

# REMTECH

Convegno AGI-ALGI  
Le problematiche di stabilità delle discariche:  
analisi ed interventi

Comportamento meccanico rifiuti

*Ferrara, 18 Settembre 2019*

*Prof. Ing. Quintilio Napoleoni*

*Facoltà di Ingegneria - Università di Roma "Sapienza"  
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale*

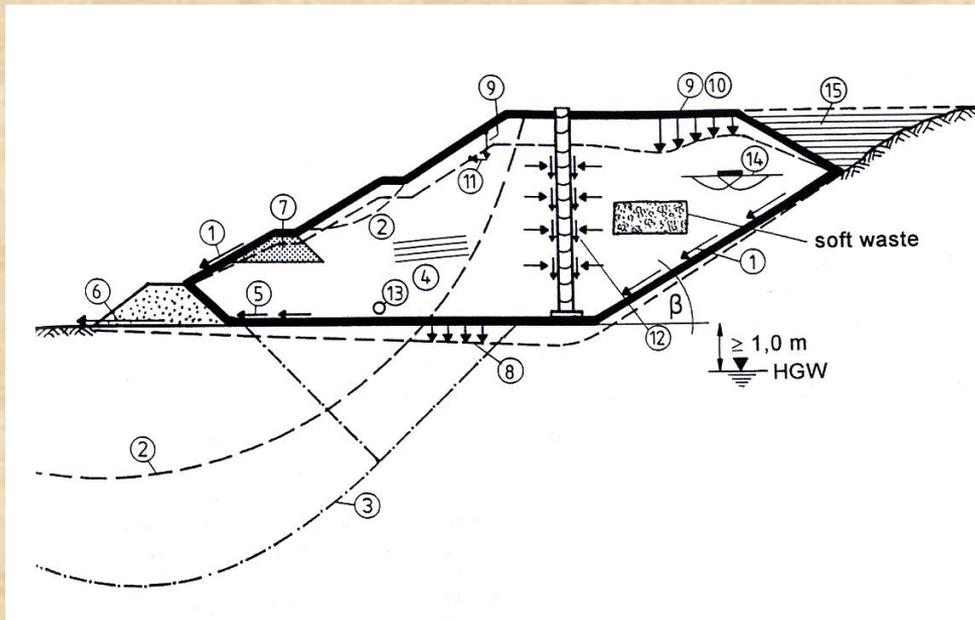


# Premessa

---

- ☞ La caratterizzazione meccanica dei rifiuti è un argomento complesso che pone importanti ed originali problemi sia in fase sperimentale che teorica
- ☞ Nonostante la sua importanza nella progettazione e gestione delle discariche, l'argomento è ancora poco studiato e, soprattutto, i risultati disponibili non hanno ancora una condivisione consolidata
- ☞ I principali aspetti della caratterizzazione meccanica dei rifiuti sono relativi a:
  - Resistenza dei rifiuti
  - Deformabilità

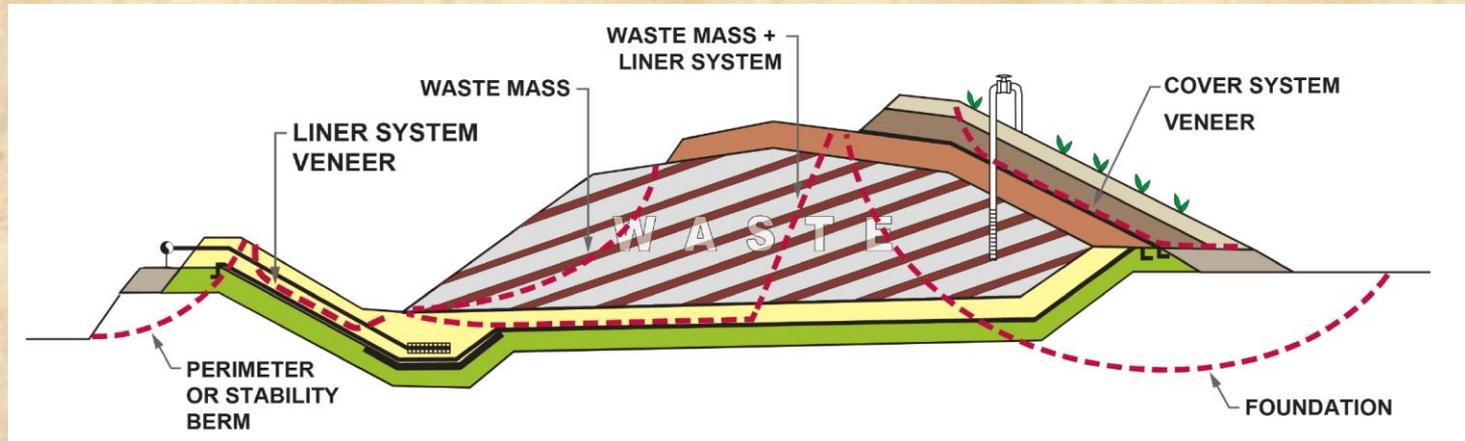
# Aspetti geotecnici nelle discariche



1. Instabilità sulle interfacce dei manti
2. Instabilità globale e locale
3. Instabilità sul terreno di fondazione
4. Presenza di strati disomogenei
5. Pressioni interstiziali (gas e percolato)
6. Stabilità argini di contenimento al piede
7. Stabilità su argini intermedi
8. Cedimenti del piano di fondazione
9. Cedimenti della discarica
10. Cedimenti differenziali sui manti di copertura
11. Variazioni di pendenza sulle sponde
12. Interazioni su pozzi verticali (attrito negativo)
13. Interferenza con i sistemi di raccolta percolato
14. Capacità portante per carichi applicati
15. Infiltrazioni dall'esterno

Problematiche «geotecniche» di una discarica

# Aspetti geotecnici nelle discariche



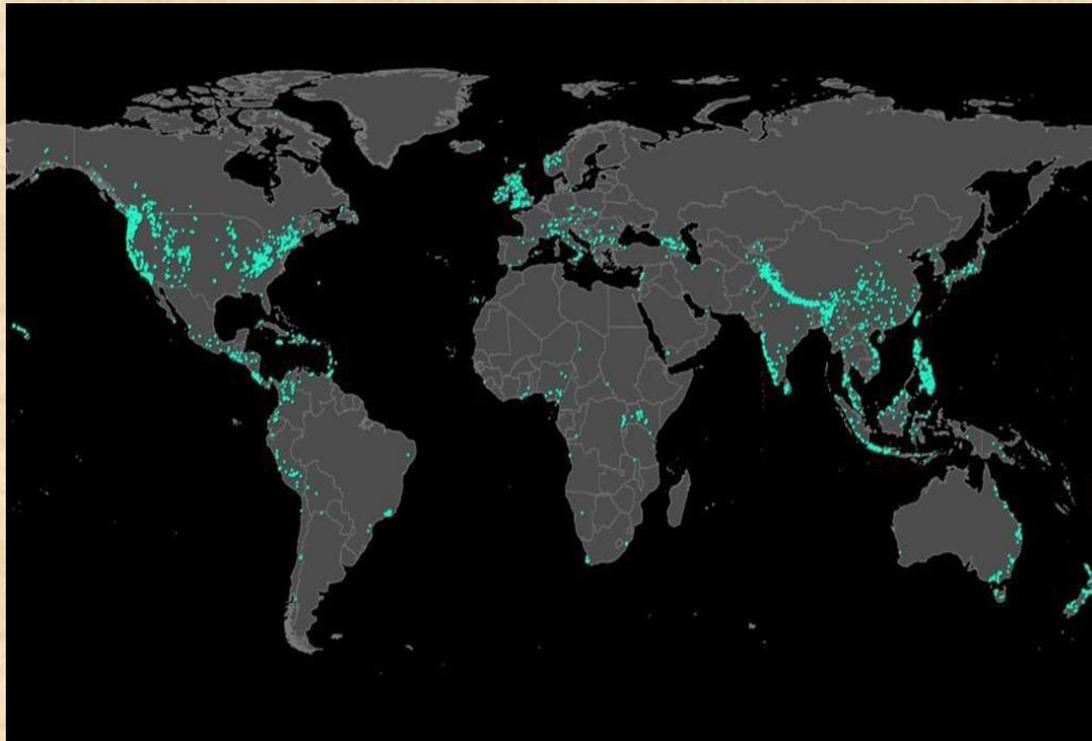
Bonaparte, 2018

## Problemi di instabilità tipici delle discariche

- ☞ Valutazione sia in condizioni transitorie che permanenti
- ☞ Scelta dei parametri di progetto in condizioni statiche e sismiche

