

**METODI E APPLICAZIONI INGEGNERISTICHE DI RISANAMENTO DELLE
DISCARICHE NON CONTROLLATE****3.1. Introduzione**

Il termine gestione dei rifiuti solidi (in inglese *Solid Waste Management* o SWM) comprende tutti i processi che vanno dalla raccolta di rifiuti solidi fino al loro smaltimento. La gestione integrata dei rifiuti solidi (*Integrated SWM*) è un concetto più ampio che contiene fattori che vanno dalla salute pubblica, all'economia del territorio, all'estetica del sito, ecc. Il risanamento delle discariche non controllate è un processo che può essere analizzato nell'ambito della Gestione dei Rifiuti Solidi Integrata (ISWM). Di conseguenza, la gestione dei rifiuti solidi può essere definita come l'insieme delle tecniche e delle applicazioni volte a minimizzare gli effetti dannosi dei rifiuti sull'ambiente e alla loro conversione in prodotti utili.

L'accumulo dei rifiuti in discariche non controllate/ a cielo aperto è stato per lungo tempo il metodo più utilizzato dalle amministrazioni locali per smaltire i rifiuti solidi urbani (RSU) in quanto soluzione facile, ed economica, ma priva di professionalità e responsabilità ambientale.

I rifiuti organici e biodegradabili provenienti dagli RSU sono i principali responsabili degli effetti negativi delle discariche non controllate. Una volta accumulati, questo tipo di rifiuti subiscono un processo di degradazione aerobica e anaerobica. L'elevato contenuto di materia carboniosa nei rifiuti biodegradabili aumenta la concentrazione di domanda chimica di ossigeno (COD) nel percolato e il volume del biogas prodotto dalla discarica. Il percolato si genera dall'infiltrazione delle precipitazioni sulla massa rifiuti e dall'umidità dei rifiuti stessi. Come già detto, il valore di COD nel percolato è elevato a causa dell'alto contenuto organico degli RSU. Inoltre, il percolato è generalmente caratterizzato da un elevato contenuto di acidi grassi volatili (VFA), metalli pesanti, azoto ammonico e basso pH. Per questo, il percolato viene considerato con un'acqua reflua ad alta resistenza in termini di caratterizzazione e trattabilità, capace di provocare danni irreparabili se raggiunge le acque sotterranee. Come ben noto, le discariche non controllate non dispongono di un sistema di raccolta del percolato. L'altro problema di questo

tipo di discariche è la produzione di gas, soprattutto di metano. Come gas infiammabile, il metano è capace di generare esplosioni e roghi nella discarica e intorno ad essa. Inoltre, il metano è molto più dannoso dell'anidride carbonica in termini di effetto serra e cambiamento climatico. Senza un impianto di raccolta del gas di discarica, il metano viene rilasciato in atmosfera. Le emissioni odorigene sono un altro problema legato alle discariche non controllate. In particolare, le periferie risentono degli effetti negativi della malagestione dei rifiuti solidi urbani. A causa dei loro effetti nocivi e malsani, le discariche non controllate devono subire un processo di riabilitazione totale.

Sfortunatamente, mentre i paesi sviluppati si avvalgono di moderni impianti di smaltimento degli RSU come l'incenerimento, il compostaggio e le discariche ingegnerizzate, i paesi più poveri e via di sviluppo utilizzano ancora le discariche non controllate/ a cielo aperto. Il risanamento di questi siti non controllati dovrebbe essere una priorità mondiale. Il risanamento deve interessare anche i siti usati come discariche che sono stati abbandonati perché rappresentano una fonte di danni potenzialmente irreparabili nel tempo.

Sono stati utilizzati diversi metodi per riabilitare le discariche non controllate e quelli più comunemente usati sono il risanamento in-situ, il risanamento tramite separazione meccanica e quello tramite il trasferimento degli RSU in discariche più attrezzate. La scelta del metodo dipende dalla situazione e dai bisogni della discarica non controllata da riabilitare. Inoltre, è necessario considerare anche il costo dell'intervento di risanamento. I parametri utili per scegliere il metodo sono l'ubicazione e le dimensioni dell'area, la quantità di rifiuti presenti e la vicinanza con corpi idrici superficiali e sotterranei. Anche fattori di tipo topografico e geologico sono importanti per decidere se effettuare o meno un risanamento in situ. La composizione merceologica dei rifiuti può essere analizzata estraendo dei campioni da diversi punti della discarica. Dopo questo studio di caratterizzazione, è possibile riabilitare la discarica attraverso la separazione meccanica. Per esempio, questo metodo è applicabile quando la quantità di rifiuti riciclabili è elevata rispetto al residuo non riciclabile. Tuttavia, i fattori economici e l'analisi dei costi devono essere presi in considerazione prima del risanamento. Questi due tipi di valutazione vengono integrati nelle applicazioni ingegneristiche spiegate più avanti in questo capitolo.

Le applicazioni ingegneristiche possono suddividersi sotto due aspetti: la **valutazione dello stato attuale** e la **pianificazione degli interventi di risanamento**. Nel primo caso, vengono compresi la valutazione della situazione dell'area prima della sistemazione dei rifiuti, la pianificazione

dell'area finale, l'analisi idrogeologica, il tipo e la quantità dei rifiuti presenti nel sito da riabilitare. Dopo questa fase, si passa al quelle di pianificazione e implementazione che comprendono innanzitutto:

- la stabilità dei versanti e la costruzione delle barriere;
- l'installazione dei sistemi di drenaggio delle acque superficiali e del percolato;
- il sistema di captazione del biogas;
- la copertura finale;
- i pozzi di ispezione;
- il piano paesaggistico e quello di monitoraggio.

Sebbene queste fasi differiscano tra i vari metodi di risanamento, esse rappresentano la base del processo in questione.

Lo scopo di questo capitolo è introdurre ai metodi e alle applicazioni ingegneristiche di risanamento delle discariche non controllate.

Nelle prossime sezioni verranno presentati il risanamento in-situ, il risanamento tramite separazione meccanica dei rifiuti e quello tramite il trasferimento degli RSU in un altro impianto. Infine, verranno esplorate le principali applicazioni ingegneristiche.

3.1. Metodi di risanamento delle discariche non controllate

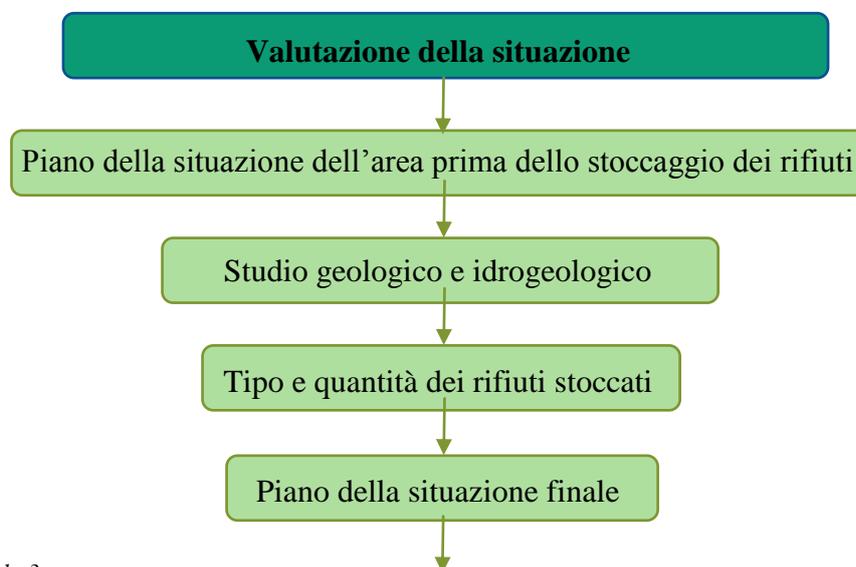
Nei paesi europei non esistono regole precise per il risanamento delle discariche a cielo aperto e/o non controllate. La Direttiva europea in materia di gestione dei rifiuti (No: 1999/31/EC) definisce le procedure da implementare per prevenire o minimizzare gli effetti dello smaltimento rifiuti sull'ambiente. Le discariche non conformi che sono state chiuse prima che questa direttiva entrasse in vigore non devono rispettare i criteri definiti nel regolamento ("Procedure di chiusura"). Tuttavia, gli stati membri devono adottare disposizioni in linea con la Direttiva per le discariche che sono attualmente attive (incluse le discariche non controllate). Il risanamento delle discariche non controllate rappresenta una delle priorità tra quelle che riguardano la sostenibilità ambientale e di solito viene lasciata all'iniziativa delle amministrazioni locali. Il processo di risanamento è un sistema di fattori che comprende una fase di valutazione, una di pianificazione e una di implementazione. La lista delle azioni da intraprendere possono riguardare il controllo delle acque superficiali e i sistemi di drenaggio del percolato e di captazione del gas di discarica. Questi processi possono variare e/o includere fasi diverse in base alla discarica non controllata da riabilitare; altre procedure possono integrare fasi diverse rispetto

a quelle menzionate. I processi riabilitativi verranno affrontati di seguito secondo i 3 metodi riabilitativi menzionati.

