

**CARATTERIZZAZIONE GEOSTRUTTURALE DI UNA
DISCARICA RSU: ANALISI DI STABILITA' E DINAMICA
BIDIMENSIONALE – PROBLEMATICHE E LIMITAZIONI
CONNESSE**

Dr.ssa Ing. Sara Palombi

*Tutor: Ing. Giuseppe Marella
Con la collaborazione dell'Ing. Quintilio Napoleoni*

ABSTRACT

Questo studio è finalizzato ad analizzare e stimare la stabilità statica e gli effetti di sollecitazioni di tipo dinamico sulle discariche di rifiuti solidi urbani. L'analisi si fonda sui risultati ottenuti dalle elaborazioni del programma ad elementi finiti Plaxis, risultati che devono comunque essere guardati con occhio critico, essendo le discariche sistemi ingegneristicamente complessi da progettare, data la moltitudine di componenti di cui sono composte.

Dal punto di vista geotecnico, il rifiuto è estremamente eterogeneo e la determinazione delle sue proprietà ingloba molte incertezze.

Questo studio è stato semplificato perchè, anche se in realtà le discariche vengono realizzate per mezzo di una successione di strati ciascuno con una diversa funzione come lo strato di argilla compattata, il geosintetico e lo strato di drenaggio, tutti questi componenti non vengono presi in considerazione nel corso della simulazione.

Innanzitutto è stata condotta l'analisi statica per poter calibrare il programma sulla base dell'individuazione della potenziale superficie di rottura del corpo della discarica.

La successiva analisi dinamica ha evidenziato come il comportamento del rifiuto urbano generalmente tenda a ridurre quelli che sono gli effetti della propagazione delle onde nel terreno verso la superficie, a vantaggio della stabilità globale del sistema.

E' importante sottolineare che la scelta dei parametri dinamici nell'impostazione dell'analisi ha un ruolo molto critico.

Infatti per i programmi ad elementi finiti a risoluzione non lineare (soluzione nel dominio del tempo) la scelta dei coefficienti di Rayleigh per l'analisi dinamica serve per modellizzare gli effetti del damping viscoso a piccole deformazioni, mentre invece per i programmi a risoluzione equivalente lineare (soluzione nel dominio della frequenza) la loro scelta assume nuovamente un ruolo molto critico.

ABSTRACT

This study focuses on the analysis required to evaluate the static stability and seismic effects on municipal solid waste landfill. The analysis found itself on the elaborations of the FEM program Plaxis, but the results have to be look critically, since the landfills are complex engineered systems, with a multitude of components.

Municipal waste is extremely heterogeneous and its properties involve significant uncertainties.

This study is simplified because, even if waste fills are built with sophisticated liner systems that involve compacted clay, geosynthetics and drainage layers, all this components are not considered

First the static analyses has been lead in order to calibrate the program with the calculation of the position of failure surface.

Subsequently the seismic analysis has evidenced how the behaviour of MSW generally reduce the effects of wave's propagation, in favor of the system's stability.

It's important to emphasize that the choice of seismic parameters for code's running is very critical.

In fact for nonlinear codes (solution in time domain) the choice of Rayleigh coefficients works itself to model small strain viscous damping, instead for equivalent linear codes (solution in frequency domain) the selection of Rayleigh coefficients is more critical.

PREFAZIONE

Negli ultimi decenni si è registrata nei paesi industrializzati una crescente produzione di rifiuti solidi urbani a causa di diversi fattori essenzialmente riconducibili all'incremento della popolazione, al miglioramento delle condizioni economiche e al conseguente aumento dei consumi.

Tale situazione, che negli ultimi anni ha assunto proporzioni preoccupanti soprattutto in alcuni paesi, ha parallelamente rafforzato nella popolazione il concetto di sensibilità ambientale, elevando il problema dei rifiuti ad una delle questioni più complesse e delicate che la società attuale deve tentare di risolvere come atto di responsabilità verso le generazioni future.

Oltre ad una pianificazione mirata sia verso una riduzione della produzione dei rifiuti parallelamente ad uno sfruttamento moderato delle risorse disponibili e sia verso una migliore gestione e trattamento dei rifiuti, ci si è resi conto che la conoscenza del comportamento meccanico dei rifiuti può essere di ausilio nell'ambito della corretta progettazione della discarica e nell'ambito di un suo sviluppo e crescita nel tempo.

Di particolare interesse sono i problemi di stabilità delle discariche posizionate vicino ad insediamenti urbani ed a infrastrutture stradali etc.

In questi casi è necessario predisporre tutti gli accorgimenti necessari affinché sia garantita l'incolumità fisica delle persone.

Oltre ai problemi di stabilità in ambito statico, anche un evento sismico di particolare intensità può compromettere l'integrità di una discarica.

Per questo motivo negli Stati Uniti, dove un gran numero di discariche è collocato in aree a rischio sismico, è sorta prima ancora che in altri paesi la necessità di inquadrare il comportamento dei rifiuti a sollecitazioni di tipo dinamico.

L'obiettivo di questo studio è quello di simulare appunto un'analisi di tipo dinamico su una discarica, per evidenziarne il comportamento globale in un contesto attualmente poco conosciuto.

I risultati dell'analisi dinamica sono presentati nel capitolo 5, mentre invece l'inquadramento delle proprietà geotecniche dei rifiuti è sintetizzato nel capitolo 2, con

particolare riferimento alle proprietà dinamiche, successivamente meglio descritte nel capitolo 3.

Nel capitolo 4 viene descritta la procedura di calcolo dinamico che utilizza il programma ad elementi finiti Plaxis, scelto per condurre le simulazioni.

Nel capitolo 1 invece vengono fornite delle informazioni generali sull'attuale normativa vigente in materia di gestione delle discariche.

INDICE

CAPITOLO 1 - Il ruolo della discarica nell'ambito della gestione dei rifiuti

1.1 - Il problema rifiuto.....	1
1.2 - La normativa sulle discariche.....	4
1.2.1 - D. Lgs. 22/1997 "Decreto Ronchi"	7
1.2.2 - D. Lgs. 13 Gennaio 2003, n.36.....	12

CAPITOLO 2 - Proprietà geotecniche dei rifiuti

2.1 – Generalità.....	16
2.2 - Descrizione dei Rifiuti: Merceologia.....	19
2.2.1 - Indagini in sito.....	19
2.2.2 - Classificazione del rifiuto.....	21
2.3 - Peso dell'unità di volume.....	26
2.3.1 – Definizione.....	26
2.3.2 - Dati di letteratura e correlazioni con altri parametri.....	27
2.4 - Contenuto naturale d'acqua.....	31
2.4.1 – Definizione.....	31
2.4.2 - Dati di letteratura, dipendenze e correlazioni.....	32
2.5 – Permeabilità	35
2.5.1 – Definizione	35
2.5.2 - Dati di letteratura	35
2.6 - Resistenza al taglio	38
2.6.1 - Determinazione dei parametri di resistenza	38
2.6.2 - Dati di letteratura	41
2.7 - Proprietà dinamiche	49
2.7.1 Parametri dinamici	49
2.7.2 Metodi per la determinazione dei parametri dinamici	51
2.7.3 Dati di letteratura	52

CAPITOLO 3 - Valutazione delle Proprietà dinamiche dei rifiuti urbani

3.1 – Introduzione	56
3.2 - Gli studi condotti	60
3.2.1 - N. Matasovic e E. Kavazanjian Jr. (1998)	60
3.2.2 - Bray, Rathje, Augello e Merry (1998)	63
3.2.3 - Glenn J. Rix	66
3.3 - Velocità delle onde trasversali Vs	68
3.4 - Modulo di riduzione e fattore di smorzamento isteretico "damping" D (%)...73	

CAPITOLO 4 - Il programma ad elementi finiti Plaxis: applicazione del modulo dinamico

4.1 - Introduzione al modello	84
4.2 - Fase di Input	84
4.2.1 - Tipo di sorgente vibrazionale	84
4.2.2 - Carichi e condizioni al contorno	85
4.2.3 - Parametri dei modelli costitutivi	86
4.2.4 - Formulazione teorica del damping	87
4.3 - Fase di Calcolo	95
4.3.1 - Selezione dell'analisi dinamica	95
4.3.2 - Parametri dell'analisi dinamica	96
4.3.3 - Settaggio manuale della procedura iterativa	97
4.3.4 - Carichi dinamici	98
4.3.5 - Carichi armonici	98
4.3.6 - Implementazione di file con la digitalizzazione dei segnali	99
4.3.7 - Modellazione dei carichi istantanei "block loads"	99
4.4 - Fase di Output	100

CAPITOLO 5 - Analisi Dinamica con il programma a Elementi Finiti PLAXIS

5.1 - Introduzione all'analisi	101
5.2 - La discarica di Hiriya, Tel Aviv	102
5.2.1 - Risultati dell'analisi di stabilità di Robert H. Isenberg	102
5.2.2 - Risultati dell'analisi di stabilità ottenuti con PLAXIS	108
5.2.2.1 - Impostazione dell'analisi	108
5.2.2.2 - Esecuzione dell'analisi ed output finali	110
5.3 - Analisi statica e dinamica di una discarica	116
5.3.1 - Risultati delle prove di laboratorio condotte da Simone De Mei	116
5.3.2 - Impostazione dell'analisi con Plaxis	120
5.3.2.1 - Scelta dei parametri meccanici	120
5.3.2.2 - Risultati dell'analisi statica	125
5.3.2.3 - Risultati dell'analisi dinamica	135

CONCLUSIONI	142
--------------------	-----

BIBLIOGRAFIA

Capitolo 1 - Il ruolo della discarica nell'ambito della gestione dei rifiuti

1.1 - Il problema rifiuto

La produzione dei rifiuti ha assunto proporzioni rilevanti in epoca recente a causa dell'incremento demografico, dell'inurbamento, dello sviluppo industriale ed in generale a causa del miglioramento del tenore di vita che ha determinato l'aumento dei consumi e la diversificazione degli stessi in termini di composizione merceologica e variabilità temporale.

Parallelamente all'aumento dei consumi si è registrato un aumento della produzione di scarti di ogni genere da rimuovere e smaltire; in pratica la ricerca estenuante e spasmodica del benessere, associata ad uno sfruttamento smodato delle risorse disponibili ed a una serie di comportamenti comuni poco "virtuosi", ha portato oggi l'uomo a dover provvedere a situazioni di emergenza ambientale che rasentano l'inverosimile.

In questa ottica, la quantità di rifiuti prodotta può essere utilizzata come indicatore dell'interazione tra attività umane e sistemi ambientali, in quanto strettamente connessa con le tendenze della produzione e dei consumi. La produzione dei rifiuti, infatti, dipende non solo dall'efficienza con cui vengono utilizzate le risorse nei processi produttivi, ma anche dalla quantità dei beni che si producono e consumano.

Dati pubblicati dall'Agenzia Europea per l'Ambiente ⁽¹⁾ mettono in evidenza come in ambito europeo l'aumento della quantità di rifiuti, sia come produzione totale, sia come produzione pro capite, nell'arco di soli sette anni (dal 1990 al 1997) sia stato rilevante.

Infatti, secondo i dati relativi all'anno 1996-1997, i Paesi europei UE hanno prodotto circa 190 milioni di tonnellate di rifiuti urbani, pari ad una produzione pro capite di 507 kg per abitante/anno, rispetto ai 183 milioni di tonnellate del 1990.

Oggi la produzione di rifiuti è ulteriormente aumentata.

Quando la produzione pro capite di rifiuti non era troppo elevata, lo smaltimento in discarica rappresentava una soluzione accettabile ed anche economicamente conveniente, ma con le quantità prodotte negli ultimi 2 decenni (in Italia nel 2001 sono stati prodotti

⁽¹⁾ EEA, 1998, Statistical Compendium for Europe's Environment: The Second Assessment e Istat 1998.

29,4 milioni di tonnellate di rifiuti urbani, dati del Rapporto Nazionale sui Rifiuti del 2003) risulta evidente come la sola discarica non sia più sufficiente.

I dati più aggiornati, relativi alla produzione dei rifiuti in Italia, possono essere ottenuti dalla documentazione in possesso delle agenzie regionali APAT (Agenzia Protezione Ambiente e servizi Tecnici) e ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente) e dell'Osservatorio Nazionale sui Rifiuti.

In Italia, ai sensi della Legge n. 70/94, i soggetti coinvolti nel ciclo dei rifiuti sono tenuti a presentare alle Camere di Commercio della competente Provincia, dichiarazioni contenenti la quantità e le caratteristiche qualitative dei rifiuti prodotti nel proprio territorio, utilizzando il Modello Unico di Dichiarazione (MUD) definito dal Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 6/07/95 e rafforzato dal Decreto Ronchi (D.L.vo n.22/97) e successive modificazioni.

L'analisi delle dichiarazioni che sono state presentate ha sollevato preoccupazioni in seno alla problematica della gestione, del trattamento e smaltimento dei rifiuti in termini di sostenibilità economica e di impatto ambientale.

Da notare che in Italia la sensibilità al problema della gestione dei rifiuti è differente da regione a regione.

In diverse aree di alcune regioni del Nord più industrializzate, quali Lombardia, Trentino-Alto Adige e Veneto, gli obiettivi previsti dalla legge n. 22/97 (Decreto Ronchi) erano già stati raggiunti prima della sua entrata in vigore.

Al Sud e nelle Isole ed in parte anche al centro, invece, la raccolta differenziata stenta ad avviarsi come pratica comune, probabilmente in conseguenza di un ritardo e di una mal organizzazione dei sistemi gestionali, di raccolta e di sviluppo di centri di recupero materiali.

Questo può sembrare un controsenso, ma è proprio dove si è concentrata la produzione di rifiuti che le autorità locali si sono sensibilizzate prima e meglio alla risoluzione della problematica di gestione e smaltimento rifiuti.

Al Nord il concetto di raccolta differenziata ha introdotto un mutamento radicale nella comune accezione del termine rifiuto, che fino a pochi decenni identificava soltanto qualcosa di sgradevole di cui sbarazzarsi senza alcuna remora.

Molto diffusa era la convinzione che il rifiuto fosse in grado di "bastare a se stesso", vale a dire degradarsi, scomparire o comunque cessare di costituire un problema. Una volta

conferito nel cassonetto o peggio abbandonato in maniera incontrollata nell'ambiente, il rifiuto cessava di esistere.

Tale concezione è rimasta in pratica fortemente radicata nel centro e nel Sud dell'Italia.

Accanto ad una cattiva gestione da parte di alcuni degli enti preposti, non bisogna dimenticare che non solo in Italia, ma anche in altri paesi, la logica dell'«usa e getta» che ha indotto a considerare un bene solo come un oggetto da consumare, di cui disfarsi rapidamente per questioni di praticità ha causato un'abnorme produzione di rifiuti con conseguenti inevitabili difficoltà nella loro gestione e smaltimento.

La quantità di rifiuti indifferenziati che finisce in discarica ha determinato al Sud una situazione di vera e propria emergenza ambientale che ha portato al commissariamento delle regioni Campania, Puglia e Calabria e poi della regione Lazio.

Visti i volumi in gioco è necessario che il rifiuto ridiventi una risorsa e che da esso si possano ottenere materie prime seconde oppure energia per soddisfare il fabbisogno nazionale.

Per raggiungere tale obiettivo è indispensabile che il sistema di raccolta preveda la suddivisione in classi merceologiche, al fine di separare quello che è possibile avviare a recupero da quello che non lo è.

Non esiste un solo criterio di raccolta differenziata dei rifiuti solidi urbani (RSU), ma per ciascuno di essi è indispensabile la collaborazione dei cittadini: informare e sensibilizzare la popolazione è il primo passo perché la raccolta sia efficace, i cittadini devono comprendere che la vita del rifiuto non si esaurisce dentro il cassonetto, ma può continuare all'interno di un ciclo dando origine a nuovi prodotti.

In pratica siamo di fronte ad una fase di transizione nella gestione dei rifiuti che pone, da un lato, l'importanza della raccolta differenziata e del recupero dei materiali nonché l'esigenza di un maggiore sviluppo dei pretrattamenti sui rifiuti solidi urbani (RSU) prima del conferimento in discarica, e, dall'altro, la necessità di un controllo capillare delle discariche esistenti che hanno un notevole impatto sull'ambiente.

Mentre in natura esistono processi che implicano un continuo riutilizzo della materia in modo circolare senza distinzione tra rifiuti e prodotti, noi consideriamo rifiuto ciò che deve essere gettato via e che non è più in grado di soddisfare a breve le nostre esigenze.

La logica dell'«usa e getta» agisce sull'ambiente in due modi:

- facendo aumentare la quantità di rifiuti prodotti;

- facendo dissipare energie e risorse ambientali.

La natura ha dei limiti nella sua capacità di assorbire rifiuti e di convertirli in prodotti meno pericolosi per l'ambiente e per l'uomo (definita come "capacità di assimilazione dell'ambiente"). Se non si oltrepassano tali limiti, la natura può conservare la sua capacità di rigenerarsi e può sostenere il sistema economico, quale fonte di un migliore livello di vita. Ci sono regole fondamentali da rispettare che implicano il mantenimento delle risorse naturali costanti nel tempo, quali:

- un impiego delle risorse rinnovabili (cioè risorse la cui quantità non è fissa ma può essere accresciuta o ridotta nel tempo consentendo alle stesse di rigenerarsi) tale che il tasso di utilizzo non sia superiore a quello di rigenerazione naturale;
- il mantenimento del flusso dei rifiuti nell'ambiente al pari o al di sotto della capacità di assimilazione dell'ambiente.

L'inquinamento generato dalle discariche può essere minimizzato con una gestione che tenga conto della vulnerabilità dell'ambiente e con una corretta informazione ambientale che conduca alla conoscenza approfondita delle reali dimensioni del problema anche da parte dei singoli cittadini.

Nel 1997 il Consiglio dell'Unione Europea ha approvato una risoluzione per una strategia comunitaria per la gestione dei rifiuti (*Community Waste Management Strategy*), che sottolinea, quale priorità per qualsiasi politica di gestione di rifiuti, la necessità della prevenzione nella produzione degli stessi, in modo da ridurre il volume e la pericolosità.

Tale risoluzione mette in rilievo l'esigenza di analizzare e gestire il problema dei rifiuti in sede di definizione delle politiche nazionali e internazionali, inserendo la gestione degli stessi all'interno di un programma di sviluppo sostenibile che abbia tra le priorità l'uso razionale delle risorse, il minor consumo di energia e la minimizzazione delle risorse alla fonte.

Il problema dei rifiuti non deve più essere affidato solo alla politica dello "stoccaggio", considerata riduttiva per la risoluzione del problema, ma anche ad una politica che deve considerare a priori il destino finale delle merci.

1.2 - La normativa sulle discariche

Antecedentemente la data del 1982 l'Italia non era ancora stata predisposta una normativa né sulle discariche, né sulle problematiche ambientali in generale.

E' solo con il Decreto del Presidente della Repubblica 915/82 che l'Italia si dota di una norma organica in materia, ed va notato che il fatto che si tratti solo di un decreto e non di una legge del Parlamento è un chiaro indice di quante e quali difficoltà la legislazione italiana abbia incontrato nell'affrontare tale questione.

Tale decreto è stato emanato in attuazione di tre direttive della CEE: la n.75/442, relativa allo smaltimento dei rifiuti in genere; la n.76/442, concernente lo smaltimento dei policlorodifenili e dei policlorotrifenili; la n.78/319, riguardante lo smaltimento dei rifiuti tossici nocivi.

Il DPR definisce i rifiuti “sostanze che derivano da attività umane o da cicli naturali, abbandonate o destinate all’abbandono”, classificandoli in tre categorie:

- **rifiuti urbani**, cioè i rifiuti ingombranti e non, provenienti da insediamenti civili, nonché i rifiuti di qualsiasi natura e provenienza che giacciono sul suolo pubblico;
- **rifiuti speciali**, cioè i residui di lavorazione, rifiuti provenienti dagli ospedali, materiali di demolizione ecc., non assimilabili a rifiuti urbani;
- **rifiuti tossici e nocivi**, cioè quelli contaminati da elementi indicati in allegato al decreto, con esclusione dei rifiuti che siano specificatamente disciplinati da altre disposizioni (materiale radioattivo, carogne di animali, esplosivi ecc.).

Successivamente, il decreto definisce la ripartizione delle competenze tra i vari poteri pubblici. Lo Stato esercita una funzione di indirizzo generale e di coordinamento legislativo. Alle Regioni spettano funzioni di coordinamento operativo, da attuarsi sia con apposita attività legislativa sia con una vera e propria attività autorizzatoria per le discariche. Ai Comuni sono affidate le funzioni di esecuzione dei dispositivi e di realizzazione delle opere di competenza, nonché una funzione di informazione e di regolamentazione dei servizi di smaltimento. Le Province, infine, esercitano funzioni di controllo.

Nel DPR 915/82 la classificazione dei rifiuti appare sufficientemente dettagliata per quanto attiene la loro origine, ma lo è molto meno per quanto riguarda le modalità e le tecniche di smaltimento che venivano rinviate a successive normative di dettaglio.

Con la deliberazione del Comitato Interministeriale del 27/07/84, l'Italia si trovò costretta a confrontarsi con le prime norme tecniche sulle discariche.

Prima di allora i rifiuti venivano semplicemente interrati in una buca, spesso priva di impermeabilizzazione di fondo, così che ad oggi risultano necessari costosissimi

interventi di bonifica per il recupero delle aree; invece agli inizi degli anni 80 finalmente la costruzione delle discariche cominciò ad essere regolamentata in modo organico e razionale, anche se dopo il 1984 le norme tecniche non furono più aggiornate per lungo tempo.

Nel frattempo, alcune Regioni cominciarono ad emanare norme tecniche di dettaglio (peraltro diverse tra loro) nel tentativo di far fronte, in assenza di leggi statali, all'evolversi delle tecnologie e delle normative in altri settori, mentre il Parlamento mostrava tutta la sua incertezza nell'affrontare la questione, costringendo gli operatori del settore e gli enti locali a rincorrere un'estenuante altalena di norme e decreti (in tre anni un decreto interministeriale ogni due mesi nel solo settore del recupero di materia).

Recependo con grande ritardo alcune direttive comunitarie ⁽²⁾, nel 1997, lo Stato si sveglia dal suo colpevole torpore, mettendo fine alla confusione normativa regnante in materia attraverso l'emanazione del D.L.vo n.22/97 dal titolo «Attuazione delle direttive n.91/156/CEE sui rifiuti, n.91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e n.94/62/CEE sugli imballaggi e rifiuti da imballaggio», meglio conosciuto come “Decreto Ronchi” (Cossu, 1998).

Successivamente solo negli ultimi anni con la pubblicazione, a pochi giorni di distanza l'uno dall'altro, del Decreto Legislativo del 13 Gennaio 2003, n. 36, e del D.M. 13 Marzo 2003, è stato posto un fine, dopo oltre un anno e mezzo di ritardo rispetto ai termini previsti, alla complessa e tormentata vicenda legislativa sul recepimento da parte dell'ordinamento italiano della direttiva 1999/31/CE in materia di discarica di rifiuti.

Lo scopo di questa direttiva è infatti quello di prevedere, mediante rigidi requisiti operativi e tecnici per i rifiuti e le discariche, misure, procedure e orientamenti volti a prevenire o a ridurre il più possibile le ripercussioni negative sull'ambiente, ed in particolare l'inquinamento delle acque superficiali, delle acque freatiche, del suolo e dell'atmosfera, e sull'ambiente globale, compreso l'effetto serra, nonché i rischi per la salute umana risultanti dalle discariche di rifiuti, durante l'intero ciclo di vita della discarica.

Riflettendo su quanto avvenuto, può apparire singolare la scelta di introdurre un nuovo decreto legislativo specificatamente volto a disciplinare la gestione delle discariche,

⁽²⁾ Direttiva n.91/156/CEE (rifiuti) – Direttiva n.91/689/CEE (rifiuti pericolosi) – Direttiva n.94/62/CEE (imballaggi).

anzichè di integrare il Decreto Ronchi, che già presentava i connotati tipici di un testo unico, finalizzato a recepire congiuntamente le previsioni contenute in più provvedimenti comunitari (dedicati rispettivamente ai rifiuti, ai rifiuti pericolosi, ai imballaggi ed ai rifiuti di imballaggio).

Se il legislatore avesse pianificato di integrare opportunamente il Decreto Legislativo n. 22/1997 (Decreto Ronchi), probabilmente si avrebbe avuto un migliore coordinamento fra le molteplici occasioni di intersecazione e sovrapposizione fra la disciplina sulle discariche e quella, di carattere più generale, in materia di gestione dei rifiuti.

Inoltre questa scelta non avrebbe fatto altro che anticipare ciò che probabilmente avverrà nel momento in cui saranno emanati i Testi Unici per il riordino della normativa ambientale.

1.2.1 - D. Lgs. 22/1997 "Decreto Ronchi"

Il Decreto Ronchi si presenta molto articolato e fondamentalmente incentrato sulla promozione della raccolta differenziata e il riciclaggio dei materiali. Le componenti sociali ed economiche dello smaltimento dei rifiuti (popolazione, produttori e gestori) lo hanno interpretato con diverse chiavi di lettura.

La più semplicistica, e però molto diffusa, vede nel decreto in esame il trionfo della raccolta differenziata e del recupero dei materiali a discapito dell'incenerimento e, soprattutto, una messa al bando delle discariche. E' questa la visione che deriva dal dibattito sui diversi sistemi di smaltimento (discarica, incenerimento, recupero) considerati come alternativi tra loro. La chiave di lettura più razionale rileva come finalmente sia stato recepito ciò che la comunità scientifica aveva individuato, già dalla fine degli anni ottanta, quale criterio guida per la gestione dei rifiuti solidi: lo *smaltimento integrato*.

In particolare, la comunità scientifica aveva evidenziato come i rifiuti *tal quali*, in virtù anche di realtà produttive che li rendono sempre meno omogenei e di qualità complessa, configurano difficoltà tecniche spesso insormontabili per il raggiungimento di adeguati *standards* di qualità nel prodotto finale dello smaltimento. Gli impianti a recupero con selezione automatica portano a prodotti contaminati e non facilmente riciclabili e commercializzabili. Gli impianti di compostaggio non riescono a produrre un *compost* con contenuto in metalli pesanti che lo renda sicuro per l'uso in agricoltura.

L'incenerimento deve consentire, anche per motivi economici, un buon recupero di energia nel rispetto dell'ambiente: ciò è più facilmente ottenibile eliminando dai rifiuti i materiali inerti (vetro, sassi ecc.) e i materiali umidi (sostanza organica putrescibile). Con i rifiuti grezzi, la discarica controllata presenta problemi insormontabili, tra cui il progressivo e ineluttabile intasamento dei sistemi di drenaggio con i conseguenti rischi ambientali che ne derivano: accumuli di percolato, instabilità meccanica del deposito, emanazione di cattivi odori, maggiore velocità di infiltrazione del percolato nel sottosuolo (Fig.1.1).

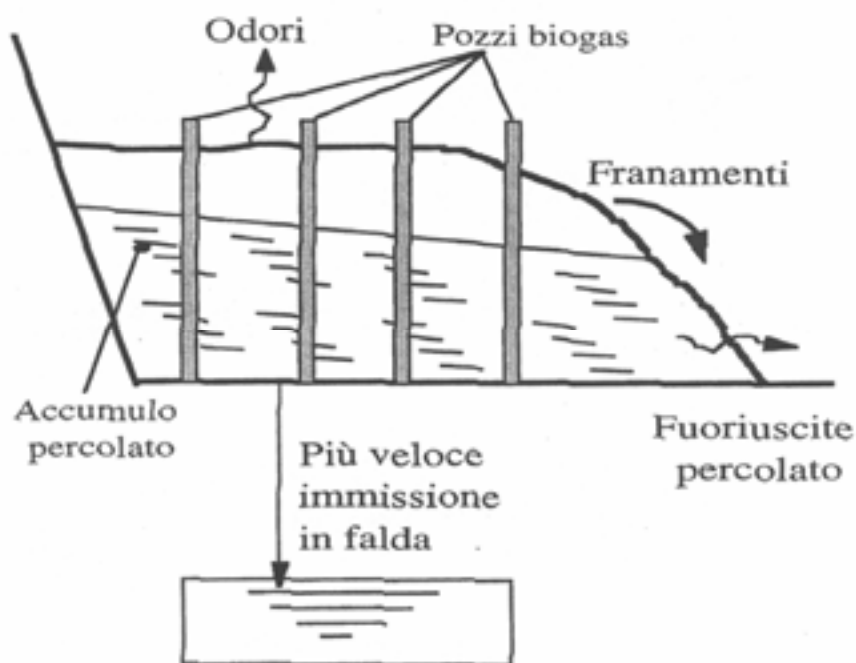


Fig.1.1 - Problemi causati dall'accumulo di percolato in discarica (Cossu, 1998).

Tutte queste considerazioni hanno portato, come evoluzione naturale, a considerare come necessaria per i rifiuti una *fase di pretrattamento* che trova la sua logica applicazione nel sistema integrato articolato secondo una gerarchia di interventi:

- minimizzazione della produzione di rifiuti;
- recupero dei materiali;
- recupero di energia;
- discarica dei residui.

Il D.L.vo n. 22/97 ha una struttura simile a quella del DPR n.915/82: si tratta di una normativa generale che rimanda a successivi decreti applicativi la definizione di dettaglio. Il testo è complesso, visto che considera tutti gli aspetti inerenti i rifiuti, comprese le bonifiche: è composto da 56 articoli e 6 allegati.

Il Decreto disciplina la gestione dei rifiuti, dei rifiuti pericolosi, degli imballaggi e dei rifiuti da imballaggio, fatte salve disposizioni specifiche particolari o complementari che disciplinano la gestione di determinate categorie di rifiuti (art.1, comma 1).

Innanzitutto il decreto individua una classificazione di riferimento per i rifiuti.

Nello specifico i rifiuti sono classificati, secondo l'origine, in *rifiuti urbani* e *rifiuti speciali*, e, secondo le caratteristiche di pericolosità, in *rifiuti pericolosi* e *rifiuti non pericolosi* (art.7, comma 1).

Per rifiuti urbani si intendono quelli:

- domestici anche ingombranti;
- rifiuti non pericolosi assimilati ai rifiuti urbani per qualità e quantità;
- derivanti dallo spezzamento delle strade;
- rifiuti giacenti su aree pubbliche;
- rifiuti vegetali da aree verdi;
- rifiuti cimiteriali (art.7, comma 2).

Per rifiuti speciali si intendono quelli:

- derivanti da attività agro-industriali e agricole;
- derivanti da attività di demolizione, costruzione, nonché i rifiuti pericolosi derivanti da attività di scavo;
- derivanti da lavorazioni industriali, artigianali, commerciali, sanitarie e di servizio;
- derivanti dal recupero e smaltimento dei rifiuti, fanghi da potabilizzazione, depurazione e abbattimento fumi;
- macchinari e apparecchiature deteriorati e obsoleti;
- veicoli a motore, rimorchi e simili fuori uso e loro parti (art.7, comma 3).

Sono pericolosi i rifiuti non domestici precisati nell'apposito allegato al Decreto (art.7, comma 4).

Inoltre il Decreto Ronchi introduce il concetto fondamentale di *gestione dei rifiuti*:

- la gestione dei rifiuti costituisce attività di pubblico interesse ed è disciplinata al fine di assicurare un'elevata protezione all'ambiente e controlli efficaci, tenendo conto della specificità dei rifiuti pericolosi (art.2, comma 1);
- la gestione dei rifiuti deve conformarsi ai principi di responsabilizzazione e di cooperazione di tutti i soggetti coinvolti nella produzione, nella distribuzione e nel consumo di beni da cui originano i rifiuti (art.2, comma 3).

Ciò significa che anche in Italia viene introdotto il principio di *responsabilità estesa e condivisa*, alla base della nuova politica comunitaria.

Tale principio consiste nell'attribuire ai produttori e distributori dei beni la responsabilità, almeno parziale, delle scelte e dei relativi costi della gestione dei prodotti in tutte le fasi della vita e quindi anche dello smaltimento dei rifiuti.

La conseguenza auspicata a medio termine è uno sforzo di riprogettazione dei prodotti in modo da diminuire l'impatto ambientale, ovvero un comportamento attivo delle aziende per utilizzare la qualità ecologica del prodotto come fattore di marketing.

Il decreto ha inoltre il merito di introdurre alcune importanti innovazioni correlate a precise scadenze temporali tra cui:

- il 1° gennaio 1999, data a partire dalla quale la realizzazione e la gestione di impianti di incenerimento possono essere autorizzate solo se il relativo processo di combustione è accompagnato da recupero energetico con una *quota minima* di trasformazione del potere calorifico dei rifiuti in energia utile, stabilita da apposite norme tecniche (art.5, comma 4);
- il 1° gennaio 1999, data a partire dalla quale è vietato smaltire rifiuti urbani non pericolosi in regioni diverse da quelli dove gli stessi sono stati prodotti (viene concessa tale possibilità per accordi precedenti o qualora l'opportunità tecnico-economica di raggiungere livelli ottimali di utenza lo richiedano). Si tratta, quindi, di ribadire l'importanza del *principio di prossimità*: la limitazione della possibilità di movimentare i rifiuti può, d'altronde, sensibilizzare maggiormente le collettività locali in merito alla necessità di gestire nel miglior modo possibile i "propri" rifiuti negli impianti di cui, giocoforza, vista la non esportabilità, si sono dovuti dotare;

- il 1° gennaio 2000, data a partire dalla quale è consentito smaltire in discarica solo rifiuti inerti, i rifiuti individuati da specifiche norme tecniche ed i rifiuti residui di operazioni di riciclaggio, di recupero e di smaltimento quali rifiuti derivanti da incenerimento a terra, da biodegradazione di alcuni residui liquidi e fanghi e da alcune tipologie di trattamento fisico-chimico (art.5, comma 6) ⁽³⁾.

I trattamenti, prima del deposito in discarica, devono consentire una sostanziale riduzione dei volumi di deposito e una sensibile attenuazione degli impatti ambientali di breve e medio termine che da essa tradizionalmente si originano, soprattutto per la presenza di sostanza organica fermentabile.

Altre importanti innovazioni introdotte dal “Decreto Ronchi” riguardano la *raccolta differenziata* e la trasformazione della tassa sui rifiuti in *tariffa*.

Il Decreto fissa per le amministrazioni comunali dei termini e degli obiettivi di raccolta differenziata per i rifiuti solidi urbani, prevedendo che in ogni *Ambito Territoriale Ottimale* (identificabile con il territorio di ogni singola provincia) la raccolta differenziata dei rifiuti urbani rispetto al totale dei rifiuti prodotti sia almeno pari a:

- 15% entro il 1999;
- 25% entro il 2001;
- 35% a partire dal 2003 (art.24).

L'ottemperare a tali innovazioni normative comporta, per le amministrazioni comunali, titolari del servizio di nettezza urbana, l'obbligo di una rapida riorganizzazione dei servizi che non rispondono alle prescrizioni normative del Decreto Ronchi.

Solo il Nord Italia è riuscita ad adeguarsi a questi standard.

L'introduzione del concetto di *Ambito Territoriale Ottimale* è fondamentale in quanto definisce il contesto spaziale entro il quale i Comuni devono organizzare, secondo criteri di efficienza, efficacia ed economicità, la gestione dei rifiuti urbani. La progressività

⁽³⁾ Il termine del 1° gennaio 2000, di cui all'articolo 5, comma 6, del Decreto Ronchi, è stato inizialmente prorogato dal Decreto-legge n.500 del 30 dicembre 1999 (convertito, con modificazioni, nella Legge n.33 del 25 febbraio 2000) sino alla data di entrata in vigore del provvedimento di ricevimento della Direttiva 1999/31/CEE del Consiglio del 26 aprile 1999 inerente modalità, termini e condizioni per lo smaltimento in discarica dei rifiuti, e in ogni caso non oltre il termine del 16 luglio 2001.

Il suddetto termine è stato ulteriormente differito dal Decreto-legge n.286 del 16 luglio 2001 fino all'adozione delle norme tecniche previste dai relativi articoli e dall'articolo 18, comma 2, lett.a) e l) del Decreto Ronchi, per lo smaltimento dei rifiuti in discarica, e comunque non oltre un anno dalla data di entrata in vigore della legge di conversione del citato Decreto n.286/2001.

degli obiettivi di raccolta differenziata ha poi il fine di consentire ai soggetti incaricati di attrezzarsi in modo adeguato per il perseguimento degli stessi.

1.2.2 - D. Lgs. 13 Gennaio 2003, n.36

Con il d. lgs. 36/2003 la complessa normativa italiana sulla gestione dei rifiuti si è arricchita di un nuovo ed importante tassello, poichè viene introdotta una nuova disciplina specificatamente dedicata alla gestione delle discariche.

In definitiva tale decreto è andato ad affiancarsi al d. lgs. n. 22/1997 e finalmente, riuscendo a colmare un vuoto legislativo che perdurava da anni, ha consentito di mettere definitivamente da parte le norme tecniche in materia di discariche fino ad allora applicabili, contenute nei paragrafi 4.2, 5 e 6 della Deliberazione Interministeriale del 27 Luglio 1984 (tutte espressamente abrogate dall'art. 17, unitamente al D.M. 11 marzo 1998, n. 141).

Il d. lgs. 36/2003 consta in 17 articoli e due allegati tecnici le cui indicazioni ripercorrono, come d'altro canto già noto, quanto specificato nella Direttiva 1999/31/CE. Fra le principali novità che esso introduce va annoverata senza dubbio la classificazione delle discariche nelle tre seguenti categorie: discarica per rifiuti inerti; discarica per rifiuti non pericolosi, discarica per rifiuti pericolosi (art.4).

Gli articoli sopra menzionati forniscono indicazioni circa gli obiettivi di riduzione del conferimento di rifiuti in discarica, la classificazione dei rifiuti che sono o meno ammessi in discarica, la modalità di presentazione della domanda di autorizzazione e le condizioni per il suo rilascio, le procedure di ammissione dei rifiuti in discarica e della chiusura di una discarica, la gestione operativa e post operativa, le garanzie finanziarie che devono essere trattenute, i costi dello smaltimento e le sanzioni.

Ciò che invece viene riportato negli allegati tecnici ha più pertinenza con gli obiettivi di questo studio, che infatti è finalizzato in generale all'inquadramento dal punto di vista geotecnico di una discarica.

Nell' allegato 1 vengono specificati i criteri costruttivi e gestionali degli impianti di discarica.

Relativamente alle novità introdotte dal presente decreto legislativo, l'art. 6 individua ben 14 categorie di rifiuti non ammessi in discarica e stabilisce un preciso divieto di diluire o comunque miscelare i rifiuti al solo fine di renderli conformi ai criteri di ammissibilità.

Il successivo art. 7 prevede in via generale che i rifiuti possano essere collocati in discarica soltanto dopo trattamento (fanno eccezione però i rifiuti inerti il cui trattamento non sia tecnicamente fattibile e quelli il cui trattamento non contribuisce al raggiungimento delle finalità del decreto e non risulta indispensabile ai fini del rispetto dei limiti di legge).

Gli articoli 8, 9 e 10 integrano quanto già previsto dal decreto Ronchi relativamente al contenuto della domanda di autorizzazione per la costruzione e l'esercizio di una discarica, le condizioni che devono sussistere ai fini del rilascio dell'autorizzazione ed il contenuto del provvedimento autorizzatorio.

Ulteriori importanti novità riguardano l'obbligo del richiedente a presentare le informazioni di cui sopra sotto forma di piani.

Essi si distinguono principalmente in:

- Piano di gestione operativa che deve individuare i criteri e le misure tecniche adottate per la gestione della discarica e le modalità di chiusura della stessa;
- Piano di gestione post-operativa, che deve definire i piani di sorveglianza e controlli successivi alla chiusura;
- Piano di sorveglianza e controllo, che deve indicare tutte le misure tecniche per prevenire i rischi di incidenti causati dal funzionamento della discarica e per limitare le conseguenze, sia in fase operativa che post operativa (con particolare riferimento alle precauzioni adottate a tutela delle acque dall'inquinamento provocato da infiltrazioni di percolato nel terreno e le altre misure di prevenzione e protezione contro qualsiasi danno all'ambiente);
- Piano di ripristino ambientale del sito a chiusura, nel quale devono essere previste le modalità e gli obiettivi di recupero e sistemazione della discarica in relazione alla destinazione d'uso prevista dell'area stessa

Relativamente ai rifiuti inerti, il d. lgs. individua l'ubicazione della discarica nei rispetto degli usuali vincoli territoriali ed ambientali (vedi: art. 17 legge 18 Maggio 89 n.183 -

art. 2,3 DPR 8/9/97 n. 357 - art. 21 d. lgs. 11/05/99 n. 152 - art. 146 d.lgs. 29/10/99 n. 490).

In generale le discariche non devono essere localizzate:

- in corrispondenza di doline, inghiottitoi o altre forme di carsismo superficiale;
- in aree dove i processi geologici superficiali quali l'erosione accelerata, le frane, l'instabilità dei pendii, le migrazioni degli alvei fluviali potrebbero compromettere l'integrità della discarica;
- in aree esondabili, instabili e alluvionabili; deve, al riguardo, essere presa come riferimento la piena con tempo di ritorno minimo pari a 50 anni. Le Regioni definiscono eventuali modifiche al valore da adottare per il tempo di ritorno sopra riportato in accordo con l'Autorità di bacino laddove costituita;
- in aree naturali protette sottoposte a misure di salvaguardia ai sensi dell'articolo 6, comma 3 della legge 6 dicembre 1991, n. 394

La discarica può essere autorizzata solo se le caratteristiche del luogo, per quanto riguarda le condizioni di cui sopra, o le misure correttive da adottare, indicano che la discarica non costituisca un grave rischio ecologico.

Per ciascun sito di ubicazione devono essere valutate le condizioni locali di accettabilità dell'impianto in relazione ai seguenti parametri:

- distanza dai centri abitati;
- fascia di rispetto da strade, autostrade, gasdotti, oleodotti, elettrodotti, cimiteri, ferrovie, beni militari;

Nell'individuazione dei siti di ubicazione sono da privilegiare le aree degradate da risanare e/o da ripristinare sotto il profilo paesaggistico.

Una volta terminato il ciclo di vita, la discarica, o una parte della stessa, può considerarsi definitivamente chiusa solo dopo che l'ente territoriale competente al rilascio dell'autorizzazione ha eseguito un'ispezione finale sul sito, ha valutato tutte le relazioni presentate da gestore e comunicato a quest'ultimo l'approvazione della chiusura.

Anche dopo la chiusura definitiva della discarica, il gestore è responsabile della manutenzione, della sorveglianza e del controllo nella fase di gestione post operativa per tutto il tempo durante il quale la discarica può comportare rischi per l'ambiente.

L'adeguamento alle nuove norme sancite dal presente decreto è regolato dall'art.17.

Inoltre il piano di adeguamento deve essere approvato dall'autorità competente con motivato provvedimento che autorizzi la prosecuzione dell'esercizio della discarica e fissi i lavori di adeguamento, le modalità di esecuzione ed il termine finale per l'ultimazione degli stessi, che non può in ogni caso eccedere la data del 16 Luglio 2009.

Qualora il piano di adeguamento fosse respinto, l'autorità competente sarà tenuta a prescrivere i tempi e le modalità di chiusura della discarica.

Aldilà di quello che potrebbe essere il formale recepimento della direttiva 1999/31/CE avvenuto con l'emanazione del presente decreto legislativo, ciò che deve essere considerato positivo e decisivo è il tentativo della direttiva di indirizzare le comunità europee ad un approccio più razionale con gli impianti di discarica esistenti.

E' necessario che il piano di adeguamento non rimanga fine a se stesso ed a questo proposito le Regioni e gli enti locali dovranno svolgere il difficile ruolo di garantire un'applicazione efficiente della disciplina, soprattutto nel lungo periodo di transitorio che inevitabilmente segue l'emanazione di un nuovo decreto legislativo.

Capitolo 2 - Proprietà geotecniche dei rifiuti

2.1 - Generalità

La progettazione delle nuove strutture nel campo dell'ingegneria geotecnica, come ad esempio le nuove tipologie di discarica, ma anche il ripristino e la bonifica di discariche vecchie o addirittura dismesse, si trova attualmente a dover far fronte a nuovi e complessi problemi relativamente, alla determinazione del comportamento meccanico dei rifiuti (Peso specifico dell'unità di volume, compressibilità, permeabilità, contenuto di umidità, resistenza etc).

I problemi di maggiore rilevanza dal punto di vista geotecnico sono (Jessberger, 1996):

- Stabilità statica e dinamica dei cumuli di rifiuti, previsione della capacità portante, stabilità delle sponde della discarica;
- Deformazioni e cedimenti dei cumuli di rifiuti, prognosi futura dello sviluppo degli assestamenti e cedimenti differenziali nelle discariche;
- Comportamento delle strutture accoppiate alle discariche (pozzi di raccolta del percolato, bocche di sfiato per i gas formatosi dalla biodegradazione dei rifiuti etc.);
- Influenza di strutture come gli edifici al di sopra di una discarica dismessa.

Spesso questi problemi convergono in una serie di problematiche nell'ambito geotecnico, come ad esempio il comportamento meccanico del rifiuto, la cui natura è spesso molto complessa.

La difficoltà nell'individuazione delle proprietà geotecniche dei rifiuti è correlata a diversi fattori:

- La composizione dei RSU è eterogenea e soprattutto variabile spazialmente;
- Il campionamento in sito presenta notevoli difficoltà nell'ottenimento di campioni rappresentativi sia in termini di dimensioni che in termini di condizioni locali;
- Non esistono, in generale, procedure di campionamento e prove standard per i rifiuti sufficientemente rappresentative ;
- Le proprietà fisico-chimiche dei rifiuti variano nel tempo.

Infatti la composizione iniziale e le proprietà meccaniche di molti tipi di rifiuti variano nel tempo a causa di fenomeni di biodegradazione e di processi chimico-fisici.

L'ammontare e la percentuale dei fenomeni di biodegradazione dipende da diverse condizioni (Napoleoni, Grisolia, 1996) come ad esempio il contenuto organico iniziale, il contenuto di umidità iniziale, l'efficienza dei sistemi di raccolta del percolato e di impermeabilizzazione, le condizioni meteorologiche e le modalità di migrazione ed estrazione dei gas.

D'altro canto i processi di biodegradazione fanno variare il contenuto di umidità nel tempo, oltre al peso di volume, quindi la variazione di un parametro determina la contemporanea variazione di tutti gli altri parametri secondo un meccanismo ciclico di difficile interpretazione e valutazione.

Quelle elencate sono le difficoltà più evidenti e di immediata comprensione, ma esistono numerose altri fattori che rendono gli studi sulla caratterizzazione dei rifiuti altamente complessi, non da ultimi possiamo ricordare il grado di costipamento che risulta variabile spazialmente, il metodo di posizionamento dei rifiuti in discarica, e l'età dei rifiuti cui è correlata la percentuale di materiali biodegradabili contenuti la cui decomposizione contribuisce ad alterare nel tempo il peso di volume ed altre proprietà meccaniche.

I rifiuti urbani sono in genere caratterizzati da un miscuglio fortemente eterogeneo di materiali come plastica, legno, vetro e sostanze organiche.

I rifiuti industriali invece sono costituiti prevalentemente da plastica e simili.

Sicuramente nell'ambito delle proprietà meccaniche, è la resistenza il fattore di maggiore interesse nell'individuazione del comportamento sia in condizioni statiche, che in condizioni dinamiche.

La resistenza è influenzata a sua volta da numerosi fattori e, per elencarne qualcuno, possiamo fare riferimento allo stato del rifiuto allocato in discarica (fresco, secco, umido), la sua composizione merceologica che determina quella che viene definita distinzione in comportamento "tipo suolo" o "tipo non suolo" (successivamente meglio spiegato), densità e stato tensionale.

Comunemente la determinazione della resistenza dei rifiuti è affidata quasi interamente alle prove in sito come SPT, CPT e Vane Test (Siegel et al. 1990, Sánchez-Alciturri et al. 1993, Coumoulos et al. 1995 and Jucá et al. 1999).

La corretta esecuzione di queste prove e l'interpretazione dei risultati ottenuti presenta altrettanti difficoltà, perchè l'eterogeneità dei rifiuti può portare, qualora il numero delle prove sia ridotto, ad una valutazione errata o comunque poco rappresentativa. La

presenza di materiali come legno, metalli, materiali da costruzione che presentano picchi di resistenza molto elevati, oltre a alterare i risultati delle prove in sito possono anche lesionare le apparecchiature di misura, causando danni economici di notevole rilevanza.

I test di penetrazione statica e dinamica in genere molto utilizzati in meccanica delle terre per ricavare i parametri di resistenza dei terreni, necessitano, per la loro interpretazione quantitativa e qualitativa, della conoscenza delle relazioni empiriche e semi-empiriche tra la resistenza alla penetrazione in sito ed i parametri di resistenza e deformabilità.

Se già per i terreni, dove queste procedure sono già state sufficientemente calibrate, è necessaria cautela nel considerare attendibili i risultati forniti dalle prove, per i rifiuti le incertezze sono notevolmente superiori.

