

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria chimica e dei materiali

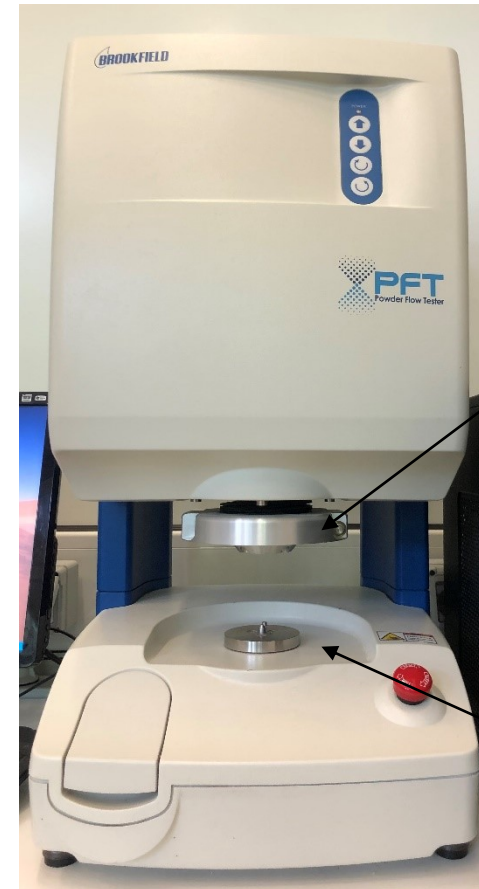
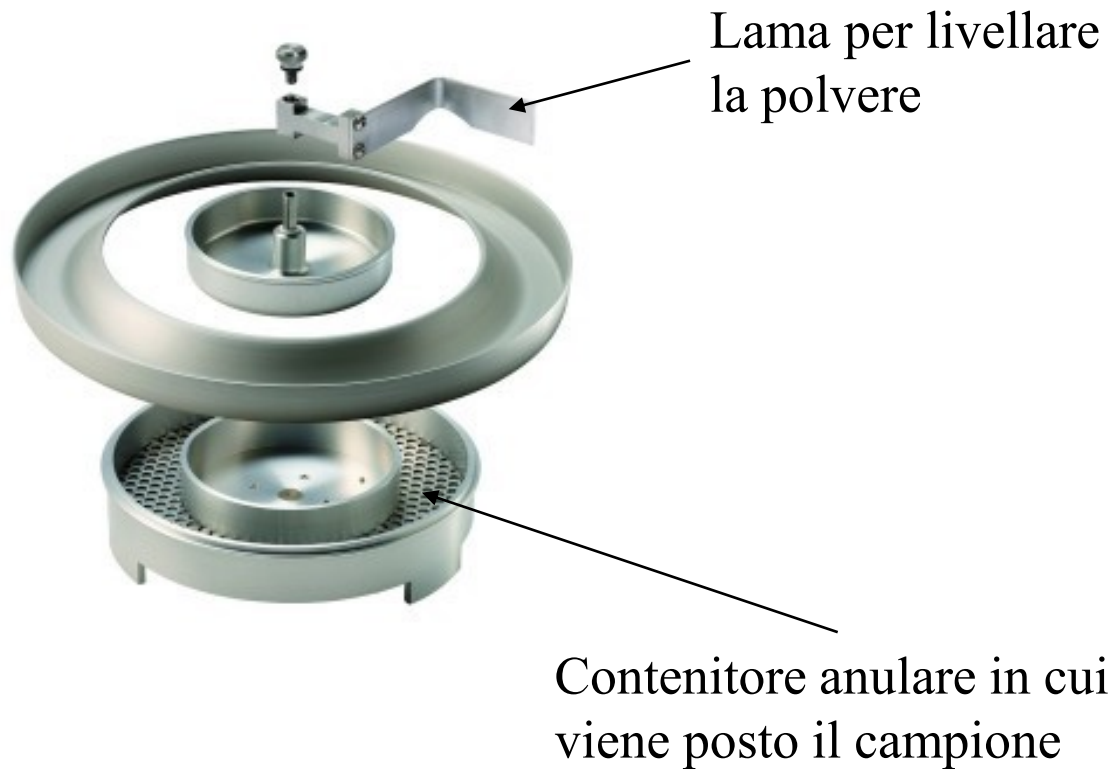
***Relazione per la prova finale***  
***Indentazione dinamica per la caratterizzazione***  
***della scorrevolezza delle polveri***