3.1.1. Il risanamento in-situ

Come suggerisce il nome, il risanamento in-situ, può definirsi come la riabilitazione di una discarica non controllata senza la rimozione dei rifiuti dal sito stesso. Questo metodo è applicabile su discariche non controllate abbandonate e ancora in uso. Le priorità di questo metodo sono quelle di prevenire problemi legati alla stabilità del sito, alla minimizzazione della produzione di percolato, alle emissioni odorigene e alla proliferazione di insetti e di malattie trasmesse da vettori e di rendere l'area un posto sicuro per gli esseri viventi e per l'ambiente. I modi in cui la discarica risanata può essere riutilizzata verranno affrontati nel Capitolo 7.

Le procedure previste nel metodo di risanamento in-situ vengono implementate secondo una sequenza definita (Figura 3.1). In primo luogo, a seconda della discarica da riabilitare, è necessario valutare la situazione in cui si trova. A seguito di questa valutazione, si passa all'analisi della discarica prima dello stoccaggio dei rifiuti e quindi si passa alla struttura geologica e idrogeologica del sito, al tipo e alla quantità di rifiuti stoccati fino a quel momento e, infine, si pianifica il processo di chiusura della discarica. Si passa poi, alla fase di pianificazione e implementazione dove vengono eseguite rispettivamente le opere di stabilizzazione dei versanti e di costruzione delle barriere, il sistema di drenaggio delle acque superficiali e del percolato, il sistema di captazione del gas di discarica, la copertura finale, i canali di scolo e le strade interne, il piano paesaggistico, i pozzi di ispezione e il piano di monitoraggio. Queste fasi saranno analizzate nella sezione dedicata alle applicazioni ingegneristiche.



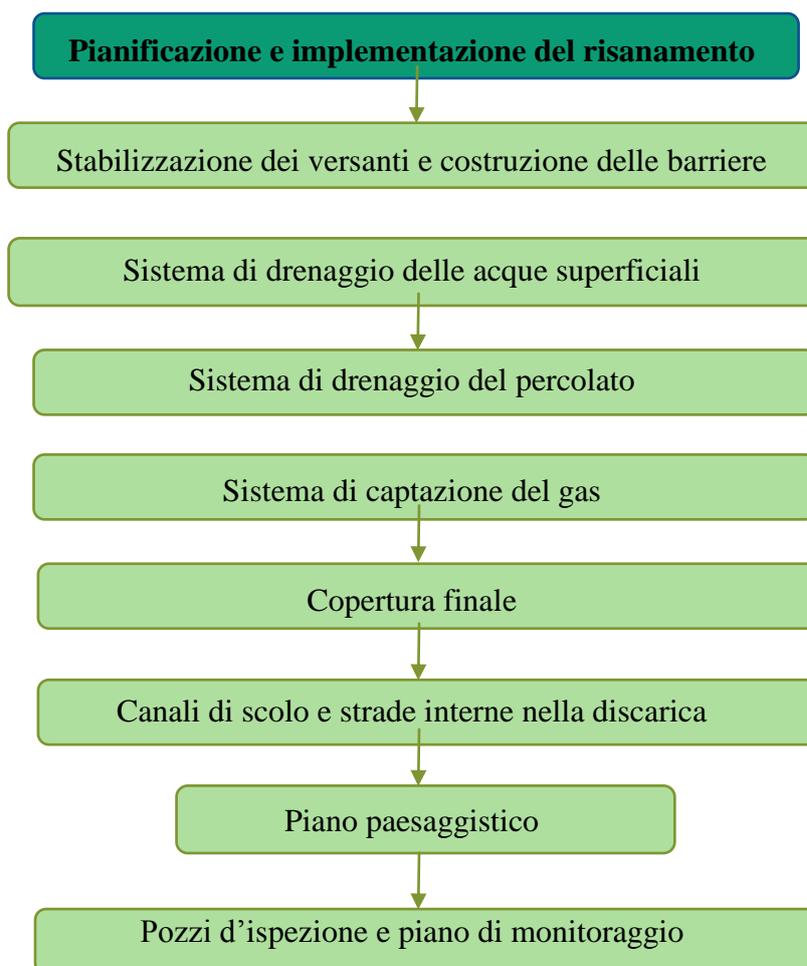


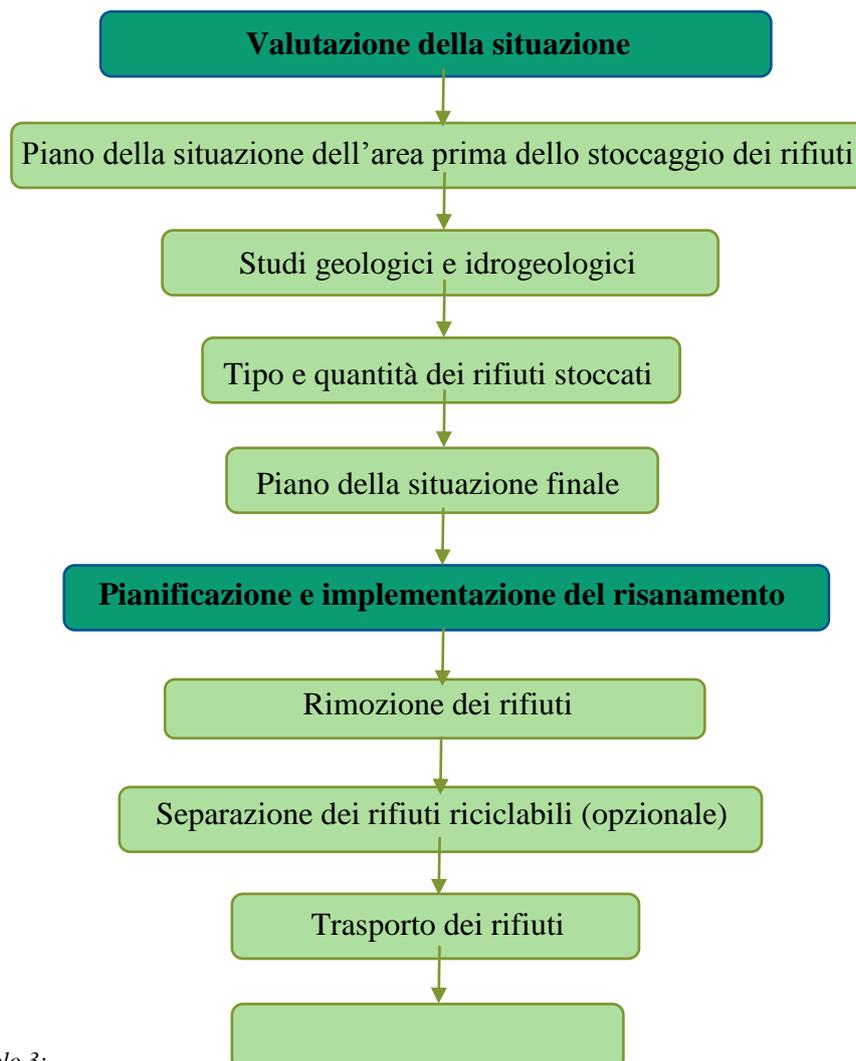
Figura 3.1. Diagramma del processo di risanamento in-situ.

