

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Chimica e dei Materiali

***Relazione per la prova finale  
«Caratterizzazione della  
scorrevolezza di polveri con il metodo  
di indentazione rapida»***

Tutor universitario: Prof. Andrea Claudio Santomaso

Laureando: *Federico Zuccolotto*

Padova, 23/09/2024

L'attività condotta presso l'APTLab (Advanced Particle Technology Laboratory), ha avuto come focus principale lo studio della scorrevolezza di polveri al variare dell'entità del consolidamento.

Questo ha permesso di approfondire il comportamento manifestatosi durante l'indentazione dinamica.

L'aspetto dinamico, infatti, offre un metodo innovativo per studiare il comportamento reologico delle polveri, in particolare sotto condizioni che simulano meglio i processi industriali reali. Alcuni esempi pratici possono essere:

- **Industria Farmaceutica:** Durante la produzione di compresse
- **Industria Alimentare:** Nello stoccaggio e handling di polveri ad uso alimentare

Hassanpour e Ghadiri (2017) hanno proposto un metodo di misurazione della durezza tramite test di indentazione, che richiede una tempistica ridotta e può essere eseguito su campioni molto piccoli anche a bassi sforzi di consolidamento.

Il valore di durezza dinamica ( $H_d$ ) è legato all'energia cinetica acquisita dalla sfera nell'istante di impatto e può essere ottenuto tramite la formulazione pubblicata da Tirupataiah e Sundararajan (2020):

$$H_d = \frac{Mv_i^2}{2U} \text{ [J/m}^3\text{]}$$

[Dynamic ball indentation for powder flow characterization. Monica Tirapelle, Andrea C. Santomaso, Colin Hare]

I materiali testati in quest'attività sono stati:

- Polvere di bicarbonato di sodio
- Polvere ceramica

Le proprietà caratteristiche di queste polveri sono state analizzate tramite le seguenti apparecchiature tecniche:

- **Powder Flow Pro V1.3 Build 23 di Brookfield Engineering Labs**
- **Inc.Mastersizer 2000 di Malvern Instruments**
- **Picnometria a gas**



Figura 1. Polveri testate

Il piano di ricerca ha previsto lo svolgimento delle seguenti prove:

- **Densità nel bulk in funzione del consolidamento**
- **Ball indentation con sfera di diametro 6 mm e 8 mm**
- **Prova di confronto replicando, per una sfera da 6 mm, la stessa energia cinetica d'impatto di una sfera da 8 mm**

La procedura eseguita, per gli ultimi due esperimenti sopraccitati, prevedeva tre step fondamentali:

- Versamento e consolidamento del letto
- Indentazione e registrazione dell'impatto tra sfera e polvere
- Analisi dei frame ed elaborazione dei dati ottenuti.

Il versamento avveniva tramite l'ausilio di: un setaccio con trama da 1mm, un tubo in vetro riposto sopra il setaccio e un tubo in plexiglass per convogliare e non disperdere la polvere versata.

Lo step di consolidamento riprodotto a 1 – 3 – 5 – 7 – 9 kPa, veniva effettuato tre volte, alternato all'aggiunta e al livellamento di altra polvere.



Figura 2. Sistema di versamento



Figura 3. Set up del metodo di consolidamento

Lo step d'indentazione avveniva tramite:

- Sfere in acciaio cromato da 6 e 8 mm di diametro
- Elettrocalamita adoperata per mantenere in posizione la sfera e poi rilasciarla al via della prova
- Telecamera ad alta velocità i-SPEED IX iS-2S-220-C-2 in grado di acquisire fino a 7000 fotogrammi al secondo