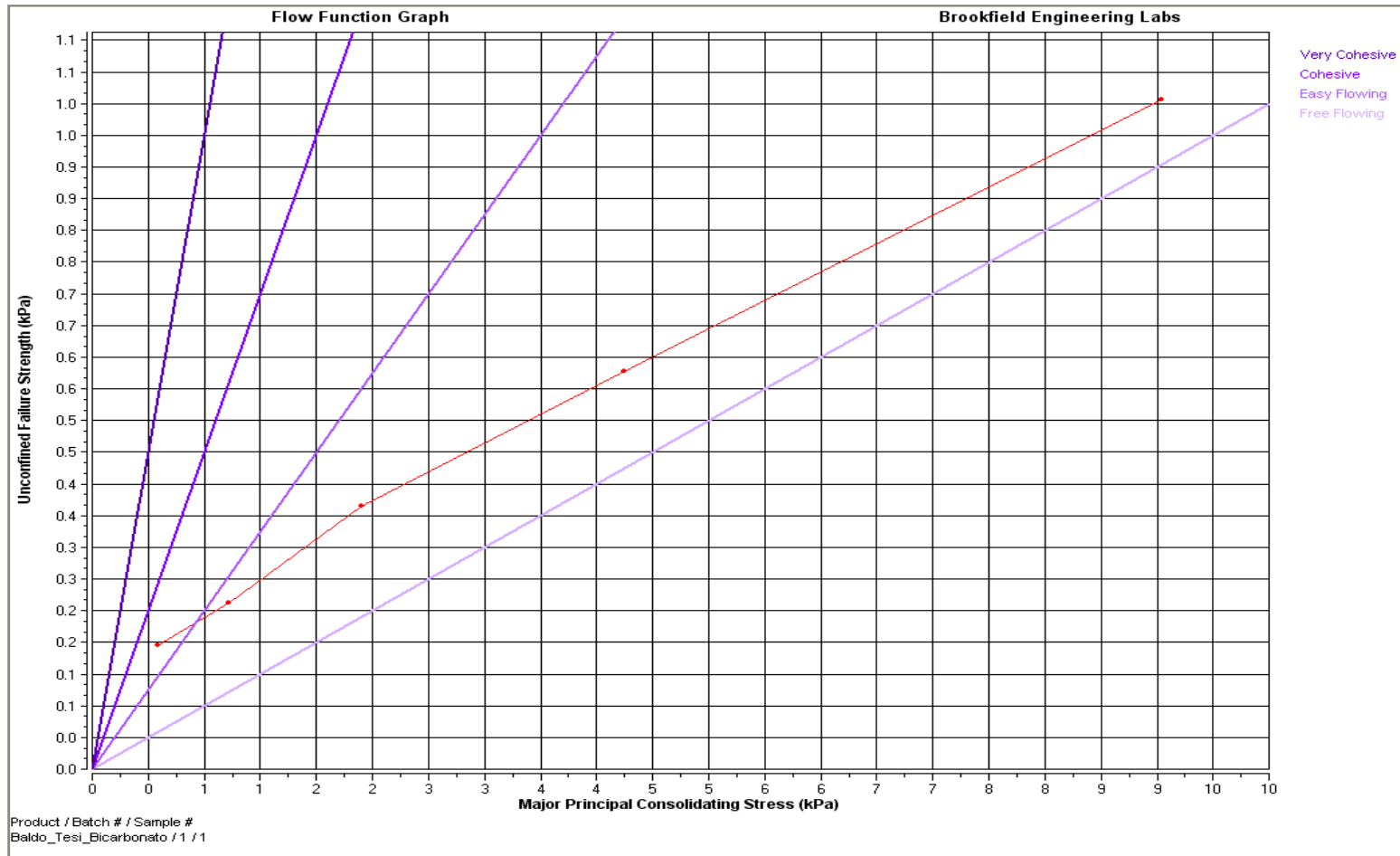
Tutor universitario: Prof. Andrea Claudio Santomaso