Ad oggi le correlazioni per i rifiuti non sono ancora disponibili (Grisolia et al., 1991), ma gli studi proseguono il loro corso e si spera di ottenere risultati concreti nei prossimi anni. Nonostante le incertezze di cui sopra discusso i test di penetrazione in sito rimangono ad oggi lo strumento migliore per la stima della resistenza dei rifiuti in discarica.

L'uso dei penetrometri ha inoltre il vantaggio di essere un metodo economico e di facile utilizzo; inoltre le misure possono essere ripetute periodicamente per poter confrontare i risultati ed effettuare gli aggiustamenti e correzioni che il caso richiede.

Le criticità di questo metodo di indagine in sito nella letteratura internazionale (Manassero et al., 1996) non hanno impedito il suo largo utilizzo.

Molti autori (Siegel et al. 1990, Sánchez-Alciturri et al. 1993 and Jucá et al. 1999) hanno tarato i parametri di resistenza dei rifiuti sulla base delle prove SPT.

Successivamente vedremo di riportare esempi di risultati di prove SPT condotte sui rifiuti, evidenziando la poca attendibilità dei risultati.

Anche se ad oggi la conoscenza di tutti gli aspetti sopra elencati è scarsa, il primo passo per impostare bene qualsiasi analisi geostutturale è descrivere e classificare il rifiuto.

Di seguito sono esaminate, in particolare, la definizione teorica, le modalità di determinazione e i dati di letteratura più significativi per ogni caratteristica fisica dei RSU, ritenuta significativa dal punto di vista geotecnico.

2.2 - Descrizione dei Rifiuti: Merceologia

2.2.1 - Indagini in sito

I criteri di progettazione e controllo delle discariche in uso o dismesse richiede una specifica conoscenza della composizione, della granulometria e delle proprietà fisico-chimiche del rifiuto.

Pertanto i comuni test di esplorazione del sito, come perforazioni, indagini in foro, campionamenti e sondaggi risultano essere sempre necessari.

La campagna di indagine deve essere pianificata in accordo con il tipo di caratteristiche meccaniche del rifiuto da valutare, inoltre risulta necessario prelevare dei campioni per poter:

- classificare dal punto di vista geotecnico i rifiuti;
- ottenere i dati necessari per svolgere un'analisi geotecnica a partire dalle prove di laboratorio;

Ciò che può essere considerato più rappresentativo e che quindi è necessario estrapolare dai risultati dei sondaggi è:

- tipologia ed età dei rifiuti
- tecnica di posizionamento
- rapporto tra fase acida e la fase stabilizzata sottoforma di contenuto in metano (in pratica per i rifiuti urbani equivale al contenuto organico)

Le indagini geotecniche e merceologiche devono essere distribuite uniformemente su tutta l'estensione areale della discarica. Unitamente ad un'opportuna combinazione dei metodi di analisi è possibile arrivare ad un'esauriente caratterizzazione del corpo di discarica.

Inoltre, per poter stilare un adeguato programma di indagine e campionamento del sito, nel rispetto della storia che ha caratterizzato l'accumulo dei rifiuti nell'area in esame, è consigliato utilizzare, ovviamente se presenti, foto aeree.

Tornando ai campionamenti in sito, le comuni indagini in foro possono essere eseguite con o senza supporti a seconda sia della profondità da raggiungere che del tipo di rifiuto.

Lo stesso discorso vale anche per i pozzi che, oltre a permettere di raggiungere le parti più profonde della discarica, consentono anche di eseguire le prove per la determinazione del peso dell'unità di volume successivamente descritto.

Le prove di penetrazione SPT e CPT possono essere utilizzate per investigare il corpo della discarica, per ricavare informazioni sulla struttura spaziale dei rifiuti (spessore degli strati) e del sottostante substrato, sul tipo di rifiuto in termini di proprietà meccaniche e fisiche.

Senza scendere in dettaglio, si ritiene utile ricordare come attraverso la prova CPT sia possibile ottenere oltre al valore della resistenza in punta e della resistenza di attrito laterale, anche il valore della pressione interstiziale, della temperatura e della resistenza elettrica.

Generalmente l'uso di tecniche di sondaggio come l'SPT e la CPT richiedono molta esperienza, come già spiegato nel paragrafo delle generalità, ed i risultati ottenuti devono essere accuratamente analizzati prima di poter essere considerati validi.

Per quanto riguarda invece il campionamento, è evidente quindi la difficoltà di ricostruire campioni di tali dimensioni che siano sufficientemente rappresentativi ai fini della determinazione dei parametri di resistenza al taglio e del comportamento a compressione su larga scala al variare del carico applicato.

Spesso i campioni vengono ricostruiti in laboratorio, in quanto la consueta procedura di prelevamento di campioni omogenei racchiusi in contenitori ermetici sottovuoto può diventare per i rifiuti una questione impraticabile.

Infatti la corretta procedura per eseguire i test necessari alla determinazione dei parametri geotecnici dei rifiuti deve necessariamente tenere in conto le proprietà e la composizione stessa del rifiuto.

In dipendenza del tipo di rifiuto, non può essere appropriato adottare la sola procedura standard di analisi.

Gli aspetti di seguito riportati devono essere tenuti in debita considerazione:

- Le dimensioni del provino, per poter essere considerate rappresentative, devono essere maggiori di 5-10 volte la dimensione massima delle particelle o degli elementi che costituiscono il rifiuto (mediamente il volume minimo considerato rappresentativo di un rifiuto debolmente compatto per la sua caratterizzazione geotecnica in laboratorio è di $1,5 \text{ m}^3$);
- L'equipaggiamento per l'esecuzione dei test di laboratorio deve poter considerare i fenomeni di corrosione legati ad esempio alla presenza di percolato;

- Il comportamento sforzi-deformazioni dei rifiuti può differire notevolmente da quello dei suoli, come verrà si seguito meglio specificato. Test condotti sui rifiuti solidi urbani hanno evidenziato la tendenza a deformazioni elevatissime che non potrebbero competere con quelle dei terreni.
- Nel caso di test su materiali contaminati è necessario garantire adeguata protezione allo staff.

Per quanto concerne la documentazione necessaria all'esecuzione dei test per la determinazione dei legami sforzi deformazioni, è necessario includere le seguenti informazioni:

- Descrizione e classificazione del rifiuto in sito;
- Preparazione di un campione rappresentativo;
- Determinazione delle proprietà iniziali del rifiuto (Peso di volume, contenuto umidità, permeabilità e stato di sforzo)
- Legame sforzi-deformazioni;
- Cambiamenti di volume durante le prove.

Considerando che nei rifiuti sono spesso presenti elementi notevolmente ingombranti, per poter disporre di un campione rappresentativo spesso è necessario eliminare tali elementi oppure sottoporre il materiale a frantumazione.

In questo caso la tecnica di preparazione del provino può influenzare pesantemente il risultato dei test.

2.2.2 - Classificazione del rifiuto

A causa della loro composizione fortemente eterogenea, i rifiuti possiedono caratteristiche meccaniche che differiscono vistosamente da quelle possedute dai suoli.

Una stima differenziata delle proprietà meccaniche dei singoli componenti del rifiuto può permettere, unitamente ad un'opportuna analisi statistica, di ricostruire il comportamento generale del loro insieme.

Una prima classificazione specifica per i RSU è stata indicata da Fang (1995), di cui la tabella seguente ne riporta lo schema. Sostanzialmente i rifiuti sono divisi in materiali degradabili e materiali non degradabili.

Categories		Type	Description	Engineering Behavior
Solid Garbage	Recyclable	A-I	Kitchen	Unit Weight Varies Bad Odors Combustion Potentials
		A-II	Garden Trash	
		A-III	Dead Animals & Manure	
		A-IV	Paper & Paper Products	
	Non-Recyclable	B-I	Textiles, Toys, Rugs	Unit Weight Varies Bad Odors Combustion Potentials
		B-II	Glass, Ceramics	
		B-III	Plastic, Rubbers, Leathers	
	Non-Generative	C-I	Metals, Appliances	Unit Wt.=200-400 pcf
		C-II	Demolition & construction materials	Unit Wt.= 110-150 pcf
		C-III	Soils	Unit Wt.= 100-135 pcf
Recycled Garbage	D-I	Partial Decomposed Garbage	Organic soil contained some glass or metal articles.	Unit Wt.=85-120pcf
	D-II	Decomposed Garbage	Organic soils contain some sand	Unit Wt.=100-135pcf

Tab. 1.II - Classificazione merceologica di Fang (1995)

Nel 1993 il GLR Recommendations suggerì un sistema di classificazione che evidenziasse le proprietà geotecniche dei RSU, suddividendo quest'ultimo in due categorie principali (GLR, 1993):

- I rifiuti granulari che presentano comportamento simile a quello dei terreni ovvero "soil-like waste", per i quali è lecito applicare i principi della meccanica dei terreni sebbene con incertezze e limitazioni.
- I rifiuti con un comportamento dissimile da quello dei terreni ovvero "non soil-like waste", per i quali i suddetti principi sono validi solo parzialmente o, nel peggiore dei casi, non applicabili in alcun modo.

Nel primo caso, la determinazione delle proprietà deve essere guidata dai convenzionali principi della meccanica delle terre.

Talvolta è possibile che per alcune delle proprietà meccaniche del rifiuto i risultati non posano essere totalmente giustificati dai principi della meccanica delle terre; in questo

caso è necessario valutare come ed in qual misura queste proprietà possono influenzare la stabilità delle pareti esterne e del corpo della discarica.

A tal proposito diventa utile eseguire ulteriori specifiche indagini in sito e test di laboratorio.

Per avere un'idea su quali rifiuti abbiano un comportamento "soil-like" o "non soil-like" è possibile far riferimento alla seguente tabella:

Soil-like waste	Non soil-like waste
Materiale di scavo	Rifiuti solidi urbani
Fanghi industriali	Residui ingombranti
Residui di materiali stradali	Rifiuti organici
Residui impianti inceneritori (cenere, polvere)	Rifiuti urbani simili a rifiuti industriali
Fango da acque di rifiuto	Rifiuti di materiali da costruzione
	Residui dei rifiuti biologici

Tab. 2.II - Classificazione geotecnica dei rifiuti secondo il GLR (1993)

Per i "non soil-like waste", un esempio di caratterizzazione geotecnica è stata proposta da Kockel et al. (1996).

In questo caso le analisi in sito devono fornire specifiche informazioni su:

- Aspetto visivo e stato di assestamento generale del deposito;
- Contenuto naturale d'acqua e contenuto di materia organica;
- analisi delle classi dei materiali secondo 3 steps:

STEP1: Suddividere opportunamente tutto l'ammasso in una serie di classi di materiali.

STEP2: Determinare la distribuzione granulometrica di tutte le particelle con dimensione < 120 mm.

STEP3: Identificazione e descrizione di ciascuna delle individuate classi di materiali (incluse quelle con $D < 120$ mm).

Per la suddivisione in classi di materiali è possibile far riferimento alla classificazione proposta nella seguente tabella:

DISTINZIONE DELLE CLASSI DI MATERIALI A PARTIRE DALL'AMMASSO TOTALE DEI RIFIUTI	DISTRIBUZIONE DELLE DIMENSIONI DELLE PARTICELLE CON $D \leq 120$ mm	IDENTIFICAZIONE E DESCRIZIONE DI CIASCUNA CLASSE DI MATERIALE
Componenti voluminosi, carta, cartoni etc.	DISTINZIONE ALMENO DELLE SEGUENTI FRAZIONI: ○ < 8 mm ○ da 8 a 40 mm ○ da 40 a 120 mm	GEOMETRIA DEI COMPONENTI
Materiali sintetici soffici		- DIMENSIONE 0 (grani)
Materiali sintetici duri		- DIMENSIONE 1 (forma allungata tipo fibra)
Metalli		- DIMENSIONE 2 (forma laminare)
Minerali		- DIMENSIONE 3 (forma scatolare)
Legno		CONTENUTO D'ACQUA (misura in due step)
Sostanze organiche		CONTENUTO ORGANICO (stabilità biochimica)
Fanghi		-----
Rimanenza con $D < 120$ mm		-----

Tab. 3.II - Esempio di classificazione merceologica

E' consigliato determinare il contenuto d'acqua W del campione di rifiuto in due step, ovvero alle temperature di 70° e 105°C.

Questa caratterizzazione dei rifiuti con comportamento dissimile dai terreni permette una dettagliata analisi della composizione e delle condizioni dell'ammasso totale dei rifiuti e dei suoi specifici componenti.

Al momento non sono disponibili correlazioni tra le diverse classi merceologiche ed i parametri geotecnici, ma tuttavia sono in corso degli studi per individuare eventuali dipendenze.

I tempi richiesti per poter arrivare a risultati soddisfacenti sono molto lunghi poichè è richiesto un numero notevole di prove di laboratorio e poichè i risultati devono essere opportunamente rielaborati e vagliati.

Manassero e Shackelford (1994) hanno proposto un approccio per la classificazione dei rifiuti di origine industriale in termini di proprietà meccaniche ed idrauliche, includendo anche la compatibilità chimica del rifiuto con eventuali barriere di contenimento.

Focalizzando l'attenzione sul comportamento meccanico dei rifiuti industriali, in accordo con quanto approfondito da Manassero e Shackelford, sono stati introdotti i seguenti aspetti:

1. COMPONENTI CHE INFLUENZANO LA RESISTENZA AL TAGLIO
 - Fenomeni attritivi;
 - Comportamento serrato o dilatante;
 - Fenomeni legati alla osmosi ed alla suzione;
 - Cementazione
 - Presenza di inclusioni rigide o fibre.
2. COMPONENTI CHE INFLUENZANO LA DEFORMABILITA' PER VARIAZIONI DELLE TENSIONI ESTERNE
 - Deformabilità intrinseca e/o collasso strutturale delle particelle solide e corpi rigidi;
 - Deformabilità dello scheletro solido.
3. COMPONENTI CHE INFLUENZANO LE TENSIONI
 - Collassabilità dello scheletro solido
 - Variazioni positive o negative delle pressioni interstiziali;
 - Cambiamenti della composizione chimica dei fluidi interstiziali (suzione osmotica)
 - Degradazione biologica e/o fisico chimica
 - Migrazione dei fini
 - Viscosità dello scheletro solido o delle singole particelle solide o inclusioni.

Dopo aver illustrato a grandi linee come effettuare una caratterizzazione merceologica dei rifiuti, si ritiene utile presentare almeno un esempio di curva granulometrica rappresentativa per un rifiuto di tipo urbano.

In fig. 2.1 sono illustrate le distribuzioni granulometriche ottenute su campioni di rifiuti di varia età, prelevati a differenti profondità (Manassero et al., 1996). Si osserva che all'avanzare dell'età del rifiuto, con il procedere del processo di decomposizione, aumenta la frazione fine e che i campioni più superficiali sono caratterizzati da una distribuzione granulometrica più grossa. Tale comportamento può essere attribuito in parte al più alto grado di decomposizione dei campioni più profondi ed in parte al diverso metodo di stacciatura (a secco e a umido) utilizzato nei due casi.

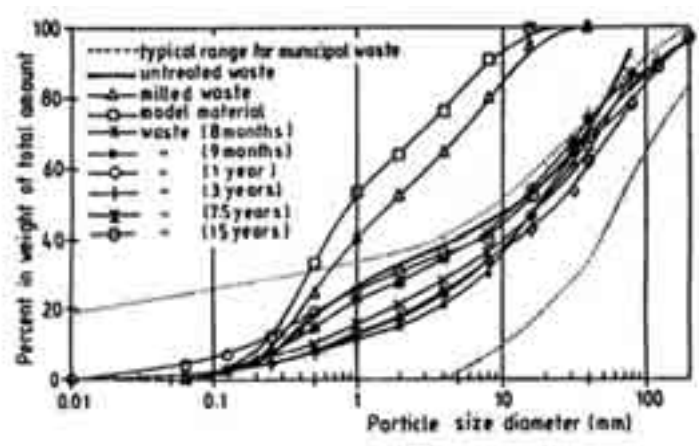


Fig. 2.1 - Curve granulometriche per rifiuti di diversa età prelevati a differenti profondità (Manassero et al., 1996)

2.3 - Peso dell'unità di volume

2.3.1 - Definizione

La conoscenza del valore del peso di volume medio dei RSU costituisce la prima informazione utile per valutare il tipo e l'età del rifiuto allocato in discarica. Il suo valore inoltre influenza le proprietà meccaniche dell'ammasso in termini di resistenza e deformabilità.

Il peso dell'unità di volume è definito come:

$$\gamma = P/V \quad (1.II)$$

dove:

γ = peso dell'unità di volume (kN/m^3);

P = peso del materiale campione (kN);

V = volume occupato dal materiale campione, comprensivo dei vuoti (m^3).

Il peso dell'unità di volume secco è, invece, definito come:

$$\gamma_d = P_s/V \quad (2.II)$$

dove:

γ_d = peso dell'unità di volume secco (kN/m^3);

P_s = peso del materiale campione essiccato (kN).

Peso di volume e densità vengono, spesso, usati come sinonimi. In realtà, la densità (sia secca che umida) è definita dalla stessa formula, ma per V si intende il volume occupato solo dagli elementi solidi.

Per quantificare la riduzione del volume della discarica nel periodo compreso tra la compattazione dei rifiuti e la chiusura dell'impianto si definisce il "grado di autocompattazione":

$$g = V_f/V'_f \quad (3.II)$$

dove:

V_f = volume finale dopo la compattazione;

V'_f = volume alla chiusura del sito.

Tale parametro è analogo al fattore di compattazione ma è esteso ad un periodo temporale diverso interessato da fenomeni fisici diversi.

2.3.2 - Dati di letteratura e correlazioni con altri parametri

Secondo Jessberger (1996) e Mitchell et al. (1991), il $\gamma_{iniziale}$ dipende da differenti fattori quali:

- il grado di compattazione;
- il contenuto d'acqua;
- la composizione merceologica;
- il contenuto organico;
- la presenza e la proporzione della copertura giornaliera che tende ad incrementare il peso di volume.

Il contenuto organico, e di conseguenza anche la composizione merceologica, influisce notevolmente sulla variazione del peso dell'unità di volume iniziale del rifiuto, alla luce dell'inevitabilità dei processi di biodegradazione che trasformano nel tempo la materia. Oltre ad influenzare il peso di volume, il contenuto organico determina un differente comportamento in termini soprattutto di deformabilità.

Mitchell (1983) ha dimostrato come l' incremento dell' 1-2% di contenuto organico origina la stessa variazione sull'indice di plasticità pari ad un incremento del 10- 20% di frazione argillosa. Inoltre è stato dimostrato che l'incremento di contenuto organico determina un sensibile decremento della densità massima secca e della resistenza a compressione libera.

Il peso di volume dei vecchi rifiuti dipende, invece, dal grado di decomposizione e, pertanto, dal tempo, dalla profondità e da alcuni fattori ambientali.

Generalmente il suo valore è superiore rispetto quello di un rifiuto di analoghe caratteristiche ma di recente origine. Le condizioni ambientali determinano infatti una maturazione del rifiuto, soprattutto se ha un alto tenore di materia organica, che porta ad una riduzione progressiva dell'indice dei vuoti e quindi del volume totale occupato dal rifiuto stesso.

Ai fini del dimensionamento delle discariche e dei calcoli di verifica, si ipotizza, in genere, che il peso di volume sia indipendente dalla profondità e dall'età del materiale, sebbene, disponendo di un numero

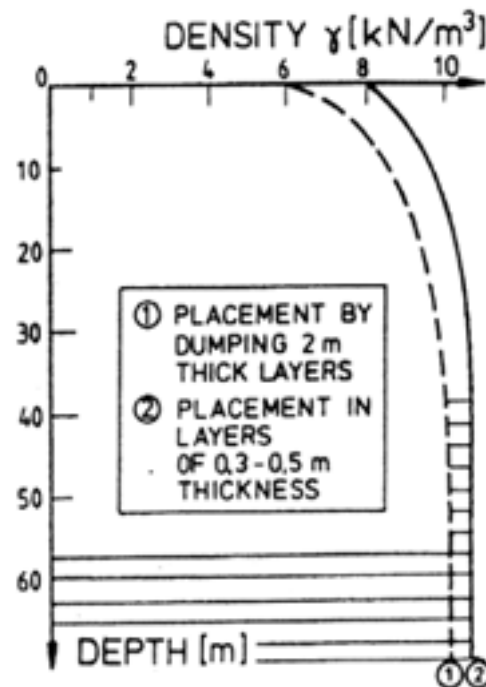


Fig. 2.2 - Unità di peso degli MSW senza detriti da costruzione e materiali di scavo (modificata da Wiemer 1982)

sufficiente di dati, si potrebbe sviluppare un'analisi a tre variabili in cui γ sia espresso in funzione dell'età dei rifiuti, della profondità e, ad esempio, dalle singole classi merceologiche.

In figura 2.2 è rappresentato un esempio di determinazione del peso dell'unità di volume al variare della profondità, nel caso di rifiuti privi di elementi di risulta di scavi e demolizioni (Weimer, 1982).

Analogamente, uno studio più recente condotto da Kavazanjian (1995) mostra un andamento pressochè simile per il profilo peso di volume/profondità (Figura 2.3).

Il range di variazione comune per i rifiuti risulta essere 6-11 kN/m³, nonostante il fatto che possano verificarsi casi estremi in cui un per rifiuti poco o per nulla compattati vale $\gamma=3-4$ kN/m³, oppure per rifiuti molto compattati, vale $\gamma=17-18$ kN/m³,

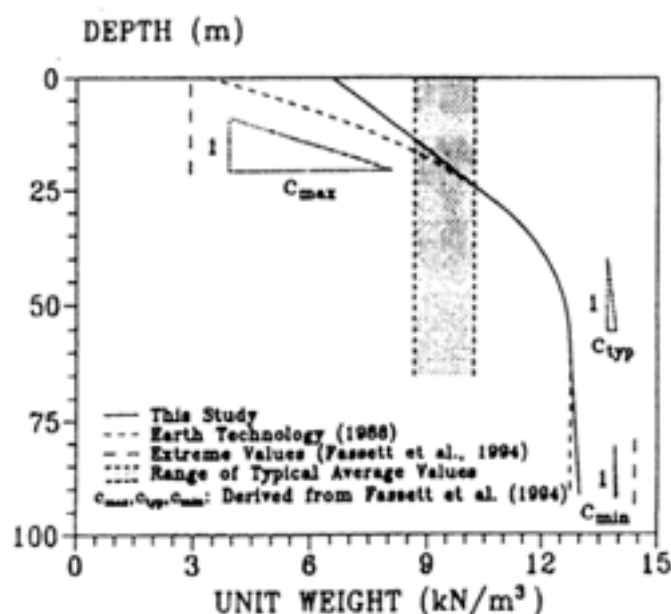


Fig. 2.3 - Peso dell'unità di volume per rifiuti solidi urbani
(Kavazanjian 1995)

E' quindi evidente come il peso di volume tenda ad incrementare con la profondità, dato che il rifiuto tende progressivamente ad essere sottoposto a tensioni di confinamento maggiori.

Tralasciando quelli che sono i numerosi metodi per il calcolo del peso di volume, in questo capitolo si cercherà di individuare esclusivamente gli intervalli comuni dei valori assunti dai parametri geotecnici di maggiore interesse, ai fini di questo e di futuri studi.

Facendo riferimento a diversi studi condotti in relazione alla determinazione del peso di volume, si ritiene utile riportare quelli che si considerano i risultati più significativi.

Cancelli & Cossu (1984) riportano un campo di valori compreso tra 0.15 e 0.35 t/m³ per rifiuti posti in opera senza alcuna compattazione, tra 0.35 e 0.55 t/m³ per rifiuti debolmente compattati e fino a 1.0 – 1.2 t/m³ con compattazione spinta. L'indice dei vuoti varia conseguentemente tra 15 (per rifiuti non compattati) e 1 (per rifiuti non compattati).

Secondo Jessberger (1996), invece, i pesi di volume variano tra 3 kN/m³ per rifiuto non compattato e 17 kN/mc per rifiuto con alto grado di compattazione. In dipendenza del metodo di scarico e della composizione si possono avere valori anche più alti di 18 kN/m³.

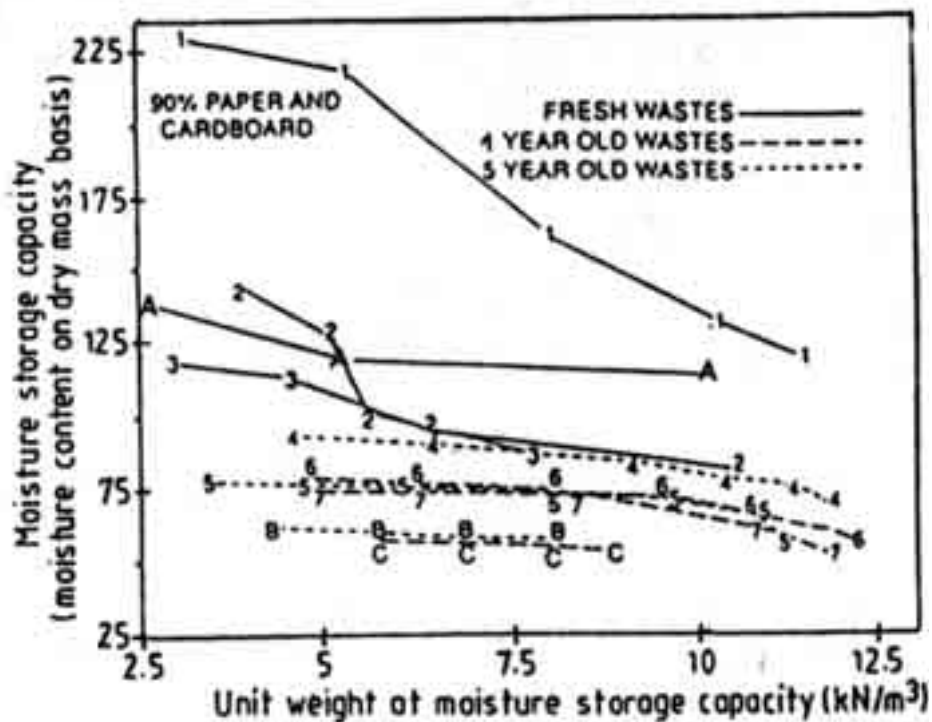


Fig. 2.4: peso di volume in funzione del contenuto d'acqua (Manassero et al., 1996)

Fasset et al. (1994) stimano che il peso di volume varia nel campo:

- 3-9 kN/m³, per compattazione debole;
- 5-8 kN/m³, per compattazione media;
- 9-10.5 kN/m³, per buona compattazione.

Secondo Manassero et al. (1996), la densità dipende dal valore locale di umidità di cui si discuterà nel successivo paragrafo.

In Fig. 2.4 sono infatti rappresentate le misure del peso di volume in funzione del contenuto d'acqua per rifiuti freschi e vecchi di 1 e 5 anni. In tutti i casi la densità diminuisce all'aumentare del contenuto d'acqua.

Invece in Tabella 4.II vengono mostrati i valori pubblicati del peso dell'unità di volume di alcuni tipi di rifiuti (Oweis, 1993).

Rifiuti solidi urbani (RSU)	Peso dell'unità di volume
	kN/m ³
RSU, compattazione da moderata a buona
RSU, compattazione da buona a ottima	4.7-6.3
RSU, rifiuto imballato	8.6-9.4
RSU, discarica attiva con percolato	8.6-14.1
RSU, vecchia discarica	6.6
RSU, da scavo di prova	9.7
RSU, dopo degradazione e cedimenti	8.9-16.2
Residui di inceneritore	9.9-11
Residui di inceneritore(densità secca max-compattazione standard)	7.2-12.7
Residui di inceneritore -vecchi e recenti (densità in sito)	13.5
Legno (asciutto)	14.9-16.6
Legno (umidità 64%)	2.3

Tab. 4.II.: peso dell'unità di volume (Oweis, 1993).

2.4 - Contenuto naturale d'acqua

2.4.1 - Definizione

Nel caso delle terre, è possibile definire il *contenuto naturale d'acqua* W_n e il *contenuto volumetrico d'acqua* θ_n :

- il *contenuto naturale d'acqua* W_n è definito:

$$W_n = P_w/P_s \times 100 \quad (4.II)$$

dove:

P_w è il peso dell'acqua rimossa dal terreno attraverso essiccamento in stufa a 105°C;

P_s è il peso del materiale solido essiccato in stufa a 105°C (temperatura alla quale evapora completamente l'acqua libera o interstiziale).

Un terreno è considerato *asciutto* quando la sua massa non subisce ulteriori variazioni durante il processo di essiccamento in stufa: ciò può richiedere, generalmente, un periodo di essiccamento pari a circa 12-24 ore;

- il *contenuto volumetrico d'acqua* θ_n è definito

$$\theta_n = V_w/V_s \times 100 \quad (5.II)$$

dove:

V_w è il volume dell'acqua;

V_s è il volume del materiale solido essiccato.

Nei rifiuti è possibile distinguere tra:

- *capacità di ritenzione* (W_s): rappresenta la quantità d'acqua contenuta nei rifiuti una volta riempiti anche i vuoti interparticellari. Se espressa come % del peso umido dei rifiuti allora diminuisce con la densità. Se espressa come % in volume dei rifiuti allora aumenta con l'aumentare della densità;
- *capacità di campo* (W_c): rappresenta il massimo contenuto d'acqua che può essere trattenuta dai rifiuti senza che si verifichi il percolamento per gravità; W_c è un parametro fondamentale per la valutazione della formazione di percolato ed, in genere, dipende dalla pressione applicata e dallo stato di decomposizione dei rifiuti. Per quelli domestici e commerciali non compattati esso risulta variare tra il 50 ed il 60 % del peso umido (Tchobanoglous et al., 1993);
- *umidità reale* (W): rappresenta la quantità d'acqua realmente contenuta nei rifiuti e viene espressa in % del peso secco, in % del peso umido o in % del volume.
- *capacità di assorbimento* ($RV=W_c-W$): indica la quantità d'acqua che potenzialmente può essere assorbita dai rifiuti senza formazione di percolato.

2.4.2 - Dati di letteratura, dipendenze e correlazioni

La Fig. 2.5, ottenuta da indagini effettuate su campioni di RSU prelevati in discarica, illustra l'andamento delle quattro grandezze sopra menzionate W_s , W_c , W e RV in funzione del peso di volume.

Secondo Manassero et al. (1996), il contenuto d'acqua in discarica dipende:

- dalla composizione merceologica iniziale, con particolare riguardo al contenuto organico;
- dalla "capacità di campo";
- dalle condizioni ambientali, quali la stagione dell'anno, l'umidità dell'aria, le condizioni metereologiche;
- dalla profondità e dal metodo di scarico dei rifiuti e, pertanto, dal peso di volume;
- dalla presenza e dalla funzionalità dei sistemi di drenaggio del percolato;
- dalla quota di umidità generata dai processi biologici;

- dalla quota di umidità rimossa dai gas della discarica (aria, biogas).

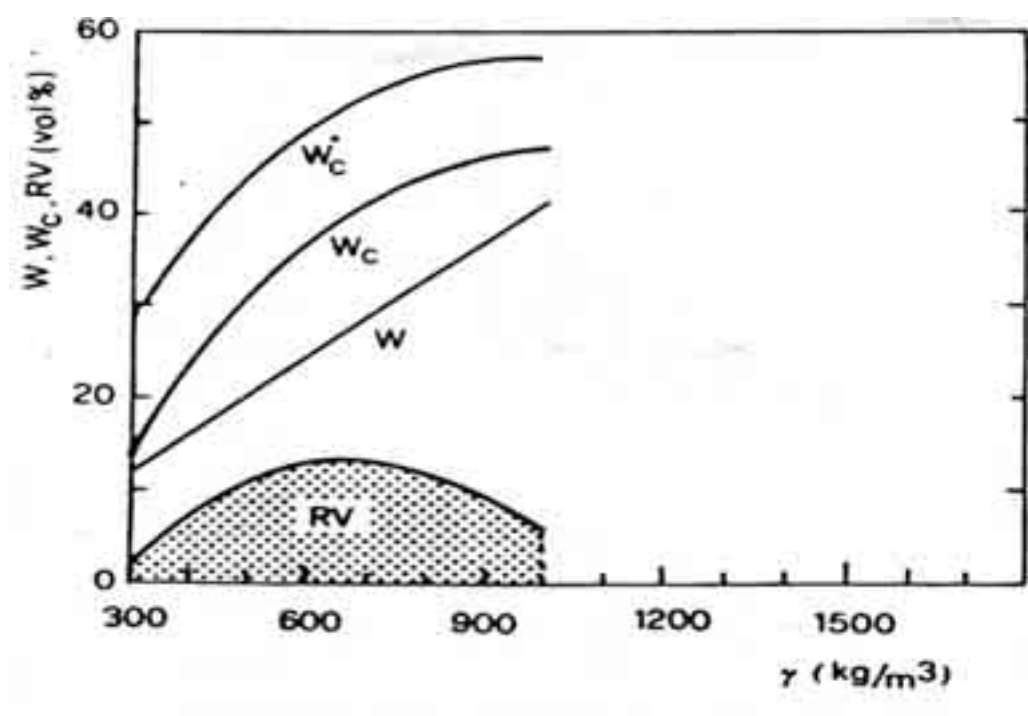


Fig.2.5: Andamento della capacità di campo (W_c), della capacità di assorbimento (RV) e dell'umidità (W) in funzione del peso di volume dei RSU (Manassero et al., 1996).

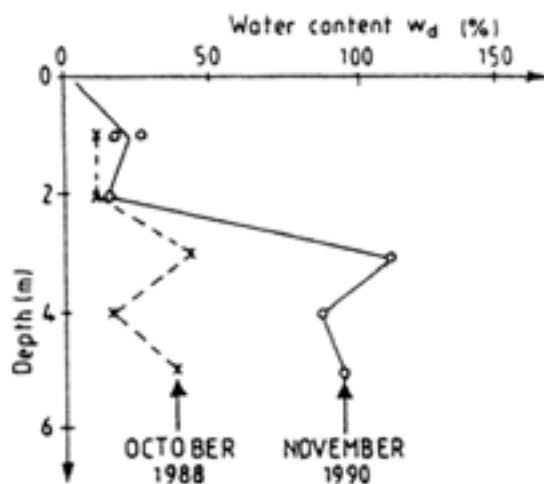
In riferimento al primo dei fattori sopra elencati, il contenuto di umidità aumenta con il contenuto organico dei materiali di rifiuto.¹ Rifiuti giovani e non compattati presentano generalmente un contenuto di umidità più alto rispetto a rifiuti più vecchi di analoga merceologia.

Huitric (1981) e Tchobanoglous et al. (1993) riportano che per la maggior parte delle discariche urbane negli Stati Uniti, il contenuto dell'umidità varia dal 15% al 40%, valori che risultano dipendenti dalla composizione dei rifiuti, dalla stagione dell'anno, dalle condizioni meteo-climatiche, ed in particolare dagli eventi meteorici.

In regioni dove la evapo-traspirazione supera le precipitazioni il contenuto di umidità tipico è dell'ordine del 25%.

Blight et al. (1992) hanno presentato i risultati un profilo del contenuto d'acqua preso alla discarica di Limbro a Johannesburg, Sud Africa che si ritiene utile riportare.

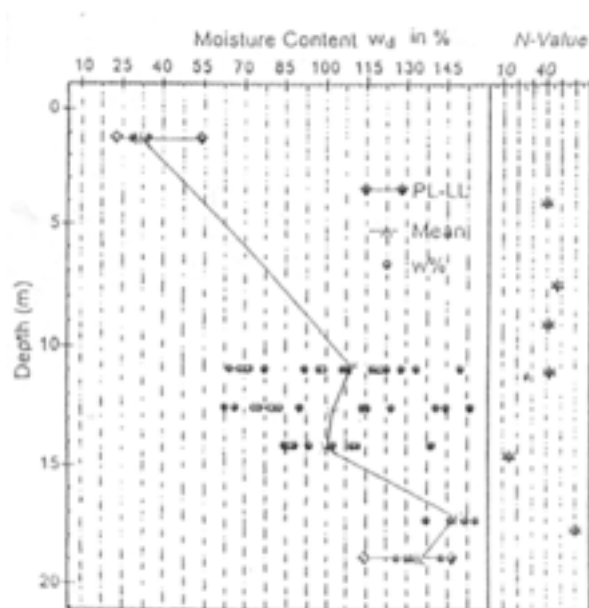
¹ Landva & Clark, 1990



E' possibile notare come nel 1990 il contenuto d'acqua tra le profondità di 3 e 5 m dal p.c. sia doppio rispetto al corrispondente valore misurato due anni prima. Questo fatto è facilmente spiegabile come effetto diretto di un evento meteorico di rilevante intensità

Fig. 2.6 – Profilo del contenuto di acqua e confronto di fine stagione secca alla discarica di Limbro, Johannesburg Sud Africa (da Blight e al. 1992)

Le misure effettuate nella discarica di "Pioneer Crossing" (Pennsylvania) da Gabr & Valero riportate in figura 2.7, mostrano come i valori del contenuto di umidità spazino tra i valori estremi del 30% e 130% a più elevate profondità. E' evidente quindi come l'eterogeneità dei rifiuti solidi urbani possa produrre zone in cui la variabilità del



contenuto di umidità è estremamente elevata.

Si nota inoltre che i dati di w_d vicino alla superficie variano da 22.5% per rifiuti freschi (non compattati e con alta % di carta e cartone) fino al 55% per vecchi rifiuti di 1-5 anni compattati ad alta densità.

Fig. 2.7 - Variazione del contenuto di acqua, limiti liquido e plastico con la profondità (Gabr & Valero 1995)

2.5 - Permeabilità

2.5.1 - Definizione

Per le nuove discariche è obbligatorio installare opportunamente i teli di geosintetico impermeabili per l'isolamento idraulico dell'ammasso di rifiuti e le apparecchiature per il controllo e la raccolta del percolato.

Per il buon dimensionamento dei dispositivi di cui sopra, è necessaria una conoscenza appropriata delle caratteristiche idrauliche del rifiuto; infatti la permeabilità rappresenta un importante elemento progettuale per tenere in conto il potenziale impatto dovuto ad una incontrollata migrazione del percolato o eventuali problemi di stabilità (Manassero et al., 1996).

La permeabilità k dei rifiuti può essere definita come la velocità con cui i fluidi (in particolare i liquidi) della discarica attraversano il corpo dei rifiuti, e si misura in m/s.

In generale la permeabilità è tanto maggiore quanto maggiori sono le dimensioni dei pori tra gli elementi solidi.

Il coefficiente di permeabilità può essere calcolato con la relazione proposta da Tchobanoglous et al. (1993):

$$k = Cd^2 y/\mu = K y/\mu \quad (6.II)$$

dove:

k = Coefficiente di permeabilità;

C = Fattore di forma;

d = Misura media dei pori;

y = Peso specifico dell'acqua;

μ = Viscosità dinamica dell'acqua;

Cd^2 , definito permeabilità intrinseca (K), dipende da alcune proprietà della matrice solida quali la distribuzione dei pori, la porosità e la superficie specifica.

2.5.2 - Dati di letteratura

Da alcune ricerche condotte in discariche di RSU compattati risulta che la permeabilità intrinseca presenta valori tipici di 10^{-11} - 10^{-12} m² nella direzione verticale e 10^{-10} m² nella direzione orizzontale (Tchobanoglous et al., 1993).

Le prove di laboratorio più utilizzate per determinare la permeabilità sono:

- il permeametro a carico costante, mediante il quale si misura il volume d'acqua che attraversa il campione in un tempo t sotto l'azione di un carico idraulico costante;
- il permeametro a carico variabile, che misura la velocità di abbassamento del carico idraulico iniziale nel tempo.

Fonte	Peso di volume	Permeabilità	Metodo di determinazione
	(kN/m ³)	(m/s)	
Fungaroli et al. (1979)	1.1-4	$10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	Lisimetro
Koriatas et al. (1983)	8.6	$5 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-5}$	Prove di laboratorio
Oweis & Khera (86)	6.45	10^{-5}	Stima da dati in sito
Oweis et al. (1990)	6.45	$1 \cdot 10^{-5}$	Pompaggio
	9.4-14	$1.5 \cdot 10^{-6}$	
	6.3-9.4	$1.1 \cdot 10^{-5}$	Prove in sito
Landva & Clark (90)	10.1-14.4	$10^{-5} - 4 \cdot 10^{-4}$	Prove in sito
Gabr & Valero (1995)	-	$10^{-7} - 10^{-5}$	Prove di laboratorio
Blengino et al. (1996)	9-11	$3 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-6}$	Foro di sondaggio (30-40 m)
Manassero (1990)	8-10	$1.5 \cdot 10^{-5} - 2.6 \cdot 10^{-4}$	Pompaggio (15 – 20 m)
Beaven ,Powrie (95)	5-13	$10^{-7} - 10^{-4}$	Prove di laboratorio
Brandl (1990)	11-14	$2 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-4}$	Prove in sito
	13-16	$5 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-7}$	
Brandl (1994)	9-12	$2 \cdot 10^{-5} - 10^{-6}$	Prove di laboratorio
Brandl (1994)	9-12	$5 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-5}$	Prove di laboratorio
Brandl (1994)	13-17	$2 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$	Prove di laboratorio
Jessberger (1984)	RSU con rifiuti da demolizione. Prove in sito I	$10^{-8} - 10^{-3}$ $3 \cdot 10^{-8} - 10^{-5}$	Prima e dopo compattazione dinamica
Jessberger (1984)	RSU con rifiuti da demolizione. Prove in sito II	$4 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-3}$ $10^{-7} - 10^{-4}$	Prima compatt.dinamica Dopo compatt.dinamica

Tab. 5.II - Riepilogo dei valori della conduttività idraulica per i rifiuti urbani (modificata da Manassero e al. 1996)

Tali prove non sembrano tuttavia adeguate alle caratteristiche di eterogeneità dei rifiuti, sebbene con opportuni accorgimenti, quali la triturazione, i ricercatori abbiano ottenuto alcuni risultati, seppur limitati.

Dalla tabella 5.II, dove sono riportati i valori indicativi della conducibilità idraulica per diverse tipologie di rifiuto e secondo diversi metodi di misura, è possibile ricavare in prima analisi che il valore medio di permeabilità di un rifiuto è simile a quello di una sabbia grossa e ghiaietto lavati.

Ma è necessario tenere in conto che il valore della conducibilità idraulica è influenzata dal grado di compattazione e dall'età del rifiuto.

In generale k può differire notevolmente da rifiuto a rifiuto, ma un valore di 10^{-5} m/s sembrerebbe essere un buon valore di prima approssimazione.

Infine, anche se generalmente nelle analisi questo effetto viene trascurato, la permeabilità tende a diminuire con l'aumentare del peso di volume e quindi anche con l'aumentare della profondità; questo effetto è chiaramente comprensibile dall'andamento mostrato in figura 2.8 (Landva & Clark, 1990).

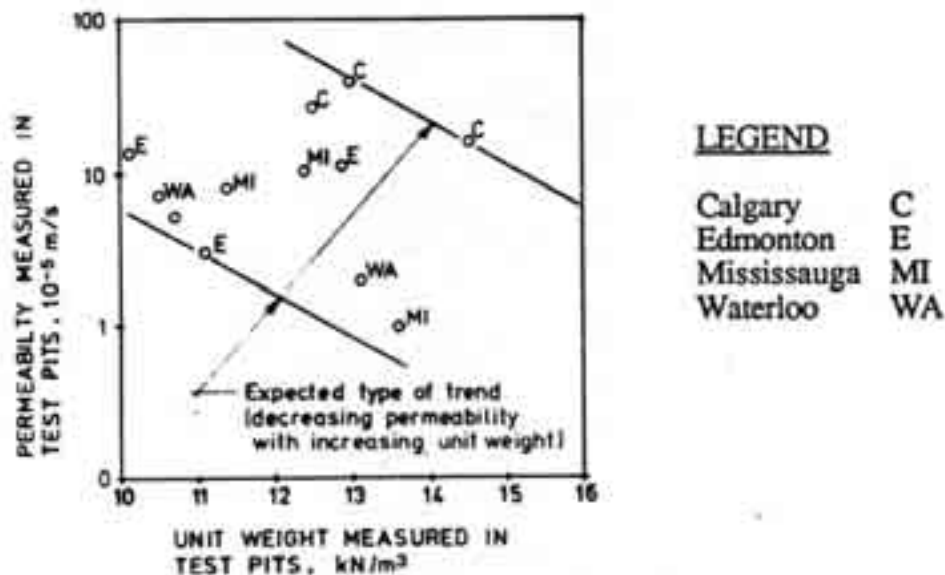


Fig. 2.8 - Permeabilità in funzione del peso dell'unità di volume (Landva & Clark, 1990)

2.6 - Resistenza al taglio

2.6.1 - Determinazione dei parametri di resistenza: limitazioni delle prove in sito e laboratorio

Come abbiamo già avuto modo di chiarire, sebbene con numerose limitazioni ed incertezze, i parametri di resistenza al taglio per i rifiuti possono essere stimati a partire dagli usuali mezzi d'indagine della Geotecnica e della Meccanica delle Terre. Ciò che è stato fatto fino ad ora è in corso di rielaborazione in quanto l'obiettivo da raggiungere è riuscire a sintetizzare un modello generale che possa tenere coerentemente conto della variazione di quelli che sono i numerosi fattori che competono e contraddistinguono il rifiuto da un normale suolo.

La caratterizzazione meccanica dei RSU con i metodi tradizionali della geotecnica trova un limite concettuale in alcune proprietà del materiale di seguito sintetizzate:

- ❑ deformabilità dello scheletro solido;
- ❑ non completa saturazione del materiale;
- ❑ elevata presenza di componente organica;
- ❑ accentuati fenomeni di consolidazione primaria e secondaria, nonché processi di decomposizione e mineralizzazione della sostanza organica che provocano variazioni nel tempo delle proprietà fisico-meccaniche del materiale (Grisolia et al., 1995).

Sebbene le suddette caratteristiche obblighino a tener conto di fattori generalmente non considerati nelle prove sui terreni, come le dimensioni dei costituenti, l'alta compressibilità, i metodi di messa a dimora in sito, cui è correlato il grado di compattazione in sito, e della struttura del rifiuto, i parametri geotecnici da ricavare per poter caratterizzare dal punto di vista della resistenza un rifiuto sono gli stessi della Meccanica delle Terre ovvero:

- ❑ l'angolo d'attrito ϕ ;
- ❑ la coesione c ;
- ❑ il modulo di elasticità E .

Tali parametri possono essere ricavati con le seguenti prove, modificate per tener conto delle caratteristiche specifiche dei RSU:

Prove in situ:

- SPT;

- CPT;
- scissometro;
- pressimetro;
- prova di carico su piastra;
- prove geofisiche.

Prove di laboratorio:

- prova di compressione triassiale;
- prova di taglio diretto;
- prova di compressione assiale non confinata;
- test in centrifuga su modello.

Back-Analysis: su campi sperimentali o su casi di discariche reali

Verifiche successive delle:

- deformazioni della massa dei rifiuti;
- rotture della massa dei rifiuti.

Le prove in sito, come già anticipato, sono molto comuni ma i loro risultati anche molto incerti.

Per quanto riguarda le prove di laboratorio, i RSU sono generalmente non saturi, pertanto, un'analisi in condizioni non drenate, con variazione di volume nulla e angolo d'attrito pari a zero, sembra essere poco realistica, mentre è più adeguata un'analisi in termini di tensioni totali (Sanchez-Alciturri et al., 1993).

Sono stati ottenuti risultati soddisfacenti e comunque abbastanza realistici con le prove di compressione triassiale sulle quali dedicheremo un po' di attenzione.

Tali analisi hanno infatti permesso di ricavare i valori numerici dei parametri di resistenza al taglio del rifiuto da utilizzare nel modello di calcolo dello studio oggetto di questo elaborato.

Volendo raggiungere una comprensione più profonda dei fenomeni legati alle interazioni tra resistenza al taglio, tensioni ed entità di deformazione correlate, i risultati delle prove condotte sui rifiuti solidi urbani, e quindi tutte le valutazioni del caso, non possono prescindere dai seguenti fattori:

- la composizione merceologica;
- il fattore tempo;
- l'aggiunta di terreno naturale.

Per quanto concerne l'influenza della composizione merceologica, si ritiene opportuno distinguere la fase solida in tre classi di materiali (Grisolia & Napoleoni, 1996):

- 1) materiali *inerti stabili*;
- 2) materiali *molto deformabili*;
- 3) materiali *organici biodegradabili*.

È presumibile che questi 3 tipi di materiali contribuiscano in modo diverso alla resistenza al taglio complessiva.

I materiali della prima classe hanno un comportamento meccanico che può essere assimilato a quello di un materiale granulare di dimensioni non fini.

La presenza di materiali molto deformabili, come la plastica e derivati, complica notevolmente il modello meccanico.

Tali materiali infatti sono:

- fortemente deformabili;
- possono incapsulare aria o altri fluidi. Ciò induce nella massa di rifiuti un comportamento non facilmente schematizzabile e comparabile, entro certi limiti, a quello di un materiale viscoso;
- tendono a modificare le proprietà meccaniche dei rifiuti al variare dei carichi applicati e del tempo;
- inducono un comportamento meccanico fortemente anisotropo.