Durante la stabilizzazione dei versanti e la delimitazione dei confini dell'area, i rifiuti collocati in superficie vengono accantonati. Con la posa e la compattazione degli strati di copertura, i rifiuti nella discarica vengono maggiormente compressi. Nel processo di risanamento in-situ, i rifiuti non subiscono altri trattamenti. I rifiuti organici continuano a degradarsi per anni dopo la chiusura della discarica. Durante il processo di decomposizione, vengono rilasciati acqua e gas da discarica (LFG). Per questa ragione, la presenza di sistemi di drenaggio del percolato e dei gas una volta concluso il processo di risanamento è importante per evitare l'inquinamento delle acque sotterranee ed evitare roghi e incendi.

Poiché le discariche non controllate sono state utilizzate per molti anni, non è possibile stimare la quantità di rifiuti presenti nelle aree da riabilitare e l'estensione dell'area di stoccaggio. Per questo motivo, il risanamento delle maggior parte delle discariche non controllate viene fatta tramite il metodo in-situ.

3.1.2. Il risanamento tramite trasferimento dei rifiuti

In alcuni casi, il risanamento in-situ non è applicabile. Al contrario, i rifiuti devono essere trasportati in un altro impianto di smaltimento rifiuti più attrezzato. Questo metodo è particolarmente indicato quando la quantità di rifiuti è esigua. Altre condizioni che determinano la scelta di questo metodo sono la presenza di un'area sensibile dal punto di vista ambientale (ad es., un'area naturale protetta), la grande quantità di acque sotterranee, e la vicinanza con una discarica ingegnerizzata. Anche in questo metodo riabilitativo, il primo passo è la valutazione della situazione iniziale. In seguito, si procede con il trasporto dei rifiuti verso un altro impianto e in questa fase è possibile anche che vengano separati da quelli riciclabili. Dopo aver sgomberato la discarica e in base alle condizioni dell'area, viene applicato uno stato di copertura. In questo modo, la discarica è stata risanata e può servire diversi scopi. Di seguito, viene riportato il diagramma del procedimento di risanamento tramite il trasferimento dei rifiuti (Figura 3.2.)



Stoccaggio in discarica

Figura 3.2. Diagramma del procedimento di risanamento tramite il trasferimento dei rifiuti

Come accennato, l'applicazione di questo metodo è efficace ed economica quando la discarica non controllata è piccola, quando la quantità di rifiuti è ridotta e quando e quando c'è una discarica più attrezzata in cui stoccare i rifiuti nelle vicinanze. Se l'area in cui sorge la discarica è vicina a un corpo idrico superficiale e/o sotterraneo, i sistemi di drenaggio delle acque di ruscellamento e del percolato devono essere progettati molto attentamente. In questo caso, il trasferimento dei rifiuti dovrebbe essere la soluzione più conveniente dal punto di vista economico. Inoltre, questo metodo riabilitativo è indicato quando la discarica non controllata è ancora in uso perché la decomposizione dei rifiuti organici è in gran parte incompleta. Dopo la riabilitazione e la chiusura della discarica non controllata, i rifiuti organici continuano a biodegradarsi. Il risultato è la contrazione del volume dei rifiuti che provoca dei crolli dell'area di stoccaggio. Gli assestamenti del corpo rifiuti possono compromettere lo strato di copertura finale e danneggiare i sistemi di drenaggio delle acque superficiali e del percolato. Considerando questi fattori e le possibilità economiche, il metodo di risanamento tramite trasferimento dei rifiuti in un altro impianto rappresenta l'opzione più conveniente e opportuna.

3.1.3. Il risanamento tramite separazione meccanica dei rifiuti

Il risanamento di una discarica non controllata/ a cielo aperto tramite separazione meccanica dei rifiuti consiste nella separazione e nell'estrazione dei materiali riciclabili come metallo, plastica, vetro e di energia da materiali organici combustibili. Si tratta di una pratica di recupero dei materiali che in letteratura viene definita spesso "landfill mining". In questo metodo, come quello della sezione precedente, dopo aver valutato la situazione iniziale i rifiuti vengono scavati e categorizzati (Figura 3.3). Gli elementi sono suddivisi in terriccio, materiali recuperabili, rifiuti metallici e polveri sottili. La valutazione dei materiali recuperabili viene generalmente fatta in due modi. Il primo metodo consiste nel riciclare i rifiuti metallici, plastici e di vetro che non subiscono un forte processo di decomposizione e che non inquinano molto. Nel secondo metodo, dopo aver separato i rifiuti metallici, si procede con l'estrazione di energia dai materiali combustibili rimasti.

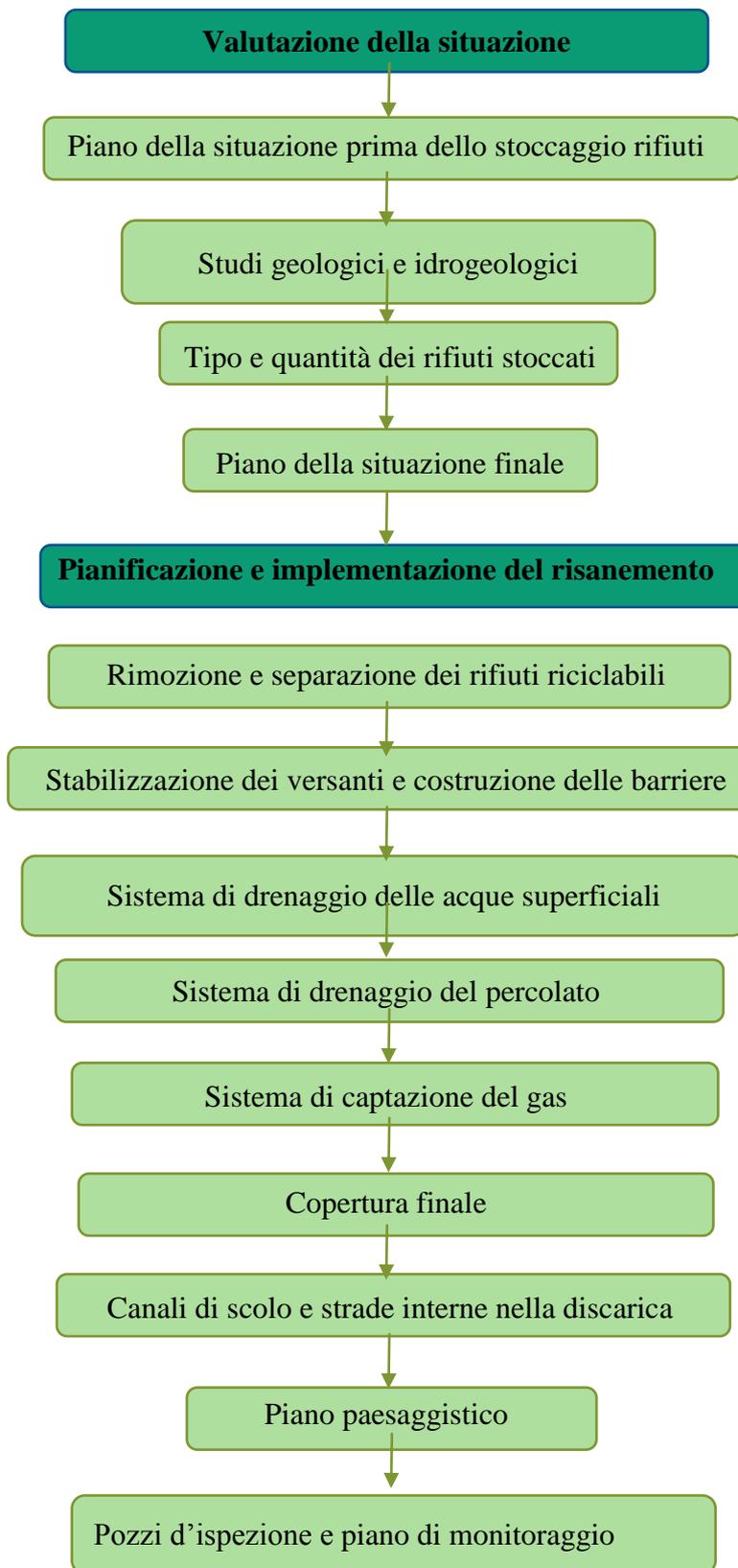


Figura 3.3. Diagramma del processo di risanamento tramite separazione meccanica dei rifiuti

Siccome il costo di questo tipo di risanamento è elevato, è necessario effettuare uno studio di fattibilità del progetto da corroborare tramite un test. Questo studio è stato realizzato per il risanamento della discarica non controllata di Florida (Jain et al., 2013). In questo articolo si descrive come, innanzitutto, sia stato fatto un test su circa uno dei 18.2 ettari dell'area, e che gli studi di risanamento su vasta scala siano stati condotti su 6.8 ettari. In un altro studio, sono stati analizzati due scenari diversi per l'utilizzo dei materiali riciclabili come combustibili dopo averli separati meccanicamente in una discarica non controllata in Sri Lanka. Tuttavia, lo studio ha dimostrato che questo tipo di metodo riabilitativo non era adatto alle necessità della discarica a causa dei costi elevati di trasporto rispetto alla rendita di energia elettrica (Maheshi et al., 2015).