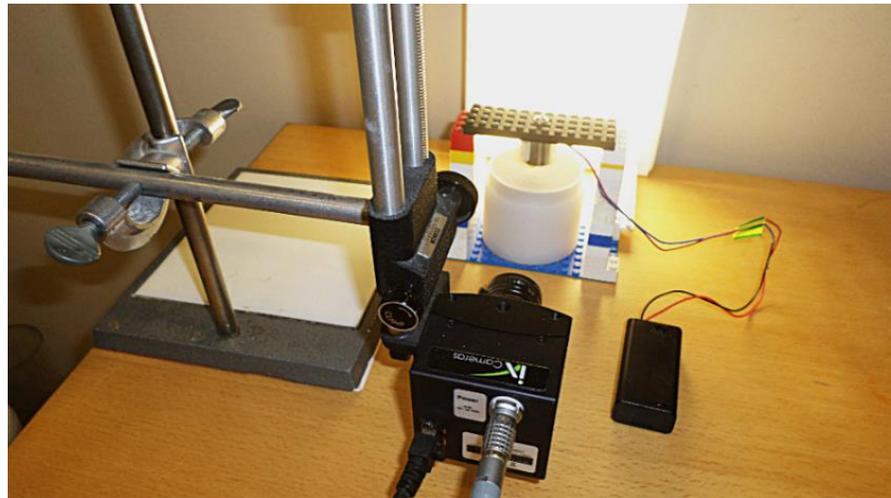


Figura 4. Postazione di lavoro dedicata alle prove di ball indentation



Figura 5. Set up di illuminazione

La parte di registrazione d'interesse comprendeva gli istanti del distacco della sfera dall'elettrocalamita fino al termine dell'interazione con la polvere. I relativi fotogrammi catturati venivano analizzati tramite un software Spyder.

L'analisi permetteva di ottenere valori e grafici riguardanti: penetrazione massima, area d'indentazione, volume del cratere, altezza iniziale, velocità d'impatto, velocità massima, lavoro compiuto, tempo di decelerazione.

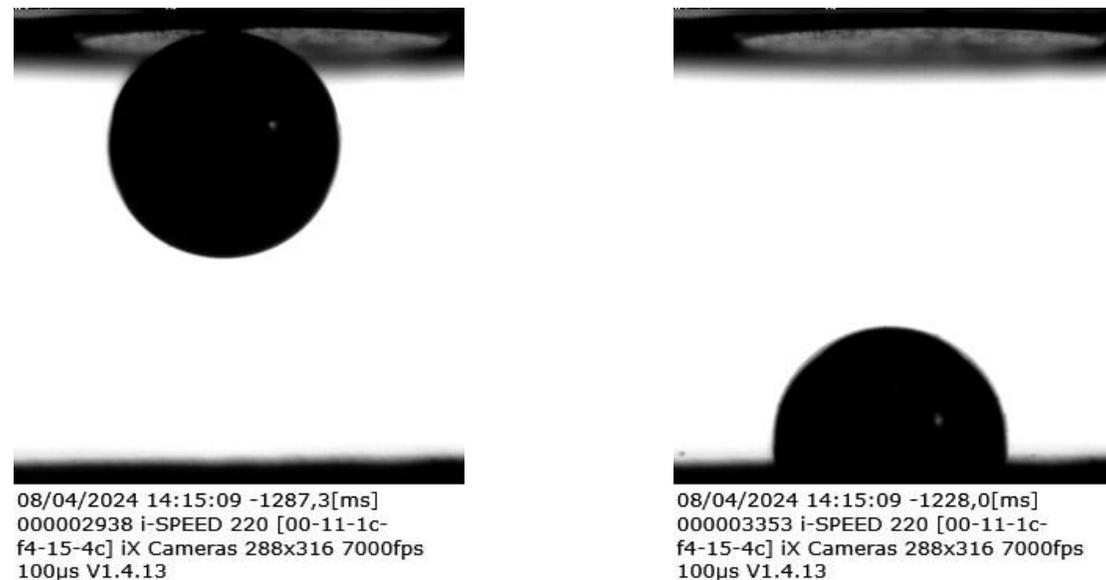


Figura 6. Sfera pre e post impatto

Dallo studio degli andamenti dei grafici elaborati, sono emerse alcune interessanti curiosità riguardanti:

- **Istante della prima rilevazione del volume d'indentazione**
- **Variazione di velocità dopo l'impatto**