# Case Histories

- 👉 Le frane nei rifiuti non sono rare e sono documentati casi in molti paesi del mondo



Localizzazione di siti di discarica con instabilità note (2012)  
N.B. le discariche non sono solo di rifiuti solidi urbani

# Case Histories

## Casi documentati di discariche con fenomeni di instabilità

Anno	Località	Stato	Morti	Cause
marzo 1988	Kettleman, California	USA	0	Eccesso di pressioni interstiziali (acqua)
gennaio 1991	Bandeirantes, Sao Paulo	Brasile	0	Piogge eccezionali
marzo 1992	Belo Horizonte	Brasile	> 100	Piogge eccezionali
aprile 1993	Umraniye-Hekimbasi, Istanbul	Turchia	39	Esplosione di gas
aprile 1993	Istanbul	Turchia	39	Esplosione di gas
marzo 1996	Rumpke, Cincinnati, Ohio	USA	0	Scavi al piede ed esplosione di gas
settembre 1997	Dona Juana, Bogota	Colombia	0	Eccesso di pressioni interstiziali (percolato)
febbraio 1998	Gnojna Grora, Varsavia	Polonia	0	Eccesso di pressioni interstiziali (acqua)
gennaio 1998	Hiriya, Tel Aviv	Israele	0	Incendio ed eccesso di pressioni interstiziali
luglio 2000	Payatas, Manila	Filippine	278	Piogge eccezionali
gennaio 2002	Chongqing	Cina	10	?
ottobre 2005	Shanglue City, Shaanxi	Cina	13	?
marzo 2003	Athens	Grecia	0	Incendio ed eccesso di pressioni interstiziali
febbraio 2005	Leuwigajah, Bandung	Indonesia	147	Incendio e piogge eccezionali
ottobre 2005	Bello, Medellin	Colombia	43	Piogge eccezionali
giugno 2008	Guatemala City	Guatemala	50	Eccesso di pressioni (gas) e piogge
dicembre 2015	Shenzhen, Guangdong	Cina	77	Eccesso di pressioni interstiziali
marzo 2017	Addis Ababa	Etiopia	113	Eccesso di pressioni intestiziali
aprile 2017	Colombo	Sri Lanka	32	Incendio

# Case Histories

---



Discarica di Payatas (Filippine) - 278 morti circa 1.2 Mmc

10 luglio 2000

# Case Histories



© Keystone USA—ZUMA / Rex Features

Discarica di Baguio (Filippine) 26 morti 24 Agosto 2011

# Case Histories



Discarica di Leuwigajah (Indonesia) 147 morti circa 2.6 Mmc

21 febbraio 2005

# Case Histories

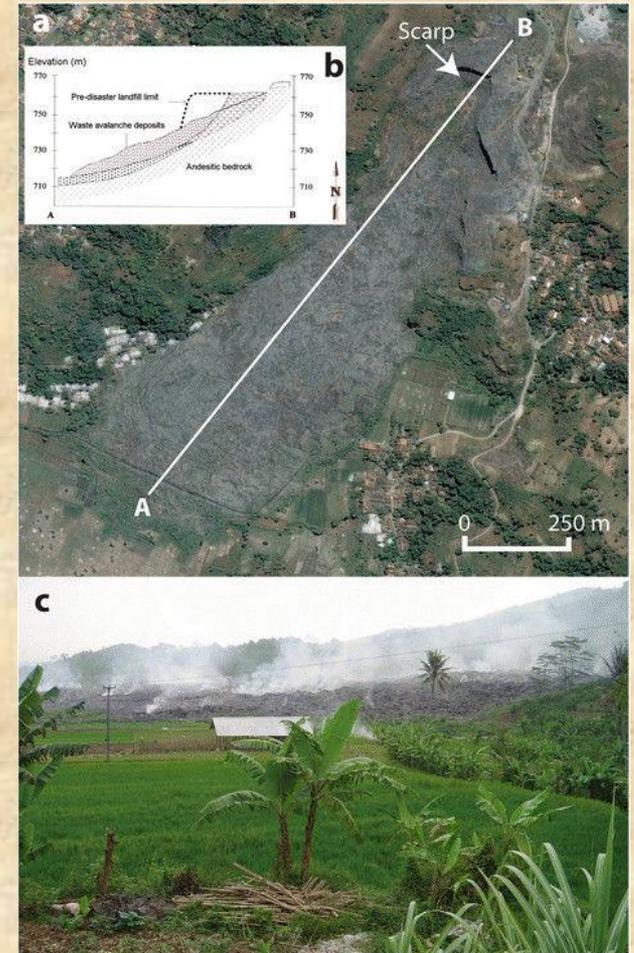
---



Discarica di Koshe - Addis Abeba (Etiopia) 113 morti

12 maggio 2017

# Case Histories



Discarica di Leuwigajah (Indonesia)

# Case Histories



Discarica in  
Sud Africa

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

---

☞ E' più difficile da studiare rispetto ai terreni naturali in quanto dipende, in modo marcato, da molti più fattori:

- Composizione merceologica
- Tipo di rifiuto
- Età del rifiuto
- Compattazione
- Grado di saturazione
- Coperture giornaliere
- Tensione media di confinamento
- Contenuto di fluidi (gas e percolato)

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

---

☞ Fattori che influenzano il comportamento meccanico dei rifiuti:

- l'elevata **deformabilità** di molti degli elementi che costituiscono la fase solida;
- la **non completa saturazione** del materiale;
- l'incertezza nella **composizione iniziale per merceologia**, forma e dimensioni degli elementi che formano lo scheletro solido;
- i processi di **decomposizione e mineralizzazione** della sostanza organica che provocano modifiche delle fasi liquida e gassosa del materiale e variazioni nel tempo delle proprietà fisico - meccaniche del materiale;
- accentuati **fenomeni di consolidazione primaria e secondaria**,

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

---

☞ E' possibile una analogia con il comportamento delle terre?

- Natura delle fase solida molto differente (tipologia e pezzatura)
- Deformabilità dello scheletro solido
- Rottura essenzialmente non piana (anisotropia)
- Grandi deformazioni dell'elemento di volume
- Non saturazione del mezzo
- Effetto del tempo

☞ Modellazione del comportamento

- Modello reologico tipo Mohr-Coulomb?
- Studio del comportamento meccanico (Campionamento e pezzatura)

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

---

## ☞ Prove in sito ?

- Attrezzature non adatte
- Interpretazione non riferibile alla bibliografia dei terreni