Laureando: *Gianluca Baldo*

Padova, 14/07/2022

Obiettivo: determinazione dell'attrito interno

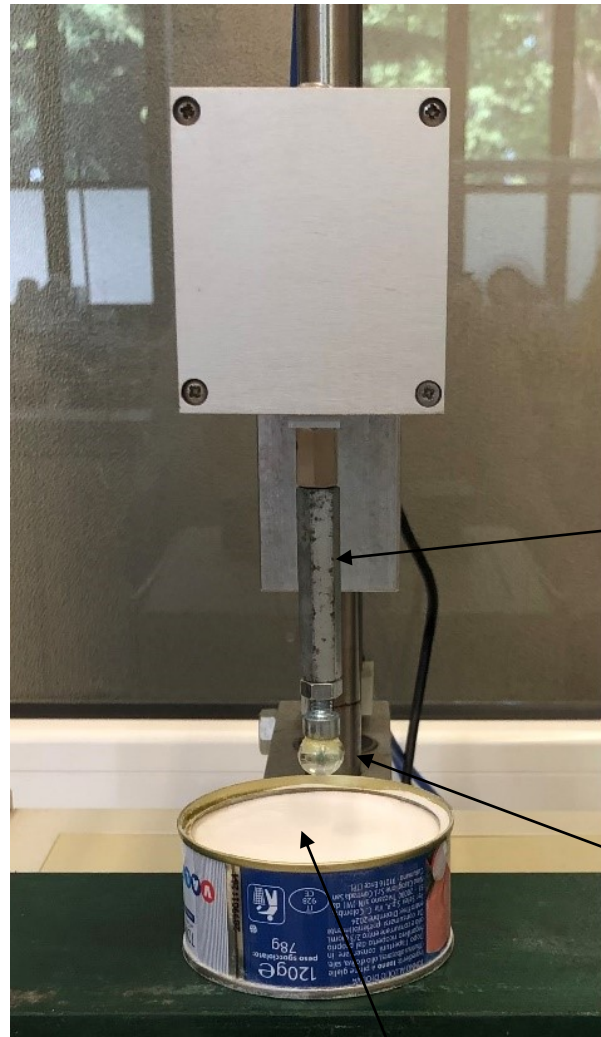




Il Bicarbonato di Sodio, il campione in esame, viene rappresentato con la linea rossa ed è presente nella zona di polvere facilmente scorrevole

Gli sforzi di cedimento vengono utilizzati per la determinazione del constraint factor dato da:

$$C = \frac{H_S}{f_c}$$



Braccio  
Meccanico

Sfera

Polvere in esame

Metodo utilizzato:

- Compression: penetrazione della sfera nella polvere
- Relaxation: rilassamento per il recupero delle deformazioni elastiche
- Traction: risalita della sfera