3.3. Applicazioni ingegneristiche per discariche da risanare

3.3.1. Valutazione della situazione iniziale

Prima di iniziare i lavori di risanamento, è necessario valutare la situazione iniziale della discarica non controllata su cui si intende intervenire. È importante per la pianificazione avere tutte le informazioni necessarie riguardo la situazione prima dello stoccaggio dei rifiuti insieme con gli studi geologici e idrogeologici del sito, il tipo e la quantità di rifiuti stoccati e il piano di attuazione. Queste preziose informazioni supportano le decisioni che riguardano la scelta del metodo riabilitativo e delle tecniche da applicare nel processo.

3.3.1.1. Situazione dell'area prima dello stoccaggio dei rifiuti

Prima di iniziare i lavori di risanamento della discarica non controllata sono necessarie le informazioni sulla situazione del sito prima dello stoccaggio dei rifiuti e, soprattutto, lo scopo della discarica così come i criteri utilizzati per selezionare la zona.

Esistono alcuni criteri per la scelta dell'ubicazione della discarica nello smaltimento dei rifiuti nel metodo di trasferimento dei rifiuti in discarica. Il primo di questi criteri è che l'area da

utilizzare come discarica sia sufficientemente grande per stoccare i rifiuti per 25-30 anni. Un altro criterio importante è la distanza tra l'area e le zone residenziali. L'area selezionata non dovrebbe sorgere vicino a delle zone abitate per non influire negativamente sulla salute delle persone e sull'ecosistema circostante; allo stesso tempo, la discarica non dovrebbe essere così lontana da far aumentare eccessivamente i costi di carburante e l'ammortamento dei veicoli per la raccolta degli RSU. Inoltre, occorre prestare attenzione anche alle condizioni speciali dell'area selezionata, come la distanza da terreni agricoli, foreste e aree naturali protette, la vicinanza con le risorse idriche sotterranee e superficiali, la topografia della zona e le condizioni idrogeologiche, il rischio di inondazioni, frane e valanghe, la direzione dei venti e le precipitazioni. Tuttavia, come già detto, questi criteri sono validi per le discariche controllate, mentre non lo sono per i siti in cui i rifiuti vengono accumulati indiscriminatamente e senza misure adeguate. In genere, come sito di stoccaggio si sceglie un'area in cui gli RSU possono essere scaricati facilmente mentre nel caso delle discariche a cielo aperto/ non controllate lo scarico dei rifiuti è casuale. La vicinanza con le zone residenziali comporta problemi di salute e rischi per l'ambiente non trascurabili. Le discariche non controllate possono trovarsi in prossimità di aree agricole (Figura 3.4.a), foreste (Figura 3.4.b), e alvei fluviali. Purtroppo, anche le linee di faglia possono essere utilizzate come discariche (Figura 3.4.c).



a. Una discarica non controllata vicina a un terreno agricolo (vigna)



b. Una discarica non controllata fiancheggia una foresta



c. Una discarica non controllata in una faglia del suolo

Figura 3.4. Alcuni degli effetti negativi delle discariche non controllate.

Conoscere la situazione prima dello stoccaggio non controllato dei rifiuti è un fattore che contribuirà a ogni fase del risanamento e nella scelta dello scopo per il quale il sito verrà riutilizzato.

3.3.1.2. Studi geologici e idrogeologici

Le informazioni che emergono dallo studio geologico e idrogeologico di un sito da riabilitare riguardano le proprietà del suolo e le risorse idriche sotto e intorno alla discarica non controllata. Questi dati sono fondamentali per calcolare il rischio di inquinamento del terreno e delle acque sotterranee da parte dei rifiuti.

Le proprietà del terreno e il tipo di roccia emergono grazie agli studi geologici condotti nel sito della discarica non controllata e permettono di capire quanto il percolato riuscirà a infiltrarsi negli strati del suolo e se riuscirà a raggiungere i corpi idrici sotterranei. Pertanto, il tipo di sottosuolo influisce tanto sul trasporto dell'acqua quanto sulla propagazione degli agenti inquinanti. Ad esempio, a causa dell'alto coefficiente di permeabilità dei terreni sabbiosi, il rischio di inquinamento del percolato sarà più alto. I terreni argillosi invece, hanno un coefficiente di permeabilità più basso e una maggior capacità di contenere la propagazione delle sostanze tossiche e inquinanti. Anche il tipo di sottosuolo influisce sul grado di assestamento della discarica non controllata. Ad esempio, le discariche che sorgono su terreni a basso contenuto sabbioso sono meno stabili rispetto a quelle che sorgono su un terreno argilloso e torboso. In quest'ultimo caso però, bisogna considerare che potrebbero verificarsi dei cedimenti quando verrà applicato lo strato di copertura finale (Mcbean et al., 1995). Per questi motivi, è importante determinare la struttura del suolo prima di iniziare i lavori di risanamento.

Oltre alla struttura del terreno, gli studi geologici danno informazioni sulla formazione tettonica generale, la piaghe, la tipologia di faglie, gli avvallamenti, i piegamenti, l'anticlinale e il sinclinale e i loro assi, gli slittamenti della faglia e le relative direzioni (DSI 2019). Dopo i rilievi geologici, questi dati devono essere illustrati sulla mappa, descritti e messi in relazione con il progetto di riabilitazione della discarica. Alla luce di queste informazioni, si possono fare previsioni sui problemi di compressione del gas generato in discarica, eventuali perdite o cambiamenti dell'inclinazione del percolato che possono verificarsi in seguito a degli eventi sismici.

Quando si esamina la struttura idrogeologica della zona, il clima e la prossimità delle risorse idriche sono elementi importanti da considerare. I dati sulle precipitazioni, la temperatura e l'evaporazione della regione possono essere ottenuti dalle stazioni meteorologiche situate vicino della discarica non controllata. Valutando questi dati è possibile calcolare le quantità di

precipitazioni mensili e annuali. Con questi dati è possibile calcolare la quantità di acque meteoriche che scorrendo sulla superficie della discarica possono infiltrarsi e finire per contaminare le falde sotterranee. Come si vede nella Figura 3.5, le discariche non controllate possono trovarsi vicino a delle risorse idriche. Un altro dato che emerge dagli studi idrogeologici è l'identificazione dei fiumi, dei laghi e paludi, dighe e stagni, e falde acquifere nelle vicinanze del sito da riabilitare. I report degli studi idrogeologici possono anche includere le dimensioni, le direzioni di flusso, la portata e l'entità dei corpi idrici nascosti e l'utilizzo di queste fonti d'acqua. La valutazione di questi dati, combinata con le informazioni climatiche, rivela le variazioni mensili e annuali delle risorse idriche.



Figura 3.5. Un esempio di discarica non controllata vicino a una risorsa idrica

Determinare il livello delle acque sotterranee è un processo importante per definire i livelli di contaminazione in caso di fuoriuscita di percolato dalla discarica non controllata. Nei casi in cui il livello d'acqua è alto, è inevitabile che l'acqua si mescoli con gli agenti inquinanti trasportati dal percolato. Anche la permeabilità dello strato di terreno sul fondo della discarica è un dato che serve a determinare il livello di contaminazione. Le concentrazioni di inquinanti misurati tramite il campionamento delle acque sotterranee dovrebbero essere aggiunte alla relazione dello studio idrogeologico.