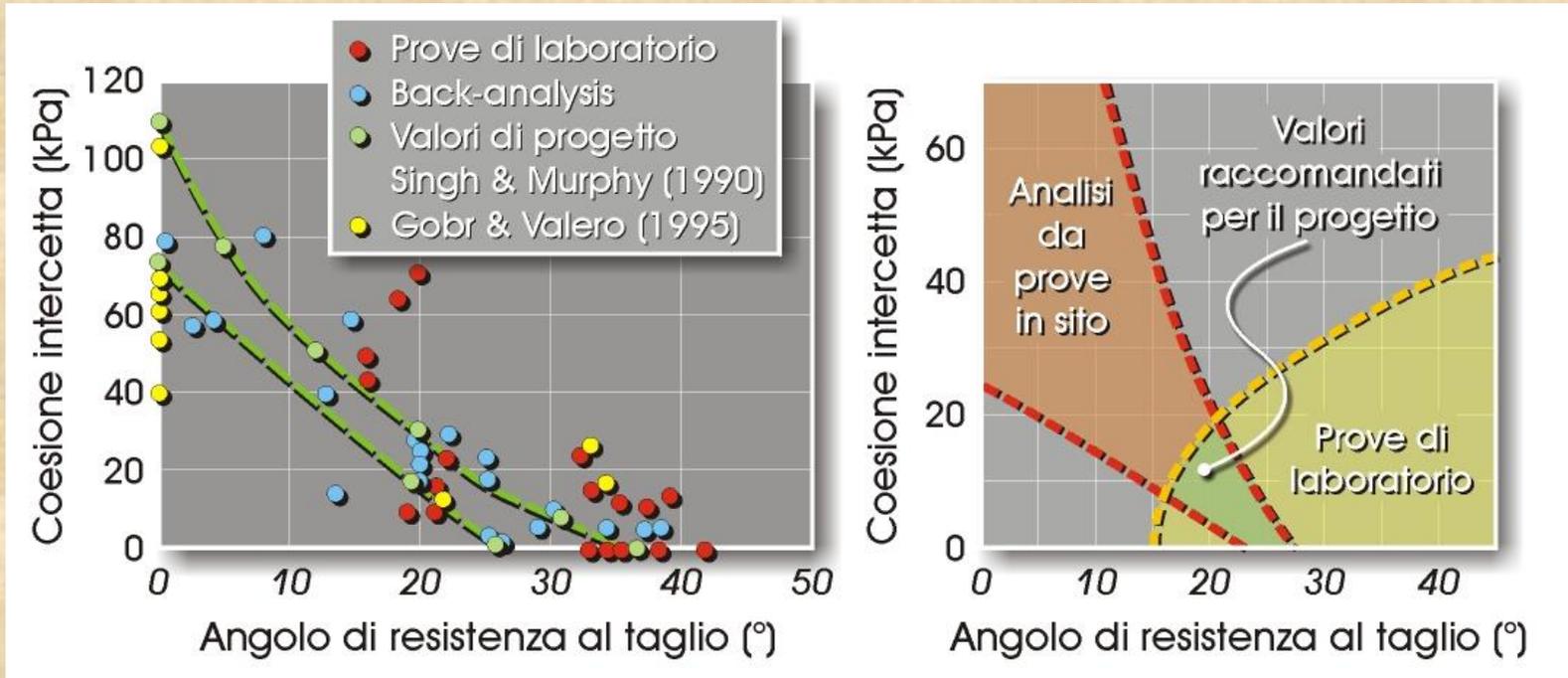
## ☞ Prove di laboratorio ?

- Attrezzature specifiche (gradi deformazioni)
- Dimensioni del campione (pezzatura elevata)
- Rappresentatività del campione (eterogeneità del materiale)
- Durata (effetti del tempo sul comportamento)

## ☞ Back-analisy (prova in sito a grandezza naturale)

- Ricostruzione del meccanismo di collasso su eventi avvenuti (poca bibliografia e poco omogenea)

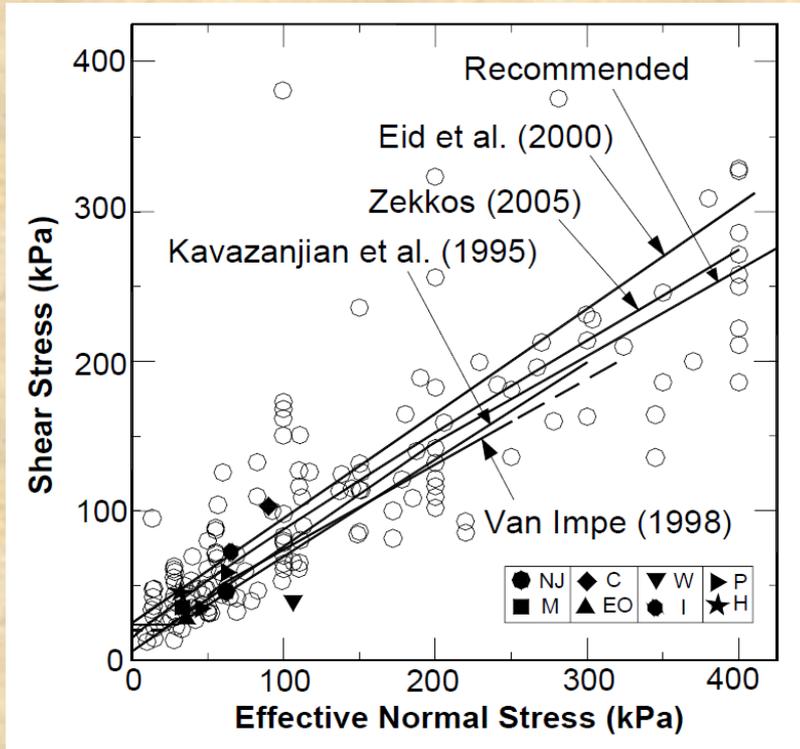
# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



Sanchez-Alciturri et al., 1993; Manassero, 1996

Resistenza al taglio dei rifiuti da bibliografia

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



Interpolazione dei dati bilineare

$c' = 6 \text{ kPa}$  e  $\varphi' = 35^\circ$   
per tensioni normali efficaci  $< 200 \text{ kPa}$

$c' = 30 \text{ kPa}$  e  $\varphi' = 30^\circ$   
per tensioni normali efficaci  $> 200 \text{ kPa}$

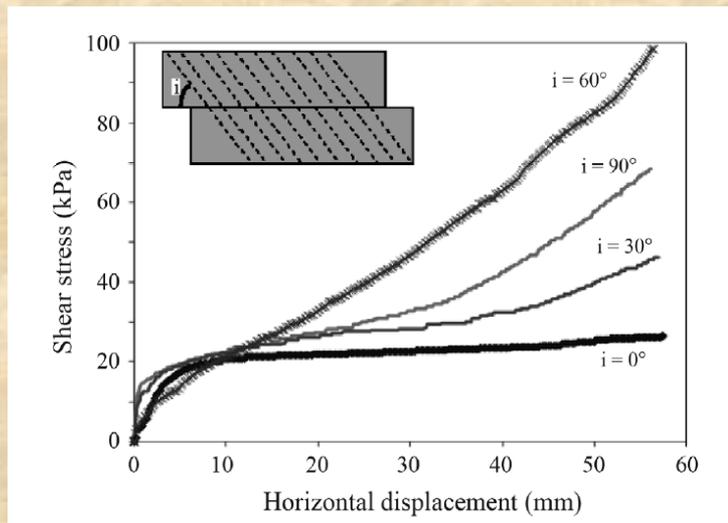
Huvaj-Sarihan e Stark, 2008

Resistenza al taglio derivata da Back-analisy

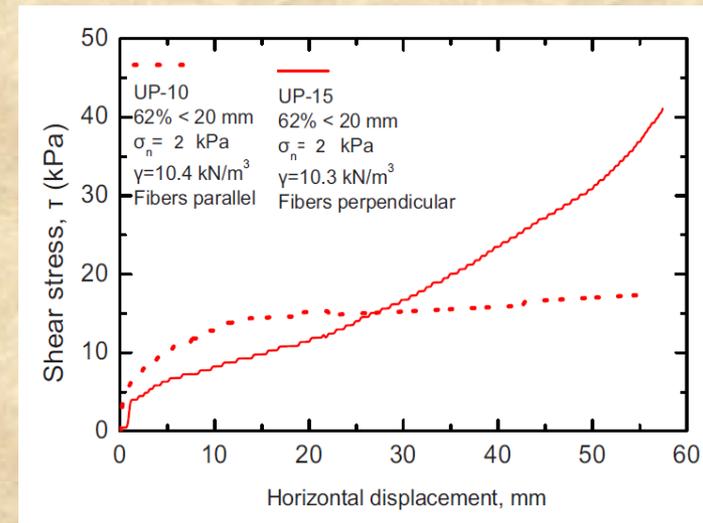
# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

☞ Quali prove di laboratorio?:

- Prove di Taglio
- Prove triassiali



Athanasopoulos et al., 2008



Giorgiopoulos, 2005

Variazione della resistenza al taglio al variare dell'orientazione della fibre planari

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

---

☞ Quali criticità nei valori di bibliografia:

- Sono indipendenti dalla merceologia
- Sono indipendenti dal livello di compattazione
- Sono indipendenti dalla tensione di confinamento
- Sono indipendenti dal livello di deformazione
- Sono indipendenti dall'età del rifiuto

☞ Necessità di studiare il comportamento meccanico almeno in funzione della merceologia