Grandezze principali da fissare per lo svolgimento della prova

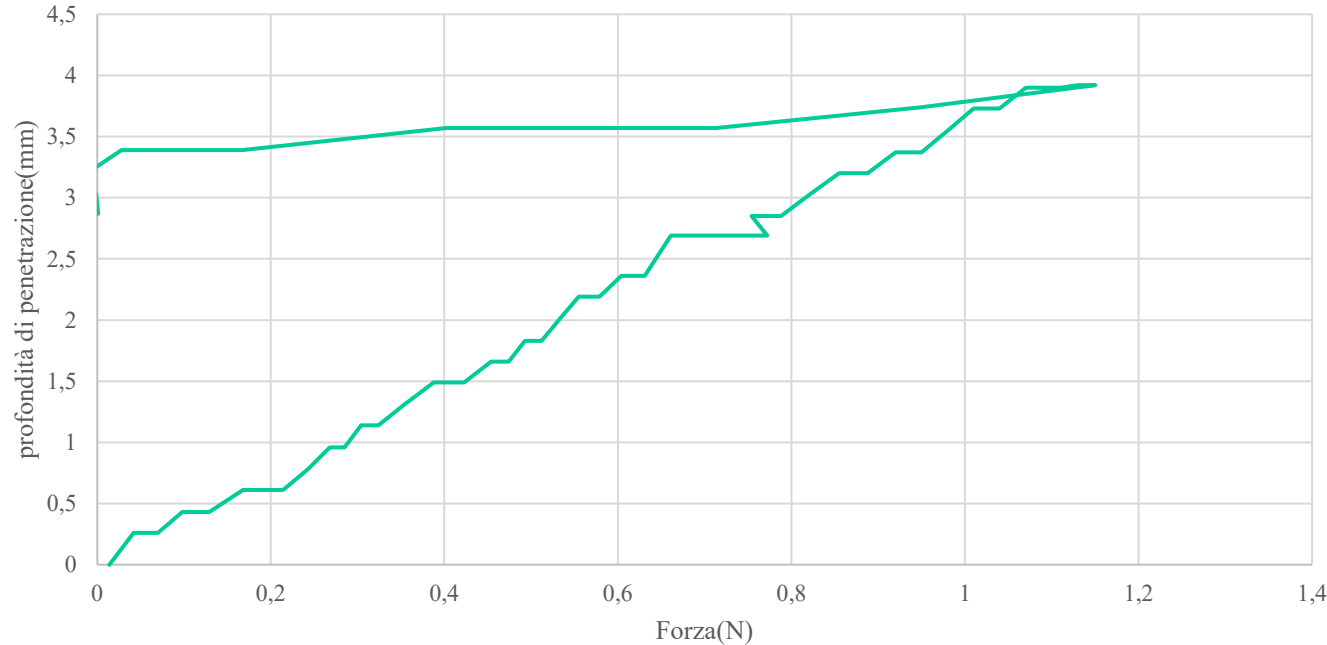
- Velocità di discesa: deve rispettare la seguente equazione

$$v < \frac{\sqrt{2gd_p}}{10} \quad \text{dp: dimensioni delle particelle}$$

non deve essere inferiore a 0.8 mm/s per vibrazioni dello strumento

- Profondità di penetrazione: deve essere inferiore al raggio della sfera per non avere una perdita di significato delle misurazioni effettuate
- Tempo di rilassamento: tempo che intercorre tra la fase di discesa e di salita, viene posto uguale a 0 per problemi legati allo studio del grafico che si ottiene

Indentazione statica per  $\sigma=15000\text{Pa}$



Il grafico rappresenta una delle prove effettuate per sforzi di consolidamento pari a 15000 Pa. Si possono distinguere le 2 fasi di discesa e salita della sfera.

Si determinano: profondità di penetrazione  
Forza massima  $\longrightarrow$

Si utilizza la profondità impostata dallo strumento

Con la profondità di penetrazione si calcola la superficie del cratere creato dalla sfera:

$$A = \pi \cdot h \cdot (d_i - h),$$

$d_i$ : diametro della sfera

Per il calcolo della Forza  
si possono utilizzare 2  
metodi

Metodo della  
media

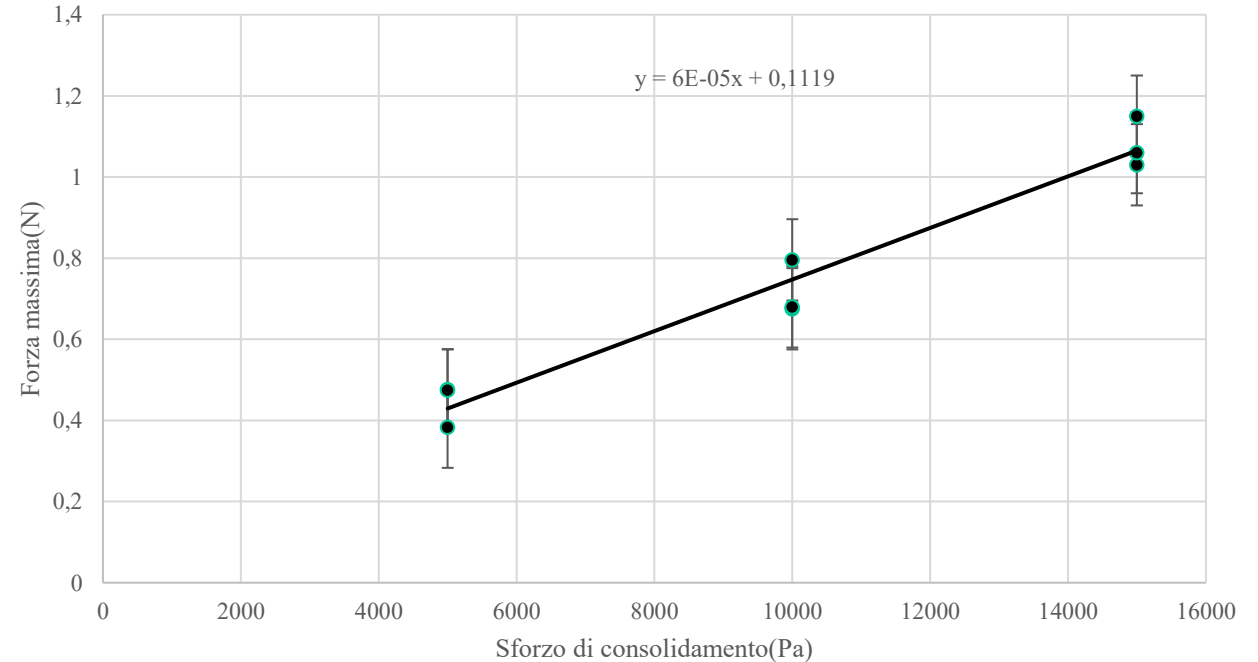
$$\bar{F} = \frac{\sum_1^3 F_i}{3}$$

Si determina la durezza:

$$H_s = \frac{F_{max}}{A}$$

Si ottiene un valore di constraint factor pari a 6.3

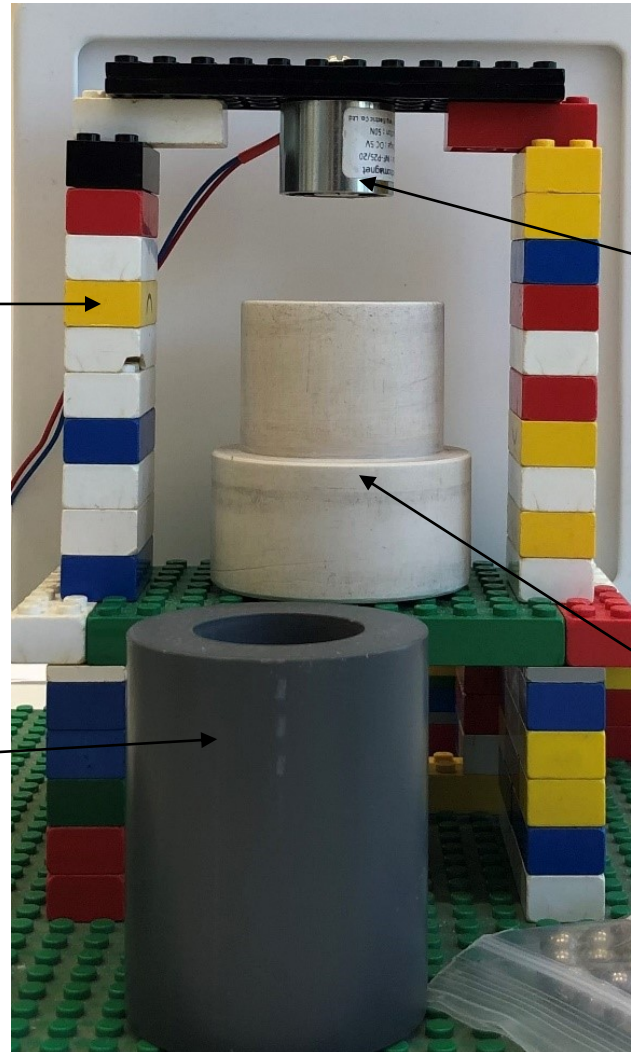
Metodo della  
regressione lineare  
determinazione forze per calcolo di Hs