La presenza di materiali organici, i cui processi rapidi di biodegradazione causano significative trasformazioni fisico-chimiche nei rifiuti, è correlata sempre ad una diminuzione dell'indice dei vuoti e quindi del volume totale dei rifiuti.

Il risultato di dette trasformazioni è la coesistenza di materiali poco consistenti con bassi valori della resistenza al taglio, di percolato e di biogas, quindi un sistema trifase che, come ben noto, è di difficile interpretazione. Inoltre non è possibile escludere la presenza di liquidi o gas in pressione, qualora i sistemi di drenaggio fossero disfunzionanti e quindi il modello concettuale si complica ulteriormente.

Le proprietà meccaniche dei RSU risultano essere fortemente influenzate anche dal fattore tempo, in ragione di due fenomeni principali (Jessberger & Kockel, 1994):

- si ha un fenomeno di consolidazione per effetto del carico dei rifiuti soprastanti che addensa il rifiuto e, in genere, migliora le sue caratteristiche meccaniche;

- la composizione dei rifiuti cambia con il tempo per effetto dei processi di biodegradazione della sostanza organica.

In letteratura le testimonianze di aumenti e diminuzioni della resistenza con l'età del rifiuto sono numerose, sia a livello di dati ricavati che a livello di opinioni ed interpretazioni. Da quanto sopra detto, infatti, il tempo può giocare sia a sfavore che a favore dell'aumento della resistenza al taglio, ma i risultati sono ancora poco rappresentativi e di conseguenza il fattore età non può essere considerato rappresentativo in termini di resistenza di un rifiuto.

2.6.2 - Dati di letteratura

Facendo riferimento ad esempio agli studi condotti tra gli anni 1991 e 1995 da Jessberger & Kockel pressol'Istituto di Meccanica delle Terre della Ruhr-University di Bochum tramite una serie di prove di compressione triassiale, è stata valutata la resistenza al taglio dei rifiuti solidi e la variabilità di questi al variare di alcuni parametri, tra cui anche l'età del rifiuto.

L'attrezzatura, le modalità di prova e le caratteristiche generali dei provini possono essere così brevemente descritte:

- L'attrezzatura di prova è costituita da una cella di compressione triassiale in grande scala che contiene provini di rifiuto prelevato in sito di altezza 60cm e diametro 30cm;
- la prova è stata di tipo Consolidata-Drenata;
- La consolidazione è isotropica;
- La velocità di deformazione assiale è stata assunta pari a 1%/min;
- E' stata effettuata la misurazione di σ_1 , σ_3 , ε_1 . Ad eccezione delle prime prove, è stato possibile misurare anche la deformazione volumetrica $\varepsilon_{v,v}$, che ha permesso di stimare anche il coefficiente di Poisson, definito come: $\nu = \Delta\varepsilon_r/\Delta\varepsilon_a$.

Le prime prove condotte da Jessberger (1991) sono state realizzate su provini di rifiuto non trattato di 3 e 7,5 anni con un peso di volume compreso tra 10 e 12 kN/m². Durante la prova non sono state misurate le variazioni di volume, ipotizzando che esso rimanga costante.

La Fig. 2.9 (a,b) illustra le curve sforzi-deformazioni sia per rifiuti di 3 anni che per rifiuti di 7.5 anni, entrambi non trattati.

Non avendo raggiunto la rottura nemmeno per deformazioni superiori al 20%, è stato utilizzato il *criterio della deformazione limite*, determinando i parametri di resistenza al taglio “fittizi” al variare della deformazione.

Inoltre dall'esame delle curve è possibile notare come il rifiuto tenda in un certo modo ad indurire con le deformazioni.

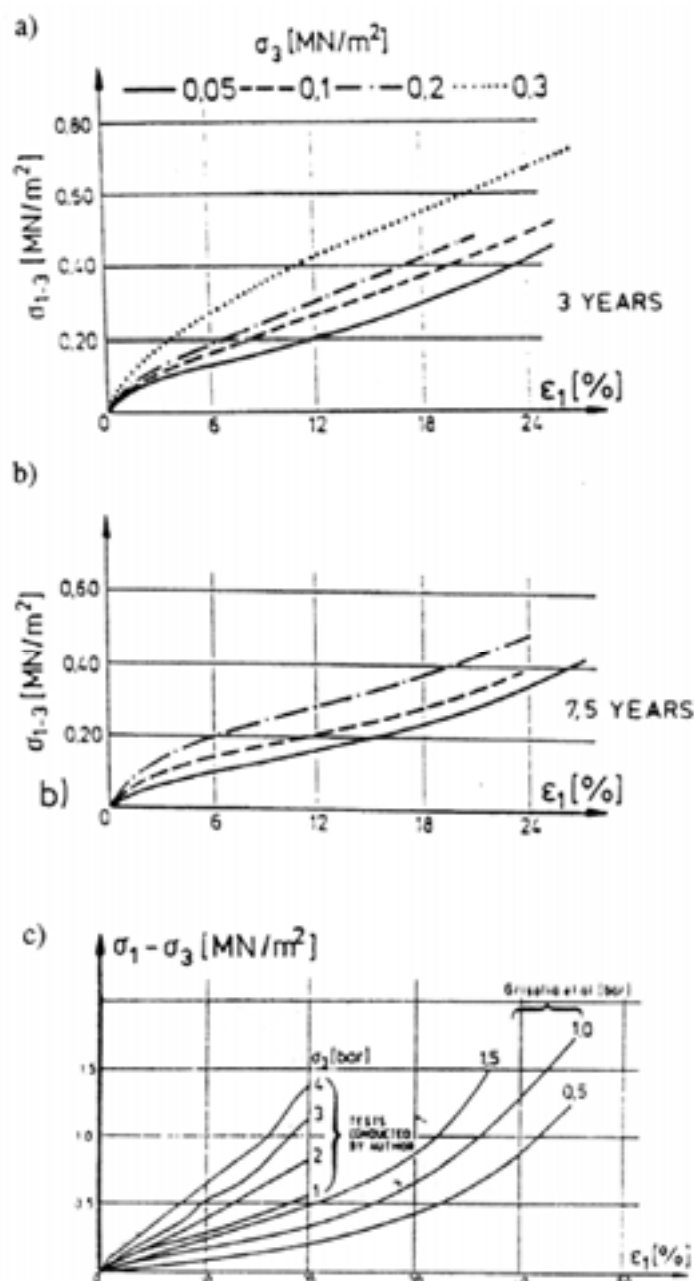
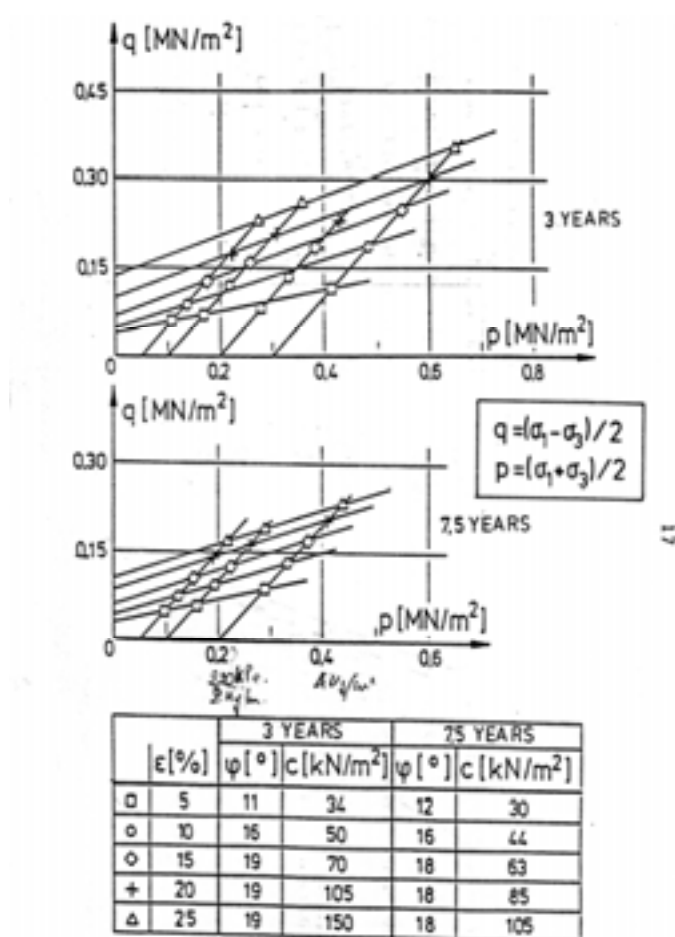


Fig. 2.9 - Relazioni sforzo-deformazioni di differenti tipi di RSU osservati da test triassiali, a, b) Jesseberger (1991), c) Jesseberger & Kockel (1993)

Fig. 2.10 - Parametri di resistenza al taglio per RSU di diversa età (Jessberger & Kockel, 1991).



La Fig. 2.10 illustra il percorso tensionale ed i parametri di resistenza ai vari livelli di deformazione.

Successivamente, gli stessi autori hanno eseguito prove triassiali su campioni di rifiuto trattato, con particolari caratteristiche (Jessberger & Kockel, 1991) quali:

- RSU “scelto”, realizzato separando gli elementi fibrosi che potrebbero conferire resistenza a trazione (plastica, tessili, ecc.);
- RSU “triturato”, fino ad ottenere una granulometria <15mm.

Le Fig. 2.11 e 2.12 mostrano, per quest'ultimi materiali, le curve sforzi-deformazioni, il percorso tensionale nel piano p-q e i valori dei parametri di resistenza al taglio “fittizi” per deformazioni fino al 20%.

In Fig. 2.13 è rappresentata la curva di variazione del volume in funzione della deformazione assiale.

Da tali risultati si possono trarre interessanti conclusioni:

- il rifiuto triturato possiede angoli d'attrito fittizi più bassi del rifiuto non trattato;
- la coesione del rifiuto scelto è più bassa (rimane costante in un campo di 18-26 kN/mq) perché tale materiale è stato privato delle componenti fibrose. La coesione del rifiuto triturato sale progressivamente fino a 80 kN/mq alle deformazioni più elevate;
- in entrambi i casi, l'angolo d'attrito aumenta all'aumentare della deformazione, portandosi a 35° - 45° per deformazioni del 20%;

- il gradiente decrescente delle curve ε_1 - ε_v (Fig. 2.13) indica un incremento della deformazione radiale ε_r all'aumentare della deformazione assiale.

Ciò può essere spiegato nel modo seguente: inizialmente, l'effettivo contatto superficiale tra le particelle può essere considerato piccolo. Nella prima fase della prova la deformazione orizzontale è circa nulla, mentre ha luogo una elevata compressione assiale con riduzione degli spazi porosi. In altre parole, si ipotizza che la superficie di contatto tra le particelle aumenta e che la pressione agente su queste superfici non varia significativamente. All'aumentare della deformazione assiale comincia ad aumentare anche la pressione agente sulle superfici di contatto mantenendosi, però, ancora lontano dalla condizione di rottura anche per deformazioni $>20\%$;

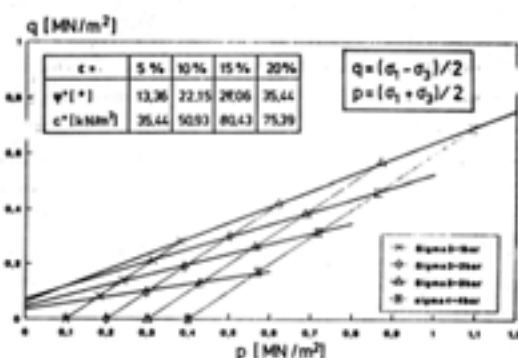
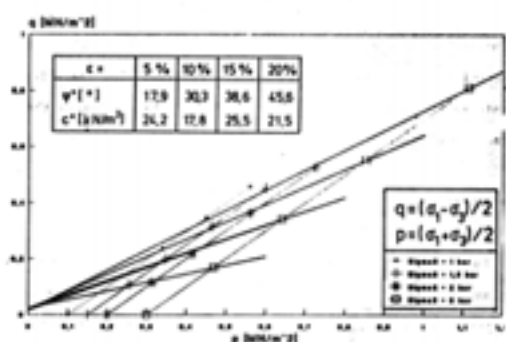
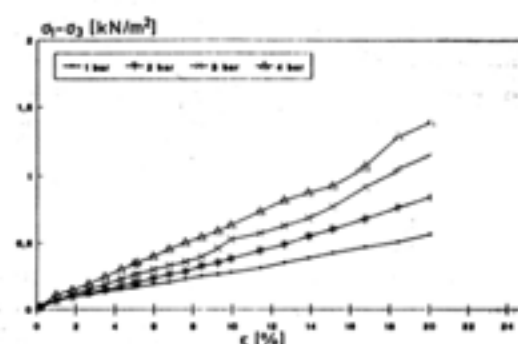
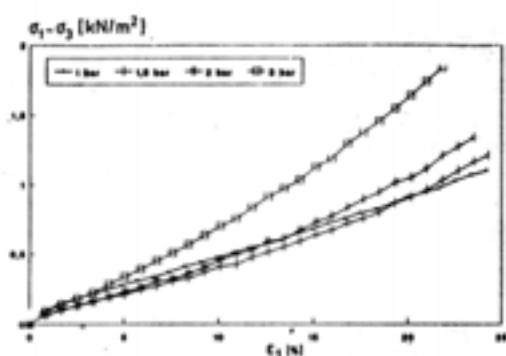


Fig.2.11: Curve sforzi – deformazioni (Jessberger & Kockel, 1991).

Fig. 2.12: Curve sforzi – deformazioni e percorso tensionale in p-q (Jessberger & Kockel, 1991).

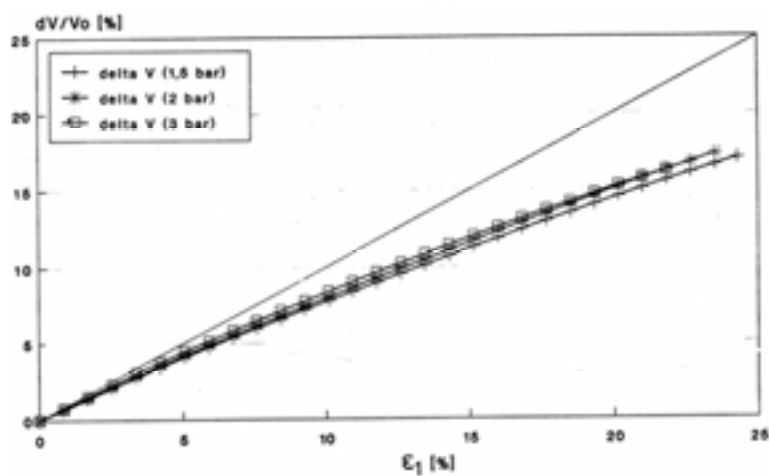


Fig. 2.13 - Deformazione volumetrica – deformazione assiale (Jessberger & Kockel, 1991).

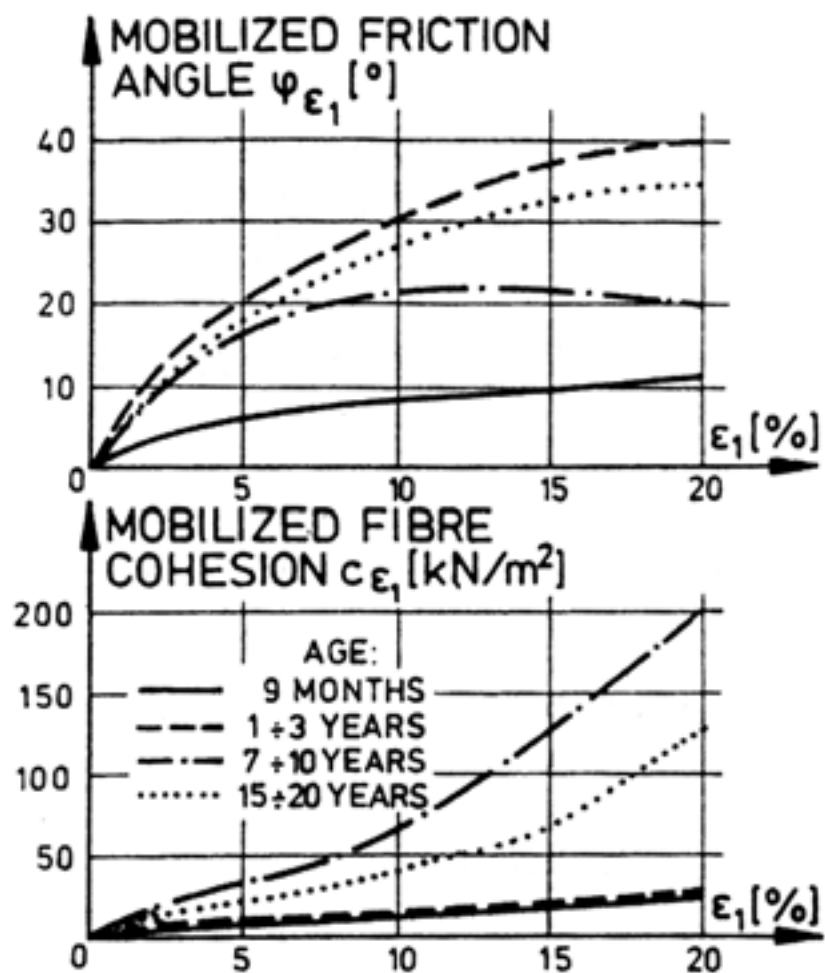


Fig. 2.14 - Esempio di dipendenza tra livello di deformazione e parametri di resistenza al taglio ottenuto da prove triassiali su campioni di grande diametro (Kockel, 1995)

L'andamento crescente della coesione e dell'angolo di attrito mobilitati con la deformazione assiale è chiaramente visibile in figura 2.14.

Sempre da figura 2.14 è possibile desumere come l'età non sia un elemento distintivo per un rifiuto, dato che non è stato possibile verificare una riduzione della resistenza con l'età. Piuttosto è possibile affermare che i parametri di resistenza al taglio e la loro mobilitazione dipende dal tipo e dalla composizione del rifiuto.

Nello specifico, il tipo di dipendenza della coesione e dell'angolo di attrito dalla deformazione presentate in figura 2.14 richiama quello che viene comunemente definito il comportamento delle terre rinforzate. Questo perchè il rifiuto è costituito, oltre che da materiale sciolto di tipo granulare, anche da elementi di forma irregolare ed allungata di tipo fibroso, come la plastica, il legno, la carta, che contribuiscono a creare una matrice di rinforzo che influenza decisamente il comportamento generale del rifiuto, soprattutto in termini di coesione.

Un esempio di schematizzazione del rifiuto è presentato in figura 2.15.

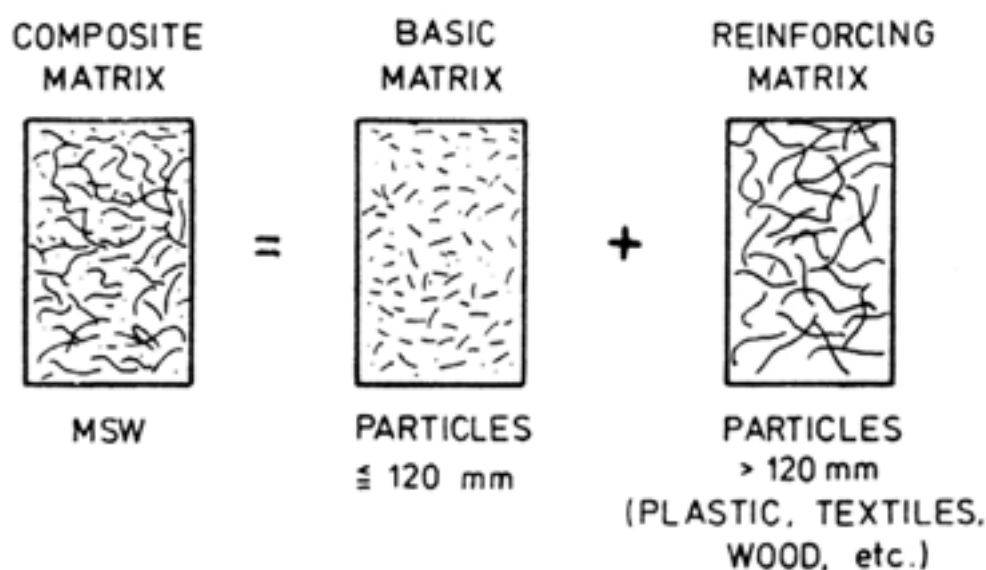


Fig. 2.15 - Modellizzazione dei RSU (Kockel, 1995)

Quando il volume di rifiuto è abbastanza grande da poter essere considerato rappresentativo, la sua composizione può essere assunta di tipo omogeneo, poichè in questo caso gli elementi di rinforzo si distribuiscono in maniera casuale ma uniforme su tutto lo spazio, conferendo al materiale una isotropicità di comportamento in termini di resistenza al taglio.

Il grafici di Kockel (1995) riportati in fig. 2.14, sono stati utilizzati per interpolare i risultati di recenti prove di laboratorio condotte su quattro categorie di rifiuto: Bioessiccato sottovaglio e non vagliato e Biostabilizzato fresco e maturo (Simone De Mei, 2001).

Le foto dei campioni sono di seguito riportate.



Fig.2.16 - campione di materiale biostabilizzato fresco per prova triassiale.



Fig.2.17 - campione di materiale biostabilizzato maturo per prova triassiale.



Fig. 2.18: campione di materiale bioessiccato non vagliato fine processo per prova triassiale



Fig. 2.19: campione di materiale bioessiccato sottovaglio fine processo per prova triassiale.

I risultati delle prove triassiali condotte da De Mei (2001) permetteranno di ricavare i parametri meccanici da inserire nel modello ad elementi finiti, come verrà meglio specificato.

2.7 - Proprietà dinamiche

Nel seguente paragrafo verranno sommariamente descritte le proprietà dinamiche dei rifiuti, riferendosi in via più generale a quanto accade per i terreni, ed i possibili metodi per la loro misura.

La determinazione dei parametri dinamici per i rifiuti, riferendosi soprattutto a prove in sito SASW, che si sono dimostrate un potente mezzo di indagine, è riportata invece più in dettaglio nel capitolo 3.

2.7.1 Parametri dinamici

I principali parametri utilizzati per descrivere le proprietà dinamiche di un terreno naturale sono:

- G = modulo di taglio;
- E = modulo elastico di Young;
- ν = coefficiente di Poisson.

Tali parametri vengono utilizzati per le analisi di stabilità e per la valutazione delle deformazioni di un sito sottoposto a carichi ciclici.

Le correlazioni che legano tra loro tali parametri sono (Sharma et al., 1990):

$$G = V_s^2 \rho \quad (7.II)$$

dove:

G = modulo di taglio;

V_s = velocità di propagazione delle onde elastiche di taglio;

ρ = densità = γ/g .

$$E = 2V_s^2 \rho (1+\nu) \quad (8.II)$$

dove:

E = modulo elastico di Young;

ν = coefficiente di Poisson.

$$E = V_c^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (9.II)$$

dove:

V_c = la velocità di propagazione delle onde elastiche di compressione.

Combinando le formule 8.II e 9.II, si può esprimere il coefficiente di Poisson come:

$$\nu = \frac{v_c^2 - 2v_s^2}{2(v_c^2 - v_s^2)} \quad (10.II)$$

La definizione delle proprietà dinamiche sopra esposte si riferisce a piccolissime deformazioni di taglio $\gamma = 10^{-6}$ - 10^{-5} in cui il comportamento del terreno può essere rappresentato da un modello elastico lineare.

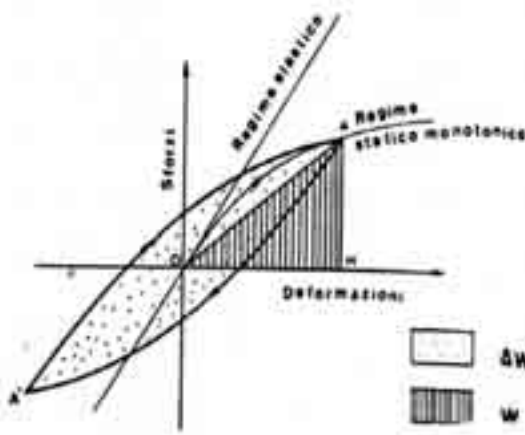


Fig.2.20: Curva sforzi-deformazioni (Ottaviani, 1993)

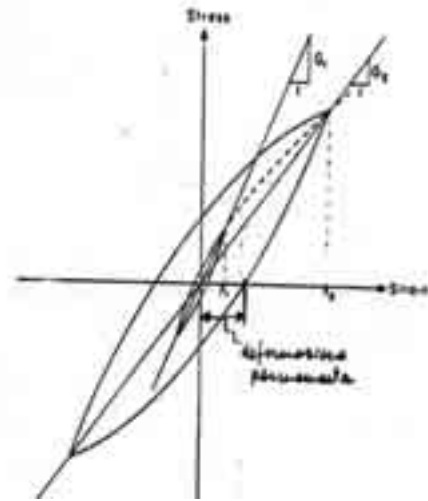


Fig.2.21: Curva sforzi-deformazioni (Ottaviani, 1993)

Per deformazioni maggiori, invece, il materiale abbandona tale comportamento (Fig.2.20 e 21) (Ottaviani, 1993), in particolare:

- per deformazioni di taglio $\gamma = 10^{-5}$ - 10^{-3} , il materiale assume un comportamento lineare equivalente, in cui G diminuisce al crescere della deformazione di taglio, e può essere determinato come modulo di taglio equivalente:

$$G = \tau_a / \gamma_a = \text{sforzo di taglio/deformazione di taglio.}$$

Per ogni ciclo di carico, inoltre, una parte dell'energia conferita al terreno viene dissipata (curva τ - γ di tipo isteretico). L'entità di tale dissipazione viene quantificata dal rapporto di smorzamento viscoso o damping (D):

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{G \gamma_a} \quad (11.II)$$

dove con ΔW si intende l'area racchiusa all'interno del ciclo di carico simmetrico, ossia l'energia dissipata nel ciclo di carico;

- per deformazioni di taglio $>10^{-3}$, il materiale assume un comportamento non lineare. G e D non dipendono più solo dalla deformazione di taglio γ ma anche dal n° di cicli, dalla frequenza di oscillazione, dalla disuniformità dei cicli di carico. Le equazioni che cercano di rappresentare tale comportamento sono quindi assai complesse.

2.7.2 Metodi per la determinazione dei parametri dinamici

I parametri dinamici possono essere determinati sia con prove in sito, che in laboratorio. Queste ultime sono sconsigliate in presenza di materiali disomogenei e/o anisotropi: per la caratterizzazione dinamica dei rifiuti è, pertanto, necessario ricorrere a prove in sito (Sharma et al., 1990).

I metodi in sito più frequentemente usati sono:

- *Metodo Cross-Hole*: misura le velocità di propagazione delle onde elastiche di compressione e di taglio generate da una sorgente situata in un foro ad una quota nota.

Le velocità di propagazione delle onde vengono determinate misurando il tempo impiegato per essere rilevate da una serie di geofoni posizionati lungo la verticale di un secondo foro. La prova viene ripetuta posizionando la sorgente a diverse quote;

- *Metodo Up- o Down-Hole*: utilizzano un solo foro ed un solo geofono.

Anche tali metodi misurano le velocità di propagazione delle onde elastiche di compressione e di taglio.

Nel metodo Up-Hole, il geofono è in superficie, mentre la sorgente viene posta a varie quote lungo la verticale del foro.

Nel metodo Down-Hole la sorgente è, invece, in superficie, mentre il geofono è posto a varie quote lungo la verticale del foro.

Le velocità di propagazione delle onde vengono determinate misurando il tempo impiegato per essere rilevate dal geofono;

- *Metodo a Rifrazione*: misura le velocità di propagazione delle onde elastiche di compressione e di taglio generate da una sorgente situata in superficie interpretando le rilevazioni di una serie di geofoni allineati tra di loro e con la sorgente stessa che segnalano l'arrivo delle onde dopo che queste hanno percorso una traiettoria sotterranea essendo più volte rifratte ad ogni interfaccia tra due diversi strati;

- *Metodo SASW*: Kavazanjian et al. (1994) hanno ideato un nuovo metodo che consente di determinare i parametri dinamici dei rifiuti con la misura delle onde superficiali

evitando di realizzare fori di sondaggio nei rifiuti che possono provocare danni ambientali. Tale metodo, denominato SASW (Analisi spettrale delle onde superficiali), consiste nel generare in superficie onde Rayleigh in un certo campo di frequenze e nel registrare le accelerazioni in alcuni punti della superficie a distanza nota dalla sorgente. La velocità di propagazione delle onde di taglio viene determinata da tali dati in funzione della profondità.

2.7.3 Dati di letteratura

Nella discarica di Richmond, in California, è stato applicato il metodo Down-Hole per la determinazione delle proprietà dinamiche dei rifiuti e dei terreni sottostanti (Sharma et al., 1990).

Sono stati realizzati 3 fori di prova. Uno di questi (GT3) ha interessato interamente il corpo dei rifiuti per una profondità di 15.3 m.

Il geofono ha effettuato le registrazioni ogni 3.1 m di profondità per tutta la lunghezza del foro.

I profili di velocità, peraltro di ottima qualità, sono riportati in Fig. 2.22.

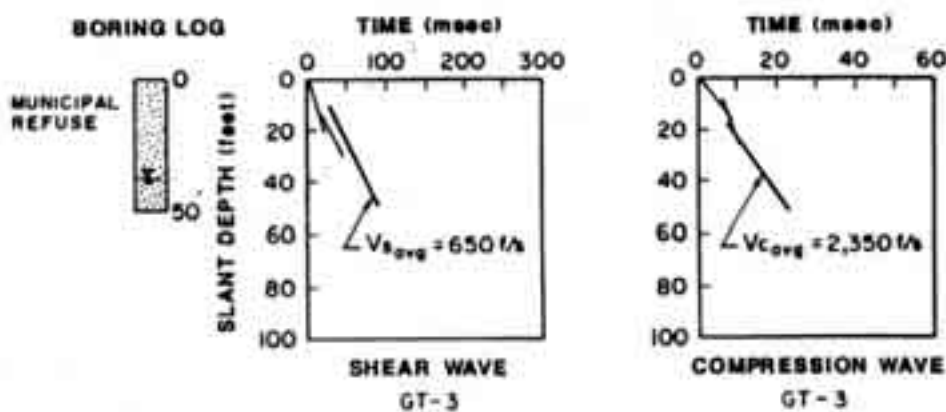


Fig. 2.22: Profili di velocità delle onde di taglio (Sharma et al., 1990)

Stimato il peso di volume in 737 kg/m^3 , si sono determinati tutti i parametri dinamici dei rifiuti utilizzando le relazioni (7.II)÷(11.II):

- $V_s = 198.3 \text{ m/s}$;

- $V_c = 716.8 \text{ m/s}$;
- $G = 28.9 \text{ Mpa}$;
- $E = 84.4 \text{ Mpa}$;
- $\nu = 0.49$.

I risultati di tali prove sono avvalorati dal fatto che la caratterizzazione dei terreni sottostanti ai rifiuti con lo stesso metodo (e con la possibilità di confronto con metodi più sicuri) è stata ottima.

Kavazanjian et al. (1994) sostengono che per altezze del cumulo di rifiuti comprese tra 30 e 70 m può essere utilizzata una velocità variabile tra 75 e 225 m/s.

Gli stessi Autori affermano che, per vecchie discariche a profondità elevate, possono solitamente essere adottati valori più alti della velocità delle onde di taglio per effetto dell'incremento di rigidità, causato dall'invecchiamento dei rifiuti e dall'aumentare della profondità.

Le deformazioni di taglio possono, tuttavia, uscire dal campo lineare elastico. In tal caso, i valori di G e D sono, comunque, ottenuti a partire dalla deformazione di taglio γ .

I valori di G e D dei rifiuti dipendono da molti fattori, tra cui anche il grado di decomposizione del materiale.

La difficoltà di determinare tali caratteristiche ha spinto alcuni ricercatori ad utilizzare, nella valutazione di G e D , un campo di valori compreso tra la torba e l'argilla - materiali di basso peso di volume, alto indice dei vuoti e alta compressibilità, alla stregua dei RSU - assumendo, relativamente al comportamento in condizioni dinamiche, prevalentemente coesiva la natura dei rifiuti.

Seed & Idriss, nel 1970, tramite prove di laboratorio statiche e dinamiche, ricavarono per la torba una velocità delle onde di taglio compresa tra 21.6 e 43.3 m/s.

Più recentemente, l'Earth Technology ha condotto prove geofisiche down-hole e cross-hole fornendo un valore medio della velocità delle onde di taglio nei rifiuti pari a 274 m/s.

Anche l'EMCON ha eseguito, nelle discariche di Richmond e di Redwood, le medesime prove, valutando un valore medio della velocità delle onde di taglio rispettivamente di 213 m/s e di 91 m/s.

I valori ricavati con tali prove geofisiche sono notevolmente più elevati di quelli trovati con prove su torba o prove di carico statiche.

A.J. Brennan, N.I. Thusyanthan & S.P.G. Madabhushi (2004) hanno condotto una recente analisi per la valutazione del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento viscoso sulla base dei risultati di prove centrifughe dinamiche rispettivamente condotte su sabbia asciutta, sabbia satura, argilla satura e un rifiuto ricostruito a partire da un'ideale miscelazione di sabbia, argilla e limo, stabilita come 1:1:1.

Riassumendo, dalle prove emerge come il modulo di riduzione espresso come G/G_{max} in funzione delle deformazioni di taglio approssima bene i risultati ottenuti da Augello (1998), che saranno riportati e descritti meglio nel prossimo capitolo.

Anche per il rapporto di smorzamento $D(\%)$ il discorso è analogo e quindi gli autori hanno potuto desumere che i valori ottenuti in un qualche modo potevano essere considerati rappresentativi per i rifiuti in generale.

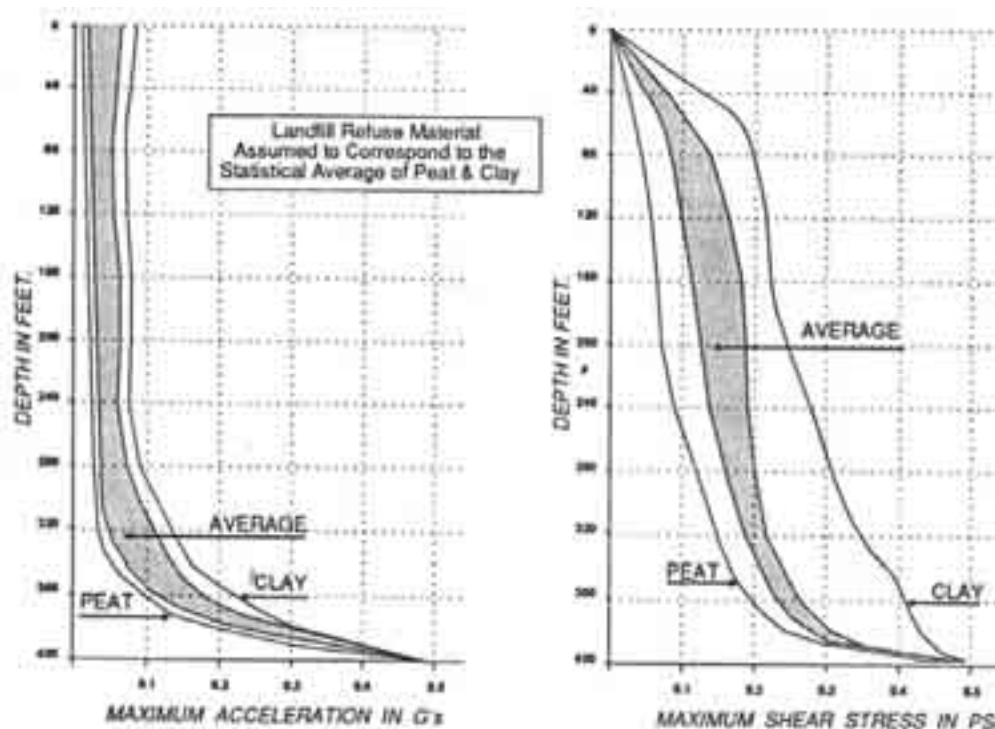


Fig. 2.23: Risultati di un'analisi Shake (Kavazanjian et al., 1995)

In ultima analisi, i grafici di Fig. 2.23, elaborati dall'analisi SHAKE, mettono in evidenza l'elevata capacità di assorbimento dell'energia da parte dei rifiuti, che sembra essere confermata dall'eccellente comportamento delle discariche quando vengono sottoposte a carichi dinamici anche elevati.

La massima accelerazione nella roccia di base si attenua molto attraversando il corpo dei rifiuti, passando da 0.5 g alla base a 0.06 g in superficie.

Tale studio conferma che i rifiuti sono caratterizzati da un elevato valore di D e da bassi valori di G e del peso di volume.

Il periodo naturale dei rifiuti è, pertanto, elevato.

L'analisi SHAKE lo ha stimato variabile tra 12 e 16 secondi.

Conseguentemente, i rifiuti tenderanno ad amplificare le frequenze < 1 Hz.

Capitolo 3 - Valutazione delle Proprietà dinamiche dei rifiuti urbani

3.1 - Introduzione

Negli ultimi anni la presenza di discariche di rifiuti solidi urbani nelle vicinanze di aree urbane intensamente popolate ha sollevato l'attenzione delle autorità competenti relativamente al rischio ambientale associato alla rottura del corpo della discarica a seguito di attività di tipo sismico.

A differenza di quanto avviene negli Stati Uniti dove le norme federali richiedono specificatamente che le discariche di RSU collocate in aree cui è associato un rischio sismico siano progettate per poter resistere ai terremoti, in Italia questi aspetti non sono stati ancora adeguatamente studiati in quanto al territorio è associato per la maggior parte un rischio sismico basso da non dover pretendere approfondimenti in tal senso.

Comunque, a causa della mancanza di casi storici ben documentati e del relativamente recente interesse per questo tipo di problematiche, le procedure analitiche per la valutazione del comportamento dei rifiuti in condizioni sismiche non sono state ad oggi ben calibrate.

Tipicamente, se l'intenzione è quella di focalizzare il problema, è possibile far riferimento alle procedure che sono state sviluppate ed ottimizzate in base agli studi condotti sui rilevati stradali, nell'ambito della stabilità in condizioni sismiche.

Per molti anni, infatti, l'attenzione è stata focalizzata sullo sviluppo di procedure atte ad analizzare e valutare le risposte dei rilevati stradali a eventi di tipo sismico (Newmark, 1965; Seed e Martin, 1966, Makdisi e Seed, 1978; Marcuson et al., 1992).

Tali procedure, con le dovute accortezze, possono essere riadattate allo studio delle discariche urbane, ma la più grande difficoltà da affrontare è la sostanziale differenza di comportamento meccanico tra i terreni utilizzati per la realizzazione dei rilevati ed i rifiuti in generale.

Le procedure per la valutazione della stabilità in condizioni sismiche dei rilevati sono state impostate principalmente sulla base di analisi pseudostatiche di stabilità, oppure sulla base della valutazione delle deformazioni permanenti indotte nel corpo del rilevato

stesso, a seguito di una stima degli incrementi di carico a partire dall'analisi della propagazione delle onde prodotte dall'evento sismico.

Sono state condotte anche analisi dinamiche non lineari con il metodo ad elementi finiti; alcuni di questi studi sono stati calibrati attraverso il confronto con le misure in situ o con i risultati ottenuti da precedenti elaborazioni. E' stato appurato che queste analisi possono dare delle giuste indicazioni circa il comportamento dei rilevati in condizioni sismiche, ma questo non implica in generale che le basi teoriche di questi metodi siano intrinsecamente corrette.

Parallelamente, negli ultimi anni è emersa la necessità di studiare anche il comportamento dei rifiuti urbani in condizioni dinamiche.

In particolare il "Code of Federal Regulations - USA" richiede espressamente, come già precedentemente anticipato, che le nuove discariche urbane e le espansioni laterali di discariche già esistenti in zone cui è associato un certo grado di rischio sismico, siano progettate per poter resistere alle sollecitazioni dinamiche indotte dai terremoti; questa necessità è palesemente connessa al fatto che più di metà dello stato è interessato da un'intensa attività di tipo sismico e che molte delle nuove discariche sono appunto collocate in aree sismiche.



Fig. 3.1 - Individuazione delle zone ad alto rischio sismico (adattato da Algermissen et al 1991)

In figura 3.1 le aree puntinate rappresentano i territori negli Stati Uniti interessati da un'intensa attività di tipo sismico; è palese quindi che, essendo le aree costiere quelle più densamente popolate, un grande numero di discariche è attualmente collocato in zone ad elevato rischio sismico.

Il tipo di risposta dei rifiuti urbani allocati in discarica a sollecitazioni dinamiche induce inevitabilmente a considerare la correlazione causa-effetti in termini di integrità dell'opera; questo perchè i carichi dinamici possono indurre nel corpo della discarica movimenti di intensità tale da compromettere l'integrità sia dell'impermeabilizzazione di fondo, sia del sistema di copertura superficiale, sia delle fondazioni e sia delle varie interfacce.

Qualora il sistema di impermeabilizzazione venisse danneggiato, è inevitabile che la conseguente perdita di percolato possa avere ripercussioni anche molto gravi in termini di contaminazione del sottosuolo, e quindi delle sottostanti falde freatiche.

Inoltre, i sistemi di raccolta del percolato e dei gas prodotti dalla biodegradazione dei rifiuti possono venire seriamente danneggiati, rendendo necessario un esborso economico talora non indifferente per il loro ripristino.

Purtroppo, come già accennato, ad oggi non è possibile far riferimento a casi storici documentati per poter eventualmente fare delle previsioni sugli effetti di un evento sismico di data intensità in termini di integrità dei componenti di una discarica.

Rimane inoltre di difficilissima valutazione il comportamento meccanico dei rifiuti in condizioni dinamiche, date le ulteriori già assodate difficoltà nell'individuazione di un loro comportamento unico, in termini di curva sforzi deformazioni, persino in condizioni statiche.

Attraverso gli studi di validi professionisti con vasta esperienza nel settore che hanno permesso lo sviluppo di procedure per la valutazione della stabilità dei rilevati in condizioni dinamiche, è stato possibile successivamente riadattare opportunamente le analisi alle discariche di rifiuti urbani.

Altro aspetto da ricordare è che gli studi condotti fino ad oggi sono stati limitati anche dal fatto che i materiali di cui sono costituiti i sistemi di copertura superficiale ed impermeabilizzazione di fondo (polietilene ad alta densità, strati di argilla compattata, geosintetici etc.) possono essere molteplici, e che la scelta del tipo di comportamento

meccanico da associargli nel modello numerico, può portare a risultati talora molto divergenti.

Inoltre, non bisogna sottovalutare l'influenza della eterogeneità dei rifiuti allocati in discarica e la difficoltà nella scelta, e quindi nell'assegnazione, delle proprietà fisico-meccaniche che cambiano generalmente nel tempo.

Anche le modalità di crescita ed espansione delle discariche, la qualità della costipazione dei rifiuti etc. influenzano in maniera considerevole il tipo di comportamento finale dei rifiuti.

E' evidente un forte contraddizione: nonostante l'importanza che oggi riveste la valutazione del comportamento delle discariche durante un evento sismico, sono disponibili informazioni assolutamente inadeguate o comunque parziali sulle proprietà meccaniche dei rifiuti in condizioni dinamiche associate a deformazioni contenute (ad esempio il modulo tangente iniziale G_{max} oppure il fattore di smorzamento isteretico indicato come "damping" D_s).

Nei prossimi paragrafi vedremo di fornire le informazioni che è stato possibile reperire sulle proprietà dinamiche dei rifiuti, e sugli studi che sono stati condotti per la valutazione della velocità trasversale e nel fattore di smorzamento D_s associabili ai rifiuti urbani.

Tali parametri costituiranno il punto di partenza dell'analisi oggetto di questo studio, finalizzata allo studio del comportamento di una discarica durante un evento sismico di prefissata intensità.

Si precisa che quanto verrà successivamente riportato, relativamente la caratterizzazione dei rifiuti urbani in condizioni dinamiche, dovrà essere preso in considerazione con un occhio critico in quanto tali risultati costituiscono l'oggetto di studi solo parziali.

Per la scelta dei testi di riferimento più attendibili e per alcuni consigli generali che sono stati utili al fine di una corretta scelta dei parametri di input del modello di calcolo, di cui successivamente verranno riportati i risultati, è stato possibile far riferimento ai testi suggeriti da Rathie (E. M. Rathie, A.J. Augello, E. J. Kavazanjian, 2005), la quale sta conducendo un progetto per la valutazione delle proprietà dinamiche dei rifiuti solidi urbani in laboratorio. Gli studi fino ad oggi condotti non hanno ancora prodotto i risultati definitivi.

Per quanto riguarda i parametri cui fare riferimento nell'ambito di un'analisi dinamica, verranno di seguito riportate delle indicazioni utili per individuare i campi di variazione della velocità delle onde trasversali V_s , del modulo di taglio G_{max} e del modulo di riduzione, del fattore di smorzamento isteretico $D(\%)$.

Tali parametri sono stati ricavati sia tramite prove di laboratorio sia tramite prove geofisiche in sito.

Di seguito verranno chiarite nel dettaglio le modalità con cui sono stati ottenuti i risultati.

3.2 - Gli studi condotti

Nello specifico verranno descritti gli studi condotti da diversi autori per la valutazione del comportamento dinamico dei rifiuti, e successivamente ne verranno riportati i risultati.

3.2.1 - N. Matasovic e E. Kavazanjian Jr. (1998)

In particolare N. Matasovic e E. Kavazanjian Jr. (1998) hanno condotto uno studio in cui prove in sito ed in laboratorio sono state combinate con una back analisi, tramite l'elaborazione dei dati ricavati dalla campagna di monitoraggio sismico, per la caratterizzazione del comportamento meccanico dei rifiuti solidi, contraddistinti come "OII" (Operating Industries, Inc.), assoggettati ad un evento sismico di notevole intensità. Il motivo per il quale è stato possibile effettuare uno studio supportato da una notevole quantità di dati numerici è facilmente spiegabile.

Nel Settembre 1988, a seguito di un terremoto di forte intensità chiamato "Whittier-Narrows", sono stati sollevati alcuni dubbi relativamente alla stabilità della discarica di Montebello nelle vicinanze di Los Angeles (Siegel et al. 1990). Questo fatto allertò l'EPA, data la sua vicinanza all'autostrada indicata come "Pomona Freeway" (vedi figura 3.2) ed ai centri residenziali.

Al fine di associare uno specifico grado di rischio alla discarica di rifiuti OII in oggetto, e quindi per poter provvedere alla sua messa in sicurezza, l'EPA ha provveduto all'installazione dell'idonea attrezzatura di monitoraggio, costituita da accelerometri a tre componenti sia sul letto che sulla sommità della discarica, da inclinometri e caposaldi per il controllo delle deformazioni.

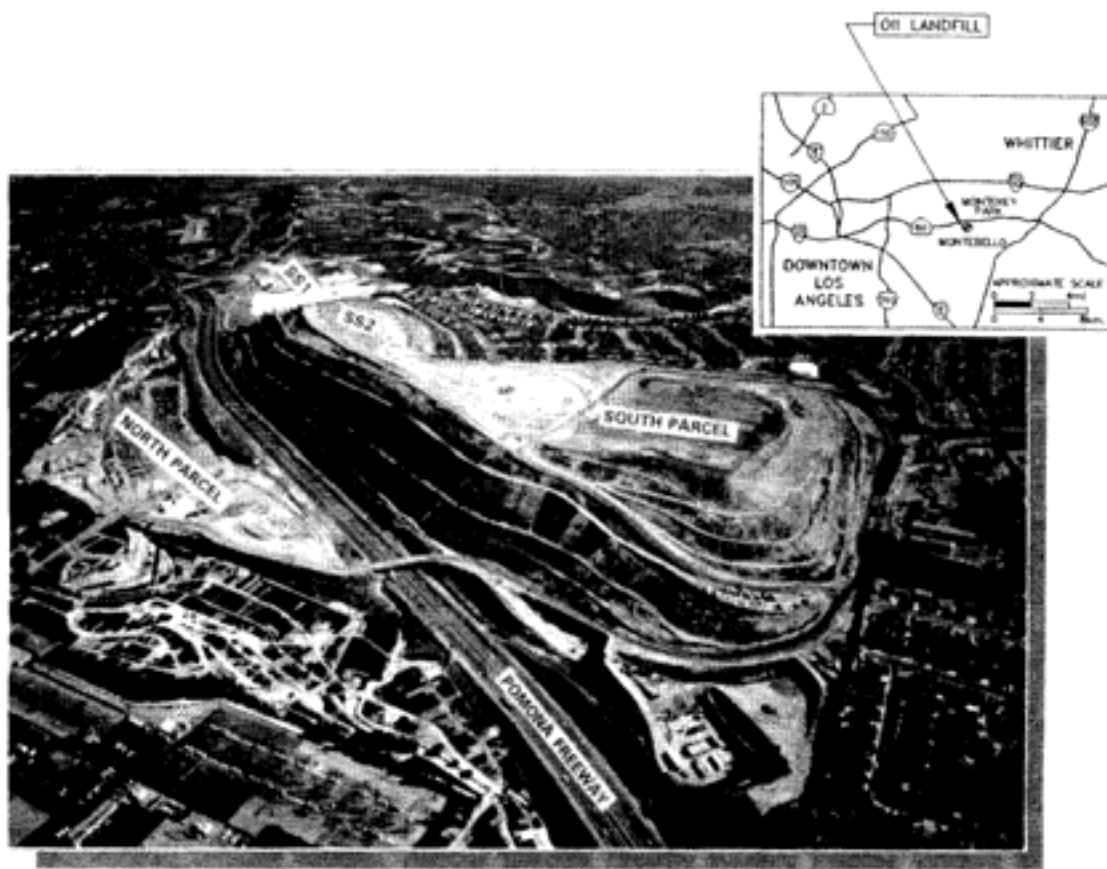


Fig. 3.2 - veduta aerea della discarica

Parallelamente all'allocazione della strumentazione di monitoraggio, dopo il 1985 sono state condotte numerose caratterizzazioni on site e numerosi studi analitici sui rifiuti OII. Questi studi, che inizialmente sono stati condotti direttamente dall'EPA, successivamente sono passati nelle mani di altri enti, ma sempre sotto la supervisione dell'EPA stessa.