- Merceologia fortemente dipendente dalla provenienza dei rifiuti

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

---

## Merceologia (Geo)tecnica

☞ **Categoria I:** materiali Inerti

- Vetro, Legno, Metalli, Terre e simili, Ceramica

☞ **Categoria D:** materiali altamente Deformabili

- Carta, Tessili, Polistirolo,
- Plastica, Gomma

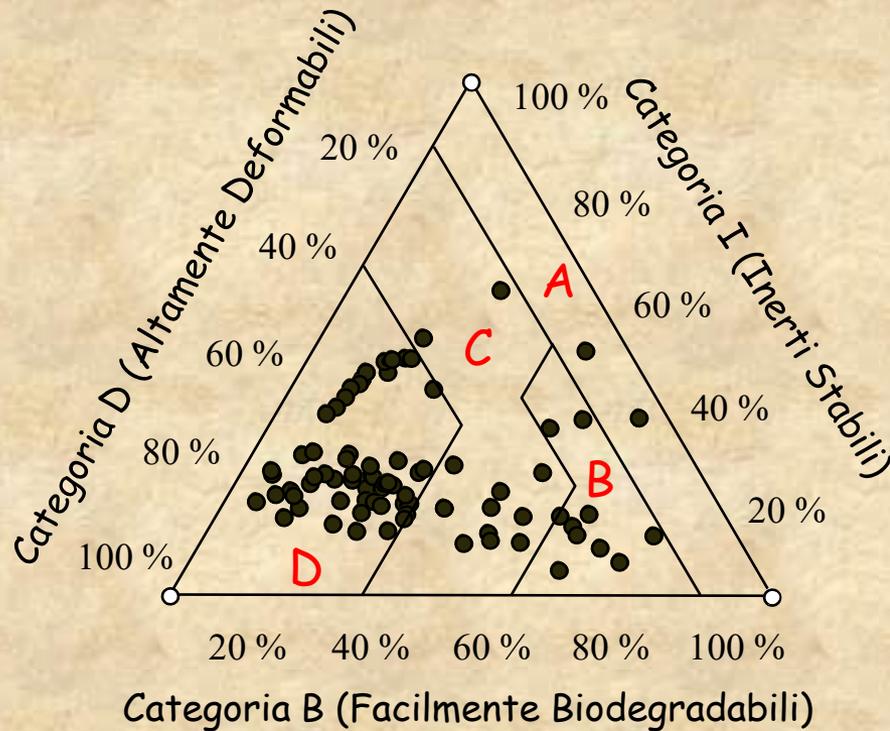
☞ **Categoria B:** materiali facilmente Biodegradabili

- Materia organica

☞ Sottovaglio?

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

## Merceologia (Geo)tecnica



- A - Sud-Est Asiatico
- B - Area del Mediterraneo
- C - Europa Centro-Settentrionale
- D - U.S.A., Canada, Giappone

Caratterizzazione di rifiuti di differente provenienza

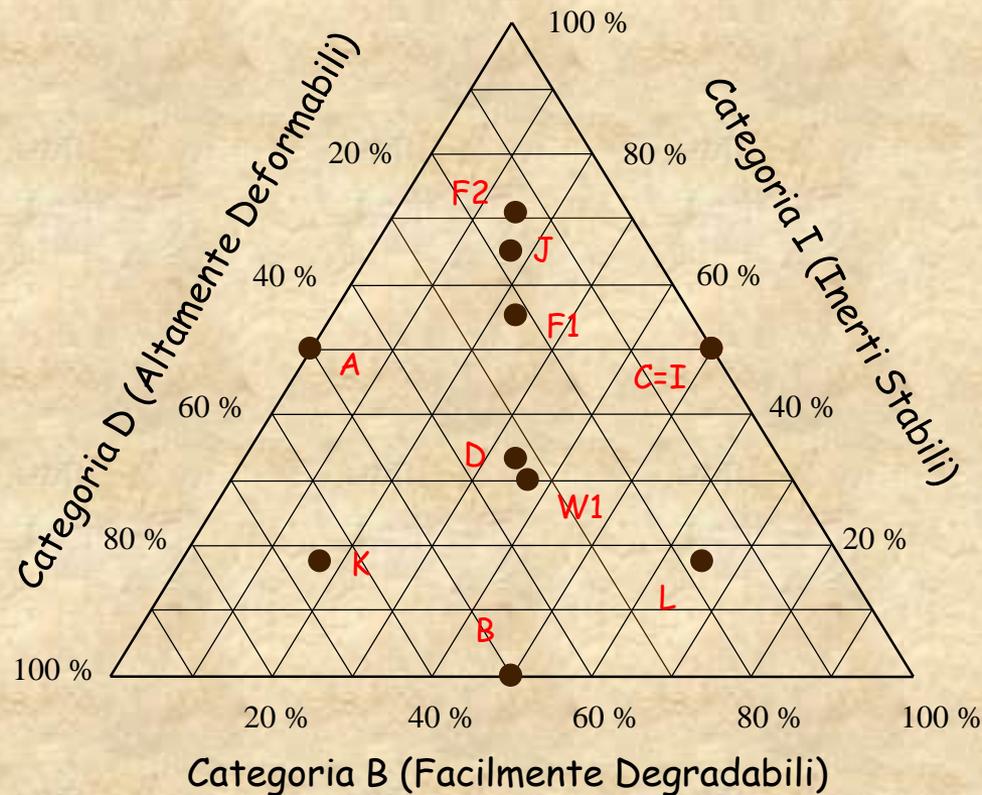
# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

- ☞ Preparazione di campioni in laboratorio di rifiuto fresco da sottoporre a:
- Prova Proctor
  - Prova Triassiali Consolidata Drenata