Per la prova di indentazione dinamica si sfrutta la forza di gravità

Struttura in lego: permette di modificare in modo semplice l'altezza di caduta della sfera ed è il giusto compromesso tra costo e stabilità

Elemento estensore del contenitore per poter porre una quantità maggiore di polvere così da poterlo riempire completamente



Magnete: trattiene la sfera prima della prova, permette di svolgere prove riproducibili e garantisce la presenza della sola forza di gravità agente sulla sfera

Contenitore della polvere in esame: deve poter essere riempito interamente per poter riprendere in modo ottimale la penetrazione della sfera nella polvere



Dallo studio delle immagini si calcolano: raggio del cratere e la profondità di penetrazione



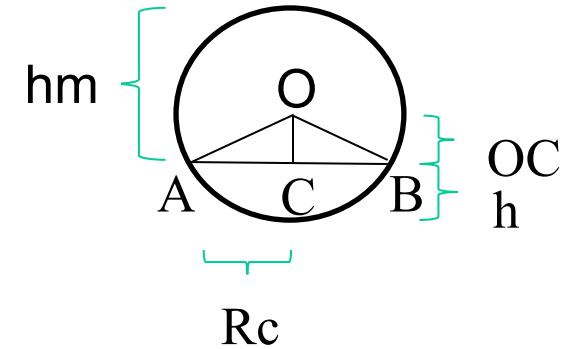
È importante ottenere una seconda immagine della sfera in cui appaia interamente per avere un legame tra la dimensione che si calcola dall'immagine e la dimensione reale; si ottiene tramite il diametro. La distanza dalla fotocamera deve rimanere invariata nelle 2 immagini per far sì che le dimensioni rimangano le stesse.

Dall'immagine si ottiene l'altezza della porzione di sfera emersa con la quale si calcola la profondità di penetrazione sottraendola al diametro

Per il calcolo del raggio del cratere si sfruttano delle regole trigonometriche

È possibile calcolare il volume del cratere U:

$$U = \frac{h\pi}{6} (3R_c^2 + h^2),$$



Equazioni del moto uniformemente accelerato utilizzate per il calcolo della velocità di impatto della sfera sulla polvere:

$$v = v_0 + at$$

$$s = s_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

Si calcola quindi la durezza dinamica:

$$H_d = \frac{Mv_i^2}{2U}$$

Una seconda grandezza molto importante è lo shear rate:

$$\gamma = \frac{v_i}{R_c}$$

È possibile determinare una correlazione generale tra la durezza dinamica e lo shear rate adimensionale definendo un gruppo adimensionale,  $b$ , ottenuto dalla combinazione delle grandezze più importanti che controllano l'indentazione dinamica

$$b = \left( \frac{\rho_b}{\rho_i} \right)^{0.5} \cdot h^* (2 - h^*)^{0.5} \cdot (\gamma^*)^2$$