Tali studi continuarono a focalizzarsi sulla valutazione della risposta sismica della discarica in termini di stabilità, inclusa la valutazione delle proprietà dinamiche del rifiuto, grazie ad un esaustivo programma di prove in laboratorio specificatamente tarate per fornire risultati coerenti da immettere quali input dei modelli di analisi numerica opportunamente scelti per simulare il comportamento delle discariche sia in condizioni statiche che in presenza di carichi ciclici (GeoSyntec 1996b, 1996c).

Per individuare la localizzazione degli strumenti di misura, è possibile far riferimento a figura 3.2 e 3.3. Gli accelerometri sono indicati dalla sigla SS1 e SS2 e sono posizionati rispettivamente sulla base e sulla sommità del corpo di discarica.

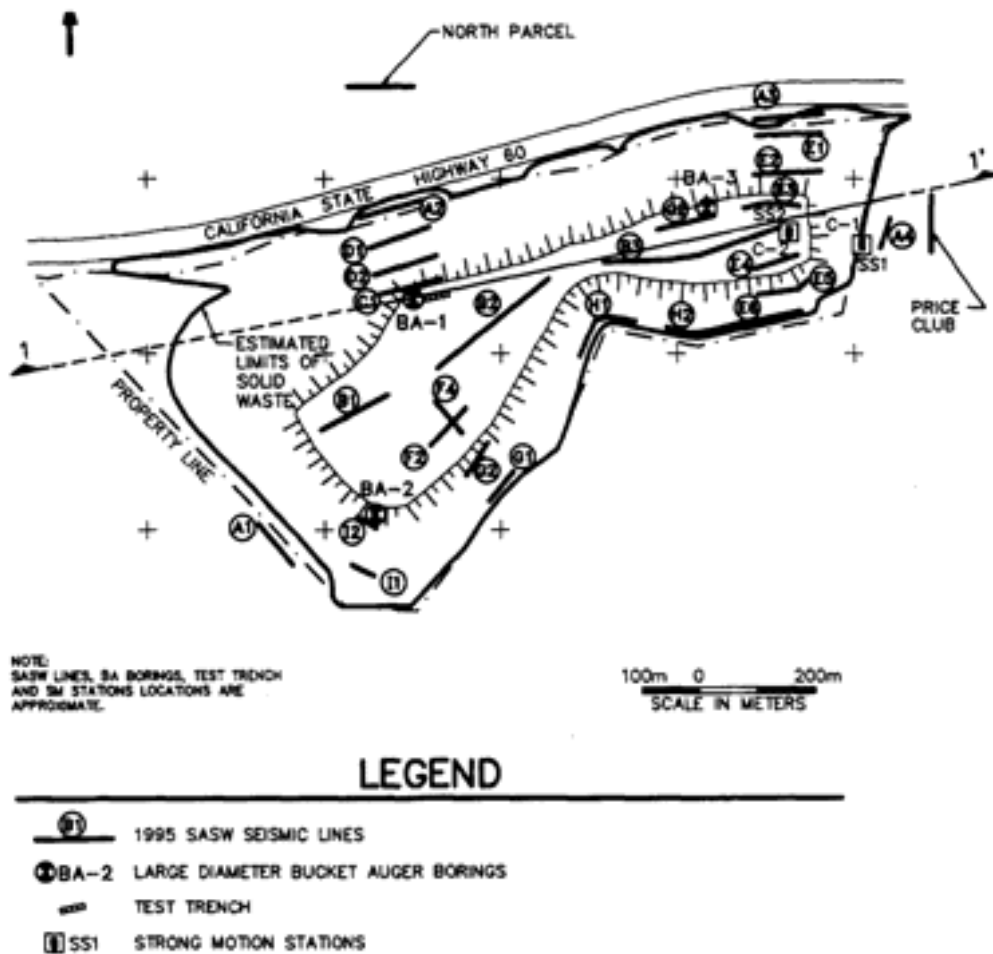


Fig. 3.3 - Pianta della discarica di Montebello

Il fatto che nel solo mese di Aprile 1994 tali strumenti abbiano registrato informazioni su ben 34 terremoti e successive scosse di assestamento, può dare un'indicazione di massima sulla quantità di informazioni che è stato possibile elaborare.

Avvalendosi dei risultati ottenuti dagli studi condotti da Hushmand et al (1990) basati sul confronto tra lo spettro di ampiezza di Fourier relativo alla base e alla sommità del corpo della discarica, Kavazanjian e Metasovic hanno condotto un'analisi equivalente lineare per la valutazione della risposta della discarica ad un evento sismico simulato a partire dall'accelerogramma di progetto registrato in data 17 Gennaio 1994, a seguito del terremoto "Northridge" di magnitudine $M_w = 6.7$.

Per poter effettuare le simulazioni e quindi ricavare sia il fattore di smorzamento sia le curve di damping, gli autori hanno assunto le tipiche caratteristiche meccaniche dei rifiuti, ottenute da studi precedenti (Kavanzanjian et al. 1995).

Comunque, come Matasovic et al (1995) e Idriss et al. (1995) hanno successivamente riportato, è stato commesso un errore relativamente la posizione della stazione di misura di base inizialmente ipotizzata sopra uno strato di roccia debole, mentre invece trattasi di uno strato di riempimento ben compattato.

Le nuove back analisi includono la deconvoluzione delle registrazioni della stazione di base e l'utilizzo dei profili verticali delle onde trasversali ottenuti tramite indagini geofisiche.

Per distinguere, Matasovic et al. (1995) hanno condotto una back analisi sulla base di modelli monodimensionali equivalenti lineari e monodimensionali non lineari, mentre Idriss et al. (1995) hanno usato un modello ad elementi finiti bidimensionale equivalente lineare.

3.2.2 - Bray, Rathje, Augello e Merry (1998)

Contemporaneo e sicuramente strettamente interconnesso è lo studio condotto invece da Bray, Rathje, Augello e Merry (1998).

Sulla base dei numerosi eventi sismici che è stato possibile monitorare nel corso degli anni, gli autori hanno infatti potuto disporre di una quantità rilevante di dati per valutare il comportamento delle discariche in zone ad elevato rischio sismico.

Il terremoto di Northridge (magnitudine $M_w = 6.7$) ha avuto un'intensità tale da riuscire ad avere ripercussioni su ben 22 discariche che sono state interessate da valori dell'accelerazione di picco superiori a 0,05 g, e da rotture dello strato di copertura superficiale, soprattutto nelle vicinanze dei punti di contatto tra il rifiuto ed il terreno naturale.

Anche il terremoto di Loma Prieta (1989) in California ha causato danni simili.

Le rotture delle discariche possono infatti essere attribuite al netto divario in termini di caratteristiche di risposta dinamiche tra il materiale di rifiuto relativamente soffice

allocato in discarica ed il contiguo terreno naturale di fondazione in genere decisamente più rigido.

Le rotture superficiali possono anche raggiungere profondità di 30 cm.

Le rotture possono inoltre avere origine, o comunque essere correlate a fenomeni di progressivo franamento delle sponde laterali (in genere le misure hanno evidenziato rotture non superiori a 20 cm), come nel caso della discarica Chiquita Canyon in California.

L'obiettivo dello studio condotto da Augello et al. (1998) in questo caso era finalizzato all'ottenimento di informazioni circa il comportamento dei materiali geosintetici (es. teli HPDE, PP, PVC) utilizzati per garantire l'isolamento idraulico della discarica dal terreno circostante.

Ovviamente il passaggio preliminare obbligato è stato quello di ricostruire il comportamento del rifiuto in sito, a cui risultava intrinsecamente correlata l'integrità delle strutture ad esso accoppiate, ed i risultati sono stati riportati nel successivo paragrafo.

Dalle seguenti foto è possibile rendersi conto del tipo dell'entità delle rotture e movimenti che interessano la sommità di una discarica in genere.



Fig. 3.4 - Foto aerea: esempio di deformazioni superficiali nella discarica - stadio avanzato



Foto aerea: Esempio di frana della discarica RSU di Cincinnati (Ohio, 1996)



Fig. 3.5 - Foto aerea: deformazioni superficiali in discarica - stadio iniziale

3.2.3 - Glenn J. Rix

Un altro studio che si ritiene utile menzionare è quello condotto dal Dr. Glenn J. Rix (Georgia Institute of Technology - School of Civil and Environmental Engineering Atlanta) finalizzato sempre alla determinazione delle proprietà dinamiche dei rifiuti solidi urbani.

In pratica è stata sviluppata una metodologia di calcolo per la simultanea determinazione della velocità delle onde di taglio V_s e del fattore di smorzamento isteretico D (%) per i rifiuti solidi urbani utilizzando una superficie generatrice d'onda.

Tale procedura è stata applicata con successo alle discariche RSU variando anche la composizione e l'età del rifiuto.

L'utilizzo del test con superficie generatrice d'onda per determinare le proprietà dinamiche a deformazioni contenute ha dimostrato di possedere numerosi vantaggi rispetto ai convenzionali metodi come le indagini cross-hole e down-hole, principalmente

perchè è un metodo non invasivo che quindi non richiede l'esecuzione di fori di sondaggio che potrebbero talvolta compromettere l'integrità dei sistemi di contenimento.

Scendendo nello specifico, la curva di dispersione sperimentale, che mostra la dipendenza tra la frequenza e la velocità dell'onda di superficie (Rayleigh) è stata calcolata sulla base di misure alle differenze finite $\theta(\omega)$ tra due ricevitori posti ad una distanza nota Δr .

La determinazione dei profili di smorzamento isteretico a deformazioni contenute richiedono misure dei coefficienti di attenuazione spaziale delle onde armoniche di Rayleigh.

In pratica la curva di attenuazione sperimentale mette in relazione i coefficienti di attenuazione spaziale con la frequenza.

I coefficienti sperimentali di Rayleigh per attenuazione delle onde $\alpha_R(\omega)$ sono stati ottenuti da misure dello spettro di deformazione verticale $|w(r,\omega)|$ in corrispondenza di alcuni ricevitori.

Per migliorare l'accuratezza dei dati di attenuazione sperimentale, le misure della velocità spettrale delle particelle in corrispondenza di ciascun ricevitore è stata corretta per ridurre gli effetti di disturbo e rumore legati all'ambiente.

Una volta calcolate le curve sperimentali di dispersione ed attenuazione, deve essere implementato un apposito algoritmo di inversione per calcolare a ritroso le corrispondenti velocità trasversali ed i profili del fattore damping con la profondità.

L'inversione combinata consiste nella simultanea determinazione della velocità delle onde di taglio e del fattore di smorzamento isteretico a partire dalle misure sperimentali della velocità delle onde superficiali di Rayleigh e dell'attenuazione.

Questa impostazione di calcolo è sicuramente superiore ad una qualsiasi analisi non combinata non solo perchè il sistema di equazioni impostate diventa più consistente ed aderente alla fisicità del problema (infatti i due parametri sono intrinsecamente correlati), ma anche perchè la simultanea inversione costituisce un problema che dal punto di vista matematico è posto meglio (Rix e Lai, 1998).

Nella formulazione combinata il comportamento medio del rifiuto è assunto di tipo viscoelastico, caratterizzato da valori delle velocità sismiche calcolati tramite un complesso procedimento matematico.

Le tecniche per la misura della velocità delle onde superficiali e dell'attenuazione sopra descritte risultano essere appropriate se applicate alla superficie libera di un semispazio verticalmente omogeneo. Il fenomeno di propagazione delle onde per le misure di attenuazione in mezzi che sono lateralmente confinati, come ad esempio le discariche, ci si deve aspettare un risultato alquanto diverso rispetto ad un semispazio.

Sykora (1995) ha dimostrato che per le misure di velocità gli effetti della presenza di superfici di contorno sono alquanto trascurabili nel caso di rilevati stradali.

Comunque questa conclusione non può essere appropriata quando si tratta di misure di attenuazione, che possono essere alterate dalle interferenze dovute a eventuali rifrazioni e riflessioni sulle superfici di contorno.

In questi casi la procedura di calcolo deve essere riadattata per un calcolo dei coefficienti sperimentali di attenuazione $\alpha_R(\omega)$ più accurato.

E' stato condotto anche uno studio parametrico con il programma ad elementi finiti ABAQUS per valutare l'importanza di questo fenomeno.

Gli studi di cui parlato sono stati applicati a due discariche diverse collocate vicino ad Atlanta, Georgia.

Si ritiene utile riportare nei successivi paragrafi i risultati relativi alla sola discarica indicata come " *Bolton Road Sanitary Landfill*" di competenza di USA Waste Services Inc. in quanto le analisi sono state impostate su un numero maggiore di informazioni che renderebbero i risultati più attendibili.

3.3 - Velocità delle onde trasversali Vs

I profili delle velocità delle onde trasversali e longitudinali sono stati ricostruiti in corrispondenza di entrambe le stazioni di misura SS1 e SS2, utilizzando test con sospensioni in foro e i convenzionali metodi downhole (ESI 1995). I profili delle onde di taglio in corrispondenza delle stazioni sono stati ricostruiti e riportati da Metasovic et al (1995) e Idriss et al. (1995).

Nello specifico i profili in questione sono stati ricavati a partire da analisi spettrali con metodi statistici per l'individuazione della superficie generatrice d'onda (SASW) su ben 27 postazioni.

Le misure della velocità delle onde longitudinali e trasversali in corrispondenza del foro di sondaggio della stazione di misura SS2 sono state utilizzate per il calcolo del modulo di Poisson, basandosi sulle equazioni dell'elasticità lineare.

In figura 3.6 sono riportati i valori assunti dal modulo di Poisson calcolati secondo la procedura di cui sopra.

Il grafico mostra anche come siano state individuate zone dove il contenuto di rifiuti era minore del 25% e maggiore del 75%, e come queste zone siano state opportunamente individuate ed indicate ai margini tramite opportuna colorazione.

E' possibile vedere come il range di valori di ν abbia una notevole dispersione, dato che i valori oscillano tra il minimo di 0,09 ed il massimo di 0,45. Nelle simulazioni che sono state condotte da Kavazanjian (1995) e Metasovic (1995) il valore scelto quale più appropriato per il comportamento dei rifiuti OII è quello medio pari a 0,33.

I test SASW sono stati condotti sotto la supervisione del Dr. Kenneth Stokoe dell'Università del Texas. Appositi martinetti idraulici installati sui camion sono capaci di applicare una forza dinamica superiore a 133 kN a frequenza variabile tra 1 e 200 Hz per eseguire le prove.

Figura 3.7 mostra i profili delle velocità trasversali V_s elaborati a partire dalle procedure statistiche SASW in 27 stazioni di misura.

Il raccomandato range di valori per le V_s sviluppato da Kavazanjian et al. (1995) e Kavazanjian et al. (1996) per i rifiuti solidi urbani nel sud California è riportato nella fig. 3.7 a scopo di confronto.

Parallelamente sono state anche condotte prove in sito per la valutazione del peso dell'unità di volume dei rifiuti che si ritiene comunque utile riportare.

La localizzazione dei sei punti per la misura del peso di volume è stata scelta di modo che venissero praticamente a coincidere con l'ubicazione dei punti dove è stata elaborata ed estrapolata la velocità delle onde di taglio.

Il peso di volume è stato ottenuto a partire da una rielaborazione adattata della convenzionale procedura "sand cone" (ASTM D 1556).

Nella procedura riadattata il γ del rifiuto, prelevato ad esempio in corrispondenza della profondità 2-3m nel foro di sondaggio, viene valutato a partire dalla misura precisa del peso del materiale e del corrispondente volume occupato alla profondità di 2-3m

attraverso la misura del volume di un'apposita ghiaia ben calibrata che è necessario immettere nel tratto del foro di sondaggio considerato.

E' necessario ricordare che l'esecuzione di questo tipo di test ha portato spesso a dei risultati anomali.

L'elaborazione dei risultati è riportata in figura 3.8 e ciò che è possibile desumere è che γ varia in maniera non sistematica tra i valori estremi di 12 e 21 kN/m³, anche se la maggior parte dei risultati si concentra nella fascia tra 14 e 18 kN/m³.

Il peso dell'unità di volume è stato anche valutato attraverso un test in larga trincea di cui però non si ritiene utile riportare i particolari.

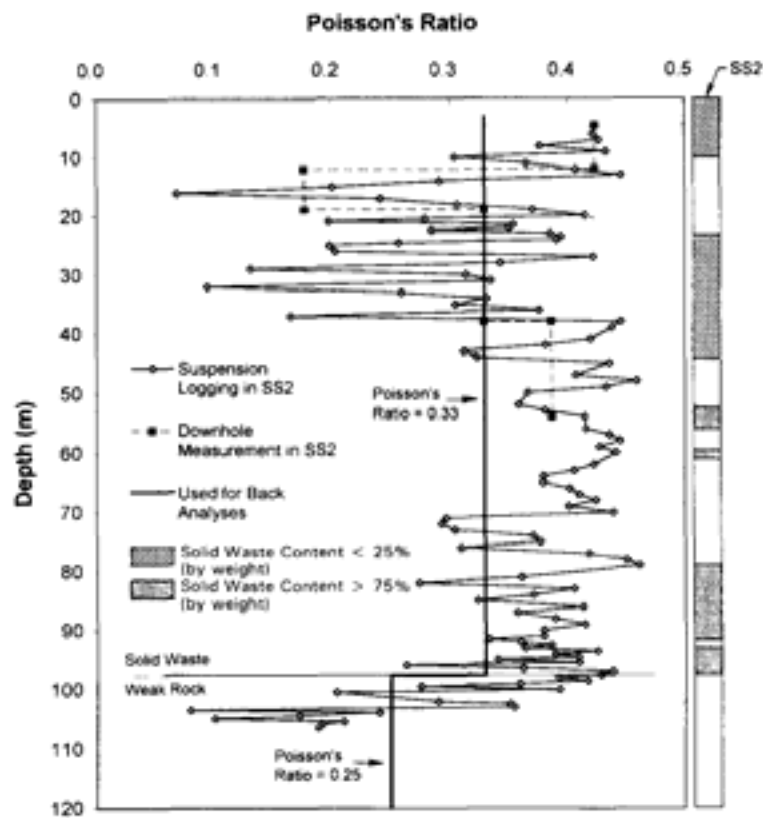


Fig. 3.6 - Andamento del modulo di Poisson con la profondità per la discarica di rifiuti OII (Matasovic & Kavazanjian 1998)

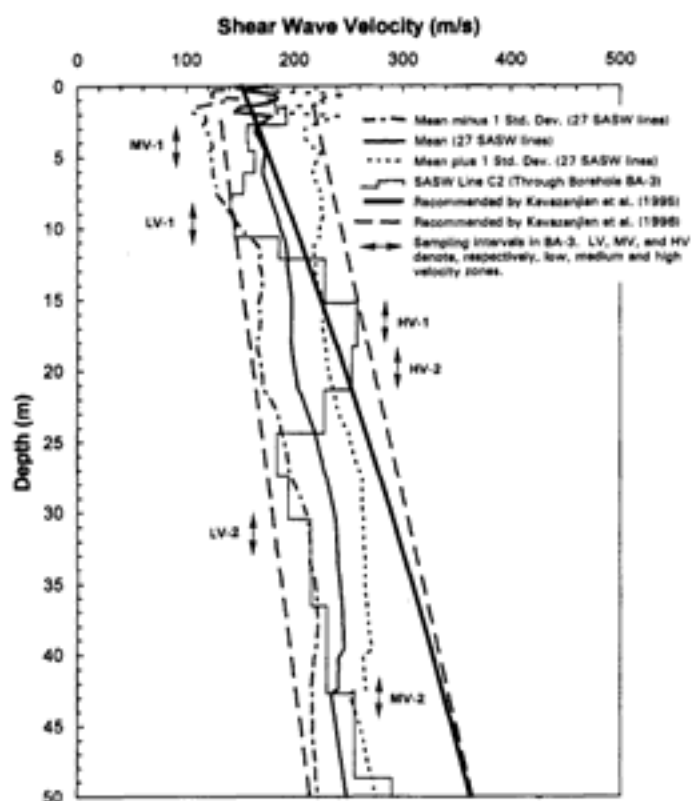


Fig. 3.7 - Andamento della velocità trasversale con la profondità per la discarica di rifiuti OII (Matasovic & Kavazanjian 1998)

Relativamente allo studio condotto da Augello et al. (1998), i risultati delle numerosissime analisi spettrali (SASW) elaborate di cui già discusso, omogeneizzati per poter essere riconducibili ad un rifiuto solido OII con un peso di volume pressochè simile, hanno portato a stabilire un range di valori per la velocità delle onde trasversali V_s in un certo modo minore rispetto ai profili suggeriti da Kavazanjian et

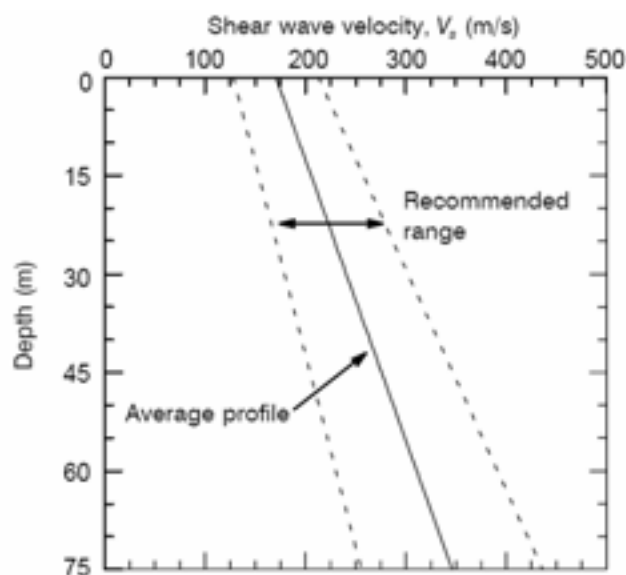


Fig. 3.8 - Profilo delle velocità trasversali elaborato da Augello et al.

al. (1995), ma pur sempre maggiore rispetto alle prime formulazioni (Singh e Murphy 1990).

Il range di valori ricostruito è riportato in figura 3.8.

Per quanto concerne invece l'analisi condotta da Glen J. Rix, l'algoritmo di inversione descritto nel precedente paragrafo applicati alla discarica di Bolton ha portato ai risultati riportati nelle figure 3.9 e 3.10.

In figura 3.9 viene riportato il diagramma di convergenza dell'algoritmo parziale per le velocità, mentre in figura 3.10 è riportato il profilo verticale delle velocità trasversali ricostruito a partire dai dati finali di convergenza dell'algoritmo.

In particolare è possibile notare come la linea tratteggiata indichi lo stato iniziale (velocità uniforme con la profondità) usato per l'inversione. Con il procedere verso la convergenza l'algoritmo fornisce il profilo definitivo delle velocità, indicato dal colore blu grassetto.

La curva teorica di dispersione fitta bene i dati sperimentali. Le velocità partono da una velocità trasversale iniziale di circa 125 m/s ed incrementano fino a raggiungere circa 160 m/s alla profondità di 25 m dal piano campagna.

Rispetto ai risultati ottenuti da Kavazanjian et al. (1995) l'incremento di velocità con la profondità è più contenuto e le velocità finali risultano sempre inferiori rispetto ai valori medi suggeriti dallo stesso autore.

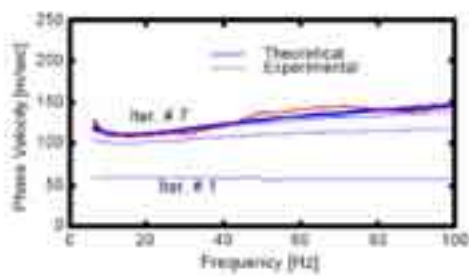


Fig. 3.9: Curva di dispersione sperimentale e teorica - discarica Bolton

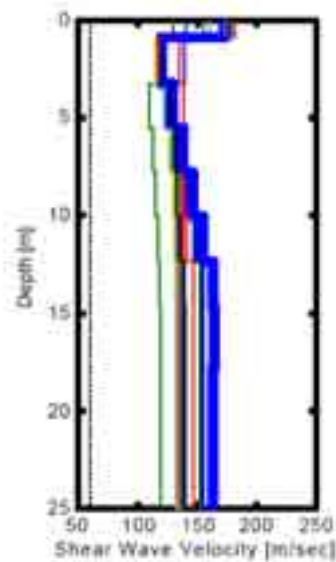


Fig. 3.10: profilo verticale delle velocità trasversali - discarica di Bolton

3.4 - Modulo di riduzione e fattore di smorzamento isteretico "damping" D (%)

Kavazanjian e Metasovic (1998) hanno condotto una back analisi 2D equivalente-lineare con il metodo ad elementi finiti per ricostruire, a partire dai dati misurati dagli accelerometri, le curve di riduzione e damping per i rifiuti solidi OII nel caso di sforzi di taglio ciclici fino ad un livello massimo di deformazione del 0,08%. La deconvoluzione monodimensionale equivalente-lineare dell'accelerogramma riferito al substrato compattato alla base della discarica costituisce uno step essenziale per la corretta impostazione della back analisi.

Prove di taglio diretto ciclico (CyDSS) su campioni di grande diametro (457 mm) ricostruiti in laboratorio hanno fornito i risultati necessari la valutazione del damping associato ai rifiuti in corrispondenza di deformazioni di taglio superiori a 0,08%, valore massimo raggiungibile per la back analisi.

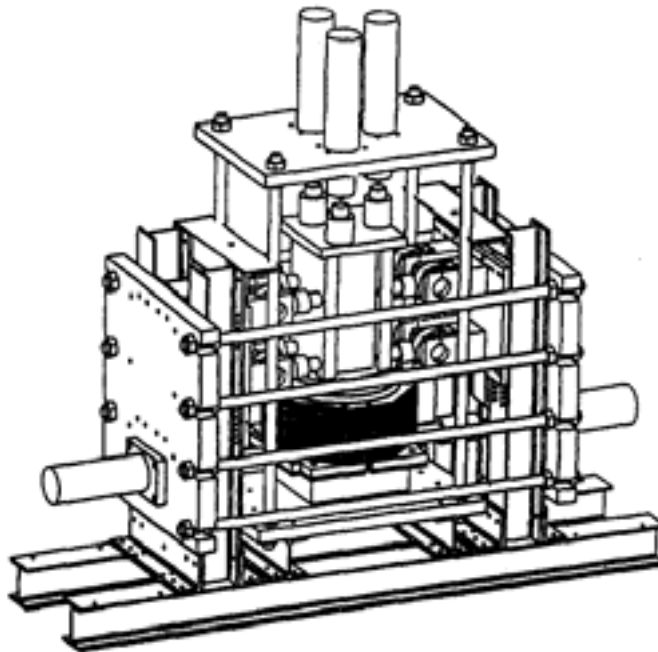


Fig. 3.11: Apparecchiatura per l'esecuzione della prova di taglio diretto ciclico su campioni di largo diametro.

La tipologia di apparecchiatura per l'esecuzione della prova di taglio diretto ciclico è quella rappresentata in figura 3.11. I test di laboratorio prevedono una serie di prove corrispondenti a livelli di deformazione di taglio ciclico pari a 0.1%, 0.3%, 1%, 3%, e 5%

per frequenze di circa 0.1 Hz. Nelle tabelle 3.1 e 3.2 sono riportate informazioni relative al rifiuto prelevato dai sondaggi sottoposto alle prove di laboratorio in oggetto.

Numero Test (1)	Sondaggio (intervallo velocità) (2)	Profondità (3)	Età stimata ^b (4)	Sforzo normale applicato (5)	Contenuto umidità ^c (6)	Velocità trasversale ^d (7)	Peso di volume ^e (8)	Numero di strati (9)
1, 2, 3	BA-1/LV-1	3.4-6.1 m	---	100.3; 95.8; 94.1 kPa	15.3%	122 m/s	16.0 kN/m ³	8
4	BA-3/MV-1	3.4-6.1 m	1980	97.4 kPa	16.6%	162 m/s	16.9 kN/m ³	2
5, 6	BA-1/HV-1	9.2-12.2 m	---	176.2; 176.4 kPa	33.5%	231 m/s	18.5 kN/m ³	6
7	BA-1/LV-2	15.2-18.3 m	1984	315.1 kPa	25.5%	148 m/s	18.1 kN/m ³	4
8	BA-3/LV-2	30.5-33.5 m	1964	311.4 kPa	24.7%	195 m/s	12.0 kN/m ³	4
9, 10	BA-2/HV-1	15.2-18.3 m	1983	292.1; 292.3 kPa	41.2%	231 m/s	16.5 kN/m ³	6

^aBA = sondaggi eseguiti con benna a coclea indicati in figura 3.3; LV, MV, HV = indicatore di zona a bassa, media, alta velocità trasversale indicate in figura 3.7.

^b Età del rifiuto stimata a partire dal livello di parziale decomposizione dei giornali.

^c Contenuto di umidità iniziale.

^d Velocità delle onde di taglio ricavata per il campione di 457 mm avente come densità quella iniziale e sottoposto alla stessa pressione di sovraconsolidazione in sito.

^e Peso dell'unità a volume in sito. Il corrispondente valore che viene misurato durante prova di taglio diretto ciclico CyDSS rispetto a tale valore può avere oscillazioni del 2%.

^f Età del campione indeterminabile.

Tab. 3.1 - Programma della prova di taglio diretto ciclico CyDSS

Numero Test (1)	Carta e Cartone (2)	Materiali plastici (3)	Legno (4)	Metalli (5)	Vetro (6)	Tessuti e materiali vari (7)	Composizione dei materiali con comportamento simile a quello dei terreni ^a (8)
1, 2, 3	1.6%	7.0%	2.3%	0.6%	2.5%	1.2%	84.8% (SM; 10% ghiaia ; 50-60% sabbia; 30-40% fini)
4	1.7%	1.1%	0.4%	0.8%	0.4%	0.9%	94.6% (CH; 10% ghiaia ; 15% sabbia ; 75% fini)
5, 6	6.9%	11.8%	4.0%	0.8%	5.6%	5.3%	64.6% (CH; 5% ghiaia ; 5% sabbia ; 90% fini)
7	9.5%	3.2%	3.7%	2.4%	1.6%	2.2%	77.5% (CL; 10-15% ghiaia ; 30-40% sabbia; 50-55% fini)
8	10.3%	0.4%	2.9%	0.9%	0.1%	0.1%	85.4% (grani fini)
9, 10	1.2%	3.7%	3.4%	4.9%	0.4%	1.5%	84.8% (ML; 10% ghiaia ; 30-40% sabbia; 50-60% fini)
[Media]	5.2%	4.5%	2.8%	1.7%	1.8%	2.0%	82.0%

^a Sistema di classificazione dei suoli unificato per visualizzare la classificazione

Tab. 3.2 - Programma della prova di taglio diretto ciclico CyDSS - classificazione merceologica

Un esempio dei risultati che si sono ottenuti tramite questa prova sono riportati in figura 3.12 ; è visibile come la curva che interpola i risultati segua una serie di cicli di isteresi in termine di legame sforzi-deformazioni.

Si può quindi desumere che il materiale segue le leggi di Masing (1926) relativamente al comportamento dei terreni sottoposti a carichi ciclici.

I risultati finali espressi in termini di modulo di modulo degli sforzi di taglio equivalente e di fattore di smorzamento isteretico sono riportati in figura 3.14.

I dati relativi al modulo di taglio equivalente sono stati normalizzati attraverso il modulo di taglio G_{max} a basse deformazioni calcolato a partire dalla semplice relazione:

$$G_{max} = Vs^2 \rho. \quad (1.III)$$

Il fattore di smorzamento $D(\%)$ viene invece calcolato a partire dall'area dei cicli di isteresi come indicati in figura 3.12 con le opportune correzioni ed assunzioni semplificative.

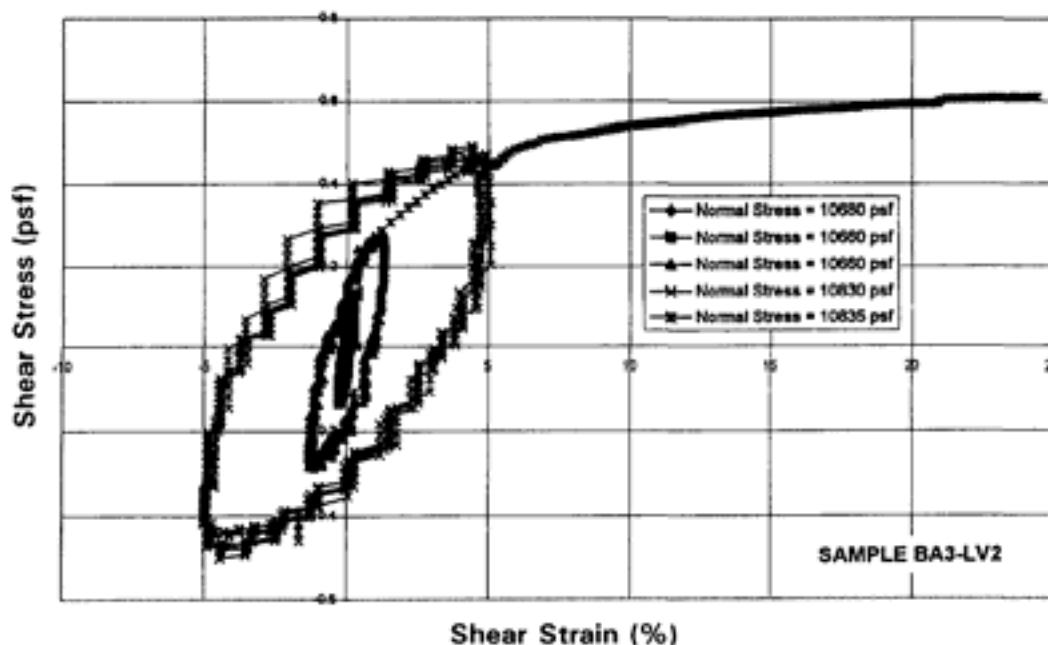


Fig. 3.12 - Curva sforzi-deformazioni risultante dalla prova di taglio ciclico CyDSS

Infine la back analisi ha permesso di ottenere dei risultati compatibili con le basse deformazioni di taglio per completare lo studio delle curve di attenuazione.

La back analisi è stata condotta in corrispondenza della sezione 1-1' visibile in figura 3.3 e 3.13, mentre le caratteristiche meccaniche dei terreni utilizzati per simulare l'analisi sono riportate in tabella 3.3.

La back analisi è stata condotta grazie al programma QUAD4M (Idriss et al. 1973; Hudson et al. 1994).

Tale programma ricostruisce la risposta dinamica del sito utilizzando un modello costitutivo equivalente lineare con la frequenza che dipende dal damping.

La back analisi è stata condotta facendo riferimento ai diagrammi spettrali deconvoluti (fig. 3.16), nella forma degli spettri di risposta in termini di accelerazioni.

Zona* (1)	Peso di volume (2)	Modulo Poisson (3)	Velocità trasversale (4)	Modulo riduzione e curve di damping (5)
Rifiuto	15.7 kN/m ³	0.33	Varies*	Valutato in questo studio
Terreno copertura	17.3 kN/m ³	0.30	274 m/s	Vucetic and Dobry (1991) (PI = 15)
Riempimento artif.	18.8-19.6 kN/m ³	0.30	288 m/s	Vucetic and Dobry (1991) (PI = 15)
Roccia debole	18.8 kN/m ³	0.25	Varies*	Shibuya et al. (1990)
Semirigido elastico	20.4 kN/m ³	0.25	1,220 m/s	—

* vedere figura 3.13

Evento (1)	Registrazione* (2)	PHGA* (3)	Durata significativa* (4)	RMSA* (5)
Jan. 17, 1994 Northridge earthquake $M_w = 6.7$	Base (SS1)	0.258g	10.54 s	0.083g
Jan. 17, 1994 Northridge earthquake $M_w = 6.7$	Top deck (SS2)	0.254g	16.34 s	0.057g
June 28, 1992 Landers earthquake $M_w = 7.3$	Base (SS1)	0.042g	37.57 s	0.012g
June 28, 1992 Landers earthquake $M_w = 7.3$	Top deck (SS2)	0.100g	39.25 s	0.027g
Dec. 3, 1988 Pasadena earthquake $M_w = 5.0$	Base (SS1)	0.218g	3.29 s	0.067g
Dec. 3, 1988 Pasadena earthquake $M_w = 5.0$	Top deck (SS2)	0.091g	3.32 s	0.033g
Jan. 19, 1994 Northridge aftershock number 5 $M_w = 4.5$	Base (SS1)	0.043g	5.49 s	0.012g
Jan. 19, 1994 Northridge aftershock number 5 $M_w = 4.5$	Top deck (SS2)	0.031g	4.96 s	0.007g
Jan. 19, 1989 Malibu earthquake $M_w = 5.0$	Base (SS1)	0.012g	20.49 s	0.003g
Jan. 19, 1989 Malibu earthquake $M_w = 5.0$	Top deck (SS2)	0.010g	26.75 s	0.002g

* Correzione dell'allineamento di base e conversione ad un allineamento est-ovest da PEA (1995)

* Accelerazione di picco orizzontale come riportato da PEA (1995)

* Durata significativa dell'evento in accordo con Trifunac e Brady (1975)

* RMSA = Root-mean-square acceleration

Tab. 3.3 - Proprietà dinamiche dei materiali e caratteristiche degli accelerogrammi

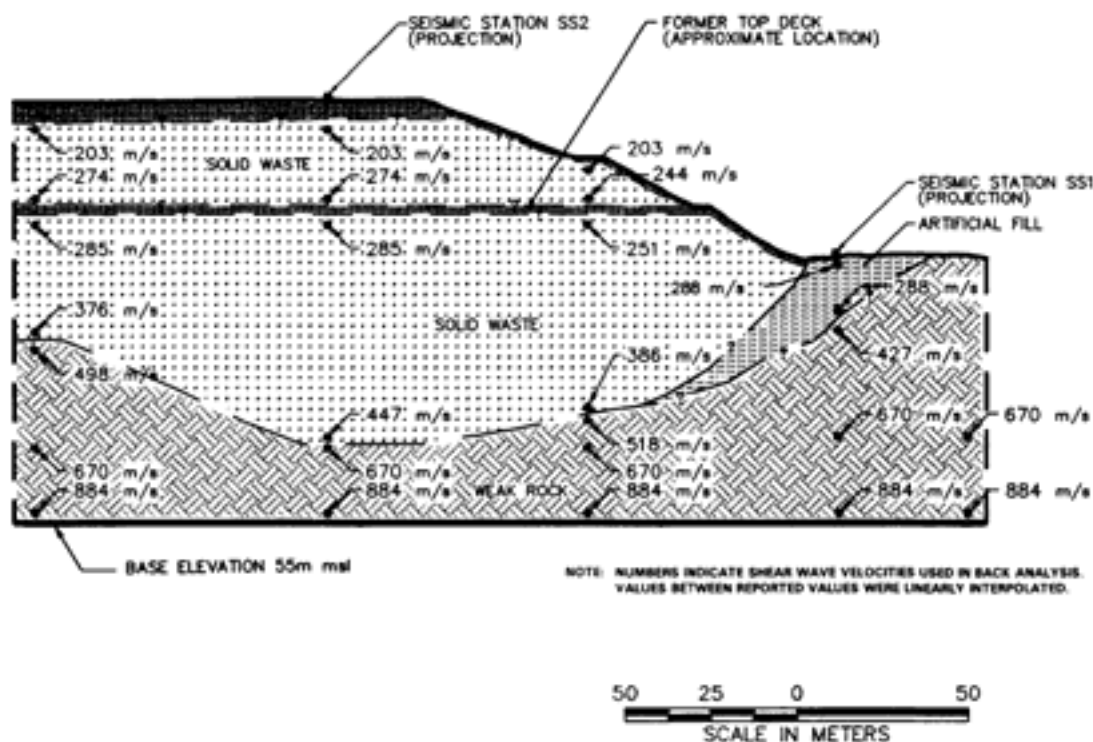


Fig. 3.13 - Sezione 1-1'

Seguendo una procedura iterativa, il modulo di riduzione e le curve di attenuazione sono state determinate sulla base di osservazioni qualitative confrontando gli spettri di risposta

in termini di accelerazione predetti e misurati in corrispondenza della stazione di misura SS2.

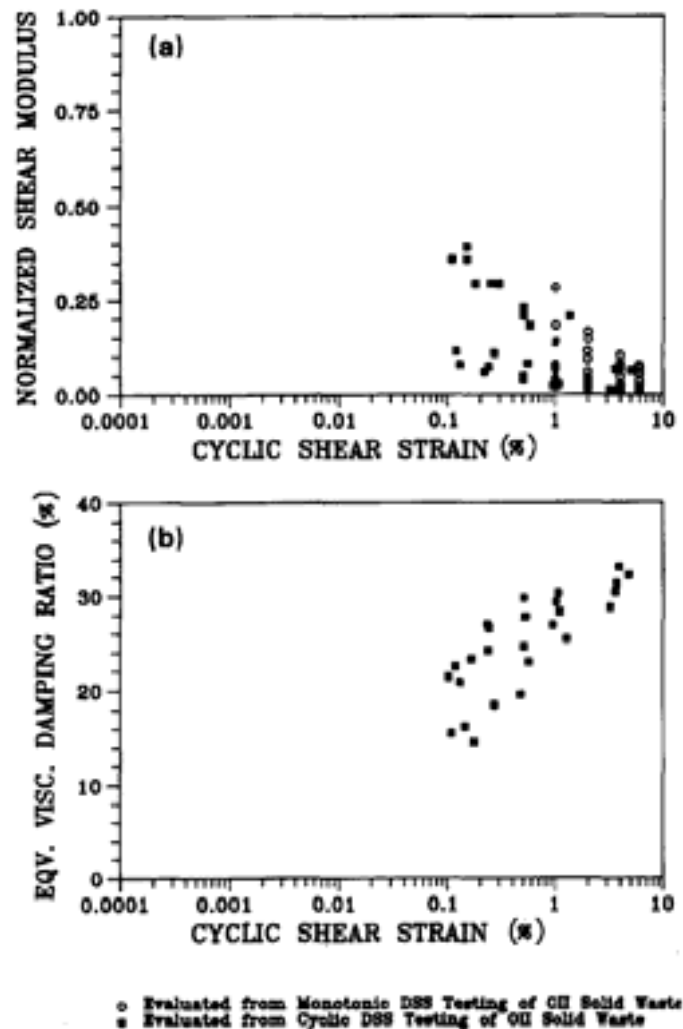


Fig. 3.14 - Risultati della prova di taglio diretto ciclico in termini di modulo di riduzione e fattore di smorzamento viscoso (Matasovic & Kavazanjian 1998)

I risultati finali della back analisi sono stati integrati con quelli della prova di taglio diretto ciclico CyDSS per ricreare una serie di curve "internamente consistenti" rappresentative della variazione del modulo di riduzione e del fattore di smorzamento al variare del livello di deformazione per i rifiuti OII.

In generale è necessario ricordare che le curve superiori ed inferiori che delimitano i domini di esistenza sono quelle meglio stimate.

In particolare la curva superiore per il modulo di riduzione risulta maggiormente rappresentativa dei risultati ottenuti con la back analisi rispetto alle altre; a causa nell'inevitabile disturbo associato al campionamento le prove di laboratorio hanno fornito dei risultati in termini sia di modulo di riduzione che di fattore di smorzamento superiori rispetto ai corrispondenti valori stimabili in sito; la minore percentuale di dissipazione di energia associata all'estremo superiore delle curve del modulo di riduzione e all'estremo inferiore delle curve di damping può essere un indice della conservatività dei risultati rispetto alla risposta in termini di accelerazione di picco misurabile in corrispondenza della superficie della discarica.

In figura 3.15 sono rappresentate le curve in questione.

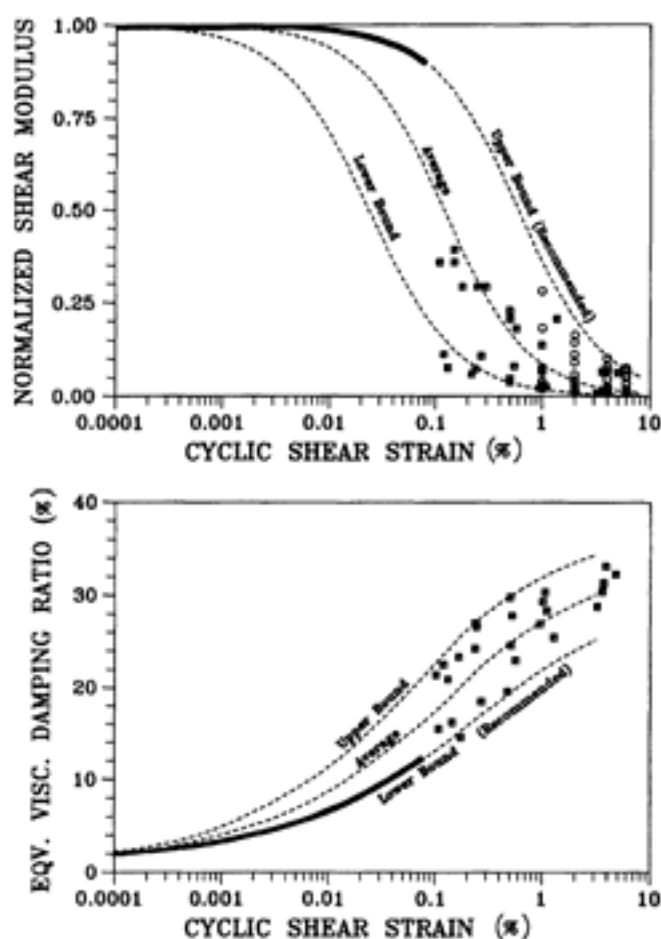


Fig. 3.15 - Curve del modulo di riduzione e del damping in funzione della deformazione di taglio (Matasovic e Kavazanjian, 1998)

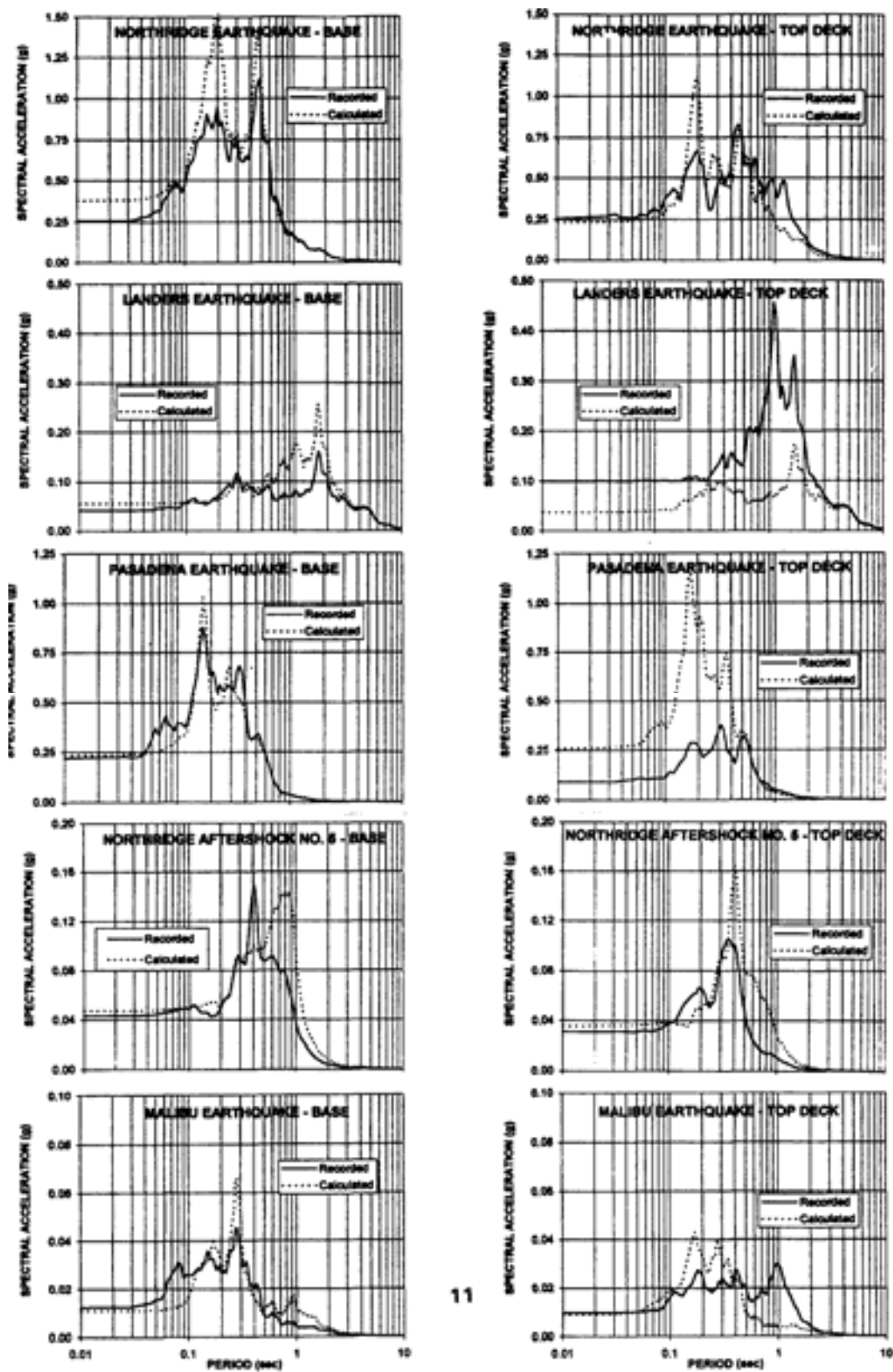
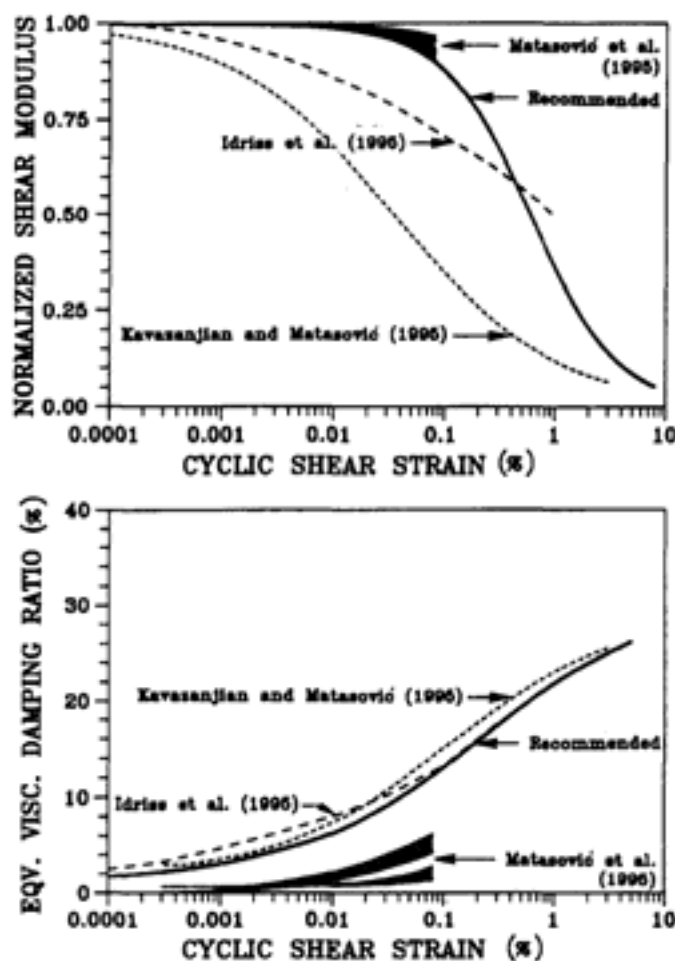


Fig. 3.16 - Risultati riepilogativi della back analisi (Matasovic e Kavazanjian, 1998)

Fig. 3.17 - Grafico riepilogativo con le curve del modulo di riduzione e del damping meglio stimate (Matasovic e Kavazanjian, 1998)



Inoltre, ai fini di un costruttivo confronto tra i risultati ottimali dello studio precedentemente descritto e quelli ricavati da ulteriori studi condotti in precedenza sempre nell'ambito dei rifiuti OII, si ritiene opportuno riportare i grafici di fig. 3.17.