Pezzatura di dimensioni non superiori a  $\frac{1}{4}$  del diametro

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



Merceologia di campioni sottoposti  
a prove triassiali in laboratorio

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



Prova Proctor  
con **energia di  
compattazione standard**

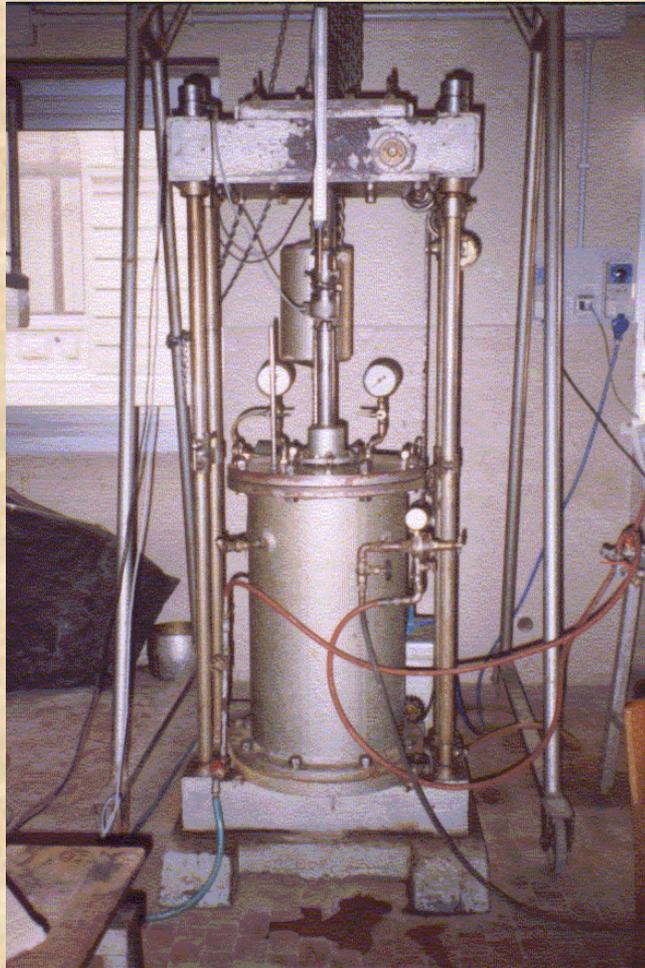


- Costipamento:
- pestello: 4,6 kg
  - altezza: 43 cm
  - strati da 2 kg



- Campione:
- altezza: 60 cm
  - diametro: 25 cm

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



Cella triassiale



Controllo dei volumi

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

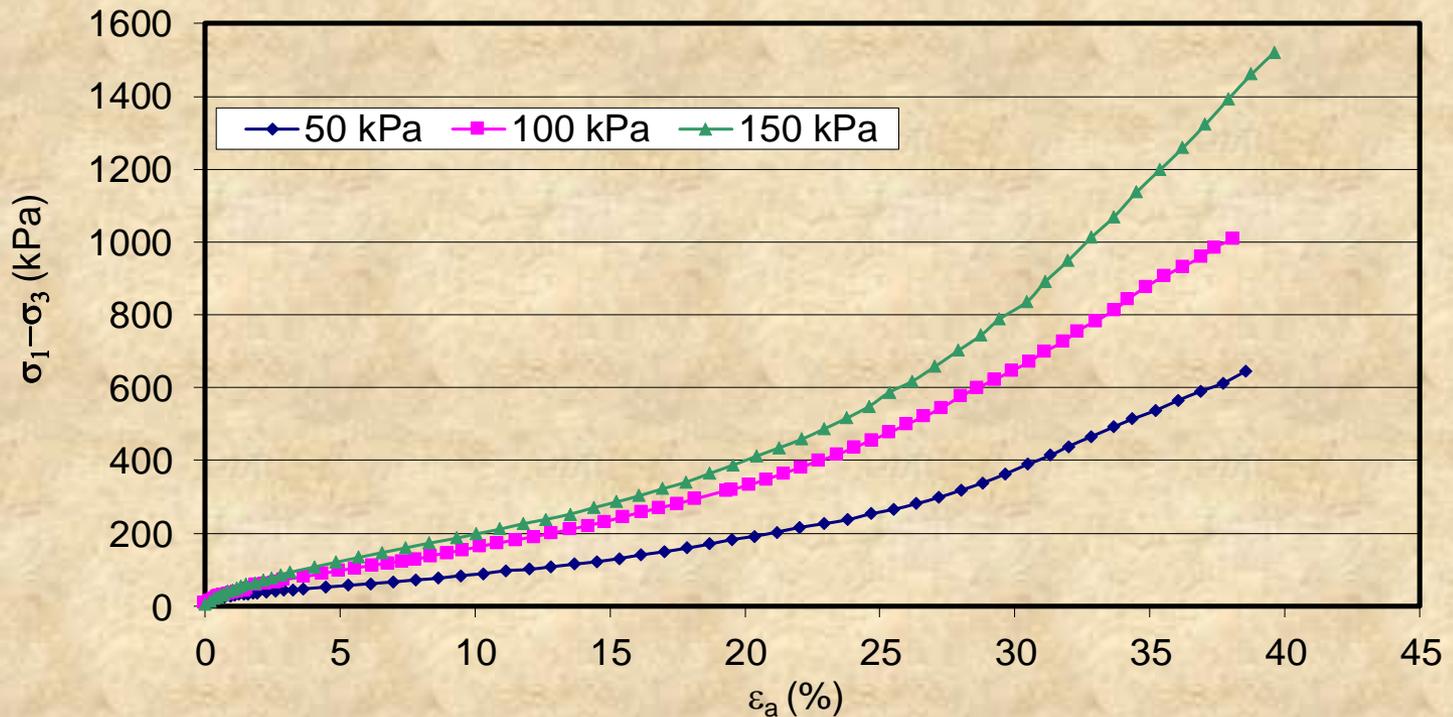


Prova ELL senza membrana



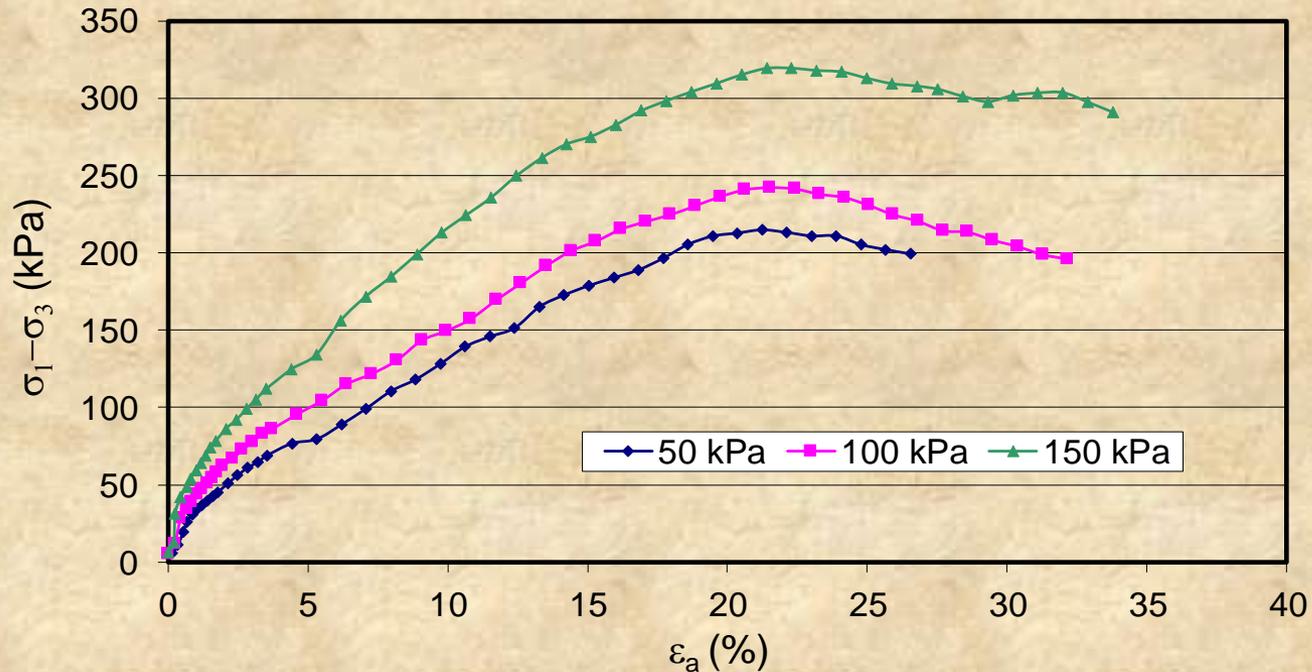
Prova ELL con membrana

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



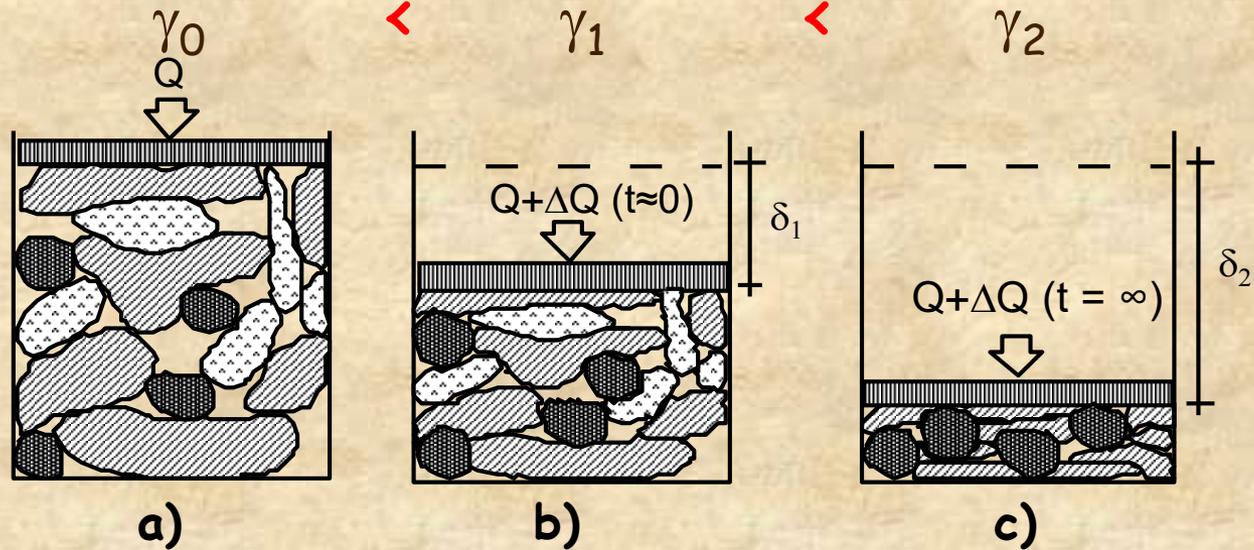
Curve sforzi-deformazione per campioni  
a elevata componente Categoria D  
(altamente Deformabili)

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



Curve sforzi-deformazione per campioni  
a elevata componente Categoria I  
(Inerti stabili)