3.3.1.3. Tipologia e quantità dei rifiuti stoccati

Una delle informazioni necessarie nella fase di valutazione dello stato della discarica non controllata sono i dati sulla composizione merceologica dei rifiuti. Questi dati includono la durata di utilizzo della discarica, il volume, la densità e la massa dei rifiuti. Conoscere la quantità di rifiuti riciclabili e organici presenti in discarica è uno dei parametri che possono essere utilizzati per determinare il metodo riabilitativo. Ad esempio, se la quantità di rifiuti riciclabili nell'area è grande, allora il risanamento tramite separazione meccanica sarà la scelta più appropriata.

Se la discarica non controllata è gestita da un'azienda municipalizzata, qualsiasi informazione sui rifiuti può essere ottenuta dall'unità competente. Se si tratta di una discarica abusiva e illegale, i metodi per stabilire tipologia e quantità dei rifiuti stoccati sono due. Il primo si basa sulla stima che viene fatta in base alla persone che vivono nelle zone residenziali in prossimità della discarica e che si servono della stessa. Innanzitutto, si effettua una caratterizzazione dei rifiuti determinando le unità familiari che vivono nella zona e si calcola la quantità di rifiuti prodotti pro capite. In questa analisi si deve considerare anche la presenza o meno di raccoglitori di rifiuti (*scavengers*). La quantità di rifiuti nella discarica viene stimata in base alla quantità di rifiuti pro capite e alla durata di utilizzo della discarica non controllata. Nel secondo metodo, dopo aver calcolato il volume, la massa e la densità dei rifiuti prelevando campioni da alcuni punti della discarica, si passa allo studio di caratterizzazione. Questo prelievo dei rifiuti è utile perché ogni campione ha un diverso rapporto di compressione e un diverso grado di decomposizione dei rifiuti in base agli anni. Se la discarica da risanare è un'area inutilizzata da molto tempo, la scelta del metodo di risanamento dovrebbe ricadere sulla separazione meccanica visto che i materiali organici saranno già decomposti.

3.3.1.4. Piano della situazione finale

Prima di procedere al risanamento della discarica non controllata, è necessario preparare un piano che comprenda tutte le informazioni considerate utili per le fasi successive di progettazione e implementazione. In questo piano devono essere incluse innanzitutto le informazioni sulla posizione geografica e la misurazione della superficie dell'area da risanare. Queste informazioni possono essere supportate da mappe aeree, fotografie che mostrano lo stato della discarica e le informazioni sulle aree residenziali nelle vicinanze. Inoltre è necessario calcolare la profondità e il volume dei rifiuti. Un altro fattore importante è la durata di utilizzo della discarica non controllata e il momento in cui lo stoccaggio dei rifiuti è terminato. Grazie a

queste informazioni è possibile determinare la quantità di gas di discarica che può essere rilasciata in atmosfera come risultato della decomposizione dei rifiuti organici, nonché la quantità di percolato generata. Queste ultime due informazioni saranno essenziali per la progettazione del sistema di captazione del gas e di raccolta del percolato da implementare nella fase successiva del risanamento.

Il piano della situazione finale può anche includere delle problematiche ambientali come le emissioni odorigene e la proliferazione di insetti nell'area. Considerare questi fattori aiuta a pianificare meglio le precauzioni da prendere durante il risanamento. Inoltre, se necessario, è possibile includere nel piano il campionamento delle acque superficiali e sotterranee in modo da verificare la presenza di coliformi fecali. Nello stesso piano si possono aggiungere informazioni su disastri come terremoti, frane, esplosioni e incendi avvenuti nell'area in cui sorge la discarica non controllata. Durante questi interventi riabilitativi, bisogna anche fare attenzione alle perdite di gas che possono diffondersi nell'atmosfera aumentando il rischio di esplosioni e incendi.

Poiché i piani in questione sono i documenti a cui si accede prima di iniziare i lavori di risanamento, tutte le informazioni incluse dovrebbero confluire nel piano di valutazione della situazione della discarica da riabilitare. Dopo la creazione del piano, si può procedere ai lavori con più consapevolezza e sicurezza.

3.3.2. La progettazione e l'implementazione degli interventi di risanamento

Dopo le osservazioni e la raccolta di informazioni sul sito da risanare si passa alla progettazione delle attività da svolgere. Le attività saranno parte delle fasi che sono importanti per mettere in sicurezza il sito. Il lavoro svolto per ogni fase influisce direttamente e indirettamente su quella successiva. In questo capitolo verranno menzionati le opere di stabilizzazione dei versanti e di costruzione delle barriere, il sistema di drenaggio delle acque superficiali, il sistema di drenaggio del percolato, il sistema di captazione del gas, il sistema di copertura finale, i canali di scolo e le strade interne della discarica, il piano paesaggistico, i pozzi d'ispezione, e il piano di monitoraggio.

3.3.2.1. La stabilizzazione dei versanti e la costruzione delle barriere

Poiché le discariche non controllate non sono un metodo di smaltimento dei rifiuti appropriato, la forma e le dimensioni del corpo rifiuti non sono chiare. In alcuni casi, l'altezza della collina dei

rifiuti è molto elevata e talvolta la discarica si estende su una vasta area, perciò è necessario innanzitutto delimitarla. Come si vede nella Figura 3.6 vengono tracciati dei confini intorno al sito in cui sorge la discarica. Successivamente, i rifiuti rimasti fuori dalle linee, vengono trasportati nell'area apposita.



Figura 3.6. La delimitazione dei confini della discarica

Dopo questa fase, l'area di stoccaggio deve essere rinforzata per garantire la resistenza alle lacerazioni. Il cumulo deve avere un'inclinazione di 3:1 al fine di mantenere la stabilità dei versanti ed evitare che lo strato di copertura finale scivoli (Blight, 2008). Un esempio di questo procedimento viene mostrato nella Figura 3.7. La parte superiore del cumulo, che avrà la forma di un trapezio, può essere leggermente inclinata (al massimo dell'1-3 %) per consentire il deflusso dell'acqua piovana.



Figura 3.7. Il trasporto dei rifiuti all'interno dell'area delimitata e l'inclinazione dei versanti.

In alcuni casi, può essere necessario terrazzare i rifiuti piuttosto che creare un'unica forma trapezoidale. Ciò è indicato nel caso in cui l'altezza del corpo rifiuti superi 1.5 metri o vi sia un insediamento vicino al sito che potrebbe subire le conseguenze di un crollo o smottamento, poiché è difficile creare una pendenza di 3:1 in una sola volta. Questo metodo è stato applicato dopo il crollo della discarica non controllata di Meethotamulla in Sri Lanka (Jayaweera et al., 2019). Per prevenire ulteriori smottamenti, le aree della discarica che erano molto vicine al centro abitato sono state terrazzate. Lo stesso metodo è stato applicato per risolvere dei problemi di smottamento nella discarica non controllata di Payatas, a Quezon City nelle Filippine (Jafari et al., 2013). In entrambi i casi, l'intervento è stato effettuato dopo che i crolli o i problemi di instabilità dei versanti delle discariche si erano già verificati. Il risanamento di questo tipo di siti è molto importante per evitare i disastri.