Per quanto concerne le curve del damping i risultati tendono ad essere pressochè uniformi, ma per il modulo di riduzione ciò non accade, tanto che le variazioni assumono valori pari al 50%.

Ciò che indirizzerebbe a considerare più rappresentativi i risultati di questo studio, è la

procedura di analisi più consistente e coerente con i valori del fattore di smorzamento ottenuti.

Per quanto riguarda lo studio condotto da Augello, Rathje, Bray e Merry (1998), l'installazione di accelerometri nelle discariche di rifiuti solidi OII prese in considerazioni ha permesso di elaborare le risposte dinamiche di interesse a seguito dei terremoti del 1987, permettendo contestualmente di valutare il modulo di riduzione e le curve di damping caratteristiche del rifiuto tramite back-analisi.

Molte indagini (Idriss et al. 1995; GeoSyntec Consultants 1996; Augello et al. 1998) hanno permesso di elaborare diverse curve per il modulo di riduzione e del fattore di smorzamento in dipendenza della deformazione di taglio per i rifiuti OII.

Figura 3.18 riassume appunto questi risultati.

In generale i risultati analitici sono più sensibili e precise nella scelta delle curve di damping, piuttosto che nella scelta delle curve del modulo di riduzione degli sforzi di taglio.

Gli studi condotti hanno portato anche a stimare per il modulo di Poisson un valore medio di 0,3.

I parametri di resistenza dei rifiuti in condizioni dinamiche sono stati calcolati a ritroso tramite back-analisi e risultano pressochè identici a quelli raccomandati da Kavazanjian et al. (1995) in condizioni statiche (coesione intercetta $c=24$ kPa, angolo di attrito $\phi=0^\circ$ per valori dello sforzo normale $\sigma_n < 30$ kPa; $c=10$ kPa, $\phi=33^\circ$ per $\sigma_n > 30$ kPa).

Invece un ragionevole valore dell'angolo di attrito in condizioni dinamiche per le discariche del Sud California è stato stimato essere $33-38^\circ$ (Augello et al. 1997).

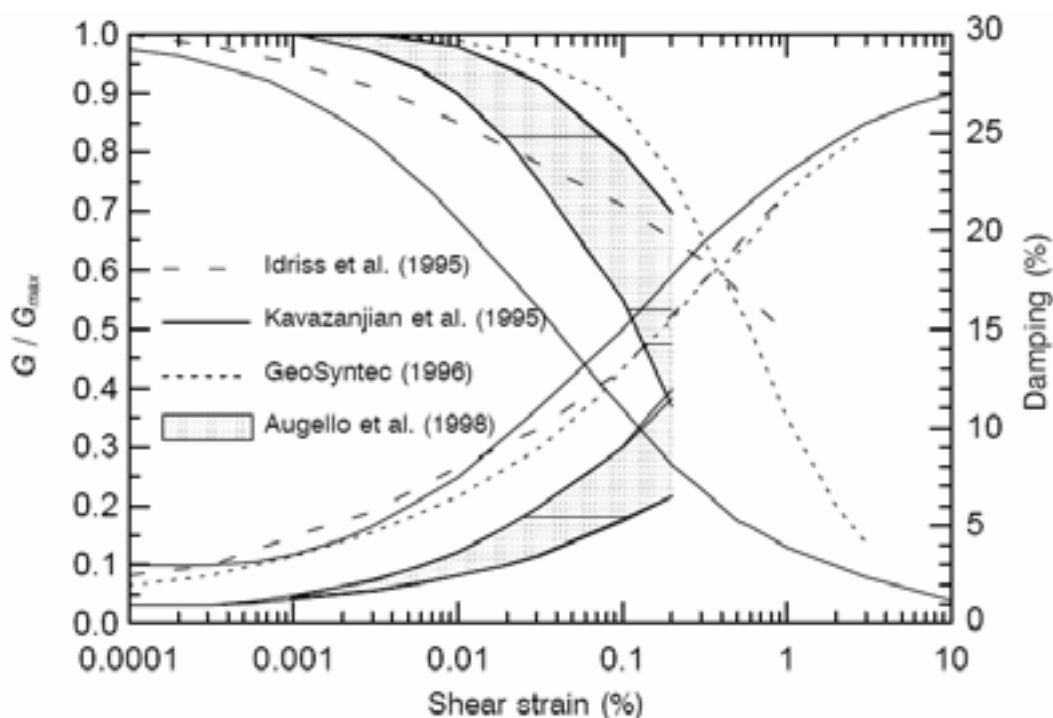


Fig. 3.18 - Curve del modulo di riduzione e di damping in funzione delle deformazioni di taglio per i rifiuti solidi urbani (Augello et al. 1998)

Per quanto concerne nuovamente l'analisi condotta da Glen J. Rix, l'algoritmo di inversione per la discarica di Bolton ha portato ai risultati riportati nelle figure 3.19 e 3.20. In figura 3.19 viene riportato il diagramma di convergenza dell'algoritmo parziale per i coefficienti di attenuazione $\alpha_R(\omega)$, mentre in figura 3.20 è riportato il profilo verticale

del fattore di smorzamento delle onde di taglio D (%) ricostruito sempre in base ai dati di convergenza dell'algoritmo di inversione.

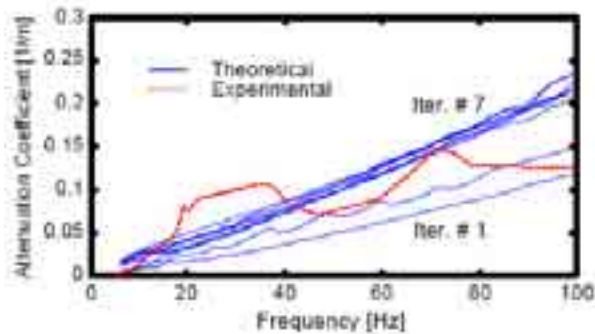


Fig. 3.19 : Curva di attenuazione sperimentale e teorica - discarica Bolton

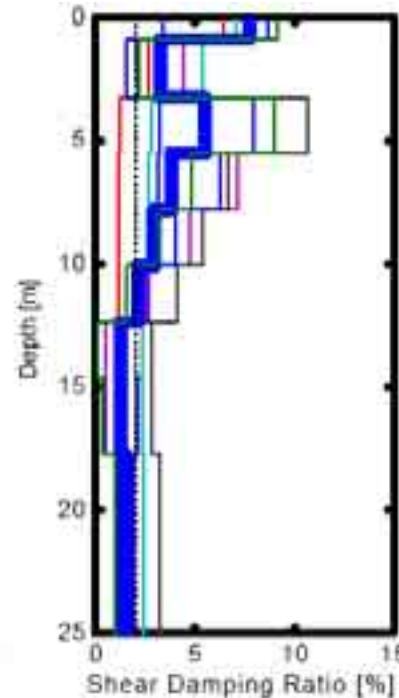


Fig. 3.20 : Profilo verticale del fattore di smorzamento - discarica Bolton

In questo caso però la curva teorica e sperimentale si discostano vistosamente e questo risultato, per nulla scoraggiante, riflette semplicemente la difficoltà di ottenere una misura accurata dell'attenuazione naturale dei terreni in sito a causa anche e soprattutto delle attenuazioni geometriche di difficile valutazione.

Secondo comunque questo studio D varia con la profondità tra 1 e 7 % e generalmente tende a decrescere con la profondità.

E' stato inoltre dimostrato, sempre nel corso dello studio condotto da Rix, che rifiuti giovani contenenti basse percentuali di suolo nativo, rispetto ad un rifiuto maturo mescolato a quantità maggiori di terreno in sito, dissipano meno energia con il fenomeno del damping e pertanto, essendo $D(\%)$ alquanto basso, sussiste una maggiore amplificazione delle accelerazioni.

Nel capitolo successivo verranno approfondite quelle che sono le potenzialità del programma ad elementi finiti Plaxis nell'ambito delle simulazioni dinamiche, ed in particolare la valutazione dei coefficienti di Rayleigh che determinano il comportamento dei suoli nell'ambito dello smorzamento viscoso.

Capitolo 4 - Il programma ad elementi finiti Plaxis: applicazione del modulo dinamico

4.1 - Introduzione al modello

Nel presente capitolo verrà brevemente descritto il funzionamento del programma Plaxis utilizzato per simulare il comportamento di una discarica in condizioni dinamiche, ed in particolare la teoria alla base della procedura di analisi adottata nel modello.

Il programma ad elementi finiti Plaxis permette, attraverso una complessa procedura di analisi statica che discretizza il modello con elementi triangolari a 6 e 15 nodi per interpolare gli spostamenti rispettivamente con polinomi di secondo e quarto grado, di ricostruire lo stato di sforzo e deformazione sia in termini di tensioni totali che efficaci.

Per l'esecuzione di analisi dinamiche e di filtrazione in condizioni non stazionarie sono invece disponibili due specifiche estensioni del programma.

La procedura per la simulazione di un'analisi dinamica con Plaxis è sostanzialmente identica a quella di un'analisi statica.

In tal senso si intende la creazione della geometria del modello, la generazione della mesh, la generazione dello stato di sforzo iniziale, la definizione e l'esecuzione delle fasi di calcolo e infine la valutazione dei risultati di output.

Si rimanda alla sezione completa del manuale (Plaxis manual Version 8) per la spiegazione in dettaglio di tutte le potenzialità del programma.

4.2 - Fase di Input

4.2.1 - Tipo di sorgente vibrazionale

Innanzitutto per impostare un problema di analisi dinamica, oltre all'usuale procedura di creazione del modello geometrico, generazione della mesh secondo un prefissato grado di infittimento etc. , è necessario definire le condizioni di base nel senso che è necessario individuare il tipo di sorgente di vibrazioni.

Nello specifico è necessario distinguere tra:

- Sorgente singola di vibrazione - in genere viene accoppiata al modello assialsimmetrico, anche se in genere è più comune lavorare in condizioni di deformazioni piane. Questo tipo di accoppiamento deriva dal fatto che le onde in un sistema assialsimmetrico si propagano in maniera più simile a quanto accade

nel tridimensionale. In questo caso l'energia progressivamente diminuisce a causa dell'attenuazione delle onde con la distanza radiale dalla sorgente. Questo tipo di effetto può essere attribuito al così detto damping geometrico, che Plaxis include nel modello assialsimmetrico.

- Terremoto - in questo caso la sorgente di vibrazione è usualmente applicata lungo la superficie di contorno inferiore del modello, dato che le onde trasversali si propagano verso l'alto. Questo tipo di sorgente è in genere accoppiata al modello "plane strain" ovvero il classico modello bidimensionale che non include quello che prima abbiamo definito damping geometrico. In questo caso l'attenuazione realistica delle onde non dipende tanto dalla distanza dalla sorgente quanto dalle proprietà intrinseche dei materiali.

4.2.2 - Carichi e condizioni al contorno

Dopo aver creato la geometria del modello per l'analisi dinamica, è necessario definire i carichi esterni e le condizioni al contorno.

Scendendo più nel dettaglio, dal menù "Loads" è possibile selezionare:

- Absorbent boudaries: sono necessarie per assorbire gli incrementi degli sforzi lungo i contorni esterni causati dall'esistenza di sollecitazioni di tipo dinamico, in assenza delle quali si avrebbero fenomeni di riflessione all'interno del modello geometrico.
- Prescribed displacements: gli spostamenti imposti vengono generalmente utilizzati per simulare i terremoti in quanto, una volta applicati alla superficie di contorno inferiore del modello geometrico, diventano nel corso del running di calcolo sorgente di onde trasversali, se la direzione dello spostamento imposto è quella orizzontale.
- External Loads: i carichi esterni possono essere applicati sia puntualmente che linearmente. Inoltre, se viene attivata l'impostazione "dynamic load system" dal menù "Loads", essi si trasformano rispettivamente in sorgenti di onde puntuali e distribuite nella fase di calcolo.

4.2.3 - Parametri dei modelli costitutivi

Una volta scelto il modello costitutivo più adatto (Elastic, Mohr Coulomb, Jointed-rock, Hardening-Soil, Soft-Soil e Soft-Soil Creep) da attribuire al terreno e quindi una volta attribuiti i valori numerici ai parametri che lo individuano, l'analisi dinamica non richiede espressamente dei parametri addizionali per poter essere svolta. Comunque, parametri alternativi e/o addizionali possono essere utilizzati per definire la velocità delle onde trasversali e longitudinali e per includere l'effetto del damping.

In genere, quando si attribuisce un valore al modulo di elasticità E ed al modulo di Poisson ν , il corrispondente valore di V_s e V_p viene calcolato automaticamente.

Nel caso particolare di modello costitutivo elastico-lineare oppure Mohr-Coulomb è possibile anche inserire direttamente V_s e V_p poichè il programma desume automaticamente i valori da attribuire ad E e ν .

Nel caso dell'analisi oggetto di questo studio, per i terreni, e nello specifico per i rifiuti allocati in discarica, è stato adottato un modello costitutivo di tipo Mohr-Coulomb i cui parametri sono stati ricavati tramite prove di laboratorio meglio descritte nel successivo capitolo.

Scendendo nel particolare, noti E e ν medi per il rifiuto, il corrispondente valore della velocità delle onde trasversali calcolato dal modello è stato confrontato con il range di valori consigliato e di cui discusso nel capitolo 3.

Un altro aspetto da tenere in conto per la sua importanza nelle applicazioni reali è l'effetto del damping; attribuire dei valori congruenti ai coefficienti di Rayleigh che permettono di simulare gli effetti del damping "viscoso" ai rifiuti è stata un'operazione che ha richiesto un grande sforzo dal punto di vista dello studio preliminare.

Sono stati infatti presi in considerazione gli studi condotti da Hashash e Park nell'ambito della formulazione del damping nella analisi di risposta non lineari dei siti.

Si ritiene utile riproporre almeno in parte i risultati di tali studi in quanto la comprensione degli stessi contribuisce alla corretta impostazione di questa analisi che, sebbene carente da molti punti di vista, potrebbe rappresentare un buon punto di partenza per futuri studi e più aggiornate simulazioni.

4.2.4 - Formulazione teorica del damping

Sono state condotte numerosissime analisi di risposta monodimensionali per ricostruire gli effetti locali in termini di movimenti e deformazioni causati dalla propagazione delle onde durante un terremoto (Idriss, 1968; Roesset, 1977; Idriss, 1990; Kramer, 1996; Hashash & Park, 2001; Borja et al., 2002).

Comunemente in queste analisi, la propagazione verticale delle onde SH approssima bene quelli che sono i movimenti del terreno in sito durante un evento sismico, mentre la stratigrafia può essere adeguatamente schematizzata attraverso una sovrapposizione di strati orizzontali diversi, che chiameremo layer.

Il comportamento meccanico del terreno può essere associato a quello di un solido di Kelvin-Voigt con un modulo di taglio lineare-elastico e un damping di tipo viscoso.

La soluzione delle equazioni di propagazione delle onde può essere ricercata sia nel dominio della frequenza che nel dominio del tempo.

Nel campo però delle grandi vibrazioni (terremoti di medio-grande intensità) una soluzione di tipo elastico-lineare perde di significato poichè il comportamento del terreno diventa inelastico, non lineare e dipendente dalle deformazioni.

E' possibile impostare essenzialmente due tipi di analisi.

Nell'analisi equivalente lineare, condotta nel dominio delle frequenze, è stata sviluppata per simulare il comportamento non lineare dei terreni (Schnabel & Idriss, 1972). La soluzione nel dominio delle frequenze per la propagazione delle onde fornisce una soluzione praticamente esatta quando la risposta del terreno è lineare. Il metodo equivalente lineare simula invece il comportamento non lineare dei terreni introducendo una dipendenza tra le deformazioni di taglio, il modulo di taglio e le curve di damping, sebbene sia comunque possibile utilizzare un valore costante sia per il modulo di taglio che per il fattore di smorzamento isteretico, ma questa scelta diventa molto critica ed è facile ottenere risultati incoerenti.

Nell'analisi non lineare, le equazioni dinamiche del moto vengono integrate nel dominio del tempo e quindi il comportamento non lineare del terreno può essere ben simulato.

Comunque le correnti formulazioni di questo tipo di analisi fanno riferimento ad un addizionale termine di damping viscoso che non sempre porta a risultati accurati, specie nel caso della propagazione delle onde nei depositi molto profondi.

L'analisi dinamica è impostata da Plaxis nel dominio del tempo.

Constatato questo, è possibile impostare teoricamente i legami tra i parametri di input richiesti dal modello e le equazioni di propagazione delle onde.

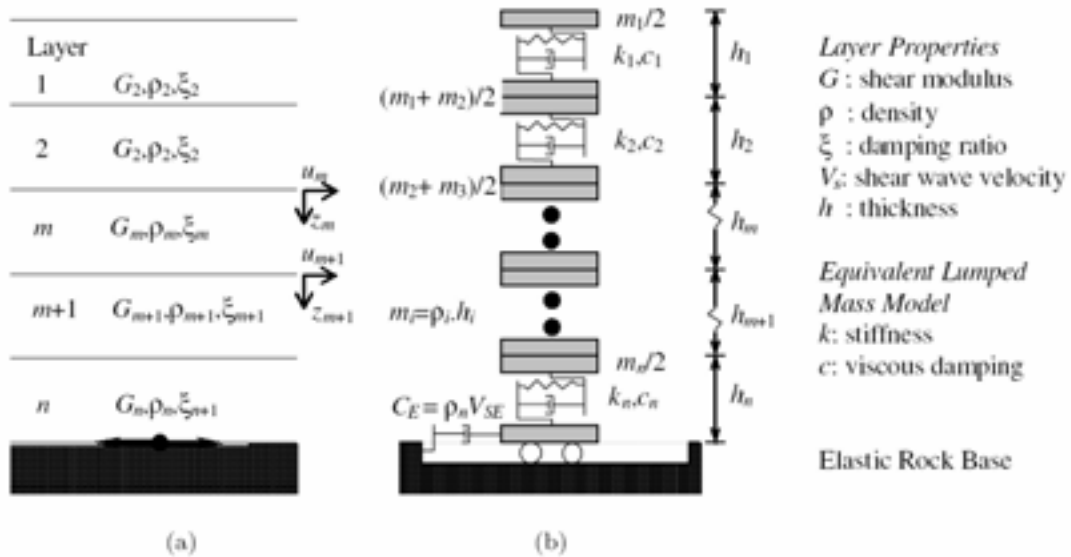


Fig. 4.1 - Stratigrafia idealizzata del terreno (a) colonna di suolo stratificato (utilizzata per la soluzione nel dominio delle frequenze) (b) idealizzazione con parametri equivalenti a più gradi di libertà (utilizzata per la soluzione nel dominio del tempo)

Nel dominio del tempo, l'analisi non lineare fa riferimento ad una stratigrafia come quella rappresentata in figura 4.1(a) idealizzata secondo un sistema discreto delle masse, come mostrato in figura 4.1(b).

L'equazione differenziale di propagazione verticale delle onde trasversali

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1.IV)$$

dove ρ è la densità del materiale, G il modulo di taglio, η la viscosità, u lo spostamento, può essere scritta in forma matriciale come di seguito riportato:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g, \quad (2.IV)$$

dove

$[M]$ è la matrice delle masse

$[C]$ è la matrice del damping viscoso

$[K]$ è la matrice delle rigidezze

$\{\ddot{u}\}$ è il vettore delle accelerazioni nodali relative

$\{\dot{u}\}$ è il vettore delle velocità nodali relative

$\{u\}$ è il vettore degli spostamenti nodali relativi

L'equazione (2.4) viene risolta numericamente ad ogni step utilizzando il metodo β di Newmark (Newmark, 1959), incondizionatamente stabile e privo del damping algoritmico (Chopra, 1995).

Ciascun layer di terreno è rappresentato quindi dalla sua massa, da una molla, e da uno smorzatore per la simulazione del damping viscoso.

La matrice delle rigidezze è costante per materiali lineari-elastici ed è definita come:

$$k_i = \frac{G_i}{h_i} \quad (3.IV)$$

dove G è il modulo di taglio mentre h_i è lo spessore del layer i .

L'effetto del damping viscoso viene simulato attraverso l'introduzione della matrice $[C]$, che in pratica rappresenta lo smorzamento a deformazioni molto piccole in corrispondenza delle quali il comportamento di tutti i terreni è pressochè lineare.

Non è possibile rendere il damping viscoso indipendente dalla frequenza dato che nell'analisi nel dominio del tempo un moto arbitrario non può essere decomposto in una somma finita di componenti armoniche.

Questa formulazione sembra comunque essere in contrasto con la realtà, in quanto gli esperimenti hanno dimostrato che il damping nei terreni è quasi sempre indipendente dalla frequenza.

Gli ultimi due termini dell'equazione (2.IV) ($Ku = -[M]\{\ddot{u}_g\} = F$) corrispondono alle deformazioni in campo statico.

In questo caso la teoria viene descritta facendo riferimento alle basi dell'elasticità lineare. Comunque, in linea generale, tutti i modelli implementati in Plaxis prima menzionati possono essere utilizzati per la simulazione di analisi dinamiche.

Il comportamento del suolo può essere sia di tipo drenato che non drenato. In quest'ultimo caso il contributo della rigidità dell'acqua deve essere aggiunto alla matrice K delle rigidezze, così come avviene nelle analisi di tipo statico.

Nella matrice M vengono tenuti in conto tutti i contributi in termini di massa esistenti nel modello (suolo, acqua e costruzioni).

La matrice C rappresenta il fattore di damping dei materiali.

Nella realtà i fenomeni di smorzamento delle onde sono in genere dovuti all'attrito e/o a deformazioni irreversibili (plasticità o viscosità). Maggiori sono le intensità dei fenomeni di plasticizzazione o di viscosità, più energia vibrazionale viene dissipata.

Anche se i modelli scelti sono di tipo elastico-lineare, è possibile comunque tenere in conto il damping con la matrice C .

Per definire C sono necessari dei parametri addizionali di difficile valutazione ed interpretazione. Riferendoci nello specifico ad un modello ad elementi finiti, C viene espressa come funzione, ovvero come combinazione lineare, della matrice delle masse e delle rigidezze (Rayleigh damping) attraverso i coefficienti di damping α_R e β_R di Rayleigh.

$$[C] = \alpha_R[M] + \beta_R[K] \quad (4.IV)$$

In pratica stiamo limitando il problema della determinazione di C alla scelta dei valori α_R e β_R . Quando il contributo delle masse è dominante (ad esempio $\alpha_R = 10^{-2}$; $\beta_R = 10^{-3}$) la maggior parte delle vibrazioni a bassa frequenza vengono smorzate, mentre quando diventa più rilevante il contributo delle rigidezze (ad esempio $\alpha_R = 10^{-3}$; $\beta_R = 10^{-2}$) sono le alte frequenze ad essere attenuate.

Lo standard presuppone un'analisi con $\alpha_R, \beta_R = 0$, mentre invece per arrivare ad una soluzione per le equazioni del moto perfettamente stabile, sarebbe in teoria consigliato utilizzare:

$$\beta \geq 0,5 \quad \alpha \geq \frac{1}{4} (1/2 + \beta)^2 \quad (5.IV)$$

La matrice C di damping viscoso, riferendosi alle analisi nel dominio del tempo, risulta essere dipendente dalla frequenza, come abbiamo già anticipato.

La scelta di una procedura di analisi nel dominio del tempo, piuttosto che nel dominio delle frequenze, permette a Plaxis di ottenere una maggiore stabilità e accuratezza nei processi di calcolo.

La risoluzione delle equazioni di propagazione delle onde può avvenire tramite una schema di integrazione implicito o esplicito.

I vantaggi dell'integrazione esplicita consistono nella sua formulazione relativamente semplice. Parallelamente lo svantaggio è che i processi di calcolo non sono robusti ed impongono limitazioni strette sugli step di calcolo in termini temporali.

Il metodo di integrazione implicito è più complicato, ma la procedura di calcolo è più realistica e stabile, e generalmente si arriva ad una soluzione più accurata.

Plaxis utilizza il metodo implicito secondo lo schema di Newmark, di cui si rimanda a testi specifici riportati in bibliografia lo svolgimento dei procedimenti di calcolo.

Ritornando alla determinazione della matrice C di damping, essa dipende dalla rigidezza, dalla massa e dal "natural mode" per la colonna di suolo considerata. I "natural modes" e la rigidezza della colonna di suolo possono essere ricavati a partire dai profili della velocità trasversale. Più recenti formulazioni, utilizzano una forma semplificata della matrice C di damping, che risulta proporzionale alla sola rigidezza.

Hudson (1994) e Hashash & Park (2002) descrivono in maniera accurata la formulazione di Rayleigh in termini di analisi di risposta dinamica di un sito.

Assumendo che il fattore di smorzamento ξ costante lungo il profilo verticale del suolo, i valori scalari possono essere ricavati utilizzando due fattori significanti, definiti come "natural modes", m e n utilizzando la seguente espressione:

$$\begin{bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{f_m} & f_m \\ \frac{1}{f_n} & f_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_s \\ \beta_s \end{Bmatrix}. \quad (6.IV)$$

dove f_m e f_n sono le frequenze naturali riferite al corrispondente fattori m e n , calcolabili attraverso l'espressione (Kramer, 1996) di seguito riportata:

$$f_n = \frac{V_s}{4H} (2n - 1) \quad (7.IV)$$

E' pratica comune scegliere frequenze che corrispondono una al primo fattore naturale e l'altra ad un fattore naturale multiplo del primo, che in pratica corrisponde alla frequenza predominante delle vibrazioni (Hudson, 1994; Rathje & Bray, 2001; Borja et al., 2002).

Siccome è noto che i parametri di damping, successivamente indicati come ξ_m e ξ_n per rispettare la coerenza con le figure riportate, sono indipendenti dalla frequenza, è necessario imporre l'ulteriore condizione $\xi_m = \xi_n$ per poter poi calcolare α_R , β_R .

L'equazione (6.IV) individua invece una dipendenza del damping dalla frequenza, nonostante l'ulteriore condizione da noi successivamente imposta che $\xi_m = \xi_n$, come è riscontrabile in figura 4.2.

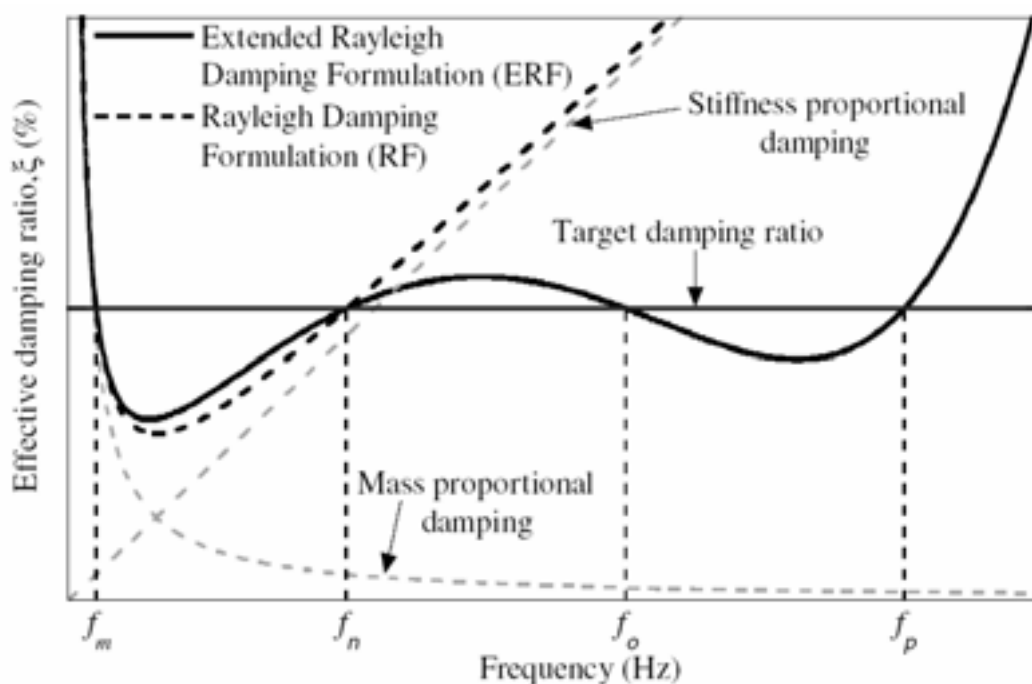


Fig. 4.2 - Damping effettivo (dipendente dalla frequenza) calcolato a partire dalla formulazione di Rayleigh (RF) e dalla formulazione estesa di Rayleigh (ERF). Da notare che la formulazione RF assume valori coincidenti con il valore di damping prestabilito in corrispondenza di due frequenze, mentre la formulazione ERF in corrispondenza di quattro frequenze.

L'equazione (6.IV) può essere estesa a più di due frequenze naturali, secondo la formulazione estesa di Rayleigh.

Senza addentrarci ulteriormente in una serie di calcoli che esulano dall'obiettivo di questo studio, possiamo comunque anticipare che, utilizzando una condizione di ortogonalità tra le matrici di massa e rigidezza, la matrice di damping può essere espressa sottoforma di una qualunque combinazione lineare delle matrici di massa e rigidezza come di seguito riportato:

$$[C] = [M] \sum_{b=0}^{N-1} a_b [[M]^{-1} [K]]^b, \quad (8.IV)$$

dove N è il numero di frequenze incorporato.

I coefficienti di Rayleigh, di seguito indicati come a_b possono essere ricavati a partire dalla seguente formula:

$$\xi_n = \frac{1}{4\pi f_n} \sum_{b=0}^{N-1} a_b (2\pi f_n)^{2b}. \quad (9.IV)$$

Nel caso pratico di formulazione estesa, rappresentata anche in figura 4.2, l'equazione (9.IV) può essere rappresentata in forma matriciale come segue:

$$\begin{bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \\ \xi_o \\ \xi_p \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{f_m} & f_m & f_m^2 & f_m^5 \\ \frac{1}{f_n} & f_n & f_n^2 & f_n^5 \\ \frac{1}{f_o} & f_o & f_o^2 & f_o^5 \\ \frac{1}{f_p} & f_p & f_p^2 & f_p^5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix}, \quad (10.IV)$$

Nella formulazione di Rayleigh, la dipendenza del damping dalla frequenza naturale implica che l'accuratezza della soluzione nel dominio del tempo dipenda dalla scelta opportuna delle frequenze utilizzate per il calcolo dei fattori di damping.

E' stata condotta una serie di analisi per esaminare l'influenza delle suddette frequenze nell'ambito della formulazione del damping di Rayleigh e come scegliere l'ottimo tra i possibili valori delle frequenze naturali.

Riassumendo, l'ottimo è stato individuato dal confronto tra la soluzione lineare ottenuta nel dominio del tempo (in cui la frequenza dipende dal damping), e la soluzione lineare nel dominio delle frequenze (in cui la frequenza non dipende dal damping) che rappresenta la soluzione esatta. In pratica la soluzione ottenuta dall'analisi equivalente lineare viene utilizzata per ricondurre l'analisi non lineare.

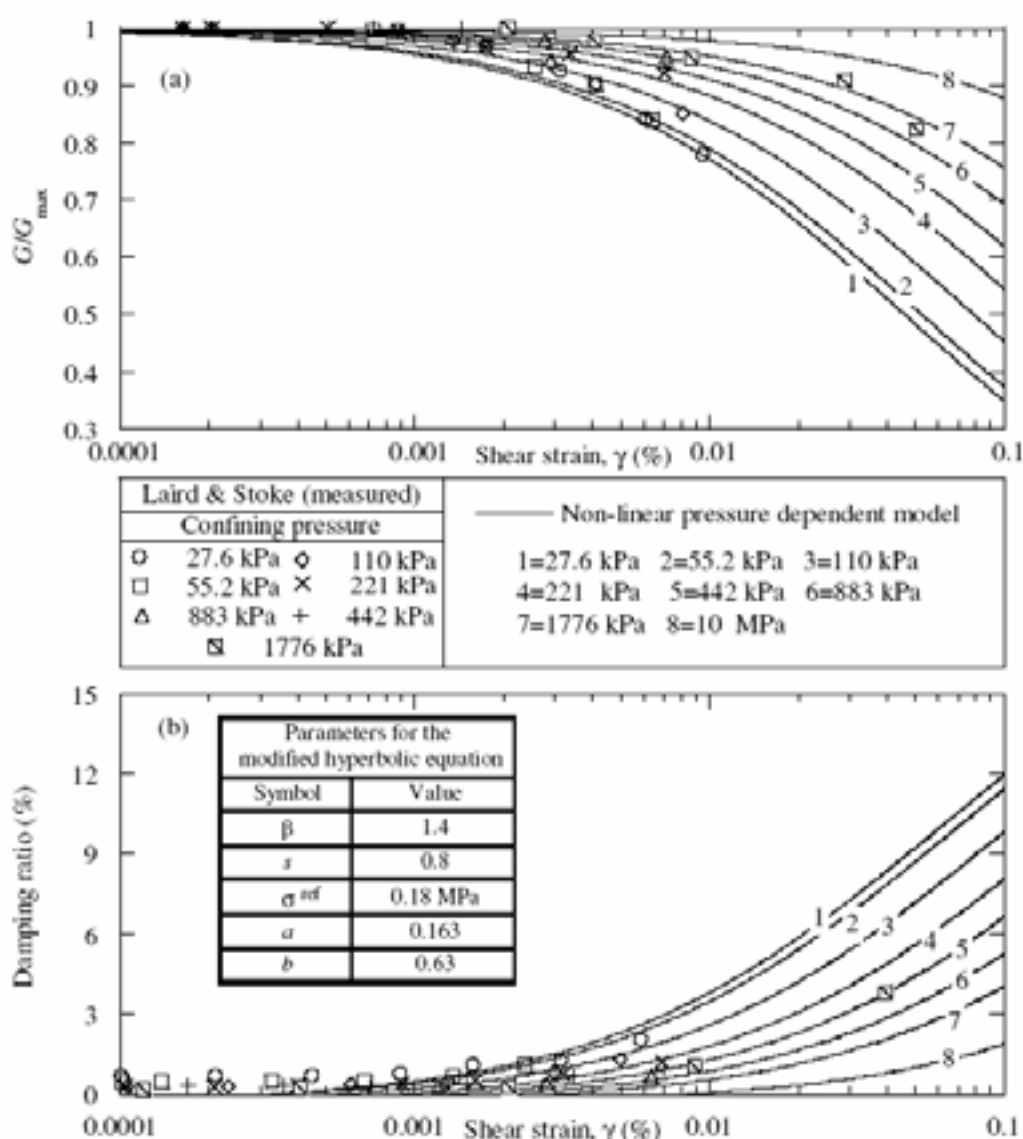


Fig. 4.3 - Influenza delle tensioni di confinamento sul modulo di riduzione e sulle curve di damping ricavate dall'analisi non lineare con DEEPSOIL

Hashash e Park hanno effettuato degli studi in tal senso, utilizzando per condurre sia l'analisi lineare che l'analisi non lineare il programma DEEPSOIL.

Le analisi sono state condotte facendo riferimento al profilo stratigrafico ed alle condizioni locali di "Mississippi Embayment" e per la simulazione del terremoto si è fatto riferimento a due serie storiche registrate e due serie sintetiche.

Per i dettagli di questo studio è possibile far riferimento ai testi riportati in bibliografia.

Ciò che si ritiene utile riportare sono invece i grafici di figura 4.3 in cui viene evidenziata la dipendenza delle curve del modulo di riduzione e damping in funzione delle deformazioni di taglio dalle tensioni di confinamento; tenere in conto questa dipendenza diventa utile nel momento in cui si deve eseguire un'analisi dinamica su depositi di notevole profondità.

4.3 - Fase di Calcolo

Nella fase di calcolo è possibile definire i carichi dinamici attivando gli spostamenti imposti lungo una superficie ed i carichi come funzioni del tempo.

Senza scendere troppo nel dettaglio, nei seguenti paragrafi verranno date alcune informazioni relativamente

- Selezione dell'analisi dinamica
- Parametri dinamici:
 - step temporali (time stepping)
 - parametri Newmark (Newmark parameters)
- Carichi dinamici:

Carichi armonici (Harmonic loading)

Implementazione dei carichi da file (Load multipliers from file)

Carico istantaneo (block load)

4.3.1 - Selezione dell'analisi dinamica

Il calcolo dinamico può essere definito, selezionando Dynamic analysis nella casella di scelta del tipo di calcolo, nel foglio delle caratteristiche generali della fase di calcolo.

Con Plaxis è possibile eseguire analisi dinamiche anche dopo una serie di calcoli di tipo plastico, nonostante esistano alcune limitazioni:

- Non è possibile aggiornare la mesh durante la simulazione dinamica
- Non è possibile selezionare l'opzione "stage construction" ovvero variare la geometria del modello simulando scavi o riporti, durante l'esecuzione di un'analisi dinamica

4.3.2 - Parametri dell'analisi dinamica

Nella tabella dei parametri del programma di calcolo è possibile impostare i valori dei parametri di controllo dell'analisi.

> Dynamic time

Un'analisi dinamica utilizza diversi parametri temporali rispetto ad altri tipi di calcoli.

Il Dynamic time viene espresso sempre in secondi, a prescindere dall'unità di misura selezionata nella finestra delle impostazioni generali.

Quando si eseguono più fasi di calcolo, alternativamente statiche e dinamiche, il Dynamic time viene progressivamente incrementato solo nelle fasi di calcolo dinamico, anche se non sono successive.

Bisogna ricordare che quando si tratta di fenomeni come la consolidazione o il creep, i tempi sono in genere lunghi per poter rendere apprezzabili gli effetti finali; di conseguenza un calcolo in cui si studia la consolidazione di un rilevato deve essere impostato facendo riferimento ad un'ampia scala temporale.

Quando si esegue un'analisi dinamica, l'interazione causa-effetto si limita a pochi secondi.

Il parametro generale che tiene conto del tempo totale come se si trattasse di un fenomeno reale, viene generalmente espresso in giorni. Quando un calcolo è composto da più fasi, il programma somma tutti i contributi temporali delle singole fasi (statiche e dinamiche) convertendo automaticamente le unità di misura per renderle confrontabili.

> Time stepping

Lo step temporale utilizzato nel calcolo dinamico è costante e pari a $\delta t = \Delta t / (n * m)$, dove Δt è la durata del carico dinamico (Time interval), n è il numero di step addizionali, mentre m è il numero dei substep dinamici.

> Time interval

Per ogni fase di calcolo è necessario specificare il "Time interval" nel foglio dei parametri di calcolo.

La stima dell' "end time", ovvero del tempo totale di esecuzione dei calcoli di tutte le fasi impostate, viene fatta automaticamente dal programma, sommando tutti gli intervalli per le singole fasi.

Quando il calcolo viene eseguito, in output viene indicato l' "end time" definitivo.

Nell'analisi dinamica anche il "Time interval" deve essere espresso in secondi.

> Additional steps

Plaxis arriva al risultato finale del calcolo in una serie di steps. Le impostazioni standard prevedono che il numero degli "Additional steps" sia 250, ma è possibile inserire un qualsiasi valore compreso tra 1 e 250.

> Delete intermediate steps

In Plaxis è possibile creare output animati a partire dai risultati di un'analisi dinamica. Inoltre se si desidera l'output non solo dello stato iniziale e finale, ma anche di uno stato intermedio, è necessario specificare al programma di non cancellare gli step intermedi, deselezionando opportunamente l'opzione.

4.3.3 - Settaggio manuale della procedura iterativa

Nella finestra del "Manual setting" è possibile modificare manualmente i parametri di controllo della procedura di convergenza dell'algoritmo di calcolo, ovvero l'errore tollerato, il massimo numero di iterazioni, il numero dei substep dinamici, i parametri di Newmark ed i contorni assorbenti.

In generale è conveniente eseguire i calcoli con i valori standard che il programma ricostruisce automaticamente. Qualora invece fossero disponibili delle informazioni che possano permettere di individuare un valore migliore dei parametri in questione, la correzione è consentita.

> Dynamic substeps

Per ciascun addizionale step di calcolo, Plaxis calcola il numero di substep necessari per raggiungere "l'end time" stimato con sufficiente accuratezza, sulla base del tipo di discretizzazione della mesh utilizzato, e del calcolato dt critico calcolato dal programma (vedere nello specifico il manuale di riferimento). Se la velocità delle onde (funzione della rigidità dei materiali) nel modello è soggetta a sensibili variazioni, oppure se la

mesh ha un elevato grado di infittimento, il valore standard dei substep può diventare anche molto grande, allungando enormemente il tempo di calcolo.

In questa situazione si consiglia di ridurre il numero individuato automaticamente dal programma, anche se è necessario prestare attenzione all'accuratezza dei risultati ottenuti.

> *Newmark α e β*

I parametri α e β di Newmark permettono in un certo senso di determinare le modalità di integrazione nel dominio del tempo delle equazioni degli spostamenti indotti dalla propagazione delle onde.

Tale argomento è stato sufficientemente ben trattato nel paragrafo 4.2.4.

> *Boundary C1 and C2*

C1 e C2 rappresentano dei coefficienti di rilassamento, utilizzati dal programma per aumentare e migliorare l'assorbimento delle onde lungo appunto le superfici assorbenti.

C1 corregge la dissipazione in direzione normale alla superficie, mentre C2 in direzione tangenziale.

Se le superfici sono soggette all'incidenza di sole onde di compressione, il rilassamento non è necessario ed i coefficienti C1 e C2 possono essere posti pari a 1.

Quando si considera la presenza delle onde trasversali (in genere è il caso più frequente), C2 deve essere scelto opportunamente per incrementare l'assorbimento in direzione tangenziale.

4.3.4 - Carichi dinamici

Come abbiamo già precedentemente accennato, i carichi dinamici possono essere di tipo armonico, istantaneo, oppure implementati da file esterni (ASCII file oppure SMC file per un terremoto di progetto).

La fase di input dei carichi dinamici avviene contestualmente alla fase di input del modello. Rispetto alle analisi in campo statico, dopo aver individuato nel modello geometrico la posizione dei carichi e degli spostamenti, l'analisi dinamica prevede che gli stessi vengano opportunamente selezionati come dinamici affinché, nella fase di calcolo, sia possibile riconoscerli come tali ed assegnare loro le caratteristiche opportune

4.3.5 - Carichi armonici

In Plaxis i carichi di tipo armonico sono definiti in base all'equazione:

$$F = M \underline{F} \sin(\omega t + \phi_0)$$

dove

M = ampiezza del "multiplier"

\underline{F} = valore di input del carico

$\omega = 2\pi f$ dove f è la frequenza in cicli per unità di tempo dinamico (secondi)

ϕ_0 = iniziale angolo di fase della funzione seno espresso in gradi

4.3.6 - Implementazione di file con la digitalizzazione dei segnali

Parallelamente alla possibilità di creare manualmente la funzione di carico, Plaxis legge anche i dati da file contenenti le funzioni d'onda digitalizzate, in formato ASCII o SMC.

Il file ASCII può essere creato dall'utente utilizzando un qualsiasi editor di testo, invece il formato SMC (Strong motion CD-ROM) è utilizzato correntemente dall' "U.S. Geological Survey National Strong-motion Program" per registrare i dati dei terremoti o di altri eventi di elevata intensità vibrazionale.

La maggiorparte dei file formato SMC contengono dati relative alle accelerazioni, ma possono contenere anche dati relativi alle velocità e deformazioni.

4.3.7 - Modellazione dei carichi istantanei "block loads"

Un carico dinamico può infatti essere applicato in un singolo step o sub-step (block load). A questo punto ci sono due possibilità; nella prima il block load viene simulato come un carico armonico con frequenza nulla, angolo di fase iniziale pari a 90° e ampiezza del moltiplicatore dei carichi pari alla magnitudine del carico considerato.

Un'alternativa è utilizzare un apposito file ASCII nel quale è stato definito il "block load".

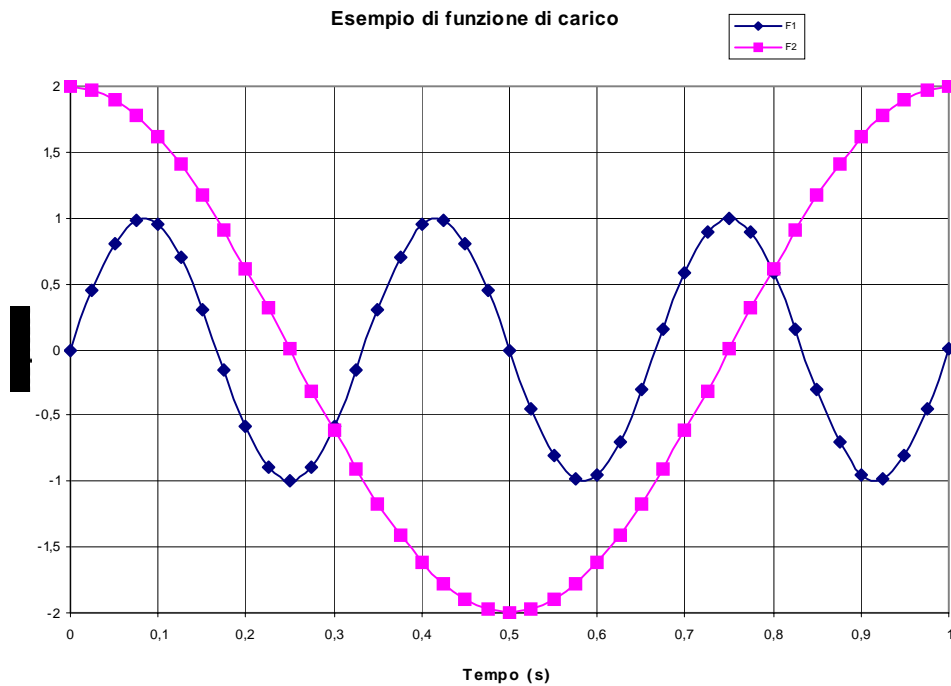


Fig. 4.4 - Esempio di funzioni di carico

4.4 - Fase di Output

La fase di input consiste essenzialmente nel visualizzare delle animazioni, non solo in corrispondenza degli steps iniziale e finale dell'analisi, ma anche in corrispondenza di step intermedi, che riproducono il tipo di movimento oscillatorio cui è sottoposto il modello geometrico oggetto di analisi.