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



-  elementi inerti stabili
-  elementi molto deformabili
-  elementi facilmente degradabili

Nel tempo aumenta il contenuto % di fibre  
(elementi planari resistenti)

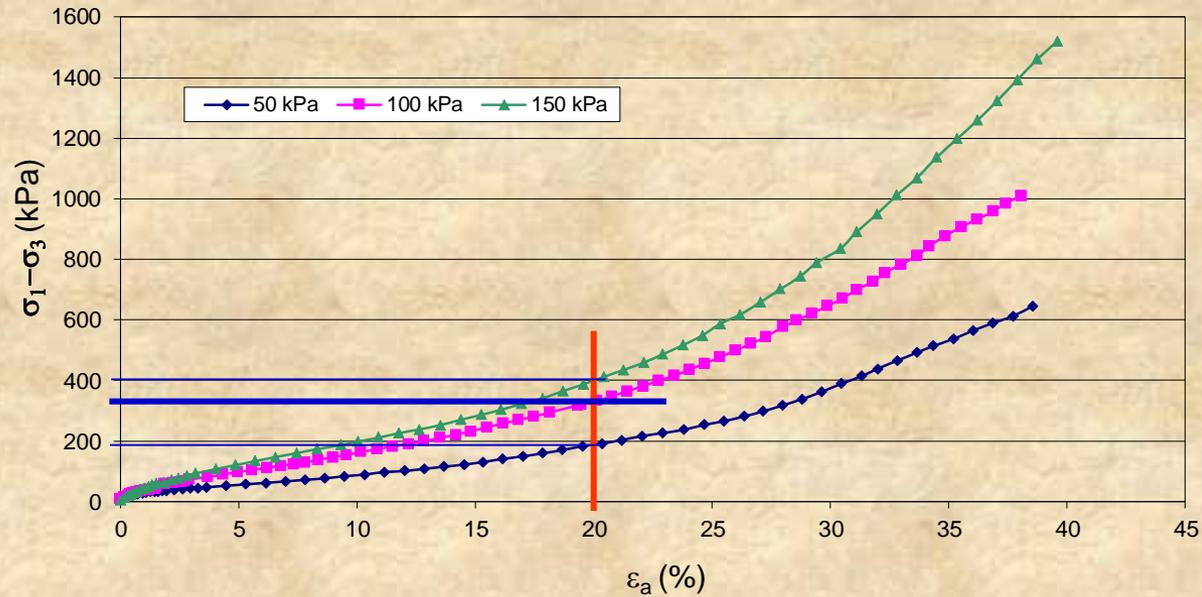
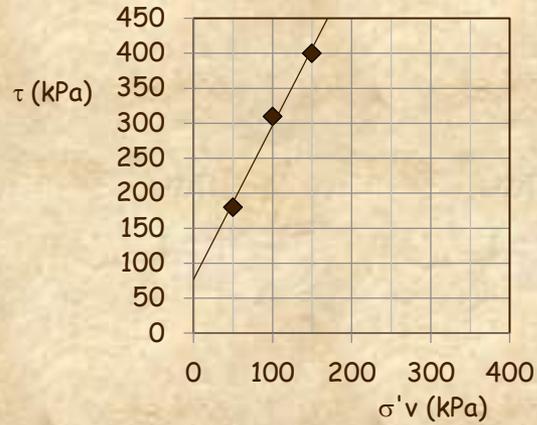
# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

## Criterio della deformazione limite ammissibile

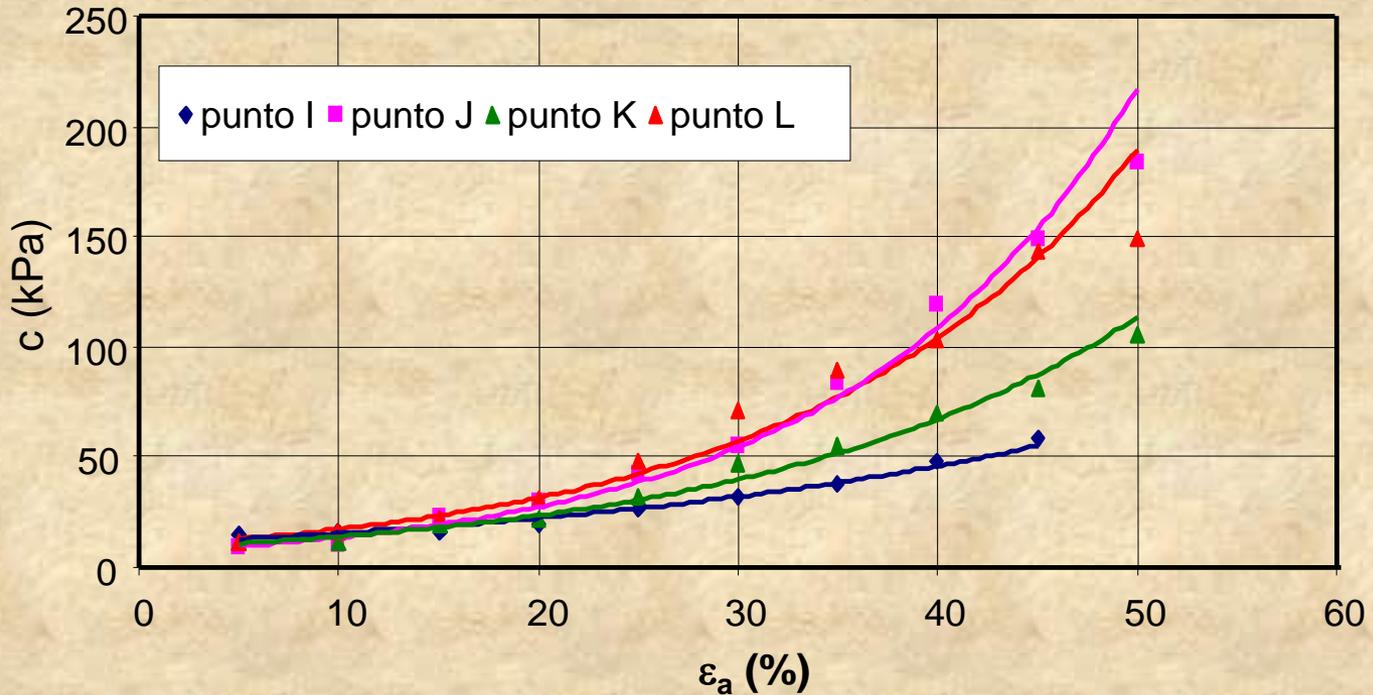
La rottura "tecnica" di una discarica (che corrisponde alla sua perdita di efficienza) avviene, in genere, prima di un vero e proprio collasso per eccesso di deformazione

- ☞ Si adotta il criterio di rottura di Mohr-Coulomb
- ☞ Si determinano i valori dei parametri di resistenza al taglio fissando il livello di deformazione "ammissibile" (per una discarica è compresa tra 5% e 10%)
- ☞ Si utilizzano i parametri  $c^*$  e  $\varphi^*$  corrispondenti per le verifiche di stabilità
- ☞ In questo modo la soluzione progettuale sarà stabile ammettendo nel corpo dei rifiuti delle deformazioni limitate