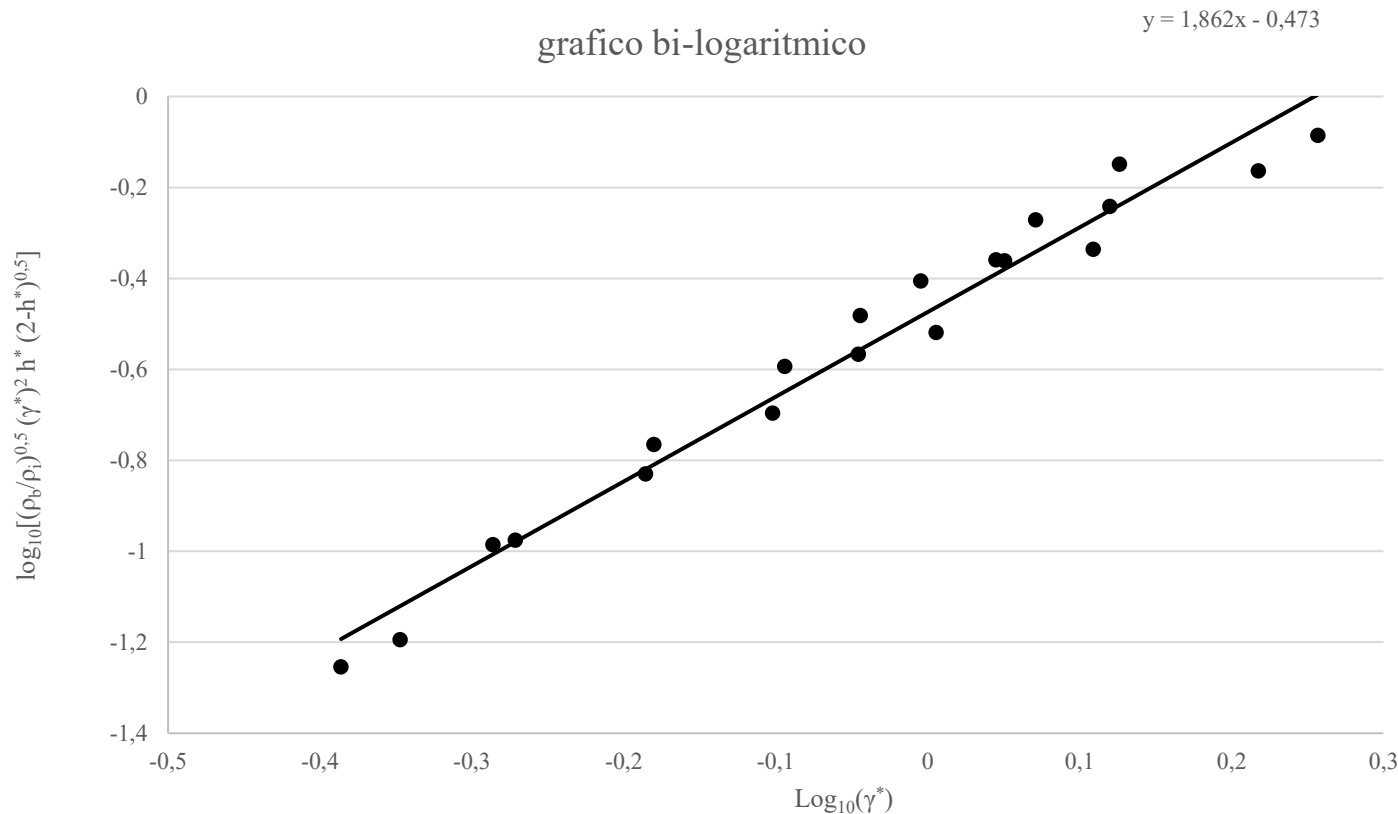


Grafico bi-logaritmico in cui è riportato il gruppo adimensionale  $b$  in funzione dello shear rate adimensionale. È molto importante poiché aiuta l'operatore nelle scelte delle condizioni di lavoro

Le 2 prove classiche della Cella di Shear e della Indentazione Quasi Statica hanno permesso:

- Determinazione degli sforzi di cedimento e della durezza della polvere e caratterizzare la polvere in esame.
- Calcolo del constraint factor che è caratteristico per ogni materiale.

La prova sperimentale di indentazione dinamica è una prova alternativa alle 2 precedenti:

- Permette di completare la Flow Function ottenuta dalla prova della cella di shear lavorando a sforzi di pre consolidamento bassi e quindi andare a lavorare nella zona in cui la cella di shear non riesce a raggiungere.
- Il grafico ottenuto che riporta il gruppo adimensionale  $b$  in funzione dello shear rate risulta molto importante perchè attraverso analisi successive e più specifiche si potrà dare un significato fisico a  $b$  e quindi caratterizzare la polvere sfruttando tale grafico che a differenza degli altri è in funzione dello shear rate.

Anno Accademico 2021/2022

*GRAZIE PER L'ATTENZIONE*

Gianluca Baldo