Inoltre è possibile visualizzare gli andamenti delle componenti verticali ed orizzontali sia delle velocità che delle accelerazioni.

Per ulteriori dettagliate informazioni si rimanda al manuale di riferimento.

Capitolo 5 - Analisi Dinamica con il programma a Elementi Finiti PLAXIS

5.1 - Introduzione all'analisi

Lo svolgimento di un'analisi dinamica richiede una grande attenzione in fase di calibrazione del modello e soprattutto nella fase di scelta dei parametri di input dei modelli costitutivi dei materiali. Se poi l'analisi dinamica deve essere eseguita su una discarica, le incertezze e le difficoltà si complicano ulteriormente in quanto i dati di letteratura sono ad oggi scarsi sia perchè l'attenzione ai problemi legati alla stabilità statica e dinamica dei depositi di rifiuti è stata sollevata solo di recente, e sia perchè il comportamento meccanico dei rifiuti, per la variabilità e dipendenza da innumerevoli fattori, è ancora oggi oggetto di studio.

Per cominciare ad inquadrare il problema della stabilità di una discarica, si è ritenuto opportuno procedere ad una analisi statica applicata alla discarica di Hiriya a Tel Aviv, confrontandone i risultati con quelli ottenuti da Isenberg (R.H. Isenberg, 2003).

L'obiettivo dell'analisi era duplice: in primo luogo era necessario calibrare il modello, valutando se il programma Plaxis era in grado di fornire risultati compatibili con quelli ottenuti da Isenberg, ed in secondo luogo era necessario elaborare delle preliminari considerazioni sul comportamento dei rifiuti in condizioni statiche, valutando l'entità delle deformazioni e degli sforzi mobilitati e le limitazioni dell'adozione di un modello costitutivo "semplice" come quello di Mohr Coulomb rispetto ad un altro modello più complesso.

Lo studio è poi proseguito ripetendo l'analisi di stabilità sulla base di un nuovo comportamento meccanico dei rifiuti, che si basa su una variazione delle caratteristiche meccaniche al variare della deformazione del corpo dei rifiuti (S. De Mei, 2001).

Questo approccio è basato su prove di laboratorio condotte su campioni di grandi dimensioni (M. Grisolia, Q. Napoleoni, 2004; M. Grisolia, Q. Napoleoni, P. Pravato, 2000; M. Grisolia, Q. Napoleoni, 1997; M. Grisolia, Q. Napoleoni, 2004, G. Tancredi, 1995; M. Grisolia, Q. Napoleoni, 2004, G. Tancredi, 1995)

I risultati delle prove di laboratorio così elaborate hanno permesso sia di stimare delle nuove proprietà meccaniche per il rifiuto, sia di ripetere, rispettando alcuni particolari

accorgimenti di cui in seguito sarà data spiegazione, prima l'analisi statica e poi successivamente passare ad effettuare l'analisi dinamica.

Nei successivi paragrafi verranno progressivamente decritti i risultati delle varie fasi di cui il presente studio è andato costituendosi.

5.2 - La discarica di Hiriya, Tel Aviv

5.2.1 - Risultati dell'analisi di stabilità

L'approccio dello studio condotto da Isenberg parte dal presupposto di dover inquadrare la stabilità della discarica in un senso più generale.

I problemi di stabilità possono infatti sorgere ancor prima che il rifiuto sia allocato in discarica, ovvero nella fase di scavo.

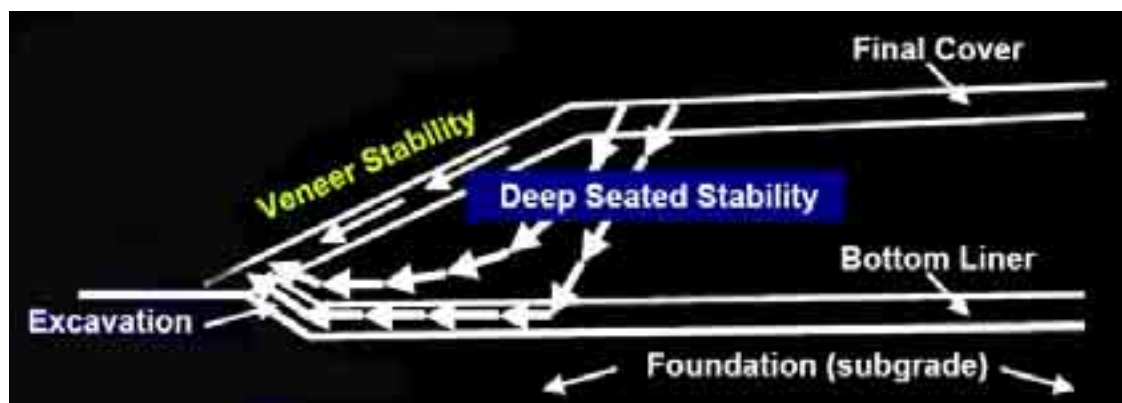


Fig. 5.1 - Schematizzazione dei possibili fenomeni di instabilità (Isenberg, 2003)

Facendo inoltre riferimento alla figura 5.1, i fenomeni di instabilità possono essere correlati a rotture sia all'interno del corpo della discarica sia lungo le pareti laterali, sia nello strato di copertura superficiale.

Non da ultimi sono i problemi associati ai cedimenti del piano di fondazione cui può essere correlata la possibilità di danneggiare il sistema di impermeabilizzazione del letto della discarica, ed i problemi legati alla capacità portante del substrato.

E' evidente come il concetto di stabilità non si riduca ad un unico aspetto, ma che investa diverse problematiche la cui valutazione contemporanea diventerebbe inapplicabile.

Nel caso dello studio di Isenberg, il substrato possiede delle caratteristiche di rigidità tali da poter escludere tutti quei problemi che potrebbero essere associati al cedimento del



Fig. 5.2.a - Immagini della discarica di Hiriya prima della frana



Fig. 5.2.b - Immagini della discarica di Hiriya prima della frana

piano di fondazione. Inoltre nella simulazione del modello non è stata presa in considerazione nè la presenza dello strato di ricoprimento superficiale nè quello di fondo. Le simulazioni iniziali sono state condotte facendo riferimento ad un rifiuto omogeneo i cui parametri di resistenza al taglio fossero compresi nel range di valori indicato dalla linea blu in figura 5.3.

L'aspetto del rifiuto che ha raggiunto la quasi completa saturazione è quello presentato in figura 5.4.

Per poter condurre l'analisi di stabilità sono stati utilizzati essenzialmente i programmi di calcolo PCSTABL, UTEXAS3, XSTABL.

L'analisi inizialmente condotta è stata successivamente raffinata considerando non più un rifiuto omogeneo nello spazio, ma bensì una successione di tre strati caratterizzati da differenti valori sia del peso di volume che dei parametri di resistenza al taglio.

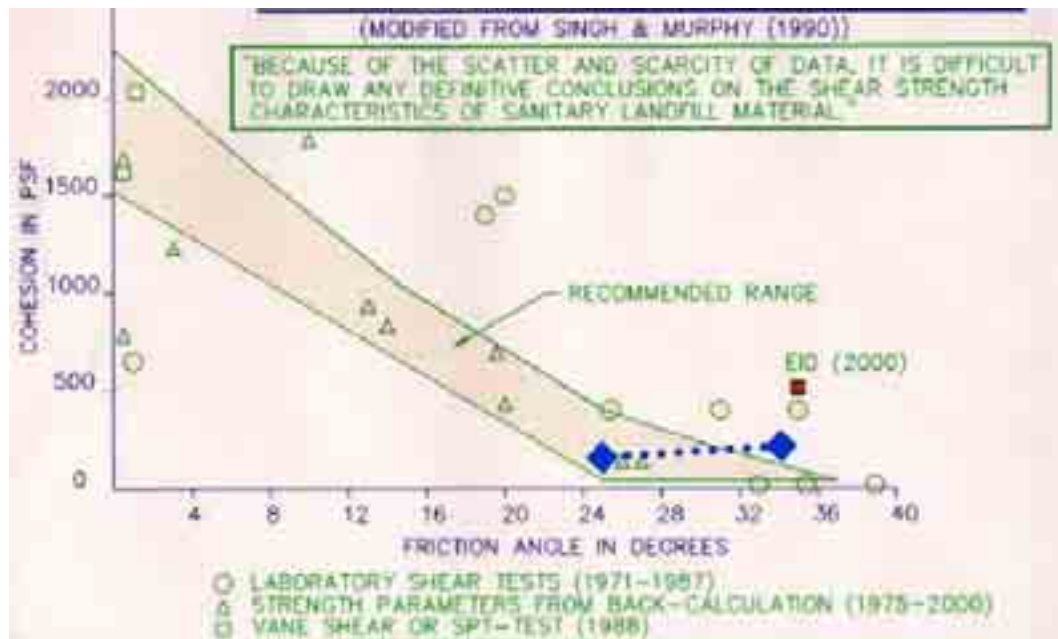


Fig. 5.3 - Range di valori per i parametri di resistenza al taglio (Isenberg, 2003)



Fig. 5.4 - Rifiuto in condizione di semi saturazione, discarica di Hiriya

L'analisi dei dati ottenuti dalle prove di laboratorio, ovvero prove di taglio semplice e prove triassiali su campioni di grande diametro, ha indotto l'autore ad utilizzare il modello costitutivo di Mohr Coulomb con valori della coesione e dell'angolo di attrito equivalenti e dipendenti in realtà da molteplici fattori come:

- merceologia e tipo di rifiuto
- grado di compattazione
- aggiunta di liquidi

- copertura giornaliera
- densità
- contenuto di umidità
- età

Per quanto riguarda la definizione delle proprietà meccaniche è possibile far riferimento alla tabella 1.V.

La simbologia 0, I, II, III è stata utilizzare per indicare il tipo di rifiuto in base ad una classe crescente di densità, a secondo delle modalità di preparazione del campione.

I valori inizialmente erano riportati in un sistema di misura diverso da quello internazionale, ma nella tabella 1.V tali valori sono stati riconvertiti.

STRATO Biotipo	DENSITA' (kN/m ³) 0→III	ANGOLO ATTRITO (°) 0→III	COESIONE (kN/m ²) 0→III
Superiore	7,1 → 12,4	26 → 18	9,6 → 1,9
Intermedio	8,6 → 15,1	30 → 22	12 → 2,4
Inferiore	10,2 → 17,9	34 → 26	14,4 → 2,9

Tab. 1.V - Parametri di resistenza al taglio per le classi di rifiuto al variare della profondità

Per quanto riguarda i risultati dell'analisi è possibile far riferimento alla figura 5.5, ma i calcoli si riferiscono al caso semplificato di rifiuto omogeneo, e non al caso di rifiuto differenziato in base alla profondità, come risulta riportato in tabella 1.V.

Facendo riferimento ai metodi bidimensionali dell' equilibrio limite, al fine di pervenire ai risultati ivi proposti sono stati utilizzati i classici metodi dei concetti di Bishop, Jambu etc. sui quali esiste una notevole documentazione bibliografica.

Nell'anno 1997 le sponde laterali della discarica di Hiriya crollarono, come riportato anche in figura 5.6.

Dai dati rilevabili in superficie è stato possibile desumere che la posizione della superficie di rottura è stata calcolata in maniera abbastanza precisa.

La rottura del pendio ha una forma di tipo circolare, in accordo con i metodi all'equilibrio limite sopra accennati, ed interessa solamente il corpo della discarica, partendo dal piede fino a raggiungere la sommità.

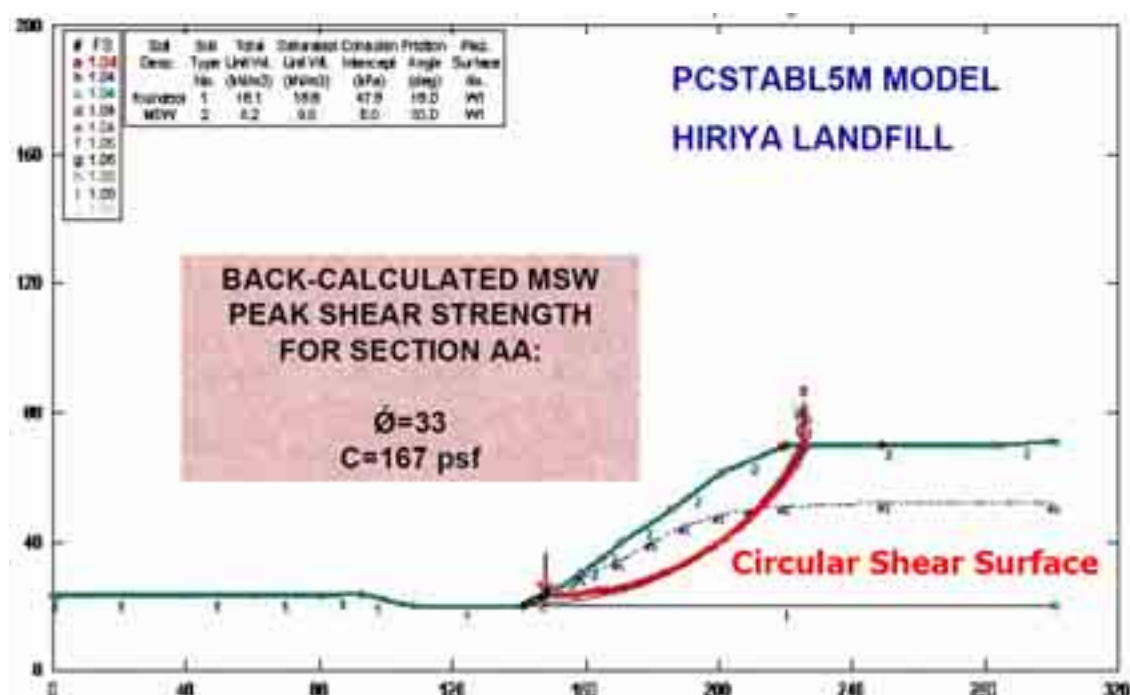


Fig. 5.5 - Risultati dell'analisi di stabilità condotta con il programma PCSTABL5M ($c' = 8$ KPa, $\phi' = 33^\circ$)

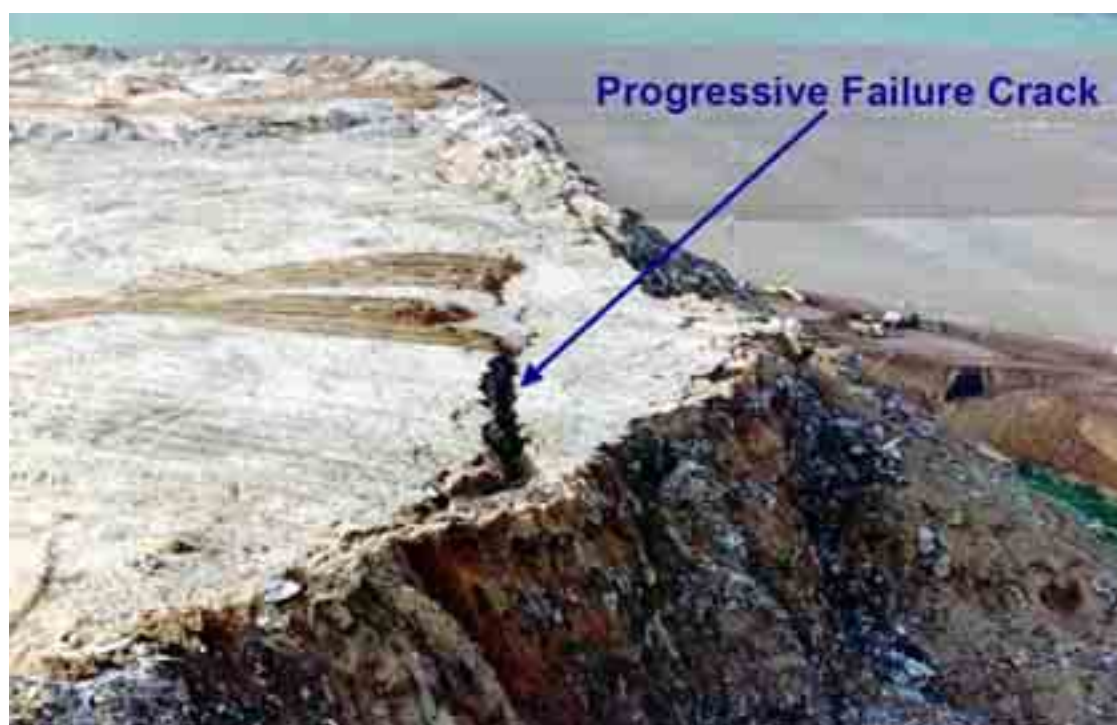


Fig. 5.6 - Il caso reale della discarica di Hiriya (1997)

Nel paragrafo successivo vedremo invece i risultati ottenuti con il programma ad elementi finiti PLAXIS, per poterli confrontare.

5.2.2 - Risultati dell'analisi di stabilità ottenuti con PLAXIS

5.2.2.1 - Impostazione dell'analisi

I risultati che verranno proposti e commentati in questo paragrafo fanno riferimento ad un'analisi condotta sul modello geometrico differenziato sulla base di quanto indicato dalla tabella 1.V; il corpo della discarica è stato suddiviso secondo tre strati, ovvero "layer", per rendere più rappresentativa l'analisi in base ai successivi risultati ottenuti da Isenberg per valutare la sensibilità dei parametri di resistenza al taglio alla variazione di altri parametri come la densità.

Quanto riportato in tabella 1.V è frutto anche di una valutazione della dipendenza del peso di volume da:

- pressione di consolidazione
- effetti della compattazione
- spessore della copertura giornaliera
- tempo e cedimenti
- variazioni del contenuto di umidità

L'esecuzione dell'analisi è partita con la definizione del modello geometrico, con la definizione dei modelli costitutivi dei terreni ed infine con la scelta dell' opportuno grado di infittimento della mesh.

Dall'esame di figura 5.7 ci si rende conto che il modello è stato discretizzato attraverso una mesh con un grado di infittimento medio-basso, essendo stato valutato che il risultato finale differiva poco rispetto a quello ottenibile da un infittimento maggiore; la scelta di utilizzare un basso grado di infittimento è legata anche, ed in maniera sicuramente

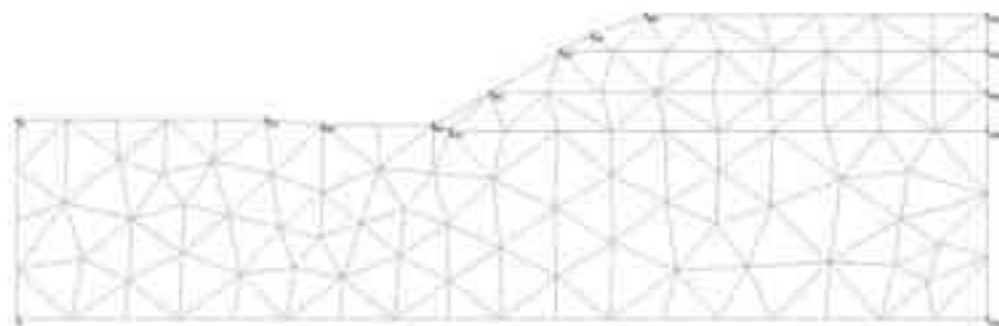


Fig. 5.7 - Discarica di Hiriya: generazione della mesh con la posizione dei nodi significativi

Tipologia	Tipologia elementi	Tipologia integrazione	N° totale
Suolo	15-nodi	12-punti di Gauss	180

Tab. 2.V - Numero e tipologia di elementi per l'integrazione.

rilevante, alla sensibile riduzione dei tempi di calcolo.

In tabella 3.V sono invece riepilogate le caratteristiche meccaniche dei terreni e la loro individuazione nel modello geometrico.

Tab. 3.V Mohr-Coulomb		1 substrato	2 RSU superficiale	3 RSU intermedio	4 RSU inferiore
Tipologia		drenato	drenato	drenato	drenato
γ_{unsat}	[kN/m ³]	18,10	8,20	11,00	12,80
γ_{sat}	[kN/m ³]	18,80	9,80	13,30	15,30
k_x	[m/day]	0,001	0,010	0,010	0,010
k_y	[m/day]	0,001	0,010	0,010	0,010
e_{init}	[-]	0,500	0,500	0,500	0,500
c_k	[-]	1E15	1E15	1E15	1E15
E_{ref}	[kN/m ²]	200000	4000	5000	6000
ν	[-]	0,200	0,300	0,300	0,300
G_{ref}	[kN/m ²]	83333	1538	1923	2307,692
E_{oed}	[kN/m ²]	222222	5384	6730	8077
c_{ref}	[kN/m ²]	48,00	6,80	7,10	8,50
ϕ	[°]	18,00	23,00	26,00	30,00
ψ	[°]	0,00	0,00	0,00	0,00
E_{inc}	[kN/m ² /m]	0,00	0,00	0,00	0,00
y_{ref}	[m]	0,000	0,000	0,000	0,000
$c_{\text{increment}}$	[kN/m ² /m]	0,00	0,00	0,00	0,00
$T_{\text{str.}}$	[kN/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00
$R_{\text{inter.}}$	[-]	1,00	1,00	1,00	1,00
Permeabilità di interfaccia		Neutrale	Neutrale	Neutrale	Neutrale

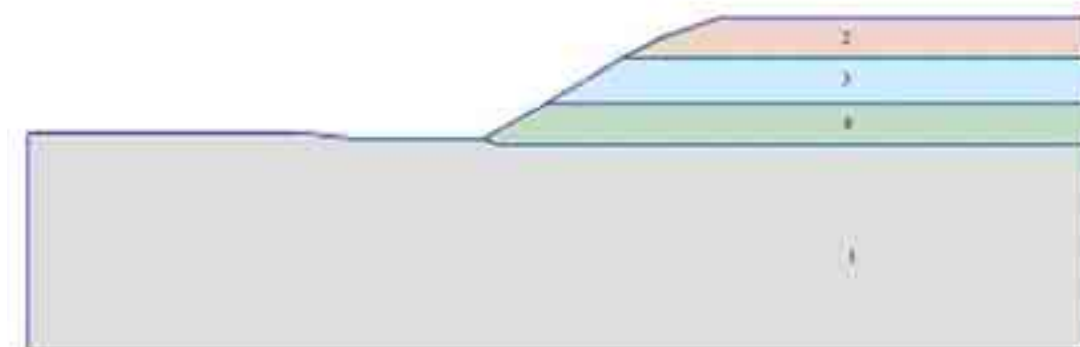


Fig. 5.8 - Stratigrafia del modello della discarica di Hiriya

Anche se ora non visibile, il livello della falda, utilizzato per ricostruire l'andamento delle pressioni interstiziali iniziali, è stato ricostruito sulla base di ciò che era visibile in figura 5.5.

5.2.2.2 - Esecuzione dell'analisi ed output finali

Dato che la geometria del modello non è piana, la determinazione dello stato tensionale iniziale non è stata effettuata tramite la procedura K0, già implementata nel programma, poichè avrebbe potuto portare a dei risultati incongruenti; pertanto lo stato tensionale della discarica è stato ricostruito attraverso una specifica fase di calcolo di cui riportiamo brevemente alcuni risultati.

Per effetto del peso proprio il corpo della discarica è soggetto ad un cedimento complessivo di 1,05 m, a fronte di un'altezza totale di circa 40 m. Si tratta di deformazioni notevoli, ma comunque basse rispetto a quelle che normalmente sono visibili in discarica.

La scelta di utilizzare il modello costitutivo di Mohr-Coulomb, a causa della mancanza dei dati necessari per adottare un modello più complesso, impedisce di tenere in conto gli effetti legati al creep, e quindi lo sviluppo progressivo dei cedimenti secondari nel tempo. Queste considerazioni comunque esulano lo scopo di questa prima analisi.

Nelle figure 5.10 e 5.11 sono invece riportati i valori delle deformazioni orizzontali e verticali separatamente.

Mentre i cedimenti verticali sono pressochè uniformi in tutto il cumulo di rifiuti, le deformazioni orizzontali assumono valori rilevanti sono in prossimità della sponda laterale.

E' immediato quindi già intuire che l'eventuale meccanismo di rottura, calcolato dal programma attraverso l'analisi di stabilità, sarà localizzato in prossimità delle sponde laterali.

A conferma di questa conclusione preliminare, basta osservare fig. 5.12 dove è rappresentato l'andamento delle deformazioni di taglio nel corpo del rifiuto.

Le deformazioni di taglio incrementano soprattutto in prossimità del piede della discarica, a conferma del fatto che quella zona potrebbe essere soggetta ad un'eventuale rottura.

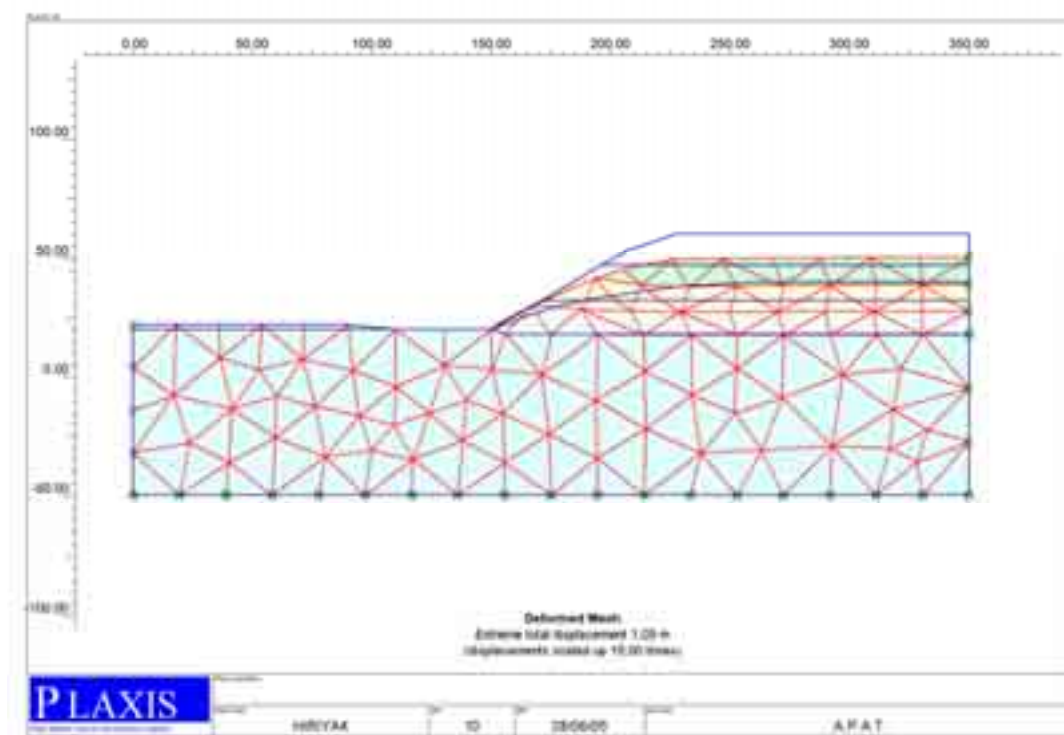


Fig. 5.9 - Mesh deformata per effetto del peso proprio del rifiuto (simulazione discarica di Hiriya)

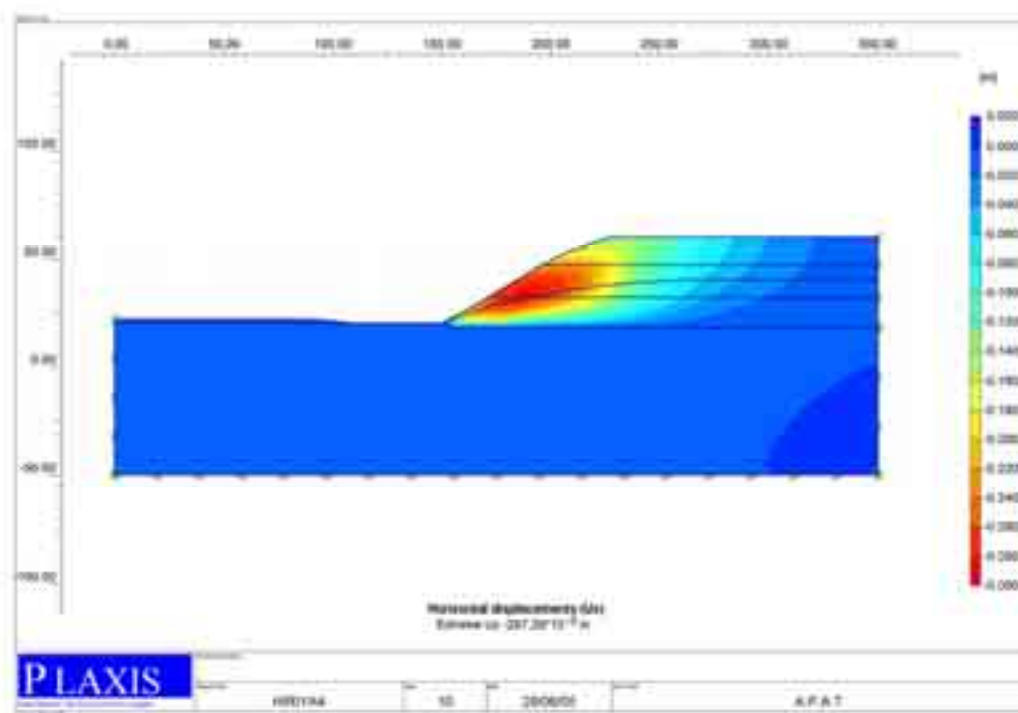


Fig. 5.10 - Deformazioni orizzontali (simulazione discarica di Hiriya)

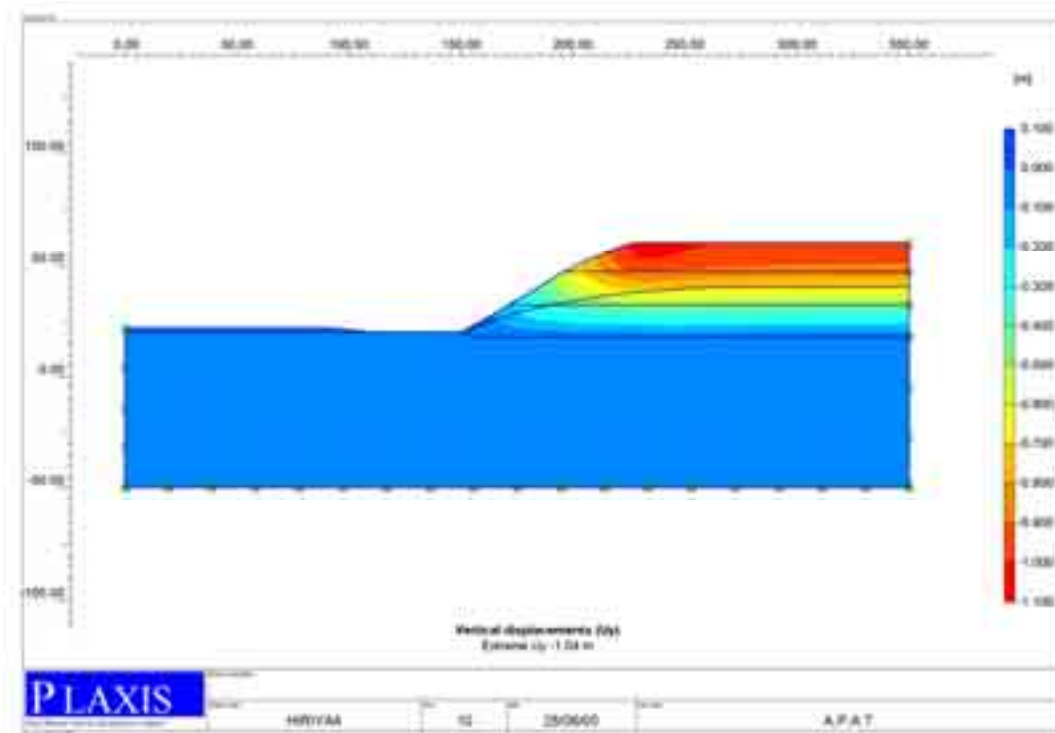
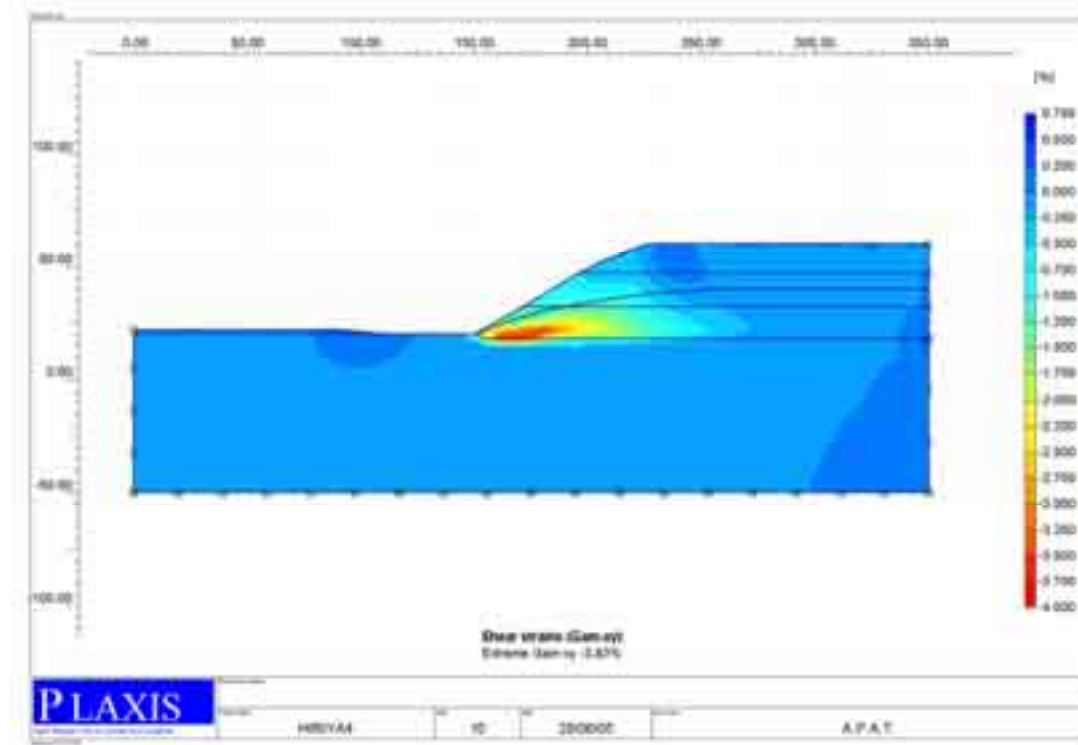


Fig. 5.11 - Cedimenti verticali (simulazione discarica Hiriya)

Fig. 5.12 - Deformazioni di taglio γ_{xy} (simulazione discarica Hiriya)

Un'analisi di stabilità in PLAXIS può essere eseguita riducendo i parametri di resistenza del terreno; tale processo è denominato *Phi-c reduction* ed è disponibile come un tipo di calcolo separato.

Phi-c reduction deve essere selezionato se si desidera calcolare un fattore di sicurezza globale per il problema in studio. Un'analisi di stabilità può essere eseguita dopo ogni singola fase di calcolo, e quindi per ogni fase di costruzione.

Comunque, si noti che la fase di *Phi-c reduction* non può essere utilizzata come condizione di partenza per un'altra fase di calcolo perché termina con una condizione di rottura; per questo motivo è consigliabile definire tutte le analisi di stabilità alla fine dell'elenco delle fasi di calcolo ed utilizzare il parametro *Start from phase* come riferimento per la fase di calcolo per la quale è stato calcolato il fattore di sicurezza.

Quando si esegue un'analisi di stabilità, nessun carico può essere contemporaneamente incrementato, infatti, il *Phi-c reduction* è uno speciale calcolo plastico; in questo caso l'input di un incremento di tempo non è in genere rilevante.

Quando si esegue un calcolo di tipo *Phi-c reduction* con modelli di terreno avanzati, il comportamento di questi sarà ridotto a quello del modello *Mohr-Coulomb*, poiché nel calcolo saranno trascurati sia la dipendenza della rigidità dallo stato tensionale sia l'incrudimento plastico. In questo caso, la rigidità viene calcolata all'inizio della fase di calcolo e mantenuta costante fino al suo completamento.

Il risultato dell'analisi condotta con il programma Plaxis ha portato ad individuare come possibile meccanismo di rottura quello rappresentato in figura 5.13 e 5.14: l'entità degli incrementi degli spostamenti non deve essere presa in considerazione.

Il modulo e la direzione delle frecce indicano rispettivamente l'entità e la direzione degli spostamenti.

La visualizzazione cromatica sicuramente permette di individuare meglio la superficie di rottura.

Per quanto riguarda il coefficiente di sicurezza, dalla figura 5.15 possiamo ricavare per F_s un valore di circa 1.047, che in pratica ricalca quello che è stato il risultato ottenuto da Isenberg, nella simulazione semplificata di rifiuto omogeneo.

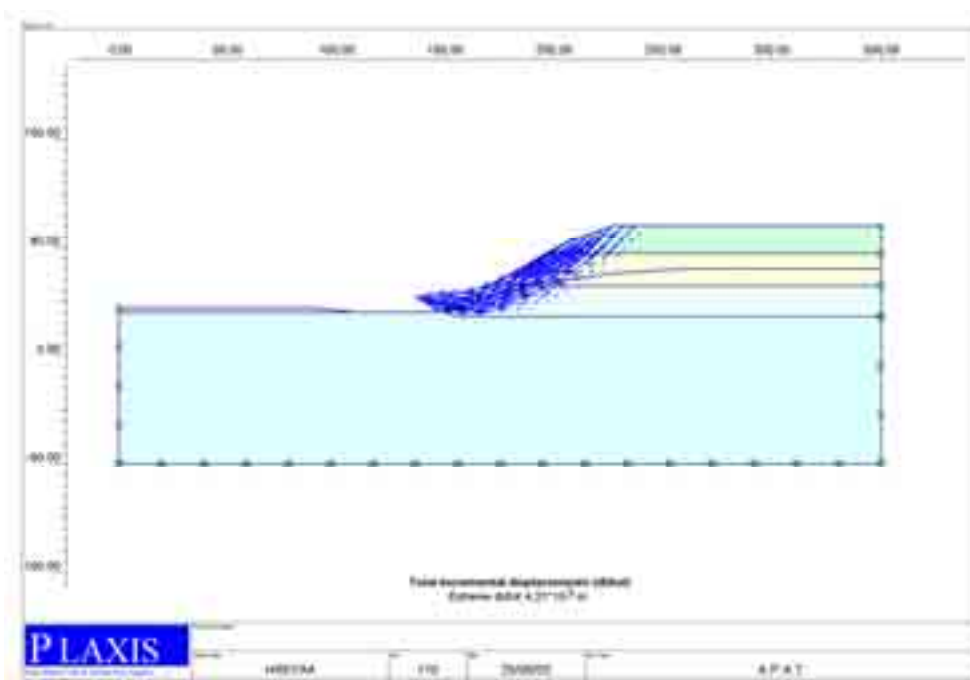


Fig. 5.13 - Possibile meccanismo di rottura - visualizzazione con le frecce

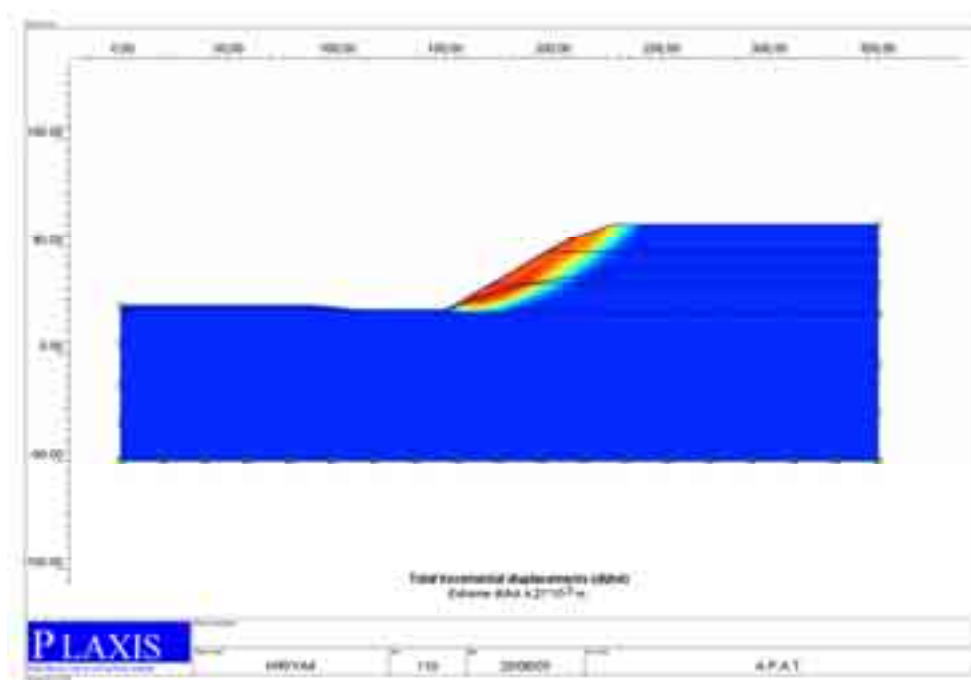


Fig. 5.14 - Possibile meccanismo di rottura - visualizzazione cromatica

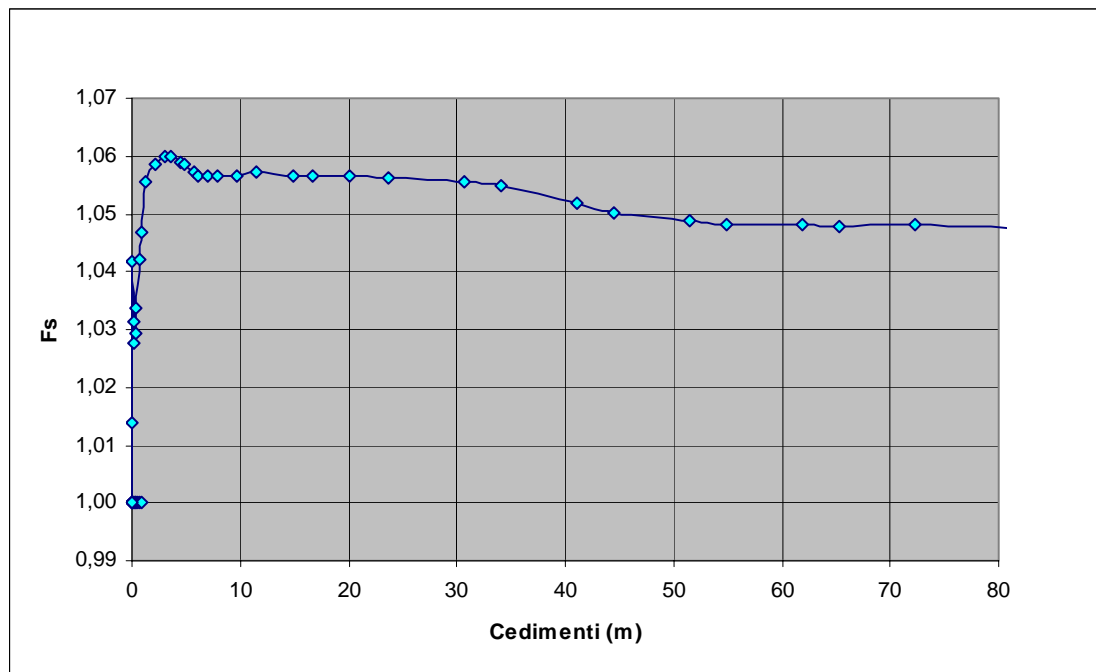


Fig. 5.15 - Valutazione del Coefficiente di sicurezza (Discarica di Hiriya)

Questi risultati, comunque soddisfacenti, hanno portato ad ipotizzare di poter effettuare una suddivisione nel corpo della discarica in una serie di zone in cui alle deformazioni di taglio corrispondessero parametri di resistenza diversi, ricavate da opportune correlazioni $c-\gamma(\%)$ e $\phi-\gamma(\%)$ di cui già discusso nel capitolo 2.

Purtroppo non è stato possibile reperire per il rifiuto allocato nella discarica di Hiriya i dati necessari per questo tipo di approccio di analisi.

Quindi, per poter procedere iterativamente alla determinazione dei parametri di resistenza al taglio da associare alle diverse zone, e quindi per poter risolvere staticamente il modello, si è preferito considerare un rifiuto diverso da quello sopra descritto, sul quale sono state condotte prove di laboratorio documentabili, e per il quale sono state elaborate le correlazioni (De Mei, 2001) successivamente riportate.

Una volta risolto il problema dal punto di vista statico è possibile passare a valutare il comportamento della discarica in condizioni dinamiche.

5.3 - Analisi statica e dinamica di una discarica

5.3.1 - Risultati delle prove di laboratorio condotte da Simone De Mei

Lo studio in oggetto consiste in un programma di analisi per la definizione delle caratteristiche meccaniche medie che competono ai rifiuti pretrattati da depositare in discarica ed, in particolare, a quelli che hanno subito un pretrattamento meccanico-biologico di biostabilizzazione e bioessiccamento.

Le recenti normative italiane e comunitarie sulla gestione dei rifiuti (vedi Cap.1) prescrivono elevati standard di qualità per le discariche per RSU, che potranno accogliere esclusivamente rifiuti che siano stati preventivamente sottoposti a trattamento di stabilizzazione.

In quest'ottica, gli obiettivi dello studio di De Mei sono:

- definire criteri di riferimento per la valutazione del grado di compattazione ottenibile con i diversi tipi di rifiuto presi in considerazione;
- stimare, attraverso prove di laboratorio, le caratteristiche meccaniche al variare del tipo di rifiuto e della compattazione, attraverso le seguenti fasi:
 - analisi granulometriche e identificazione delle caratteristiche fisiche dei campioni;
 - prove di compattazione in cella Proctor;
 - prove di laboratorio di tipo Triassiale Consolidate Drenate su campioni di grandi dimensioni;
- determinazione della resistenza al taglio ai vari livelli di deformazione, secondo il *criterio della deformazione limite ammissibile*;
- elaborazione di “Carte di Resistenza” per rifiuti di varie tipologie (*pretrattati e tal quali*) con il fine ultimo di definire quale sia la prospettiva migliore, da un punto di vista sia geotecnico che ambientale, per lo smaltimento dei rifiuti in discarica.

Le prove sono state condotte su quattro tipologie di rifiuto di cui si riportano le curve granulometriche in figura 5.16.

Tra le quattro tipologie di rifiuto, quella considerata maggiormente rappresentativa in termini qualitativi del comportamento di un rifiuto generale, corrisponde al campione Bioessiccato Sottovaglio, in quanto il comportamento sforzi deformazioni elaborato a

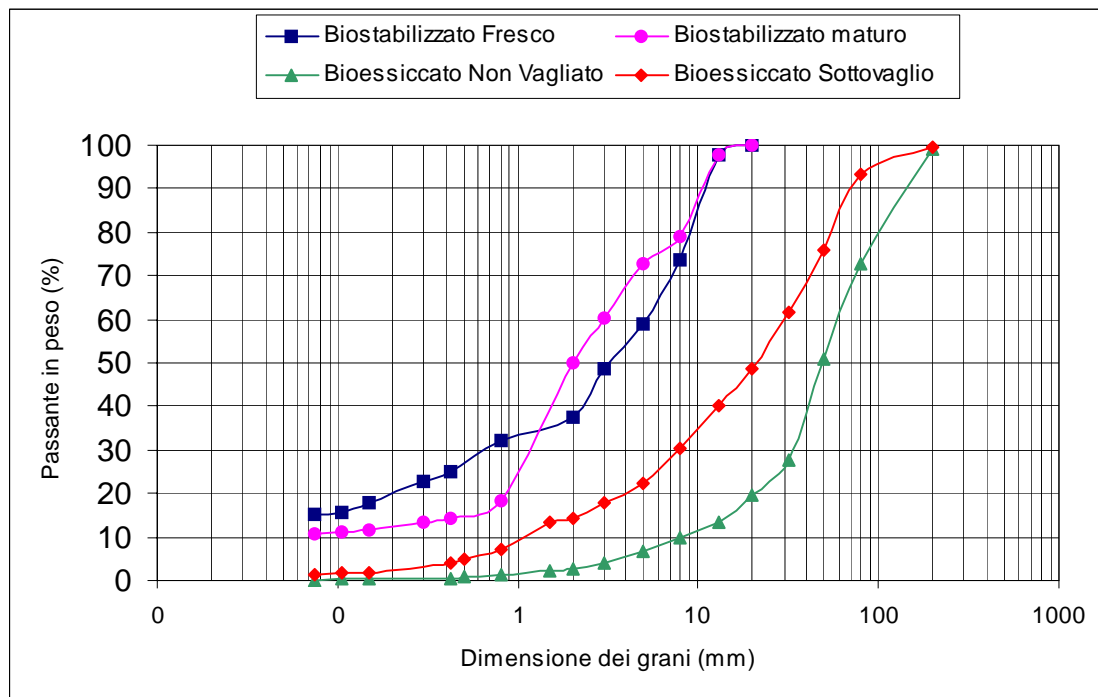


Fig. 5.16 - Curve granulometriche dei rifiuti (De Mei, 2001)

partire dalle prove triassiali si presenta sottoforma di una curva sempre crescente con concavità rivolta verso l'alto, a conferma del fatto che non è possibile arrivare alla rottura del provino neanche a condizioni di deformazioni molto elevate.