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

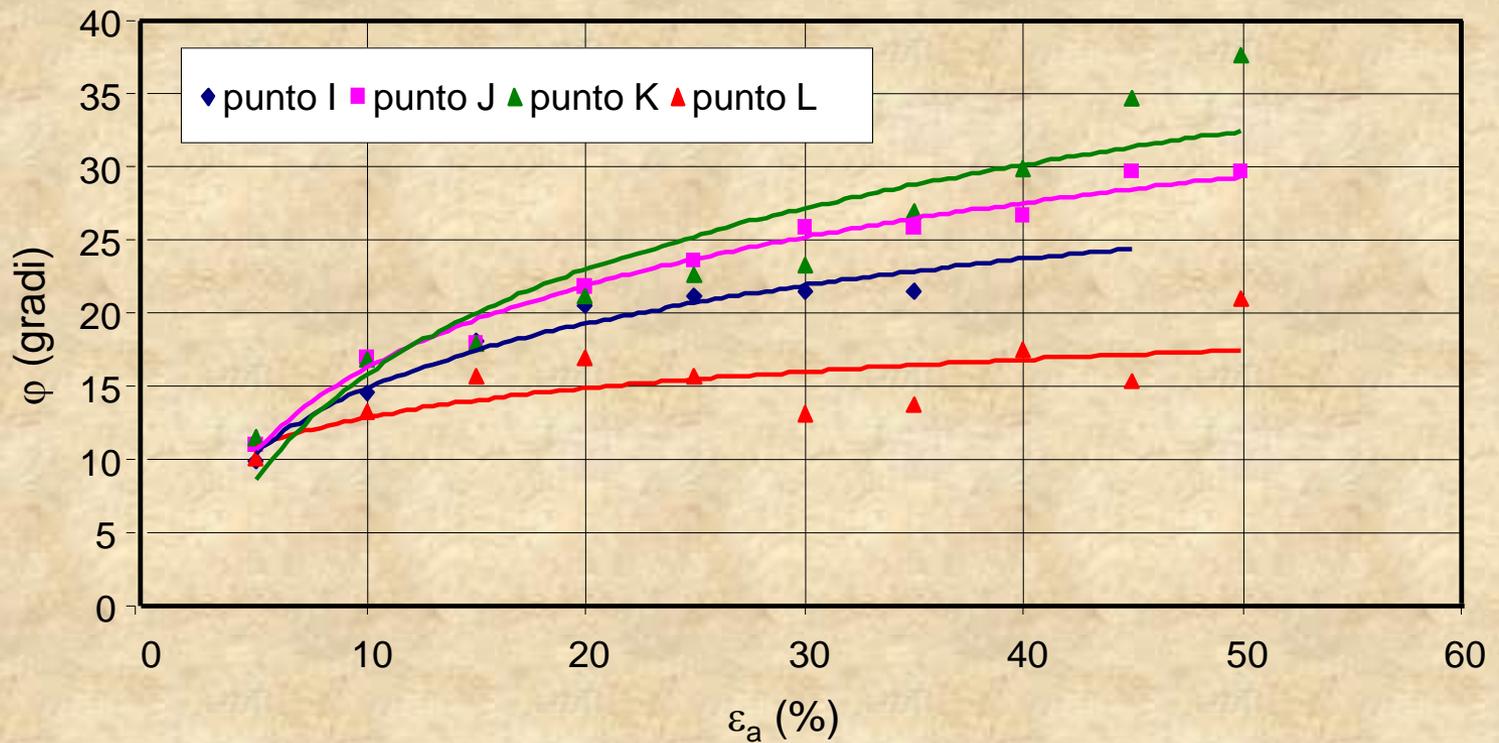


# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



Variazione della coesione con la deformazione

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



Variazione dell'angolo di attrito con la deformazione

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

## LIMITI PRINCIPALI

- ☞ Il rifiuto "fresco" utilizzato non tiene conto dei fenomeni di degradazione presenti in un ammasso di rifiuti
- ☞ Il modello di comportamento meccanico utilizzato è quello della geotecnica classica, ma i rifiuti sono assai lontani da un terreno naturale
- ☞ Effetto scala sulla dimensione dei campioni

## OSSERVAZIONI

- ☞ Influenza delle merceologia e della pezzatura
- ☞ Miglioramento del comportamento meccanico con le deformazioni (tipo terra rinforzata)
- ☞ Influenza del tempo ?
  - Aumento di peso di unità di volume
  - Riduzione della frazione biodegradabile (aumento relativo della frazione di «fibre planari»)

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti



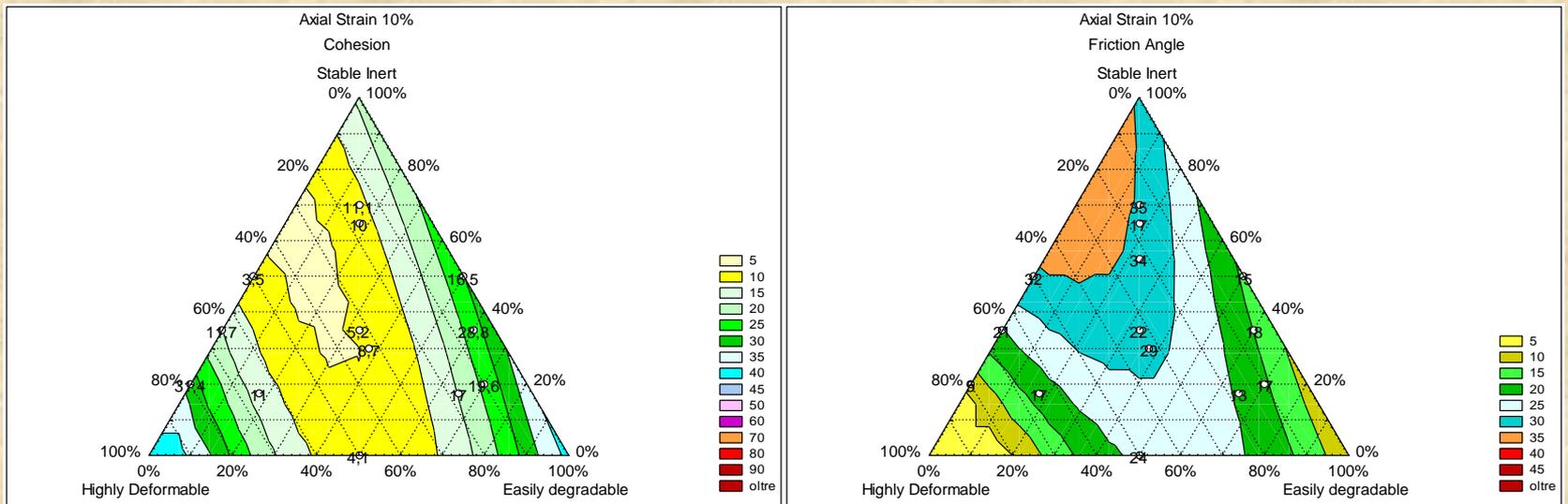
Il rifiuti abbancati in discarica sembrano mostrare buone caratteristiche meccaniche d'insieme

# Carte di Resistenza dei rifiuti

---

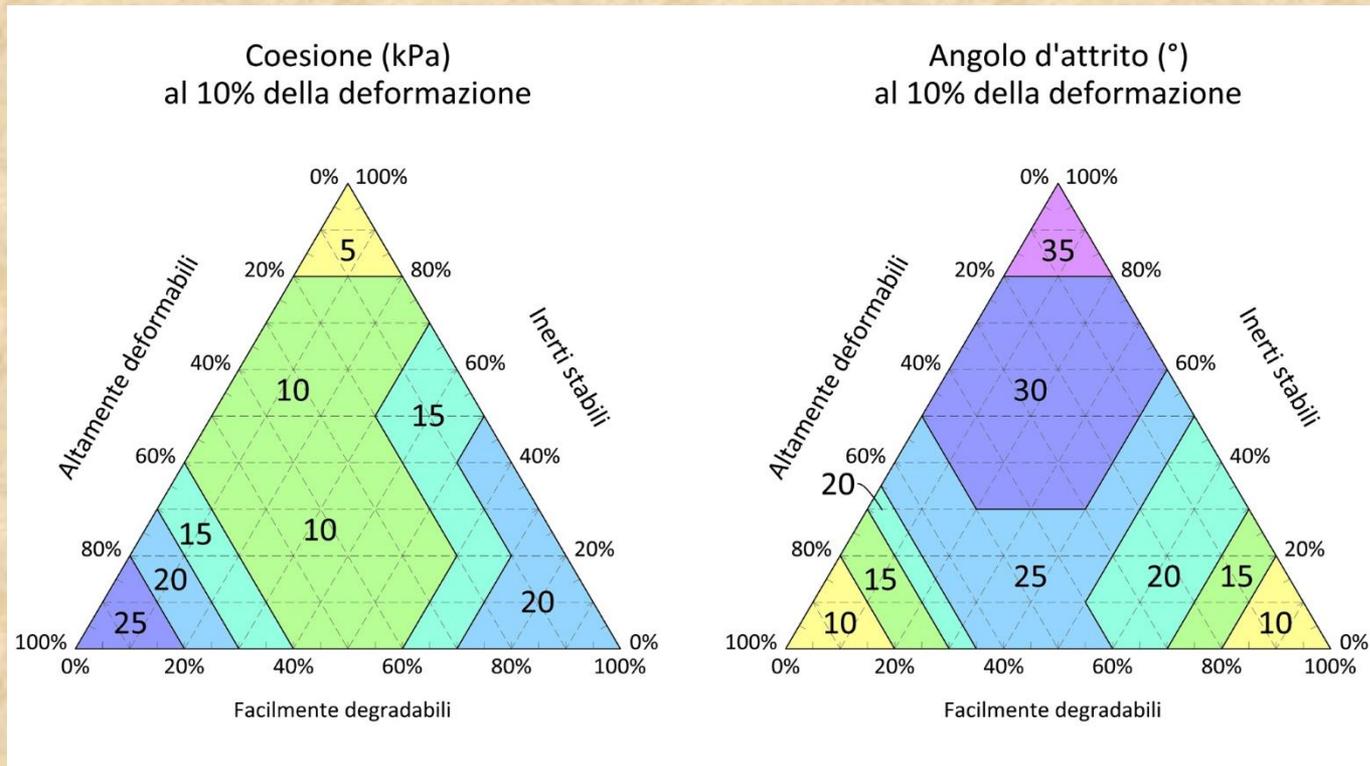
- ☞ Noti i parametri di resistenza al taglio per i vari tipi di rifiuto e relativi ai vari livelli di deformazione è possibile stimare i parametri meccanici per qualsiasi rifiuto
- ☞ Andamento dei parametri di resistenza al variare della composizione per ogni livello di deformazione fissato interpolando i dati puntuali fino a coprire l'intero diagramma
- ☞ Definizione di un rifiuto tipo per ogni singolo caso
- ☞ Parametri meccanici senza prove dedicate

