziale consolidazione dei settori in esame.

- H_1 = spessore max dei rifiuti con ipotesi di ricarica minima di 0,75 m = 11,30 m;
- t_1 = tempo di esaurimento dei cedimenti primari = alla chiusura (ipotesi);
- t_2 = tempo trascorso dalla chiusura + 1 anno,

Applicando ora l'espressione proposta da Sowers (1973) si due casi H e H_1 :

$$S_s = C_\alpha \times H \times \log(t_2/t_1) \quad \text{e} \quad S_{s1} = C_\alpha \times H_1 \times \log(t_2/t_1)$$

con $C_\alpha \rightarrow (e_0, t)$ si ottengono i seguenti risultati:

Relazione di Sowers con $C_c = 0,18 \times e_0$

| Periodo | H = 10,85 m | $H_1 = 11,60$ m |
|---------------------------|----------------------|-------------------------|
| ad 1 anno dalla chiusura: | $S_s \approx 0,15$ m | $S_{s1} \approx 0,16$ m |
| a 3 anni dalla chiusura: | $S_s \approx 0,33$ m | $S_{s1} \approx 0,35$ m |
| a 5 anni dalla chiusura: | $S_s \approx 0,46$ m | $S_{s1} \approx 0,49$ m |
| a 8 anni dalla chiusura: | $S_s \approx 0,60$ m | $S_{s1} \approx 0,64$ m |

Assumendo convenzionalmente come tempo di esaurimento dei cedimenti secondari tutto il periodo di massima produzione del biogas per i settori 4, 3 e 2 pari a circa 8 anni dalla realizzazione della copertura finale della discarica, il cedimento secondario max con la ricarica di 0,75 m di rifiuti sarà pari a 0,64 mt, di soli 4 cm in più rispetto a quello senza ricarica.

Se si rapporta il dato relativo così calcolato con lo spessore dei rifiuti, si può osservare come il cedimento secondario stimato risulti pari solo al 5,6%.

Tale valore così medio-basso non deve stupire poiché il contributo primario dei cedimenti secondari si è già in parte verificato per effetto del lungo tempo trascorso dalla coltivazione dei primi settori della discarica e del sovraccarico indotto dalla

presenza di rifiuti provvisoriamente stoccati sulle superfici dei settori 4, 3 e 2 (pre-carico).

Si ritiene che la stima dei cedimenti secondari effettuata utilizzando il rapporto $C_\alpha/C_c = 0,058 \div 0,073$ con $C_c = 0,79 = 0,18 \times e_0$ sia la più attendibile al caso di specie, posto che, come osservato da Van Impe e Squeglia (1997), C_α appare più dipendente dalle condizioni che favoriscono l'attività microbica (e quindi dal tempo) piuttosto che dal valore dell'indice dei vuoti e_0 .

b) SETTORE 1 (lotti 1.1 e 1.2): in fase di ultimazione della coltivazione:

- indice medio dei vuoti¹⁷ $e_0 = 6,75 \times 0,85 \approx 5,74$;
- contenuto di sostanza organica “*medio-basso*”;
- $C_c = 1,43$, ovvero $0,25 \times 5,74$ (cfr. anche fig. 5a);
- rapporto $C_\alpha/C_c = 0,058 \div 0,073$ (Boutwell & Fiore, 1995);
- $C_\alpha = (0,058 \div 0,073) \times 1,43 \approx 0,083 \div 0,104$ (cfr. anche Olivier et. al., 2003);
- H = spessore max dei rifiuti = 10,55 m;
- H_1 = spessore max dei rifiuti con ipotesi di ricarica di 0,75 m = 11,30 m;
- t_1 = tempo di esaurimento dei cedimenti primari = alla chiusura (ipotesi);
- t_2 = tempo trascorso dalla chiusura + 1 anno,

Applicando nuovamente l'espressione proposta da Sowers (1973):

$$S_s = C_\alpha \times H \times \log(t_2/t_1) \quad \text{e} \quad S_{S1} = C_\alpha \times H_1 \times \log(t_2/t_1)$$

con $C_\alpha f \rightarrow (e_0, t)$ si ottengono i seguenti risultati:

¹⁷ Si veda la nota precedente a cui è stato applicato nel caso di specie una riduzione del 15% a causa del minor tempo di consolidazione.