Inizialmente si è pensato di poter creare senza troppe difficoltà un modello "User Define" sulla base delle curve sforzi deformazioni riportate in figura 5.17, ma per poter far girare il modello era necessario creare un intero programma in Fortran per poi convertirlo in estensione .DLL.

Tuttavia l'implementazione di un nuovo modello costitutivo comporta notevoli problemi di taratura sul comportamento dell'analisi numerica, che non si ritiene possibile affrontare in questo studio preliminare.

Per ottimizzare l'analisi statica si è pensato infatti di suddividere il rifiuto in zone cui poteva essere assegnato un preciso valore della deformazione di taglio $\gamma(\%)$ e successivamente, in base alle correlazioni riportate in figura 5.18, stimare i nuovi parametri di resistenza al taglio che inseriti nel modello avrebbero permesso di ricalcolare l'andamento delle $\gamma(\%)$ e quindi nuove caratteristiche meccaniche.

Tale procedura si è ripetuta finché in ciascuna zona del rifiuto $\gamma_i \approx \gamma_{i-1}$.

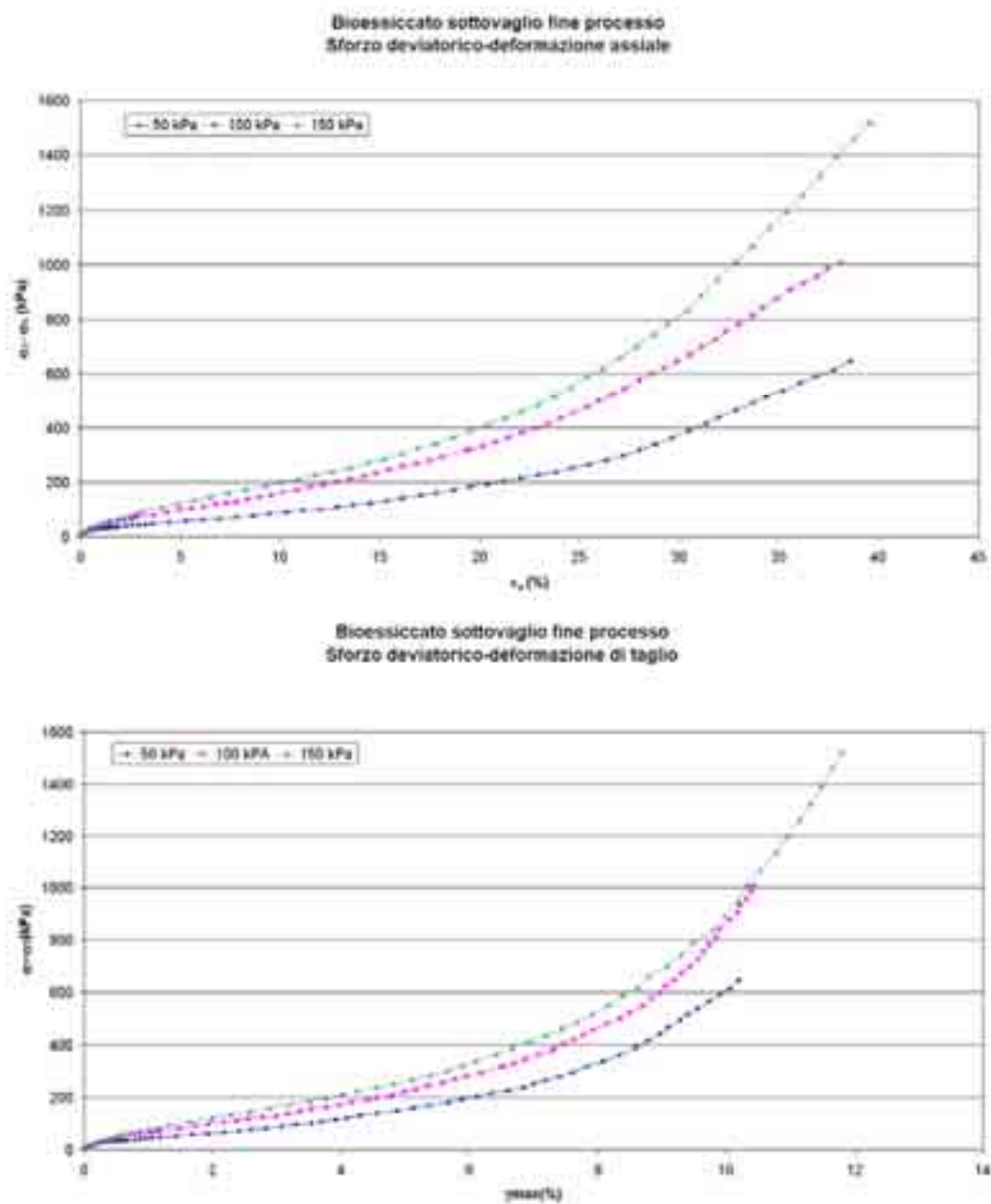


Fig. 5.17 - Andamento delle curve sforzi deformazioni (De Mei, 2001)

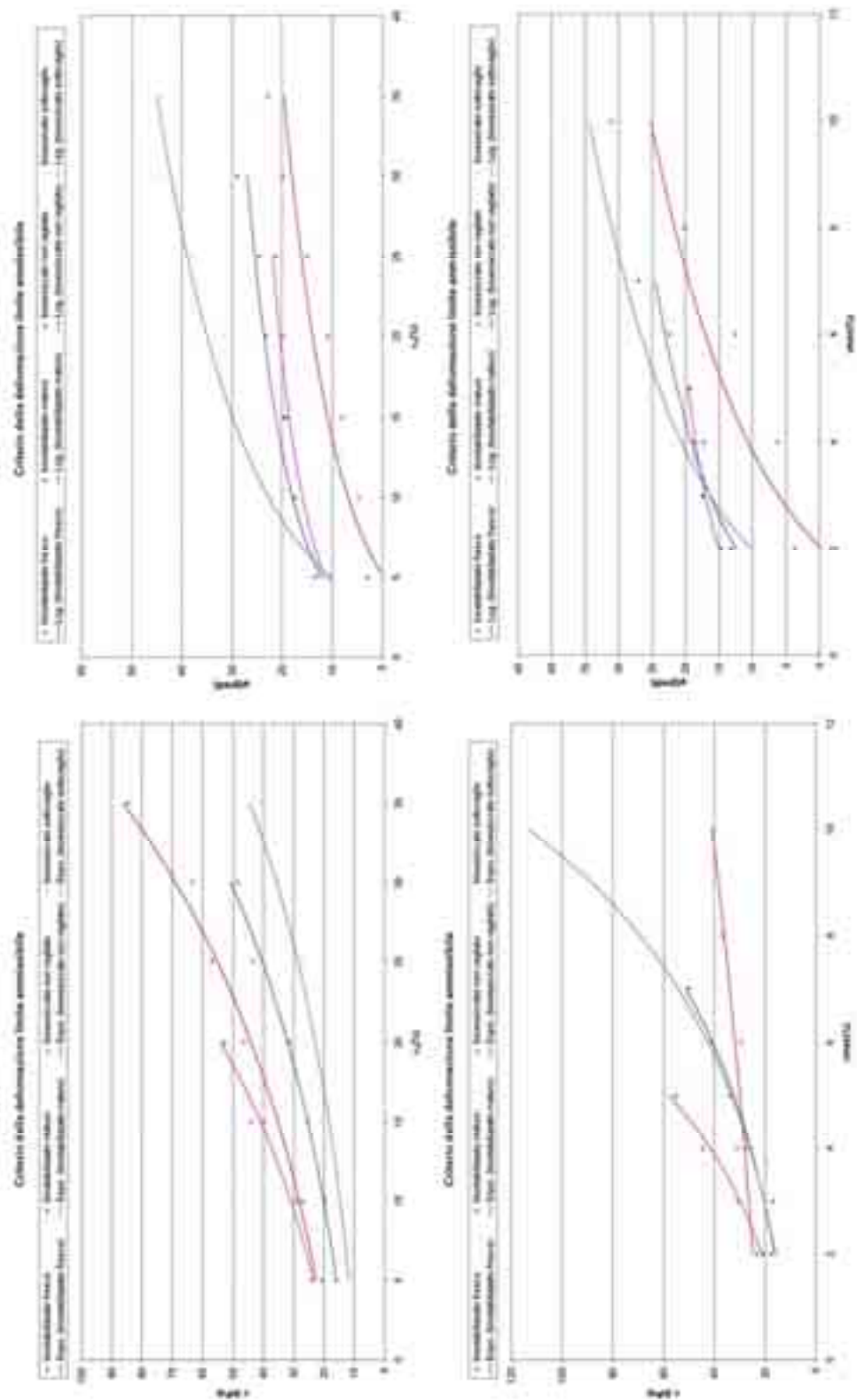


Fig. 5.18 - Correlazioni tra i parametri di resistenza al taglio c e ϕ , e le deformazioni assiali e le deformazioni di taglio.
(De Mei, 2001)

Di seguito verrà descritto lo svolgimento dell'analisi con il programma Plaxis e, nello specifico, si procederà ad illustrare su quali criteri si è basata la scelta sia dei parametri meccanici dei terreni e sia dei parametri dinamici. Successivamente verranno presentati e descritti i risultati sia dell'analisi statica che dell'analisi dinamica.

5.3.2 - Impostazione dell'analisi con Plaxis

5.3.2.1 - Scelta dei parametri meccanici

Per i parametri di resistenza al taglio iniziali sono stati utilizzati dei valori medi rappresentativi dei risultati delle prove di laboratorio condotte, tenendo in considerazione che agli strati più profondi corrisponde un valore più elevato della $\epsilon_a(\%)$; inoltre non è stata tenuta in conto la variazione del peso di volume con la profondità.

Per quanto riguarda invece il modulo di Poisson si è fatto riferimento essenzialmente alle correlazioni riportati in figura 5.20, attribuendo un valore di ν congruente con il valore stimato della deformazione assiale $\epsilon_a(\%)$ e parallelamente congruente anche con la profondità del rifiuto e quindi le tensioni di confinamento.

Per quanto riguarda invece il modulo di Young, i valori riportati nella tabella 4.V sono stati stimati contemporaneamente sia dall' esame della curva sforzi deformazioni, imponendo un valore della deformazione assiale $\epsilon_a(\%) = 10\%$, sia valutando i grafici riportati in figura 5.20.

L'analisi preliminare fa riferimento ad un rifiuto caratterizzato come in tabella 4.V ed a una geometria del modello leggermente diversa da quella utilizzata per la discarica di Hiriya, a causa delle diverse proprietà meccaniche del rifiuto che non permettevano di realizzare una discarica con lo stesso profilo iniziale riportato in figura 5.9.

Il modello geometrico è stato suddiviso secondo una mesh a medio-basso grado di infittimento, come riportato in figura 5.19.

Per quanto concerne la stima dei coefficienti di Rayleigh α e β , da attribuire ai rifiuti per la simulazione dell'effetto del damping secondo le formule descritte nel capitolo 3, è stato reputato opportuno utilizzare come valore del periodo naturale dei rifiuti quello ottenuto dagli studi condotti da Bennan et al. (2004) attraverso l'uso del software SHAKE.

Noto infatti il periodo naturale è possibile conoscere immediatamente il valore della frequenza naturale che compete non al vero e proprio rifiuto ma bensì all'intero deposito

Tab. 4.V Mohr-Coulomb		1 substrato	2 RSU superiori	3 RSU intermedi	4 RSU inferiori
Tipo		Drenato	Drenato	Drenato	Drenato
γ_{unsat}	[kN/m ³]	18,1	12,0	12,0	12,0
γ_{sat}	[kN/m ³]	18,8	13,5	13,5	13,5
k_x	[m/day]	0,001	0,010	0,010	0,010
k_y	[m/day]	0,001	0,010	0,010	0,010
e_{init}	[-]	0,500	0,500	0,500	0,500
c_k	[-]	1E15	1E15	1E15	1E15
E_{ref}	[kN/m ²]	200000	1600	1800	1900
ν	[-]	0,200	0,300	0,120	0,120
G_{ref}	[kN/m ²]	83333	615	803	848
E_{oed}	[kN/m ²]	222222	2154	1861	1964
c_{ref}	[kN/m ²]	48	10	11	12
ϕ	[°]	18	13	15	17
ψ	[°]	0,00	0,00	0,00	0,00
E_{inc}	[kN/m ² /m]	0,00	0,00	0,00	0,00
y_{ref}	[m]	0,000	0,000	0,000	0,000
$c_{\text{increment}}$	[kN/m ² /m]	0,00	0,00	0,00	0,00
$T_{\text{str.}}$	[kN/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00
$R_{\text{inter.}}$	[-]	1,00	1,00	1,00	1,00
Interface permeability		Neutral	Neutral	Neutral	Neutral

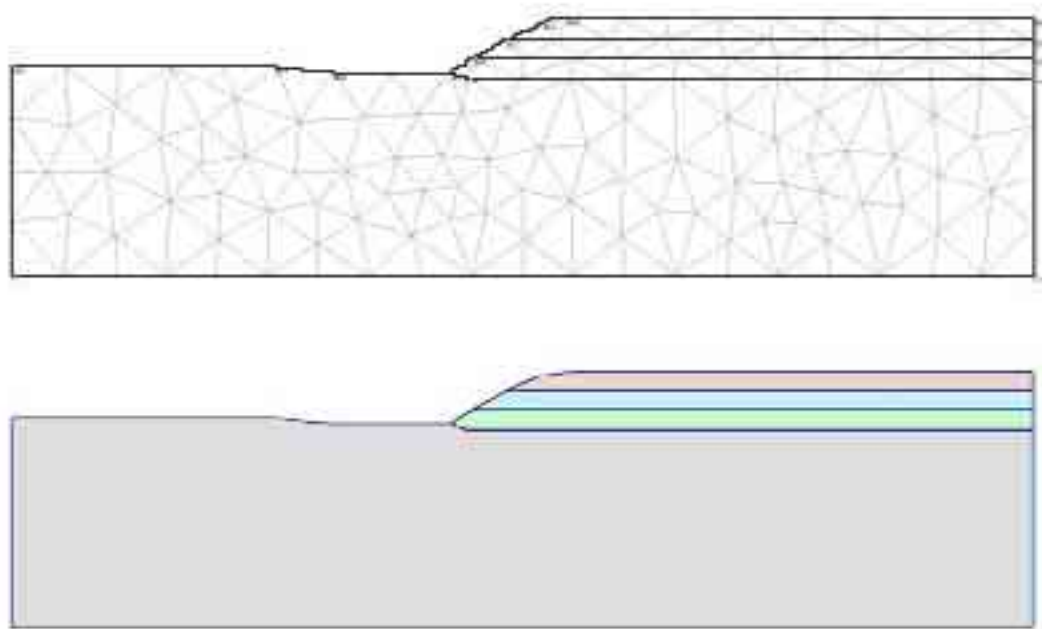


Fig. 5.19 - Rappresentazione grafica della mesh ed individuazione della stratigrafia nel modello geometrico della discarica di Hiriya

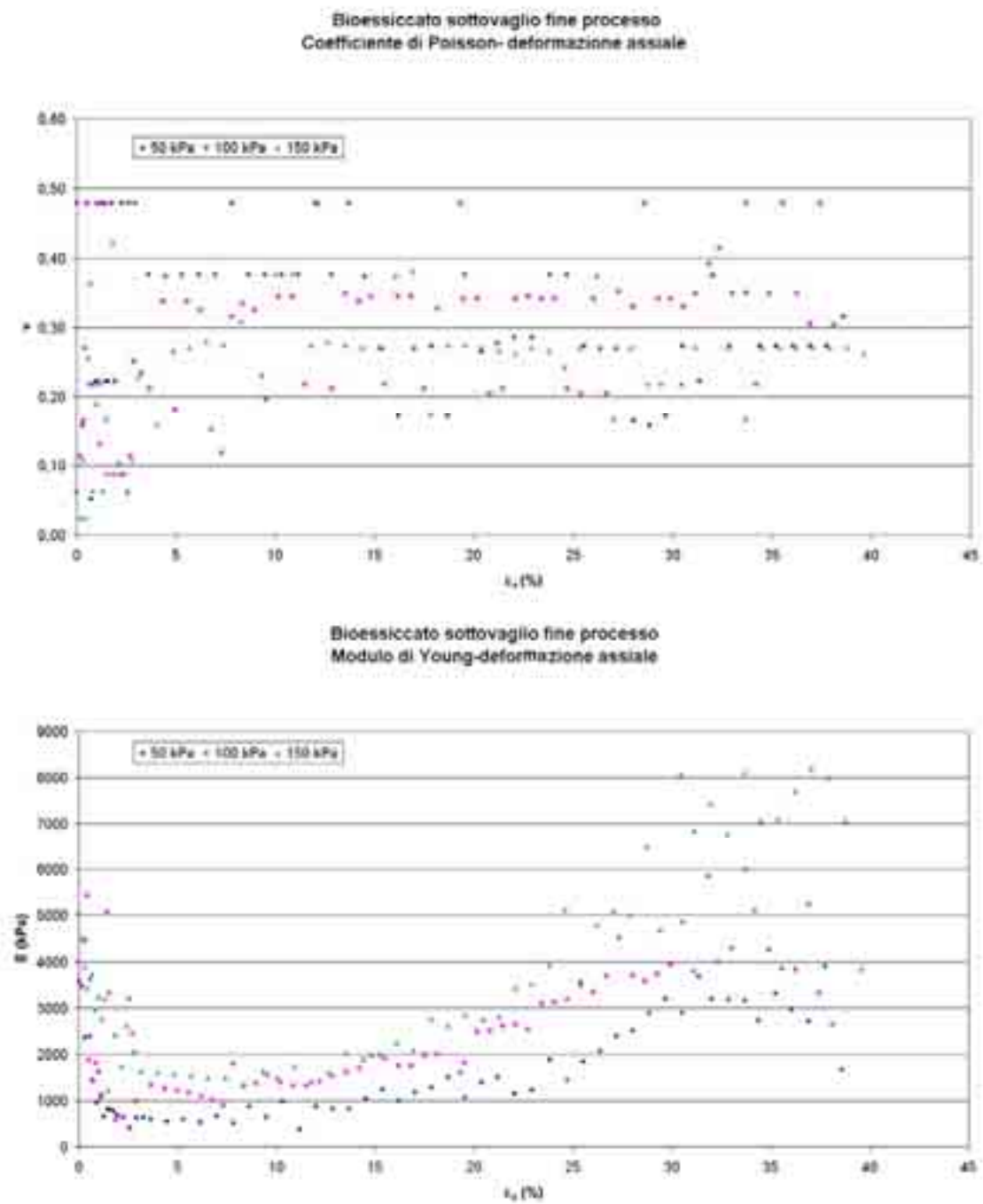


Fig. 5.20 - Correlazioni tra il modulo di Poisson e il modulo di Young e le deformazioni assiali (De Mei, 2001)

(E. M. Rathie, A.J. Augello, E. J. Kavazanjian, 2005) ad un progetto di valutazione delle proprietà dinamiche dei rifiuti solidi urbani.

Inoltre per calcolare α e β è necessario prendere in considerazione un'ulteriore frequenza di riferimento, in genere multipla dispari di ω_1 . In base agli studi condotti da Rathie e Bray (2001) finalizzati a valutare gli effetti delle diverse procedure analitiche implementate nei due programmi QUAD4M e SHAKE91, ovvero il confronto tra l'utilizzo dei coefficienti di Rayleigh piuttosto che un valore del fattore di smorzamento indipendente dalla frequenza, ovvero anche un confronto tra il metodo di risoluzione dell'equazione di propagazione delle onde nel dominio del tempo piuttosto che nel dominio delle frequenze, è stato possibile scegliere un valore ragionevole per il multiplo della frequenza naturale del deposito di rifiuti.

Infatti SHAKE91 utilizza una soluzione in forma chiusa per l'equazione di propagazione monodimensionale delle onde nel dominio della frequenza; il calcolo della risposta del deposito a sollecitazioni di tipo dinamico è basato sull'assunzione che il damping sia indipendente dalla frequenza.

Invece QUAD4M utilizza la formulazione di Rayleigh per il damping, secondo cui la matrice dello smorzamento viscoso $[C]$ è espressa come combinazione lineare delle matrici delle masse e delle rigidezze, così come il programma PLAXIS utilizzato in questa analisi.

Il Rayleigh damping è rappresentato tramite i sopra citati coefficienti α e β che risultano diversi al variare della frequenza naturale di riferimento per il sistema (Chopra 1995).

L'esperienza acquisita unitamente agli studi condotti hanno comunque confermato che i coefficienti di Rayleigh non variano in maniera significativa, almeno nel range di variazione delle frequenze più comune nell'ambito della meccanica dei terreni (0,2-10 Hz, Kramer 1996).

I coefficienti di Rayleigh nel programma QUAD4M sono stati calcolati di modo che il valore desiderato del fattore damping $D(\%)$ sia ottenuto in corrispondenza della frequenza naturale ω_1 e di una frequenza ω^* suo multiplo intero ($\omega^* = n \cdot \omega_1$).

In genere è preferibile che il valore n sia scelto in modo tale che $\omega^* > \omega_p$, dove ω_p è la frequenza predominante dell'evento sismico considerato.

Riferendosi specificatamente allo studio condotto da Rathje e Bray (2001), è stato fatto un confronto in termini di risposta tra i due programmi per una colonna monodimensionale di terreno come indicato in figura 5.21.

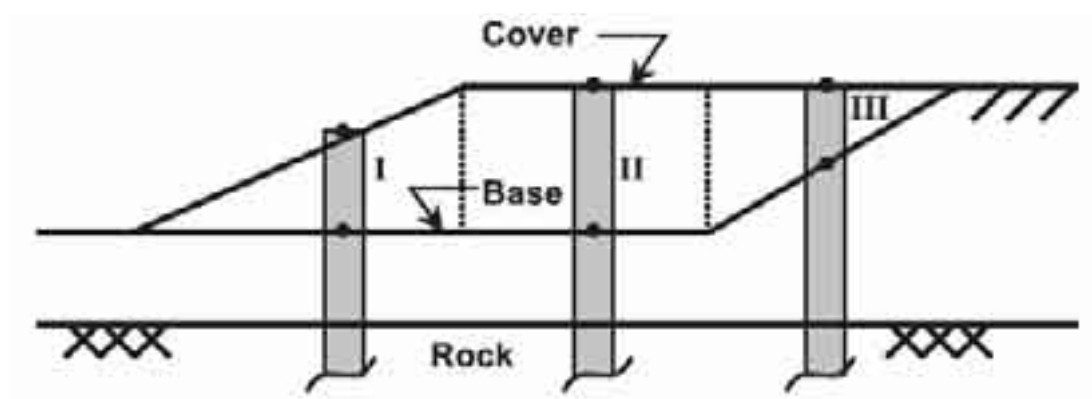
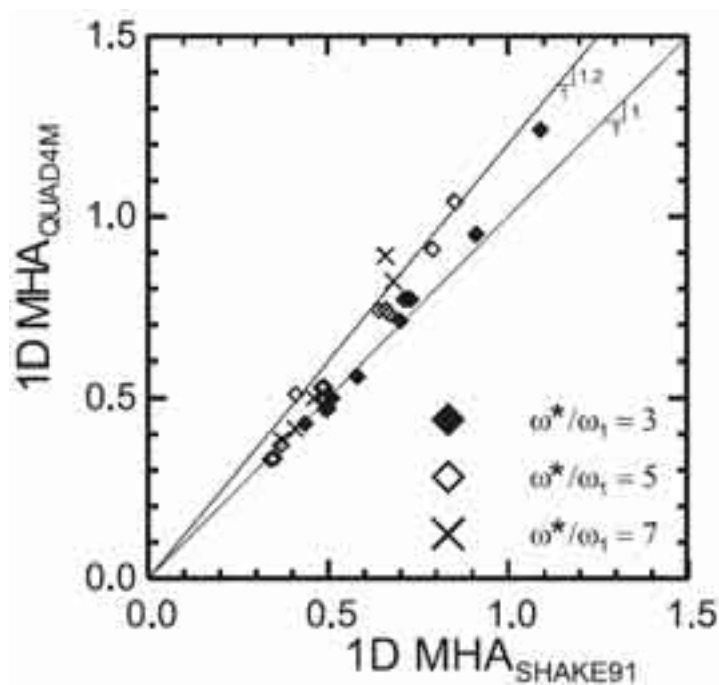


Fig. 5.21 - Individuazione delle colonne 1D a rappresentanza della geometria 2D del modello.

La fig. 5.22 rappresenta questo confronto sulla base dei valori assunti dalla massima accelerazione orizzontale.

Per simulare il terremoto con il programma Plaxis, si è utilizzato un accelerogramma di



progetto implementato sottoforma di file con estensione .smc fra quelli contenuti nella libreria del software.

Non conoscendo quindi il valore della frequenza predominante dell'evento sismico ω_p , è stato scelto un valore di n a tentativo, ed in particolare, facendo riferimento alla figura 5.22, è stato scelto per $n = \omega^*/\omega_1$ il

Fig. 5.22 - Andamento delle accelerazioni orizzontali massime sulla superficie del deposito calcolati con Shake e Quad4m

valore di 5.

La risoluzione delle equazioni per il calcolo di α e β riportate nel capitolo 3 ha fornito i seguenti risultati:

$$\alpha = 0,09$$

$$\beta = 0,06$$

5.3.2.2 - Risultati dell'analisi statica

Partendo da una situazione iniziale come quella descritta nel precedente paragrafo, la procedura di analisi denominata "gravity loading" permette di calcolare la distribuzione degli sforzi e delle deformazioni nel deposito originatesi per effetto del peso proprio del rifiuto.

I risultati sono riportati nelle figure 5.23, 5.24, 5.25, 5.26.

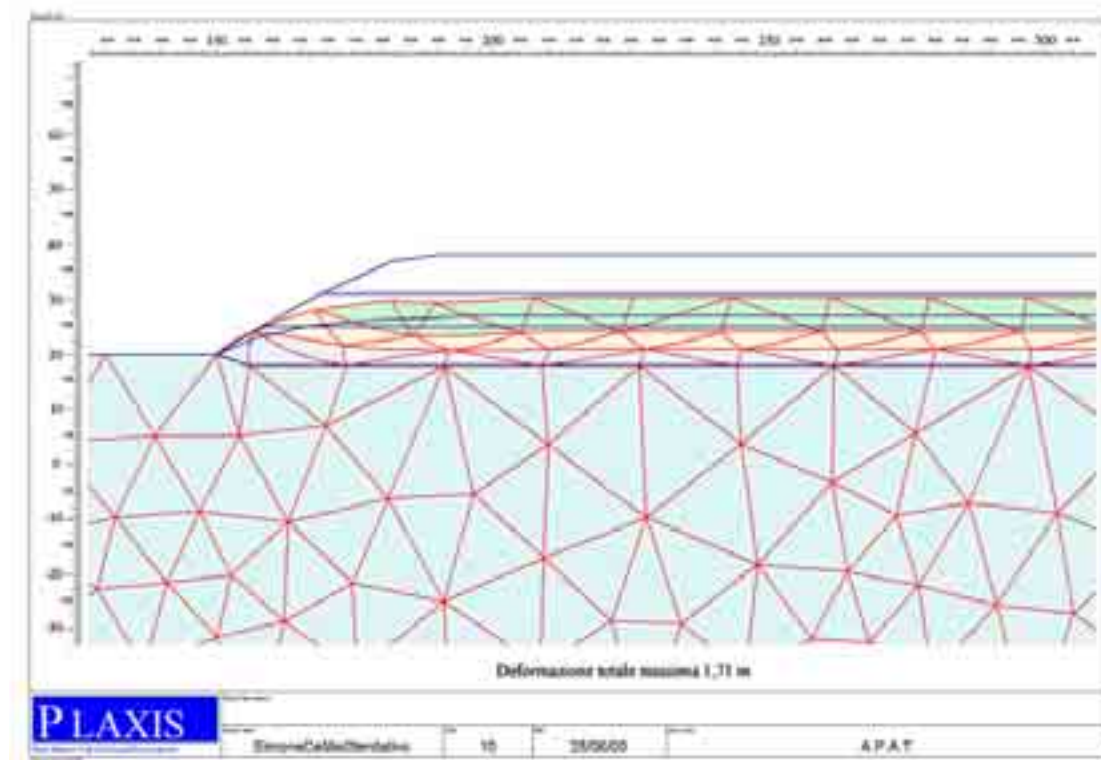


Fig. 5.23 - Simulazione discarica - situazione iniziale: mesh deformata

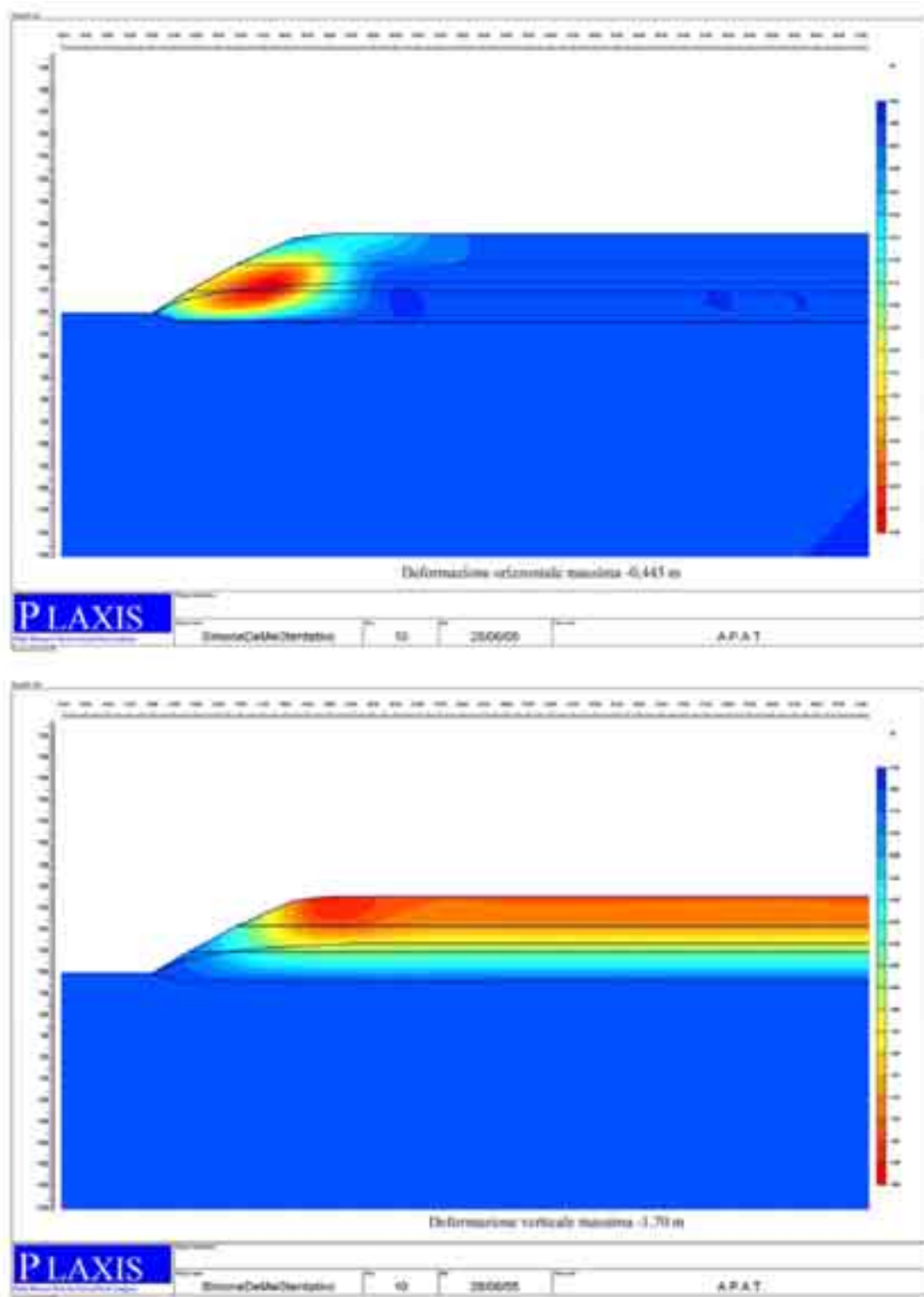


Fig. 5.24 - Situazione iniziale: andamento delle deformazioni orizzontali e verticali

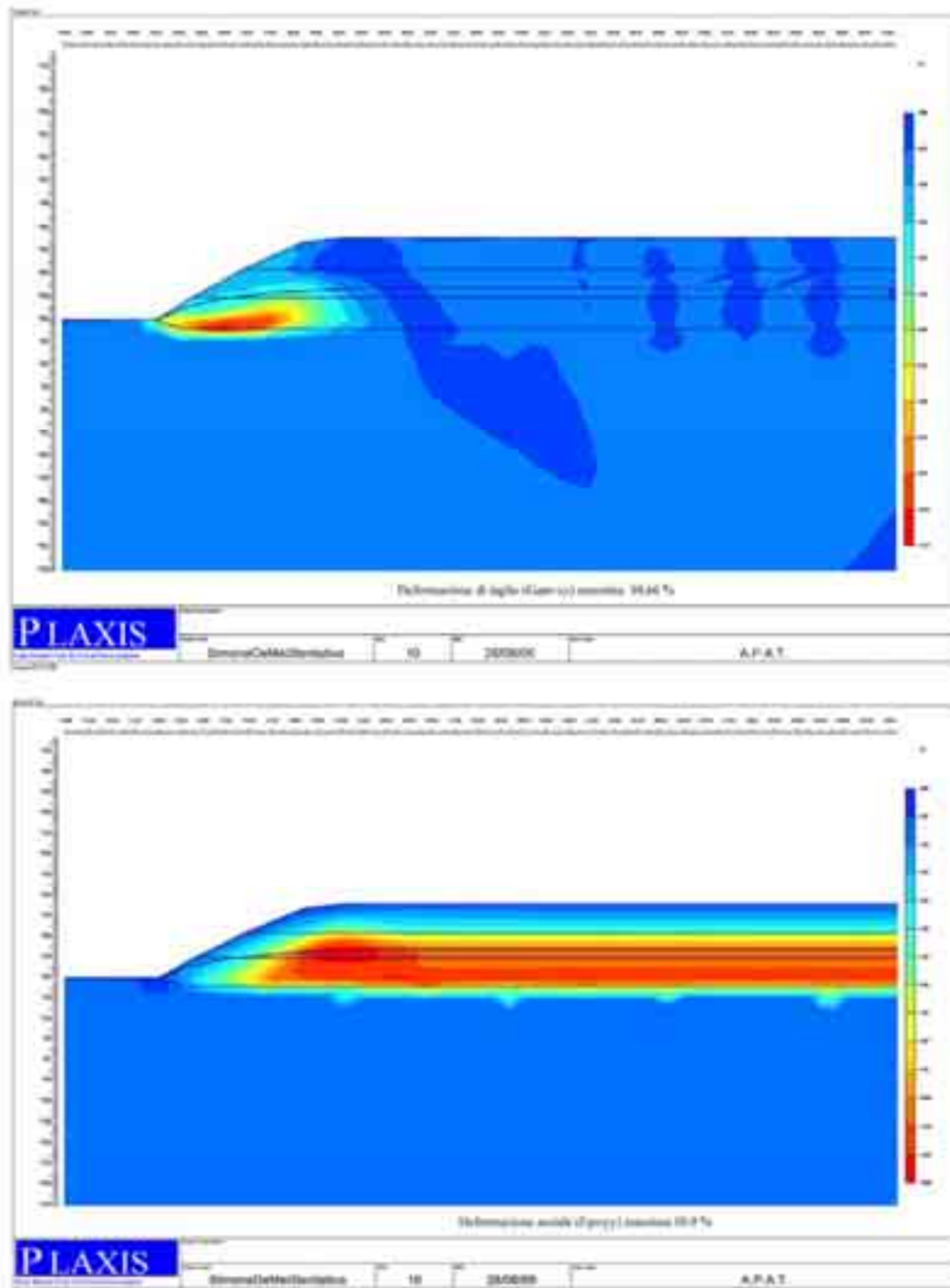


Fig. 5.25 - Situazione iniziale: andamento di γ_{xy} e di ϵ_{yy} .

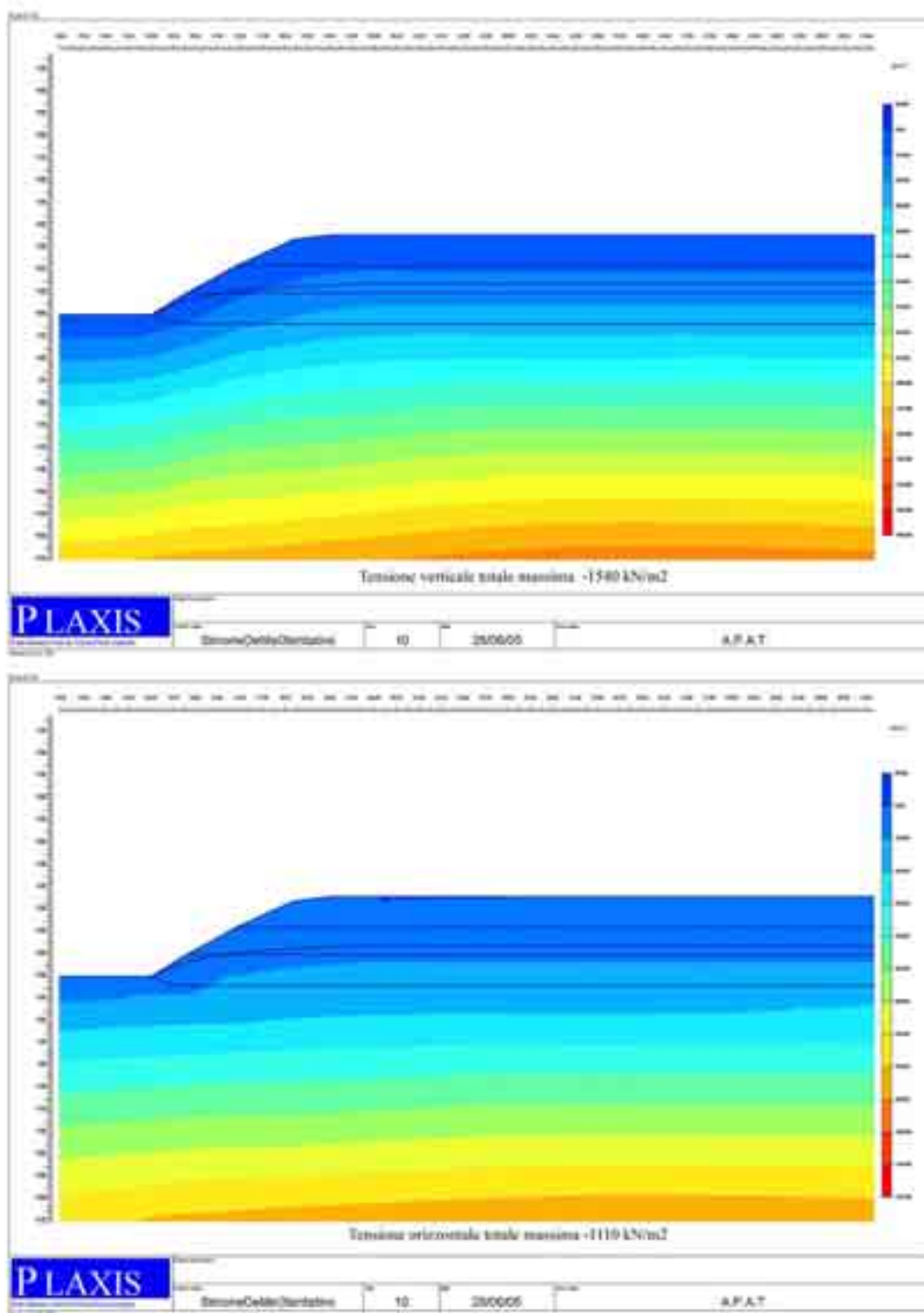


Fig. 5.26 - Situazione iniziale: andamento delle tensioni totali

Avendo già potuto esaminare i risultati ottenuti per la discarica di Hiriya, gli output qui riportati non presenterebbero nulla di diverso ad eccezione dei valori ottenuti sia per le tensioni che per le deformazioni, data la diversa assunzione dei parametri di input dei modelli costitutivi.

Le tensioni orizzontali e verticali totali crescono con la profondità ma l'andamento è distorto a causa della stratigrafia non piana.

Le deformazioni di taglio γ_{xy} (%) raggiungono valori abbastanza elevati (10,6%) in prossimità della sponda laterale.

A questo punto i calcoli sono stati ripetuti aggiornando volta per volta i parametri di resistenza al taglio c e ϕ secondo i grafici riportati in figura 5.18, cercando di ottenere una situazione finale in cui per ciascuna zona individuata nel modello ci fosse corrispondenza tra la deformazione di taglio media ed i parametri di resistenza al taglio scelti.

Nonostante numerosi tentativi, la situazione finale cui si è pervenuti non è ottimale, dato che lungo le interfacce tra rifiuti di diverse caratteristiche meccaniche si ha uno sviluppo irregolare delle tensioni e delle deformazioni. Comunque si è pervenuti ad una condizione finale in cui ci fosse una corrispondenza evidente tra i parametri c e ϕ ed i valori assunti dalle deformazioni di taglio γ_{xy} (%).

Tab. 5.V Mohr-Coulomb		1 substrato	2 RSU superficiale	3 RSU intermedio	4 RSU inferiore
Tipo		Drenato	Drenato	Drenato	Drenato
γ_{unsat}	[kN/m ³]	18,10	12,00	12,00	12,00
γ_{sat}	[kN/m ³]	18,80	13,50	13,50	13,50
k_x	[m/s]	0,000	0,000	0,000	0,000
k_y	[m/s]	0,000	0,000	0,000	0,000
e_{init}	[-]	0,500	0,500	0,500	0,500
c_k	[-]	1E15	1E15	1E15	1E15
E_{ref}	[kN/m ²]	200000	1800	2000	2300
ν	[-]	0,200	0,250	0,170	0,150
G_{ref}	[kN/m ²]	83333	720	854	1000,000
E_{oed}	[kN/m ²]	222222	2160	2150	2428
c_{ref}	[kN/m ²]	48,00	12,00	16,00	20,00
ϕ	[°]	18,00	11,00	14,00	16,00
ψ	[°]	0,00	0,00	0,00	0,00
E_{inc}	[kN/m ² /m]	0,00	0,00	0,00	0,00
y_{ref}	[m]	0,000	0,000	0,000	0,000
$c_{increment}$	[kN/m ² /m]	0,00	0,00	0,00	0,00
$T_{str.}$	[kN/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00
$R_{inter.}$	[-]	1,00	1,00	0,80	0,80
Permeabilità di interfaccia		Neutrale	Neutrale	Neutrale	Neutrale

Tab. 5.V Mohr-Coulomb		5 RSU1	6 RSU2	7 RSU3	8 RSU4
Tipo		Drenato	Drenato	Drenato	Drenato
γ_{unsat}	[kN/m ³]	12,00	12,00	12,00	12,00
γ_{sat}	[kN/m ³]	13,50	13,50	13,50	13,50
k_x	[m/s]	0,000	0,000	0,000	0,000
k_y	[m/s]	0,000	0,000	0,000	0,000
e_{init}	[-]	0,500	0,500	0,500	0,500
c_k	[-]	1E15	1E15	1E15	1E15
E_{ref}	[kN/m ²]	1600	1800	1600	2100
ν	[-]	0,190	0,180	0,190	0,150
G_{ref}	[kN/m ²]	672	762	672	913
E_{oed}	[kN/m ²]	1756	1954	1756	2217
c_{ref}	[kN/m ²]	27,00	20,00	15,00	20,00
ϕ	[°]	18,00	16,00	13,00	16,00
ψ	[°]	0,00	0,00	0,00	0,00
E_{inc}	[kN/m ² /m]	0,00	0,00	0,00	0,00
y_{ref}	[m]	0,000	0,000	0,000	0,000
$c_{\text{increment}}$	[kN/m ² /m]	0,00	0,00	0,00	0,00
$T_{\text{str.}}$	[kN/m ²]	0,00	0,00	0,00	0,00
$R_{\text{inter.}}$	[-]	0,70	0,90	0,90	1,00
Permeabilità di interfaccia		Neutrale	Neutrale	Neutrale	Neutrale

Tab.5.V Mohr-Coulomb		9 RSU5
Tipo		Drenato
γ_{unsat}	[kN/m ³]	12,00
γ_{sat}	[kN/m ³]	13,50
k_x	[m/s]	0,000
k_y	[m/s]	0,000
e_{init}	[-]	0,500
c_k	[-]	1E15
E_{ref}	[kN/m ²]	1600
ν	[-]	0,200
G_{ref}	[kN/m ²]	666
E_{oed}	[kN/m ²]	1777
c_{ref}	[kN/m ²]	13,00
ϕ	[°]	12,00
ψ	[°]	0,00
E_{inc}	[kN/m ² /m]	0,00
y_{ref}	[m]	0,000
$c_{\text{increment}}$	[kN/m ² /m]	0,00
$T_{\text{str.}}$	[kN/m ²]	0,00
$R_{\text{inter.}}$	[-]	1,00
Permeabilità di interfaccia		Neutrale

In tabella 5.V sono indicate le proprietà meccaniche dei diversi rifiuti, mentre in figura 5.27 sono rappresentate sia la suddivisione in mesh che la suddivisione del corpo della discarica in zone dove il rifiuto assume diversi valori dei parametri di resistenza al taglio.

Per quanto concerne l'output della fase di calcolo statico, dai grafici di seguito riportati si evince come globalmente il comportamento della discarica, rispetto alla condizione di partenza, sia migliorato a causa dei differenti valori dei parametri nei modelli costitutivi.

Le deformazioni massime raggiungono non più valori di 1,7 m ma bensì di circa 1,4 m, a fronte di un'altezza complessiva della discarica di circa 22 m, come si evince dalla figura 5.28, dove vengono rappresentati separatamente gli spostamenti orizzontali e verticali del deposito di rifiuti, e dalla figura 5.29, dove è invece rappresentata la deformata totale.

Di conseguenza anche per l'andamento delle γ_{xy} (%) le variazioni saranno sensibili, come si evince da figura 5.30.

Facendo riferimento, infatti, ai risultati riportati in figura 5.31, le deformazioni di taglio $\gamma_{xy}(\%)$ assumono, rispetto alla condizione iniziale, valori inferiori.

Questo fatto si ripercuote anche sul valore del coefficiente di sicurezza che tende ad incrementare, come si evince dal grafico di figura 5.30, passando da un valore prossimo all'unità ad un valore di 1,303.