# Carte di Resistenza dei rifiuti



Interpolazione dei dati sperimentali al 10% di deformazione assiale

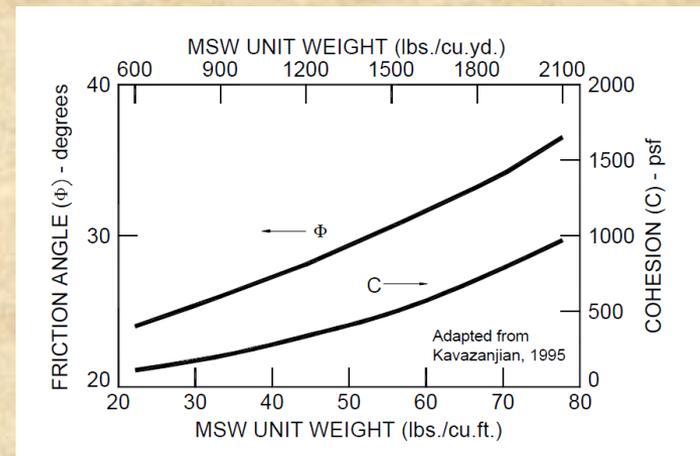
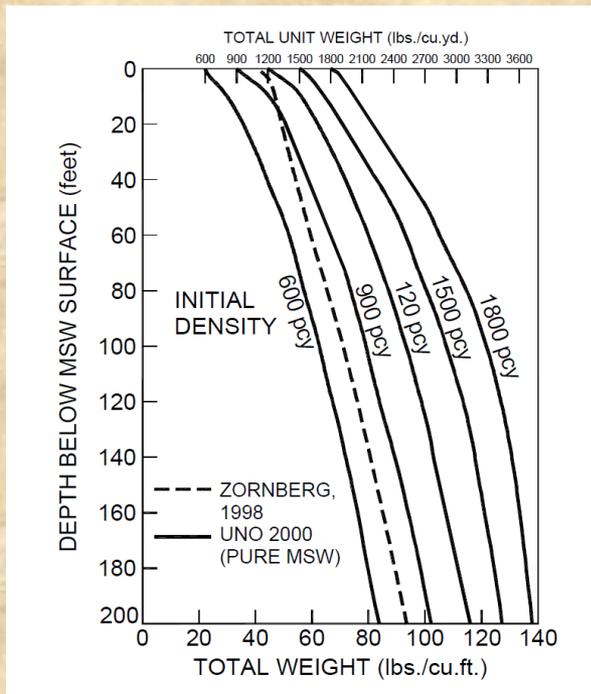
# Carte di Resistenza dei rifiuti



Diagrammi regolarizzati dei dati sperimentali al 10% di deformazione assiale

(con energia di compattazione costante e  $\gamma$  variabile)

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

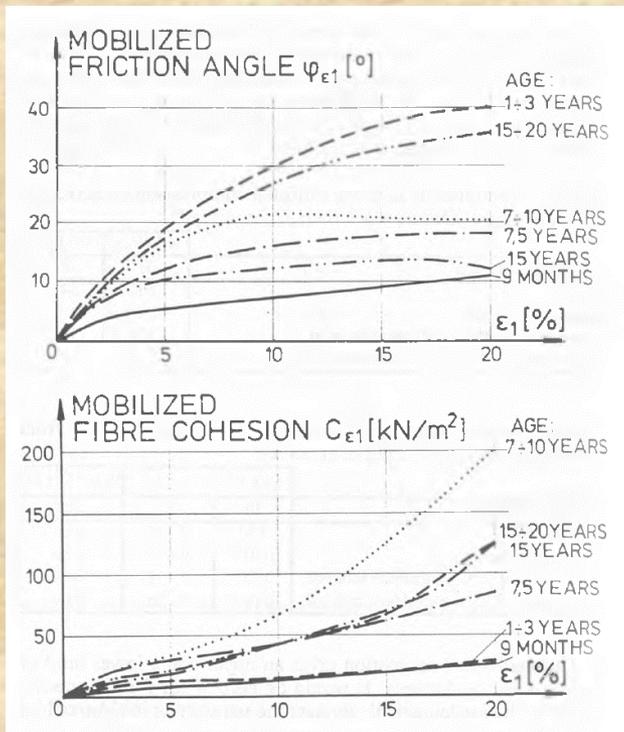


Boutwel G. P. 2002

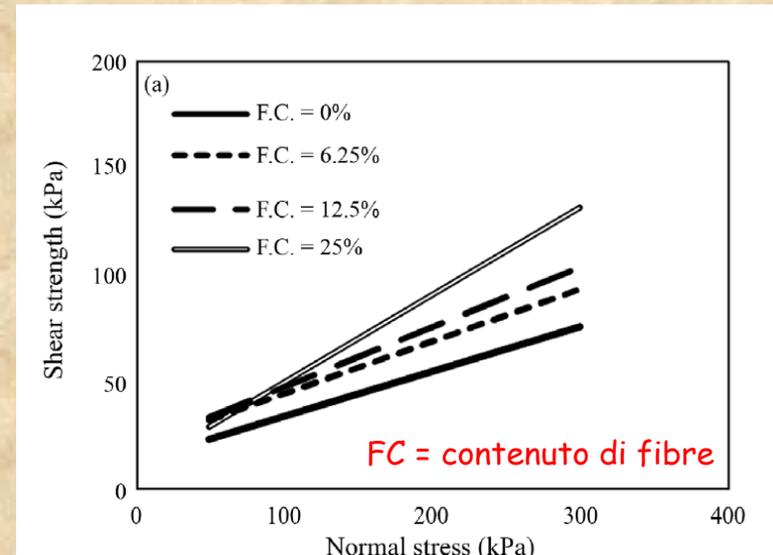
Variazioni della resistenza con il peso di unità di volume

# Caratterizzazione meccanica dei rifiuti

☞ Quale effetto del tempo: il rifiuto migliora o peggiora le proprie caratteristiche meccaniche?



Kockel, 1995



Machado e Karimpour-Fard, 2011

# Conclusioni

---

- ☞ I rifiuti sembrerebbero aumentare la propria resistenza con il tempo (prove su rifiuto fresco cautelative)
- ☞ Prove di laboratorio di difficile esecuzione
- ☞ Prove triassiali più rappresentative delle prove di taglio diretto (che sono però conservative)
- ☞ Forte dipendenza dalla merceologia
- ☞ Caratterizzazione da prove di laboratorio possibile ma devono essere dedicate al caso specifico
- ☞ Caratterizzazione da bibliografia spesso poco rappresentativa
- ☞ Le carte di resistenza (con la dovuta cautela) possono rappresentare una importante fonte per la caratterizzazione meccanica dei rifiuti