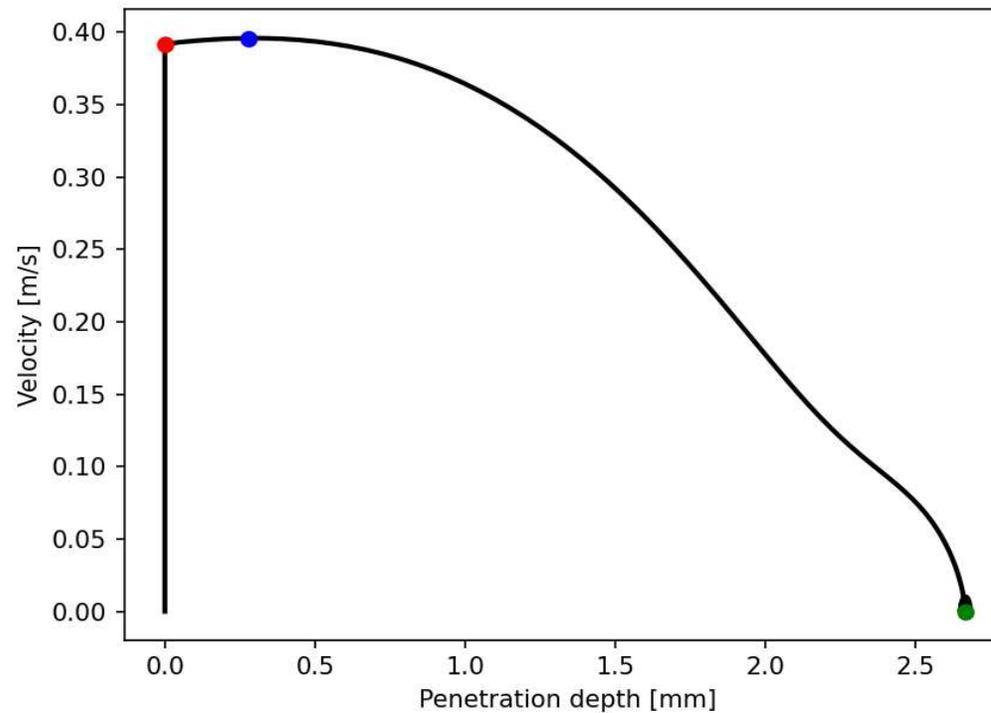


Figura 7.  
Andamento  
velocità -  
penetrazione

Si registra la tendenza di crescita della durezza dinamica all'aumentare del consolidamento. La sfera da 6 mm, essendo posizionata ad un'altezza maggiore a causa del suo diametro inferiore, possiede una maggiore energia potenziale gravitazionale e quindi acquisisce maggiore velocità d'impatto.

In **arancione** andamento per sfera da 6mm mentre in **azzurro** andamento per sfera da 8 mm