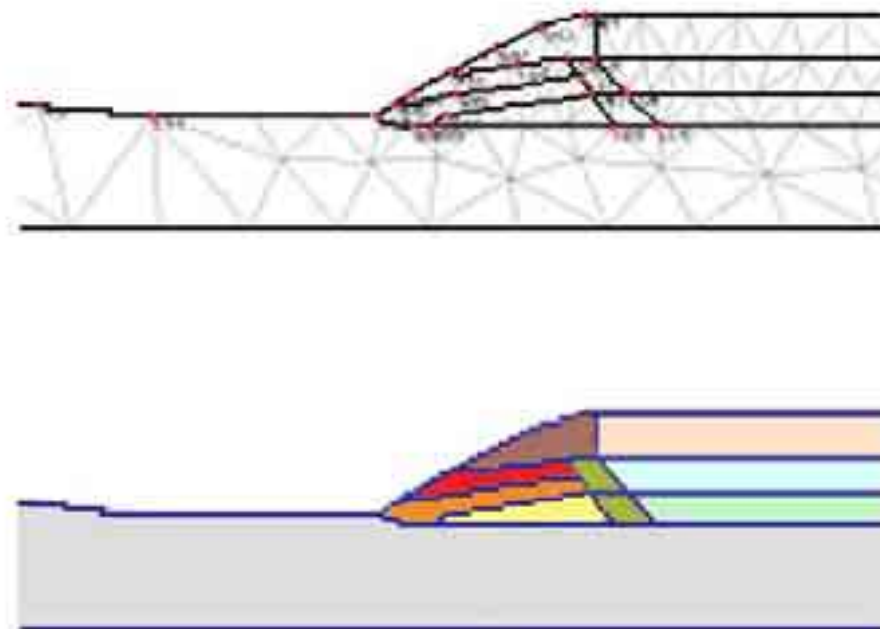


Fig. 5.27 - Simulazione discarica - mesh e geometria finale del modello

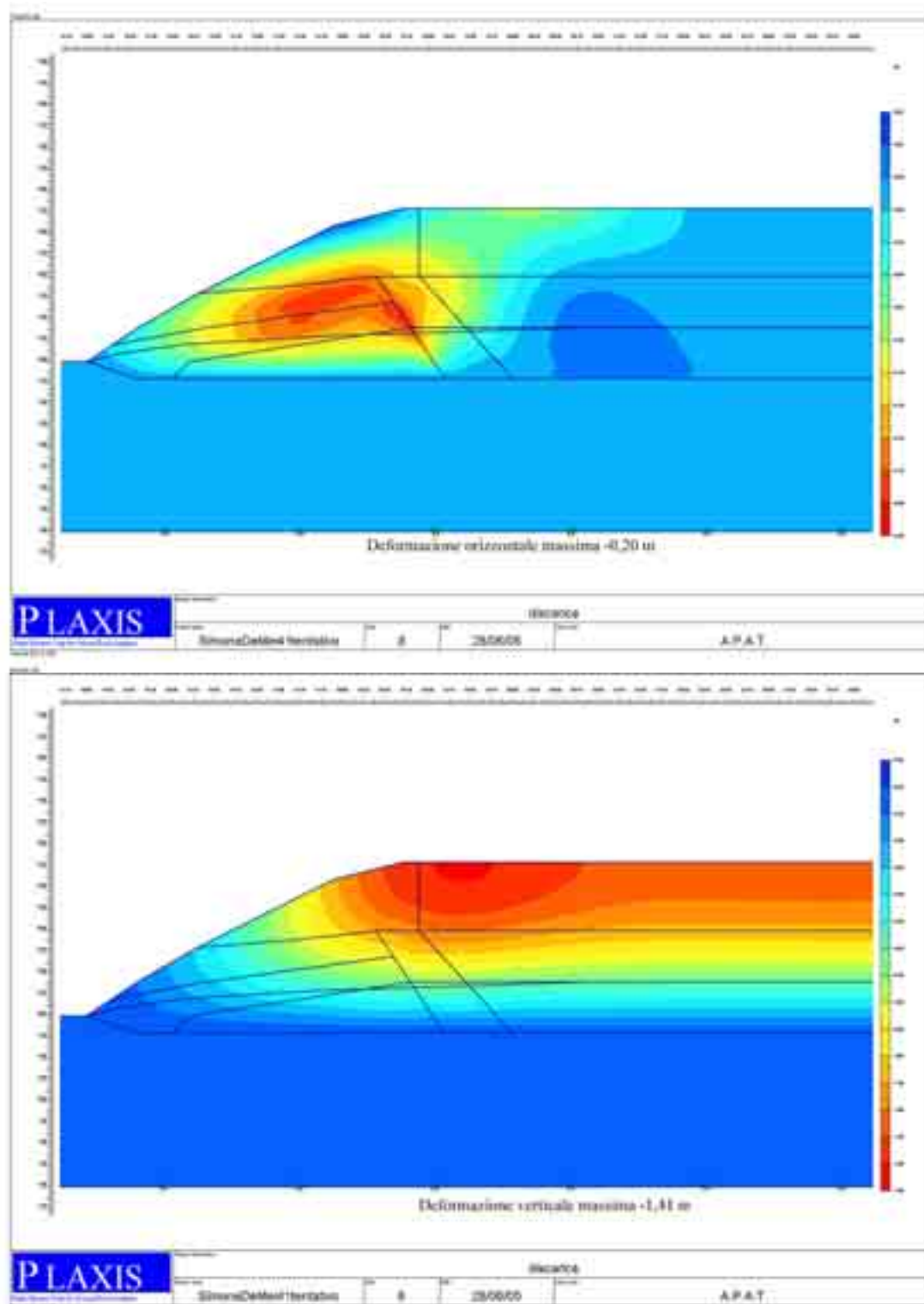


Fig. 5.28 - Analisi statica finale: andamento delle deformazioni verticali ed orizzontali

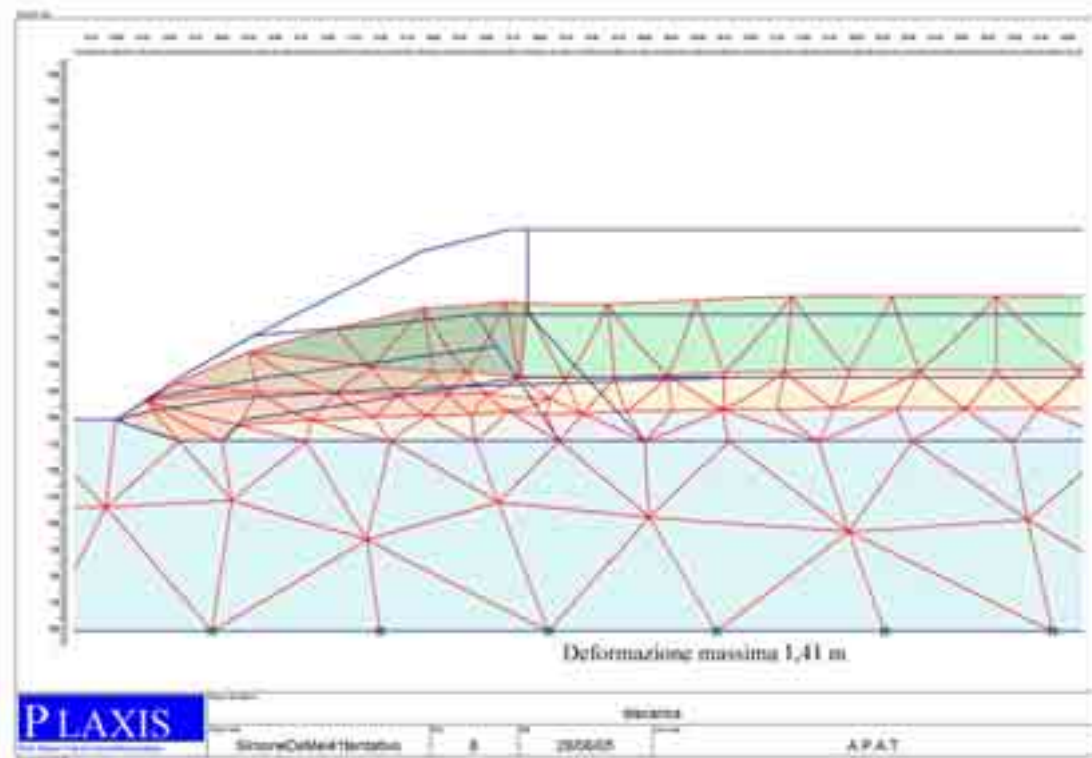


Fig. 5.29 - analisi statica finale: mesh deformata

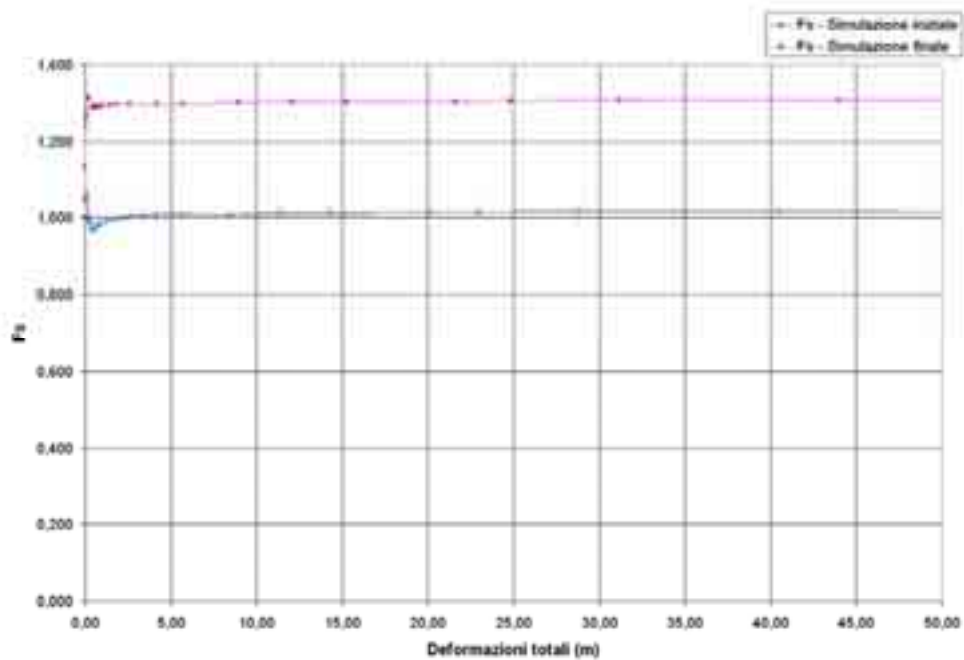
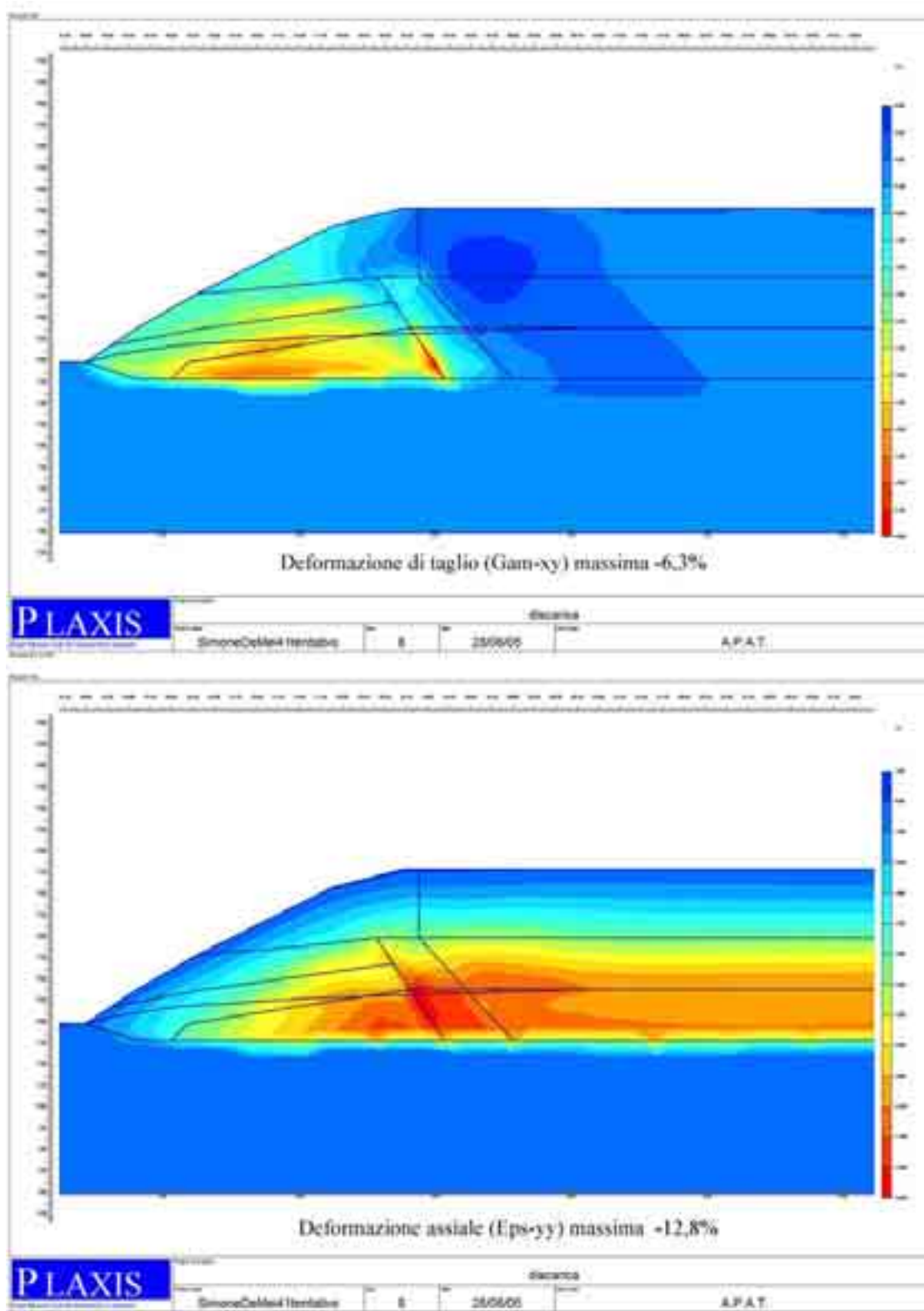


Fig. 5.30 - Confronto tra i valori del coefficiente di sicurezza prima e dopo l'aggiornamento dei parametri di resistenza del rifiuto

Fig. 5.31 - Analisi statica finale: andamento delle deformazioni assiali ϵ_{yy} e di taglio γ_{xy}

5.3.2.3 - Risultati dell'analisi dinamica

I risultati della simulazione finale sopra riportati sono stati successivamente utilizzati come punto di partenza per l'analisi dinamica.

Per simulare l'evento sismico, al contorno di base del modello geometrico è stato applicato uno spostamento imposto orizzontale che, opportunamente attivato, nell'analisi dinamica rappresenta la sorgente di propagazione delle onde.

Per far questo è stato anche dato come input al programma un accelerogramma di progetto implementato sottoforma di file .smc.

L'intenzione iniziale era quella di ricercare un accelerogramma di progetto sintetizzato in un formato di estensione .smc, relativamente ad un terremoto italiano.

Questo non è stato possibile per due ragioni. La prima è che l'Istituto Nazionale di Vulcanologia e Sismologia non possiede accelerogrammi di questo tipo, mentre la seconda è che nonostante il tentativo di convertire in formato .smc un generico accelerogramma, il programma Plaxis ha evidenziato un errore in fase di lettura dei dati.

La scelta è stata quindi pilotata per la mancanza di tempo verso l'utilizzo dell'accelerogramma già implementato nel programma.

La simulazione del terremoto ha evidenziato sostanzialmente un buon comportamento della discarica nei confronti delle sollecitazioni di tipo dinamico associate ad un evento sismico.

Questo in pratica può essere sintetizzato come una riduzione delle accelerazioni orizzontali dalla base del corpo della discarica alla sua sommità.

L'esame di figura 5.32 evidenzia in maniera generale questo effetto, sulla base della diversa intensità cromatica che compete il substrato rispetto al rifiuto.

Le accelerazioni massime orizzontali competono al substrato ed assumono valori di picco pari a $1,6 \text{ m/s}^2$, ovvero pari a 0,17 g, ma questo valore subisce una drastica riduzione nel momento in cui l'onda si propaga nel rifiuto.

Le accelerazioni orizzontali si riducono quasi ad annullarsi.

Un esempio dell'andamento delle accelerazioni orizzontali con la profondità è rappresentato in figura 5.33.

Nella sezione di riferimento le accelerazioni nel substrato raggiungono un valore di $1,33 \text{ m/s}^2$, ma nel rifiuto esse tendono a diminuire raggiungendo valori dell'ordine di $0,1 \text{ m/s}^2$.

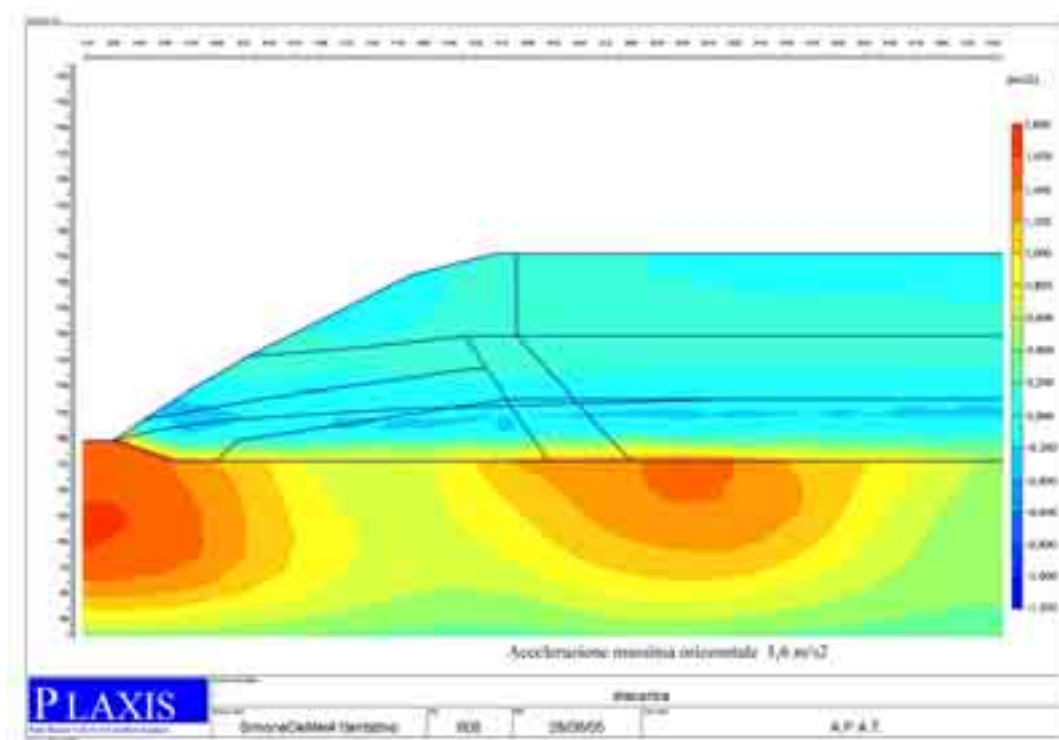


Fig. 5.32 - Andamento delle accelerazioni orizzontali a seguito della simulazione dell'evento sismico.

Un esempio dell'andamento delle accelerazioni orizzontali con la profondità è rappresentato in figura 5.33.

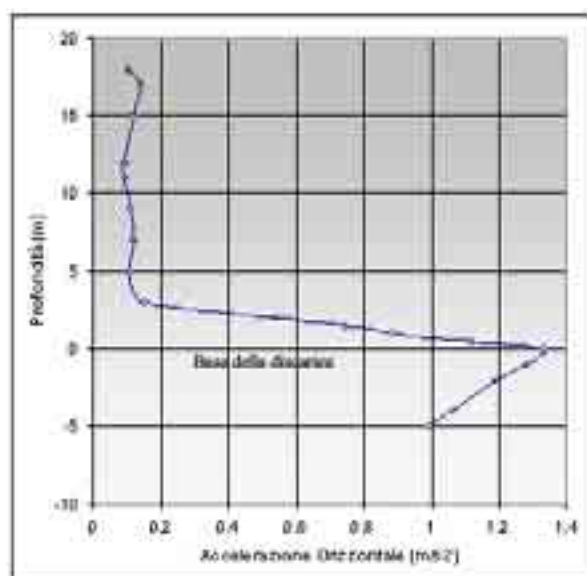


Fig. 5.33 - Andamento delle accelerazioni orizzontali con la profondità

A titolo di esempio della correttezza dell'analisi dinamica, si riportano anche i risultati dello studio condotto da Bray et al. (1995) relativamente alla determinazione della stabilità delle discariche in condizioni sismiche in figura 5.34.

Nonostante i valori diversi, sia perchè l'intensità del terremoto di progetto utilizzato nella simulazione è tale da originare nel substrato accelerazioni di picco minori, sia perchè

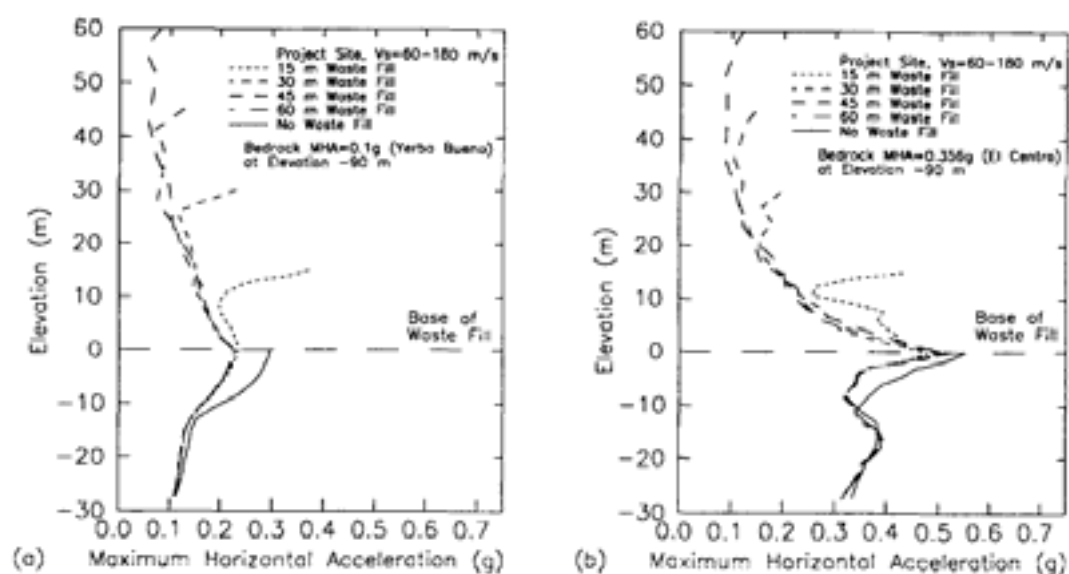


Fig. 5.34 - Andamenti delle accelerazioni orizzontali massime (a) Yerba Buena (b) El Centro (Bray, Augello, 1995)

probabilmente i valori del fattore di smorzamento per la discarica differiscono da quelli che competono il rifiuto preso in considerazione da Bray et al. (1995), l'andamento è sostanzialmente simile.

Da questo possiamo desumere che le discariche hanno in generale un buon comportamento se soggette ad un normale evento sismico, perchè tendono a smorzare i movimenti di oscillazione che nel substrato assumono valori più rilevanti.

A seguito dell'analisi dinamica sulla base del terremoto di progetto, lo stato tensionale e deformativo della discarica non si è modificato sostanzialmente. Infatti le γ_{xy} (%) non subiscono incrementi significativi da richiedere un ulteriore aggiornamento dei parametri di resistenza al taglio.

Questo però non accade in tutti i casi.

Kavazanjian et al. (1995), a seguito di un'analisi con il sussidio del programma SHAKE, hanno affermato che quando il periodo fondamentale dei rifiuti è compreso tra il range di valori 12-16 secondi, come nel nostro caso, allora le frequenze inferiori ad 1 Hz tendono ad essere invece amplificate.

Per studiare questo effetto è stata condotta un'ulteriore analisi dinamica dove, al posto del terremoto di progetto implementato nel programma Plaxis, si è creato manualmente un carico armonico con una frequenza di 0,6 Hz per simulare l'evento sismico.

In questo caso, a prescindere dal segno delle accelerazioni che nel substrato assumono un verso mentre nel rifiuto diventano di segno opposto (questioni probabilmente legate all'inerzia), è riscontrabile come le accelerazioni orizzontali sulla sommità della discarica risultano invece amplificate.

Il risultato della simulazione dinamica è riportato in figura 5.35.

Nel substrato le accelerazioni assumono valori di circa $0,7 \text{ m/s}^2$, ovvero 0,07 g, mentre sulla sommità della discarica le accelerazioni assumono un valore praticamente doppio.

In figura 5.36 è rappresentato l'andamento delle accelerazioni orizzontali in tutto il deposito di rifiuti; è immediato notare come tutto il rifiuto sia interessato da una amplificazione delle accelerazioni rispetto ai valori che competono il substrato.

L'analisi dinamica è stata successivamente reiterata, attribuendo ai terreni un comportamento non drenato.

Tale assunzione deriva dall'intenzione di valutare gli effetti legati alla rapidità di applicazione delle sollecitazioni di tipo dinamico, in un contesto in cui l'acqua interstiziale, essendo sensibilmente più rigida della matrice solida circostante, tende ad assorbire la maggior parte dei carichi applicati.

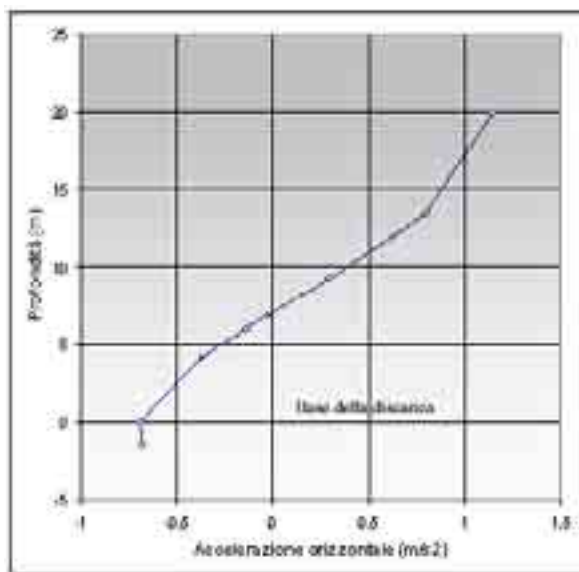


Fig. 5.35 - Andamento dell'accelerazione orizzontale con la profondità nel caso di carico dinamico ad una frequenza $< 1\text{Hz}$

Il risultati mostrati in figura 5.37 mostrano come l'andamento delle accelerazioni non subisca notevoli cambiamenti rispetto ai risultati ottenuti assumendo un comportamento drenato. Nel caso di terremoto simulato attraverso l'accelerogramma di progetto già implementato nel programma di analisi, le accelerazioni tendono a diminuire progressivamente nel

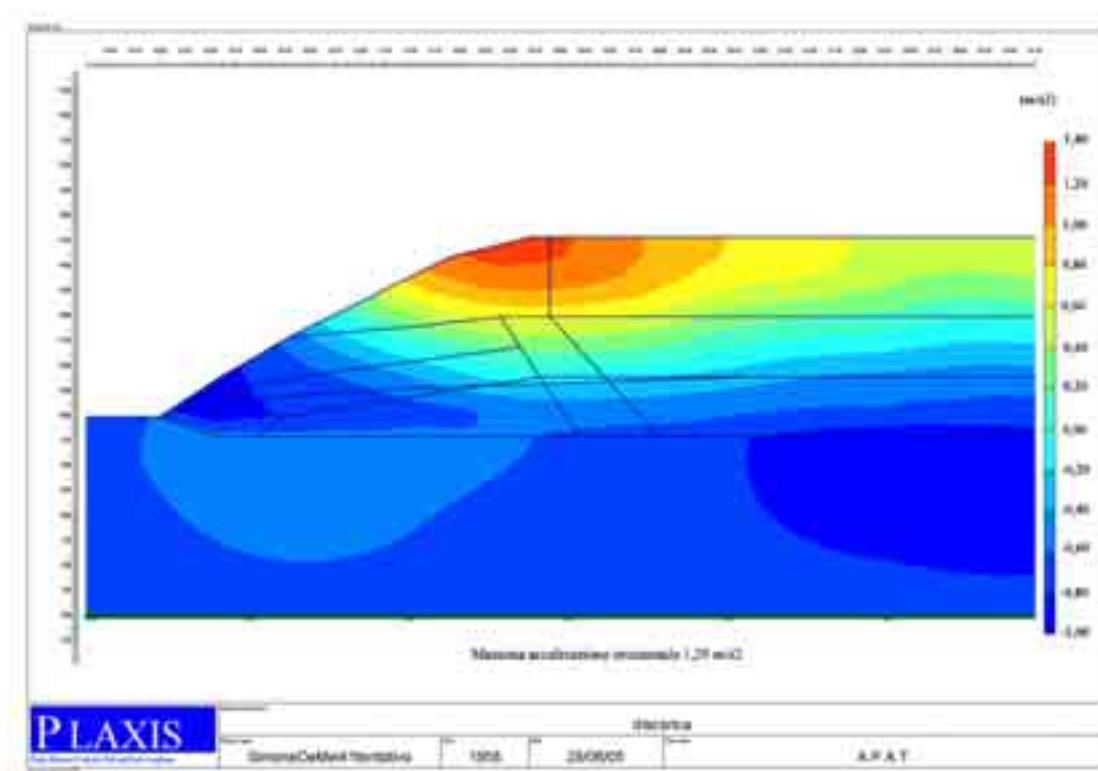


Fig. 5.36 - Visualizzazione cromatica dell'andamento delle accelerazioni orizzontali nel deposito di rifiuti, caso di carico dinamico con frequenza < 1 Hz

rifiuto, mentre nel caso di terremoto simulato a partire da un carico armonico con frequenza < 1 Hz le accelerazioni subiscono un'amplificazione, come previsto.

Il confronto dei risultati è riportato in figura 5.38.

In definitiva l'analisi dinamica ha portato ad una conclusione, ovvero che generalmente il comportamento di una discarica sottoposta a carichi di tipo dinamico risulta tale da non comportare rischi elevati in termini di deformazioni e quindi stabilità.

Qualora invece i carichi dinamici possiedano uno specifico range di valori della frequenza, allora la presenza del rifiuto tenderà ad amplificare quelli che sono gli effetti in superficie.

In generale i terremoti italiani hanno frequenze che non dovrebbero comportare effetti sensibili di amplificazione.

I risultati ottenuti sono comunque parziali e l'analisi potrebbe essere migliorata sotto diversi punti di vista.

Innanzitutto il comportamento meccanico può essere con le dovute accortezze rappresentato tramite un modello costitutivo più complesso del semplice Mohr Coulomb.

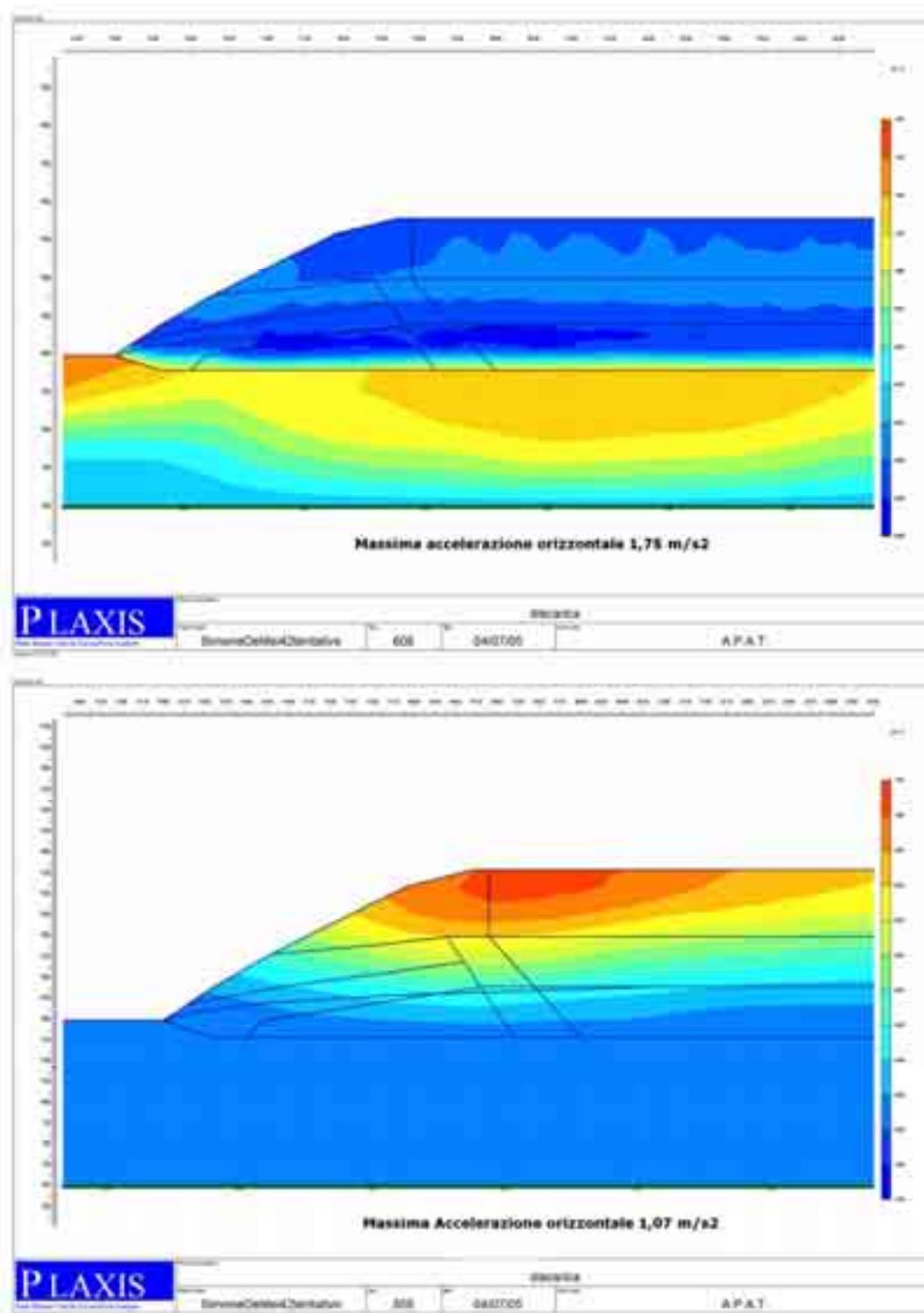


Fig. 5.37 – Visualizzazione cromatica dell'andamento delle accelerazioni nel caso di terremoto progetto implementato in Plaxis, e nel caso di terremoto simulato con carico armonico a frequenza pari a 0,6 Hz

Inoltre sarebbe opportuno implementare se possibile in Plaxis gli accelerogrammi relativi a terremoti nel territorio italiano.

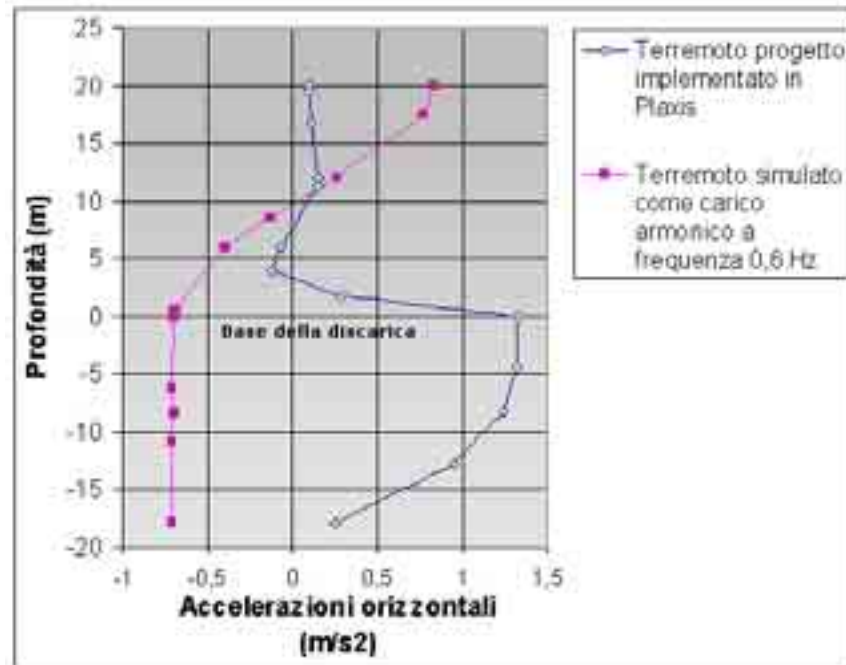


Fig. 5.38 – Andamento delle accelerazioni orizzontali con la profondità

CONCLUSIONI

Il presente elaborato riassume quelli che sono stati i risultati ottenuti dall'analisi statica e dinamica di una discarica di rifiuti solidi urbani scelta quale modello rappresentativo.

L'analisi preliminare, finalizzata alla calibrazione del modello, è stata basata su quelli che sono stati i risultati ottenuti da Isenberg (2003) sulla stabilità della discarica di RSU collocata a Hiriya (Tel Aviv).

La simulazione ha fornito dei risultati soddisfacenti le aspettative, dato che la superficie di rottura calcolata dal programma ad elementi finiti PLAXIS ricalca pressochè quella ottenuta da Isenberg, utilizzando il programma PCSTABL.

Non potendo proseguire l'analisi in base agli obiettivi prefissati, dato che non era stato possibile reperire per il rifiuto collocato nella discarica di Hiriya informazioni aggiuntive sulle caratteristiche meccaniche, oltre ai semplici valori della resistenza al taglio (curve sforzi deformazioni, correlazioni tra parametri di resistenza etc.), si è preferito prendere in riferimento un rifiuto urbano di diversa origine e provenienza, sul quale sono state eseguite analisi sufficienti a ricostruire le curve sforzi-deformazioni e le correlazioni tra deformazioni e parametri di resistenza al taglio (De Mei, 2001).

In questo modo è stato possibile proseguire l'analisi, inizialmente sotto il profilo statico, in cui l'obiettivo era quello di sfruttare le correlazioni tra la deformazione di taglio $\gamma_{xy}(\%)$ ed i parametri di resistenza c e ϕ , per suddividere l'ammasso dei rifiuti secondo zone dove al livello di deformazione ottenuto corrispondessero i parametri di resistenza al taglio stimabili dalle curve di correlazione sopra menzionate. Il procedimento iterativo di aggiornamento dei parametri di resistenza può ritenersi terminato nel momento in cui $\gamma_i = \gamma_{i-1}$.

Il risultato finale della procedura iterativa mostra per le deformazioni di taglio un andamento alquanto irregolare.

Evidentemente la suddivisione dell'ammasso di rifiuti in zone diverse a geometria piuttosto irregolare comporta una distorsione inevitabile dell'andamento iniziale delle $\gamma_{xy}(\%)$, soprattutto in prossimità delle linee di contatto.

Purtroppo non è stato possibile migliorare, almeno in questa analisi, il risultato della procedura iterativa.

Assumendo comunque validi i risultati dell'analisi statica, si è quindi proceduto ad effettuare l'analisi dinamica, inizialmente simulando l'evento sismico tramite un accelerogramma di progetto implementato in Plaxis sottoforma di un file formato .smc.

E' stato fatto un grande lavoro di studio sul ruolo del damping in un'analisi dinamica e sui differenti modi con cui i programmi attualmente in commercio rappresentano il fenomeno dello smorzamento viscoso nelle simulazioni dinamiche.

I risultati della simulazione evidenziano comunque per il rifiuto una generale tendenza ad assorbire e quindi a limitare gli effetti dovuti alla propagazione delle onde nei mezzi. Le accelerazioni orizzontali passano infatti da valori di $1,3 \text{ m/s}^2$ nel substrato a valori quasi nulli in prossimità della superficie della discarica.

L'effetto positivo dello smorzamento viscoso non ha validità in tutto il campo delle frequenze dei carichi dinamici.

Sebbene si tratti di un range di valori ristretto, Kavazanjian et al (1995) hanno riscontrato che il rifiuto con periodo naturale elevato (12-16 secondi) tende ad amplificare frequenze inferiori ad 1 Hz.

Con Plaxis è stato simulato un evento sismico sulla base di un carico armonico con frequenza pari a 0,6 Hz e l'effetto finale è stato quello di un'amplificazione delle accelerazioni orizzontali con l'attraversamento del cumulo dei rifiuti.

In tale circostanza il buon funzionamento della discarica potrebbe essere compromesso, in quanto si potrebbero innescare dei meccanismi di deformazione tali da inficiare il corretto funzionamento delle strutture che devono essere accoppiate con la stessa discarica.

Nonostante le limitazioni intrinseche di questa analisi, se gli attuali studi finalizzati alla determinazione più accurata dei parametri dinamici permetteranno di inquadrare meglio il rifiuto in un contesto più realistico, relativamente al problema della stabilità in condizioni dinamiche, allora ciò che nel presente elaborato è presentato solo come indicazione di massima potrà essere approfondito appropriatamente.

In questo modo sarà anche possibile, nota la localizzazione della discarica in un contesto cui è associato un certo grado di rischio sismico, prevedere gli effetti di un eventuale terremoto e quindi predisporre tutti gli accorgimenti necessari per prevenire danni all'integrità del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- **Augello, A.J., Bray, J.D., Abrahamson, N.A., and Seed, R.B. (1998)** "Dynamic properties of solid-waste based on back-analysis of the OII Landfill" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124(3): 211–222.
- **Bray, J.D., and Rathje, E.M. (1998)** "Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124(3): 242–253.
- **Bray J.D., Augello A.J., Leonards G.A., Repetto P. C., Byrne R. J. (1995)** "Seismic Stability Procedures for Solid-Waste Landfills", *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 121, n. 2, February, pp. 139-151.
- **Bray J.D., Rathje E.M., Augello A.J. and S.M. Merry (1998)** "Simplified Seismic Design Procedure for Geosynthetic-Lined, Soil-Waste Landfills", *Geosynthetics International*, Vol. 5, Nos. 1-2, pp. 203-235.
- **Brennan A.J., Thusyanthan N.I., Madabhushi S.P.G. (2004)** "Evaluation of Shear Modulus and Damping in Dynamic Centrifuge Tests", Extension of the paper submitted to the *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
- **Cazzato Massimo (2005)** "Linee guida per la progettazione geostrutturale delle discariche" *Tesi di Stage*, Apat.
- **Chopra A.K. (1995)** "Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering", *Prentice-Hall International series in civil engineering mechanics*, Englewood Cliffs.
- **Chopra, A.K. (1967)** "Earthquake response of earth dams" *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, 93(SM2): 65–81.
- **Craig H. Benson (2000)** "Liners and Covers for Waste Containment", *Proc. Fourth Kansai Intl. Geotechnical Forum, Creation of a New Geo-Environmental*, Japanese Geotechnical Society, Kyoto, Japan, May 24-26, pp. 1-40
- **Decreto Legislativo 5 febbraio 1997, n.22.** Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio
- **Del Greco O., Oggeri C. (1994)** "Shear Resistance Tests on Solid Municipal Wastes" *Proceedings, 1th International Congress on Environmental Geotechnics*, Edmonton, Alberta (Canada), pp. 643-650

- **ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS** – Report of the ISSMFE Technical Committee TC 5 on Environmental Geotechnics – Bochum, September 1997 – Ruhr- Universität Bochum
- **Fasset J.B., Leonardo G.A., Repetto P.C. (1994)** "Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design", Proceeding, waste Technical Conference, Charleston SC (USA).
- **Filz G. M., Esterhuizen J. J. B., Duncan J. M. (2001)** "Progressive Failure of Lined Waste Impoundments", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(10), pp 841–848
- **Fior F. (1998)** "La Discarica di RSU tra Presente e Futuro", Normativa e ruolo della discarica nella gestione dei rifiuti in Italia. Seminario Internazionale, Centro di Ingegneria Sanitaria Ambientale di Cagliari, Cittadella, Padova, pp. IV 1-2.
- **Glenn J. Rix** " Dynamic Properties of Municipal Solid Waste Landfills for Site Response Analyses" Georgia Institute of Technology, School of Civil and Environmental Engineering.
- **Grisolia M., Napoleoni Q. (1991)** "Caratterizzazione geotecnica dei rifiuti solidi urbani per la corretta conduzione di una discarica" Atti 3° Seminario su "Il Trasferimento della Ricerca Ambientale nell'Innovazione dei Servizi". Fac. Ingegneria Università degli Studi di Roma "La Sapienza".
- **Grisolia, M., Napoleoni, Q., Tancredi G. (1995)** "Contribution to a technical classification of municipal solid waste" Proceedings 5th International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula (Cagliari)
- **Grisolia, M., Napoleoni, Q., Tancredi G. (1995)** "The use of triaxial tests for the mechanical characterization of municipal solid waste" Proceedings 5th International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula (Cagliari)
- **Grisolia, M., Napoleoni, Q. (1997)** "Geotechnical characterization of municipal solid waste: Choice of design parameters." Proc., 2nd Int. Cong. on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 2, 641–646.
- **Grisolia, M., Napoleoni, Q., Pravato P. (2000)** "Large size triaxial tests on municipal solid waste" Proc. Of the Asian Pacific Landfill Symposium 2000 Fukuoka (Japan)
- **Grisolia, M., Napoleoni, Q. (2004)** "Caratteristiche meccaniche di rifiuti protrattati" – Incontro annuale dei ricercatori di Geotecnica 2004 – IARG 2004 – Trento, 7-9 luglio 2004

- **Hashash, Y. M. A. and Park, D. (2002)** "Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in nonlinear site response analysis," *Soil Dynamics and Earth-quake Engineering* 22(7), 611-624.
- **Hashash, Y. M. A. and Park, D. (2001)** "Non linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment", *Engineering Geology* vol 62(1-3), pp.185-206
- **Hisham T. Eid, Timothy D. Stark, W. Douglas Evans, Paul E. Sherry (2000)** " Municipal Solid Waste Slope Failure. I: Waste and Foundation Soil Properties", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 126(5), pp 397–407
- **INEEL (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2002)** "Seismic Evaluation of Landfill and Evaporation Pond", Engineering Design file
- **Jessberger, H. L., and Kockel, R. (1993)** "Determination and assessment of the mechanical properties of waste materials." *Proc., Sardinia 93,4th Int. Landfill Symp., San Margherita di Pula, CISA, Cagliari, Italy*, 1383–1392.
- **Jessberger H.L., Kockel R. (1993)** "Determination and assessment of the mechanical properties of waste materials", *Proceeding, Geotechnics Related to the Environment, Waste Disposal by Landfill, Bolton (GB)*, pp. 313-322.
- **Jesseberger H.L., Kockel R. (1994)** "Determinazione e valutazione delle proprietà meccaniche dei rifiuti", *Seminario di aggiornamento su "Meccanica dei rifiuti e analisi strutturale dei componenti di una discarica controllata. Criteri di Progettazione, Realizzazione, Gestione, Controllo, Impatto Ambientale e Aspetti Normativi"*, CISA, S. Margherita di Pula (Cagliari), pp. XVIII-1 – XVIII-11.
- **Kavazanjian Jr., E., Matasovic, N., Bonaparte, R., and Schmertmann, G. R. (1995).** "Evaluation of MSW properties for seismic analysis." *Proc., Specialty Conf. Geoenvironment 2000, Geotech. Spec. Publ. 46, ASCE, New York, Vol. 2*, 1126–1141.
- **Kavazanjian E.Jr., Matasovic N., Snow M.S., Poran C.J., Satoh T. (1994)** "Non intrusive Reyleigh wave investigation at solid waste landfills" *Proceedings, 1th Int. Conference on Environmental Geotechnics*.
- **Kavazanjian E.Jr., Matasovic N., Bachus R.C. (1999)** "Large-diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste" *Proceedings of 5th International Landfill Symposium, 2, CISA (Cagliari)*, pp. 437-444.
- **Ling, H., and Leshchinsky, D. (1997)** " Seismic stability and permanent displacement of landfill cover systems" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(2): 113–121.

- **Makdisi, F.I., and Seed, H.B. (1978)** "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104(GT7): 849–867.
- **Martelli Andrea (2005)** "Con il D. Lgs. 13 Gennaio 2003, n.36 l'Italia recepisce la direttiva 1999/31/CE in materia di discariche di rifiuti", articolo rielaborato rispetto a quello pubblicato sul n. 7 dell'8 Aprile 2003 di *Ambiente e Sicurezza - Il Sole 24 Ore-Pirola*.
- **Matasovic N., E.J. Kavazanjian (1998)** "Cyclic Characterization of OII Landfill Solid Waste", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, March, vol. 124, n.3, pp. 197-210.
- **Matasovic N., Kavazanjian E.J., J.P. Giroud (1998)** "Newmark Seismic Deformation Analysis for Geosynthetic Covers" *Geosynthetics International*, vol. 5, n. 1-2, pp. 237-264.
- **Mazzuccato, P. Simonini, S. Colombo (1999)** "Analysis of block slide in MSW Landfill", *Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 4-8 October 1999*
- **Newmark, N. M. (1959)** "A method of computation for structural dynamics," *J. Engineering Mechanics Division* 85, 67-94.
- **Paul Michaels (1998)** " In situ Determination of Soil Stiffness and Damping", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 124 (8), pp 709–719
- **PLAXIS v.8 Reference manual (2002)**, R.B.J. Brinkgreve, Delft University of Technology & Plaxis b.v., The Netherlands
- **Rathje, E. M. and Bray, J. D. (2001)** "One- and two-dimensional seismic analysis of solid-waste landfills," *Canadian Geotechnical Journal* 38(4), 850-862.
- **Rathje, E.M., Abrahamson, N.A., and Bray, J.D. (1998)** "Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 124(2): 150–159.
- **Rathje, E. M. (2005)** - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale - Università del Texas - Comunicazioni personali
- **Sandro L. Machado, Miriam F. Carvalho, Orencio M. Vilar (2002)** "Constitutive Model for Municipal Solid Waste", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 128(11), pp 940–951

- **Sun-Hoon Kim, Kwang-Jin Kim (2001)** " Three-dimensional dynamic response of underground openings in saturated rock masses", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, vol. 30, pp. 765-782
- **Timothy D. Stark, Hisham T. Eid, W. Douglas Evans, and Paul E. Sherry (2000)** " Municipal Solid Waste Slope Failure. II: Stability Analyses", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 126(5): 408–419