3.3.2.2. Il sistema di drenaggio delle acque superficiali

L'acqua è uno dei parametri da monitorare all'interno del sito di stoccaggio dei rifiuti. Per questo motivo, durante il risanamento di una discarica non controllata è necessario tenere sotto controllo il bilancio idrico. Ci sono molti fattori interni e esterni che influenzano il bilancio idrico all'interno del corpo rifiuti delle discariche (Figura 3.8). Questi input e output determinano la quantità di percolato che gli RSU sono in grado di generare nel tempo. L'umidità dei rifiuti e la

scarsa quantità d'acqua prodotta durante la decomposizione anaerobica aumentano la produzione di percolato. Oltre a queste, i fattori esterni sono l'infiltrazione delle acque meteoriche sul corpo rifiuti e gli apporti idrici che filtrano dalle acque sotterranee. La parte di precipitazioni che evapora dalla superficie e la parte che passa dal flusso superficiale costituiscono gli output. Considerando tutti questi fattori in un'equazione, è possibile calcolare il bilancio idrico di una discarica, come mostrato nella Figura 3.1 (Worrell et al. 2011). Attraverso questi dati è possibile ricavare l'infrastruttura per la selezione dei materiali da utilizzare per lo strato di copertura finale, oltre al sistema di raccolta dell'acqua di ruscellamento e il sistema di raccolta di percolato.

$$C = P(1 - R) - S - E \quad (3.1)$$

- C : percolazione totale nello strato superficiale del suolo, mm/anno
- P : precipitazioni, mm/anno
- R : coefficiente di ruscellamento superficiale
- S : accumulo nel suolo o nel corpo rifiuti, mm/anno
- E : evapotraspirazione, mm/anno

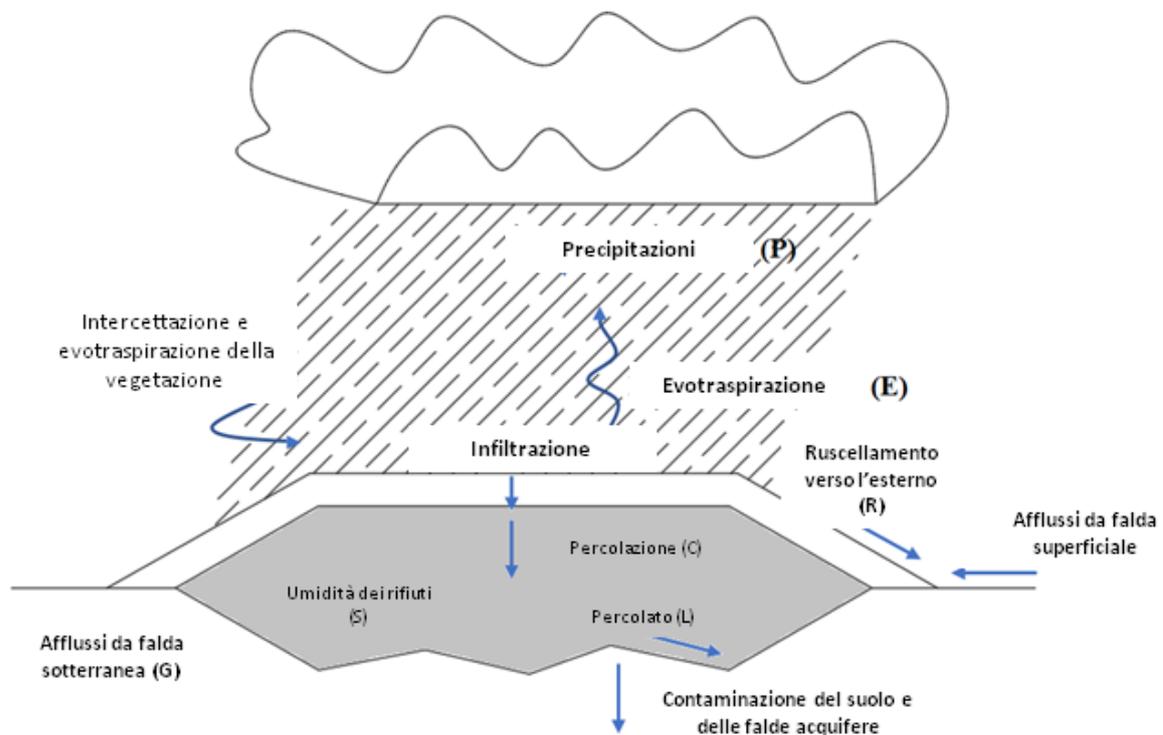


Figura 3.8. Schema del bilancio idrico nella discarica

Le misure adottate per ridurre la quantità di percolato causato dall'infiltrazione delle acque meteoriche, ad esempio, sono: l'aumento dell'inclinazione della superficie per facilitare il deflusso dell'acqua e la creazione di uno strato di copertura impermeabile, che aiuta a bloccare le infiltrazioni dalla superficie prevenendo crolli e crepe nel corpo rifiuti.

Uno dei fattori più importanti per evitare le infiltrazioni dell'acqua piovana è creare un sistema di drenaggio sulla superficie dello strato di copertura finale. Questo strato di drenaggio permette di rimuovere l'acqua in eccesso dallo strato superficiale della discarica e di ridurre il carico d'acqua sullo strato isolante impermeabile. Quando il primo strato raggiunge la saturazione con le precipitazioni, l'acqua passa allo strato successivo. Grazie a questo strato sabbioso, a basso contenuto di humus e altamente permeabile, l'acqua fluisce velocemente dalla superficie della discarica senza filtrare nel corpo rifiuti. Se ci sono le risorse economiche sufficienti, l'acqua piovana può fluire, sfruttando la gravità, all'interno di speciali tubi in HDPE sistemati su questo strato verso i tubi principali situati ai bordi della discarica. Questo sistema di raccolta dell'acqua assicura che quella in eccesso venga portata fuori dall'area di stoccaggio. L'acqua che arriva nello stato di drenaggio può essere raccolta inclinando la superficie su cui non sono presenti i tubi (Figura 3.9).



Figura 3.9. I canali di raccolta dell'acqua piovana ai lati dell'area di stoccaggio rifiuti

3.3.2.3. Il sistema di drenaggio del percolato

La gestione del percolato nelle discariche non controllate viene effettuata con l'aiuto di studi geologico e idrogeologici fatti nella fase di pianificazione. A seconda delle capacità tecniche ed economiche, si può utilizzare una rete di tubazioni per raccogliere il percolato. Fattori come la profondità del corpo rifiuti, l'età dei rifiuti, la topografia dell'area e le proprietà del suolo sottostante sono dati importanti per la creazione del sistema di drenaggio del percolato efficiente. Oltre a queste informazioni, vengono determinate diverse applicazioni per il drenaggio del percolato a seconda della profondità delle acque sotterranee. È possibile evitare che il percolato si mescoli con queste acque attraverso metodi come la costruzione di un muro di separazione e la creazione di tubi e fossati di raccolta che assecondano la direzione in cui scorre il liquido in questione. Dopo essere stato raccolto, il percolato viene trasferito in una vasca alla base della discarica. In questo modo, è possibile prevenire la propagazione di questo liquido altamente inquinante. Tuttavia, dopo il risanamento della discarica non controllata, la produzione di percolato sarà ridotta quindi, probabilmente, non sarà necessario installare un impianto di trattamento dello stesso. La gestione del percolato verrà spiegata meglio nel Capitolo 4 – La gestione del biogas e del percolato nelle discariche risanante.

3.3.2.4. Il sistema di captazione del gas

Uno dei problemi delle discariche non controllate è rappresentato dai gas che si formano e si accumulano in discarica. Il biogas, che è il risultato della decomposizione dei rifiuti organici in condizioni anaerobiche, viene chiamato gas di discarica (*Landfill Gas*, LFG) ed è composto approssimativamente dal 50-60% di metano, dal 35-40% di anidride carbonica e dal 3-10% di nitrogeno. Questi gas fuoriescono da corpo rifiuti incontrollatamente e sono responsabili di diversi danni ambientali, in particolare del riscaldamento globale. Inoltre, è possibile che si inneschino esplosioni e incendi a causa dell'accumulo, della compressione dei gas e della miscelazione in diverse concentrazioni con l'aria. In particolare, se la concentrazione dei gas di discarica è inferiore al 5-15% (LEL) ci sarà il rischio di esplosione, mentre se la concentrazione è maggiore (UEL) allora ci sarà il rischio di incendio. Come si è detto nel Capitolo 1, l'esplosione avvenuta nella discarica non controllata di Ümraniye-Hekimbaşı (İstanbul, Turchia)

nel 1993 è un esempio lampante (Kocasoy & Curi, 2000). Implementare un sistema di captazione del gas di discarica è fondamentale per evitare che si verifichino ancora questi disastri.

La quantità di LFG varia a seconda della quantità dei rifiuti organici presenti del corpo rifiuti. Il sistema di captazione del gas, che comprende il sistema di raccolta e trasporto del gas, è contenuto nello strato impermeabile. I tubi collettori vengono posizionati sotto questo strato per garantire la raccolta controllata del gas. Nei casi in cui si prevede che la produzione di gas attuale e futura sia alta, questo sistema viene integrato con una serie di pozzi o camini verticali. A seconda della situazione, il gas raccolto viene bruciato attraverso delle torce apposite oppure trasportato verso delle centrali di recupero energetico. La gestione del gas di discarica verrà trattato meglio nel Capitolo 4.