Relazione di Sowers con $C_c = 0,25 \times e_o$

| Periodo | H = 10,55 m | H₁ = 11,30 m |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| ad 1 anno dalla chiusura: | $S_s \approx 0,26 \text{ m}$ | $S_{s1} \approx 0,28 \text{ m}$ |
| a 3 anni dalla chiusura: | $S_s \approx 0,57 \text{ m}$ | $S_{s1} \approx 0,61 \text{ m}$ |
| a 5 anni dalla chiusura: | $S_s \approx 0,80 \text{ m}$ | $S_{s1} \approx 0,85 \text{ m}$ |
| a 8 anni dalla chiusura: | $S_s \approx 1,05 \text{ m}$ | $S_{s1} \approx 1,12 \text{ m}$ |

Assumendo come tempo di esaurimento dei cedimenti secondari tutto il periodo di massima produzione del biogas per il settore 1 pari a circa 8 anni dalla realizzazione della copertura finale della discarica, il cedimento secondario max con la ricarica di 0,75 m di rifiuti sarà pari a 1,12 mt, ovvero a circa il 9,91% dello spessore dei rifiuti.

6.7 Considerazioni conclusive

Sulla base dei calcoli effettuati in precedenza si può stimare un cedimento totale ST del piano di posa del sistema di chiusura finale della discarica come somma di due addendi:

- assestamento dovuto alla trasformazione in biogas della massa dei rifiuti;
- cedimento di consolidazione secondaria.

Nei due casi sopra esaminati: stato di fatto ($H = 10,55$ m per il 1° settore e 10,85 m per gli altri settori) e ricarica con uno strato di rifiuti minimo di 0,75 m ($H_1 = 11,30$ m nel 1° settore e 11,60 m negli altri settori) i corrispondenti cedimenti totali ST e ST_1 saranno rispettivamente pari a:

| | | | |
|---------------------|---|---------------------------|---|
| ST ($H = 10,55$ m) | 1° SETTORE $\approx 0,63$ m + 1,05 m $\approx 1,68$ m | ST_1 ($H_1 = 11,30$ m) | 1° SETTORE $\approx 0,63$ m + 1,12 m $\approx 1,75$ m |
| ST ($H = 10,85$ m) | 2°, 3° e 4° SETTORE $\approx 0,48$ m + 0,60 m $\approx 1,08$ m | ST_1 ($H_1 = 11,60$ m) | 2°, 3° e 4° SETTORE $\approx 0,48$ m + 0,64 m $\approx 1,12$ m |

Ne consegue che lo strato minimo di ricarica generalizzato di rifiuti sulla superficie della discarica ipotizzato di 0,75 m rappresenta il limite inferiore al di sotto del quale non è oggettivamente ed opportuno determinare; per contro, si consiglia di applicare al 1° settore della discarica una ricarica di 1,50 m, mentre nei settori 2 e 3 la ricarica dovrebbe essere cautelativamente posta pari a 1,00 m. Al settore 4, infine è possibile applicare una ricarica di 0,75 m, e così per un volume complessivo «temporaneo» di 98.244,44 mc.

Allo scopo di accelerare ulteriormente il processo di stabilizzazione del plateau finale della discarica e, soprattutto, quello più recente in coltivazione, si ritiene che al di sopra dello strato di ricarica di rifiuti come sopra determinato si possa ulteriormente procedere ad un pre-carico attraverso la posa in opera di parte del cumulo di terreno argilloso proveniente dagli scavi di costruzione della discarica all'uopo accantonato per la copertura definitiva della discarica.