3.3.2.5. Lo strato di copertura finale

Dopo aver affrontato i fattori che influiscono sulla produzione del percolato in discarica, questa sezione si occupa dello strato di copertura finale progettato per prevenire l'infiltrazione dell'acqua piovana nel corpo rifiuti e, di conseguenza, diminuire la produzione di percolato. La progettazione di questo strato superficiale gioca un ruolo fondamentale nel bilancio idrico della discarica.

L'utilizzo di un pacchetto di copertura finale consente di adattare la progettazione dei sistemi di drenaggio e trattamento del percolato a portate inferiori permettendo al sistema di funzionare per molti anni senza deteriorarsi. È necessario considerare alcuni fattori per la creazione dello strato di copertura finale perché una progettazione non accurata impedirebbe il corretto funzionamento di questo strato finale sigillante e costituirebbe uno spreco di tempo e soldi. Uno strato di copertura mal progettato comporta il fallimento dell'intero processo riabilitativo della discarica. Per questi motivi, è necessario considerare tutto ciò che può compromettere la resistenza della copertura finale, i tipi e la quantità di materiale da utilizzare, l'inclinazione, lo spessore ed altri fattori simili. Un altro componente fondamentale è garantire la stabilità dei versanti affinché non causino l'erosione e il distacco dei rifiuti. Inoltre, è necessario valutare la quantità di precipitazioni che cadranno sul sito da risanare e dove verranno incanalate le acque di ruscellamento sulla superficie. Dopo la progettazione del pacchetto di copertura finale, devono essere effettuati dei controlli affinché possa essere utilizzato per molti anni senza richiedere

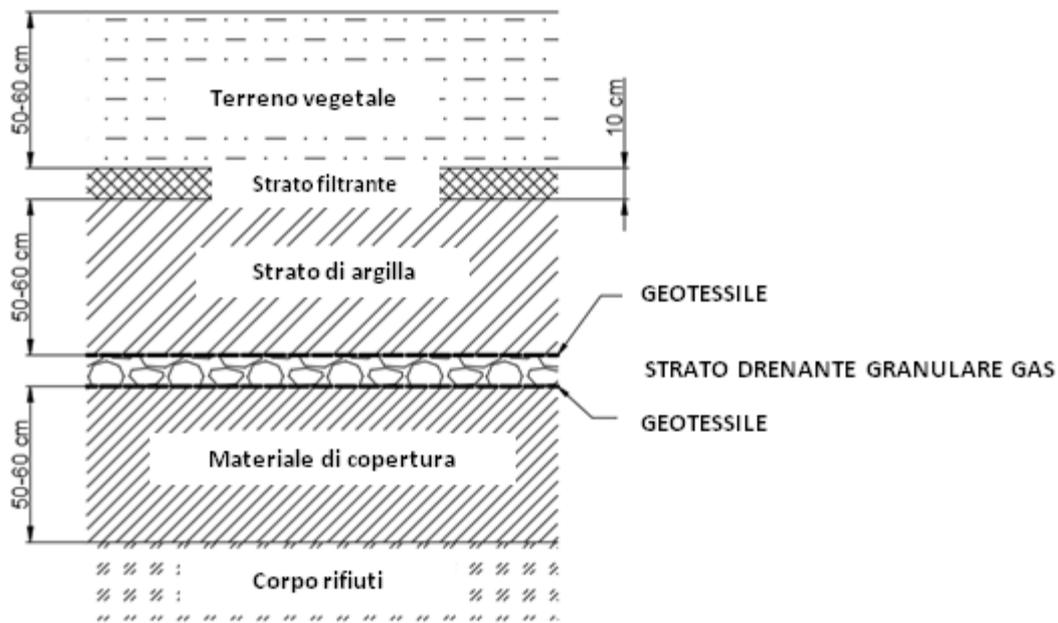
ulteriori interventi. Inoltre, è necessario effettuare un'analisi dei costi per scegliere lo strato più appropriato per la discarica che si andrà a riabilitare.

Piuttosto che applicare un solo strato di copertura finale, è consigliabile creare un pacchetto di copertura in cui si integrano strati con diverse funzioni, come lo strato per la vegetazione e quello utilizzato come barriere idraulica. Quest'ultima può essere composta da strati come quello filtrante, quello drenante e quello impermeabile. La tabella di seguito (Tabella 3.1) elenca gli strati utilizzati associati a diversi obiettivi.

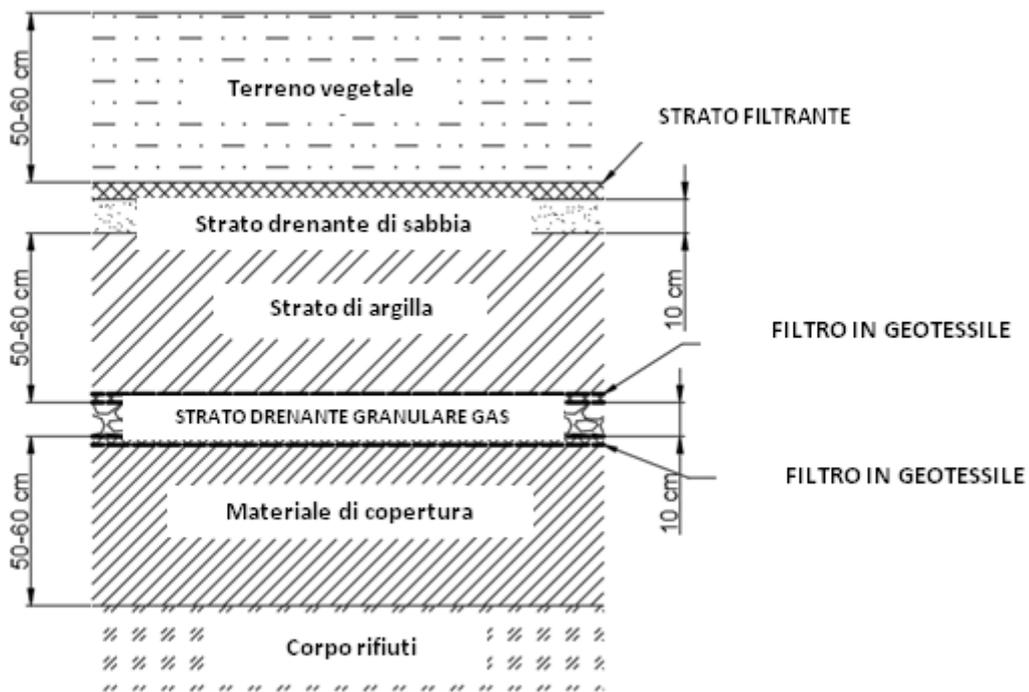
Tabella 3.1. Gli strati del pacchetto di copertura finale e le diverse funzioni

Tipo di strato	Composizione	Obiettivo
Strato superficiale	Strato di terreno vegetale	Essendo adatto alla coltivazione di piante, favorisce lo sviluppo delle radici e la capacità di trattenere l'acqua, riducendo l'infiltrazione, l'assorbimento di acqua e l'erosione da parte del vento.
	Strato di filtraggio	Impedisce ai pesticidi di mescolarsi con lo strato di drenaggio sottostante.
Strato barriera idraulica	Strato di drenaggio	Favorisce il drenaggio delle acque di ruscellamento superficiali.
	Strato impermeabile	Blocca l'infiltrazione dell'acqua nel corpo rifiuti e contiene il sistema di captazione del gas

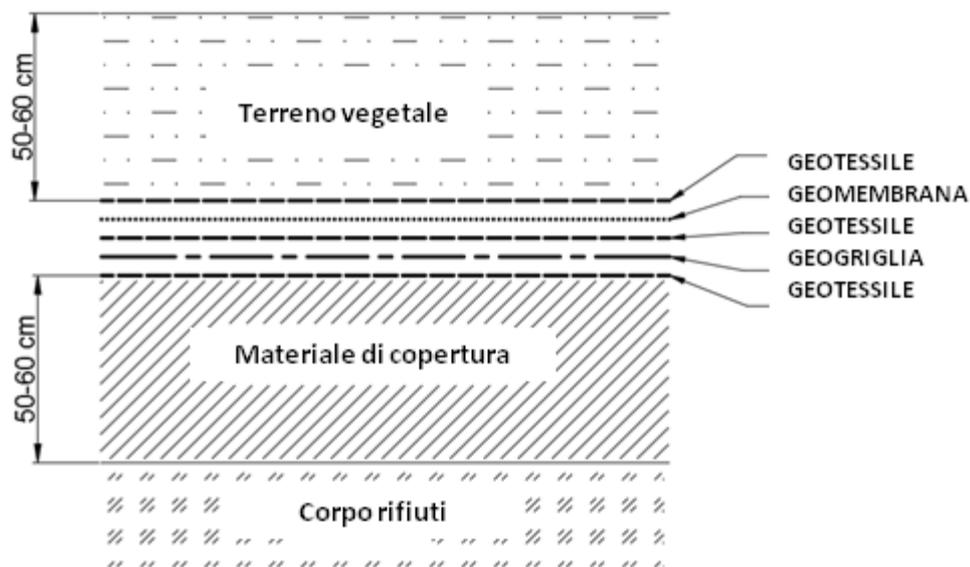
Lo schema riportato non riporta degli standard specifici per la selezione dello strato, lo spessore e la quantità di materiali da utilizzare per completare il pacchetto di copertura finale. La combinazione è lasciata alla discrezione di chi progetta il pacchetto. La Figura 3.10 mostra alcuni esempi di combinazioni. Ad esempio, lo strato di terreno naturale dovrebbe sempre stare in superficie perché le radici sono in grado di aumentare la compattezza del terreno ed evitare l'erosione da parte dei venti. Tuttavia, non si dovrebbero usare piante dalle radici molto profonde. Nella Figura 3.10.a viene illustrato un semplice pacchetto di copertura finale dove le funzioni di filtraggio e drenaggio si riuniscono in un unico strato. Come strati drenanti, possono essere usati una membrana geotessile e uno di ghiaia sotto l'argilla. Lo strato impermeabile è spesso utilizzato come strato adatto alla raccolta di gas. Nella Figura 3.10.b si vede un dettaglio della Figura 3.10.a, in cui gli strati di drenaggio e di filtraggio sono separati e lo strato di impermeabilità è rafforzato. Nella Figura 3.10.c, la geomembrana garantisce l'impermeabilità, il geotessile garantisce il filtraggio e la geogriglia assicura la raccolta del gas (Ministero dell'Ambiente, e dell'Urbanizzazione della Turchia, 2014).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10. Stratificazione della copertura finale

3.3.2.6. Canali di scolo e strade interne della discarica

La progettazione di tutte le operazioni tecniche da eseguire sul campo deve essere registrata durante la pianificazione del risanamento. Per evitare confusione nella fase di implementazione, è importante determinare tutti i tipi di operazioni previste. Prima dell'inizio dei lavori, si devono anche realizzare i progetti dei canali di scolo da utilizzare per rimuovere il percolato e le acque piovane. Poiché gli strati della copertura finale influiscono anche sulla quantità d'acqua che si formerà, le dimensioni dei canali di scolo devono essere adattate di conseguenza. Il canale di scolo da utilizzare per rimuovere il percolato dall'area deve essere dimensionato in base alla quantità di percolato stimata e, di conseguenza, avere dimensioni e capacità sufficiente. Se si prevede la costruzione di una vasca di raccolta del percolato, i canali di scolo saranno collegati alla discarica. Nel caso in cui non sia prevista, i canali di scolo saranno collegati alla rete fognaria più vicina.

È importante che la strada da utilizzare per l'accesso al sito della discarica sia predisposta prima dell'inizio degli interventi riabilitativi, in modo che i mezzi di lavoro utilizzati nel processo possano raggiungere facilmente le aree apposite. Il manto stradale deve essere robusto tanto da non essere danneggiato dal passaggio di macchinari pesanti, perciò è consigliabile utilizzare terreno compattato o asfalto, sempre a seconda delle possibilità economiche. La strada da

costruire deve essere abbastanza ampia da consentire il passaggio di almeno due veicoli contemporaneamente. Siccome la zona sarà soggetta a ispezioni e potrebbe essere utilizzata in caso di potenziale minaccia, queste strade interne dovrebbero anche essere progettate in modo da facilitare il più possibile ogni tipo di intervento nel sito della discarica.

3.3.2.7. Il piano paesaggistico

Una volta riabilite, le discariche non controllate possono essere utilizzare come aree verdi, aree ricreative o come aree fabbricabili. Lo scopo per cui l'area sarà utilizzata deve essere specificato nelle prime fasi di progettazione del risanamento. Ad esempio, se si prevede di costruire una struttura, è importante evitare di usare delle geomembrane per la copertura finale della discarica. La scelta più appropriata e conveniente per ridare nuova vita alle discariche riabilite è convertirle in parchi pubblici e aree ricreative. In entrambi i casi, l'area deve essere piantumata e la selezione delle specie vegetali deve essere fatta accuratamente. Se la piantumazione di piante erbacee o da prato non presenta problemi, quella degli alberi deve essere affrontata con criterio. Le piante con radici profonde devono essere evitate perché possono perforare lo strato isolante e far infiltrare l'acqua piovana nel corpo rifiuti. Le specie vegetali autoctone con radici poco profonde sono quelle più adatte per il piano di ripristino ambientale vegetazionale.

3.3.2.8. Pozzi di ispezione e piano di monitoraggio

La manutenzione, il monitoraggio e il controllo della discarica risanata devono essere effettuati dalle autorità competenti per un certo periodo. I fattori da considerare per svolgere queste attività variano a seconda delle condizioni della discarica e sono:

- la presenza del sistema di captazione del gas e, se presente, del sistema di combustione (es. torcia); entrambi devono essere costantemente monitorati;
- la presenza un impianto di bonifica del gas, se presente, deve essere monitorato;
- la qualità del gas captato deve essere monitorata continuamente;
- la manutenzione del sistema di drenaggio del percolato deve essere svolta regolarmente;
- la qualità del percolato deve essere monitorata prelevando dei campioni dalla vasca di raccolta alla base della discarica;
- se ci sono degli impianti di trattamento del percolato bisogna assicurarsi che vengano regolarmente controllati;
- la qualità dell'acqua dovrebbe essere controllata prelevando dei campioni dalle acque superficiali intorno alla discarica;
- si devono creare dei pozzi d'ispezione per monitorare l'eventuale contaminazione dell'area;

- infine, è necessario monitorare gli strati di copertura finale nonché eventuali slittamenti o crolli dei rifiuti.

Bibliografia

Blight, G. (2008). Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review. *Waste Management & Research*, 26, 448–463. <https://doi.org/10.1177/0734242X07087975>

Jafari, N. H., Stark, T. D., & Merry, S. (2013). The July 10 2000 Payatas Landfill Slope Failure. *International Journal of Geoengineering Case Histories*, 2(3), 208–228. <https://doi.org/10.4417/IJGCH-02-03-03>

Jain, P., Townsend, T. G., & Johnson, P. (2013). Case study of landfill reclamation at a Florida landfill site. *Waste Management*, 33(1), 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.011>

Jayaweera, M., Gunawardana, B., Gunawardana, M., Karunawardena, A., Dias, V., Premasiri, S., Dissanayake, J., Manatunge, J., Wijeratne, N., Karunaratne, D., & Thilakasiri, S. (2019). Management of municipal solid waste uncontrolled dumps immediately after the collapse: An integrated approach from Meethotamulla uncontrolled dump, Sri Lanka. *Waste Management*, 95, 227–240. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.019>

Republic of Turkey Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, (2014), *The guide of the landfill operation*.

Kocasoy, G., & Curi, K. (2000). the Umraniye-Hekimba \$ I open dump site Accident. April 1994, 305–314.

Maheshi, D., Steven, V. P., & Karel, V. A. (2015). Environmental and economic assessment of “open waste dump” mining in Sri Lanka. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.004>

Worrell, W. A., Vesilind, P. A. (2011), *Solid waste engineering*, Publisher: Global engineering