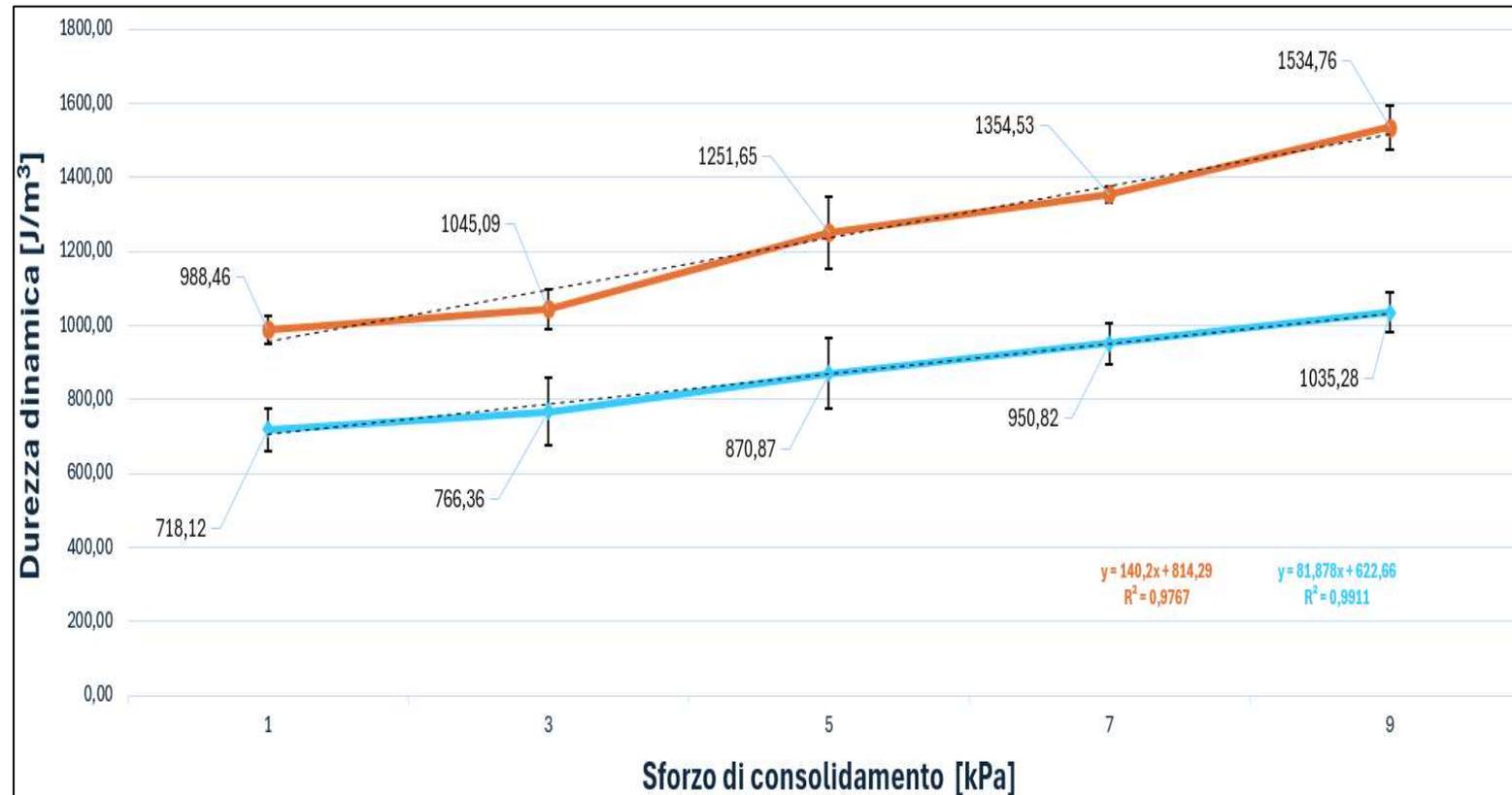


Figura 8.  
Andamento  
durezza  
dinamica –  
sforzo per  
polvere di  
bicarbonato

In **arancione** andamento per sfera da 6mm, in **azzurro** andamento per sfera da 8 mm, mentre in **verde** andamento per sfera da 6mm replicando la medesima energia cinetica d'impatto della sfera da 8mm

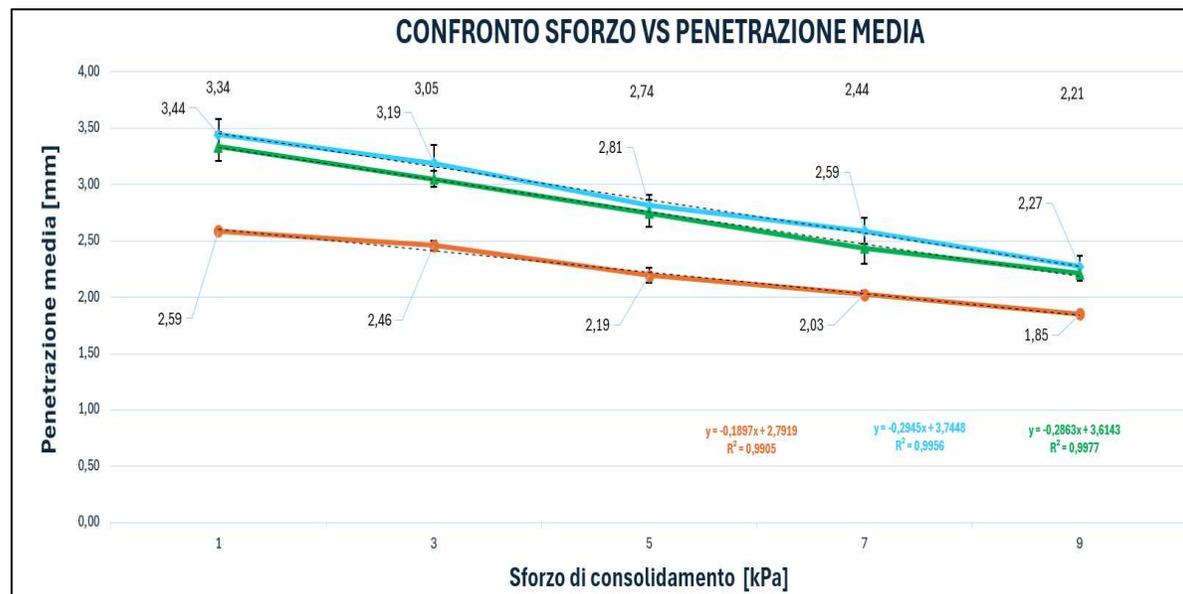


Figura 9. Andamento penetrazione - sforzo per polvere di bicarbonato

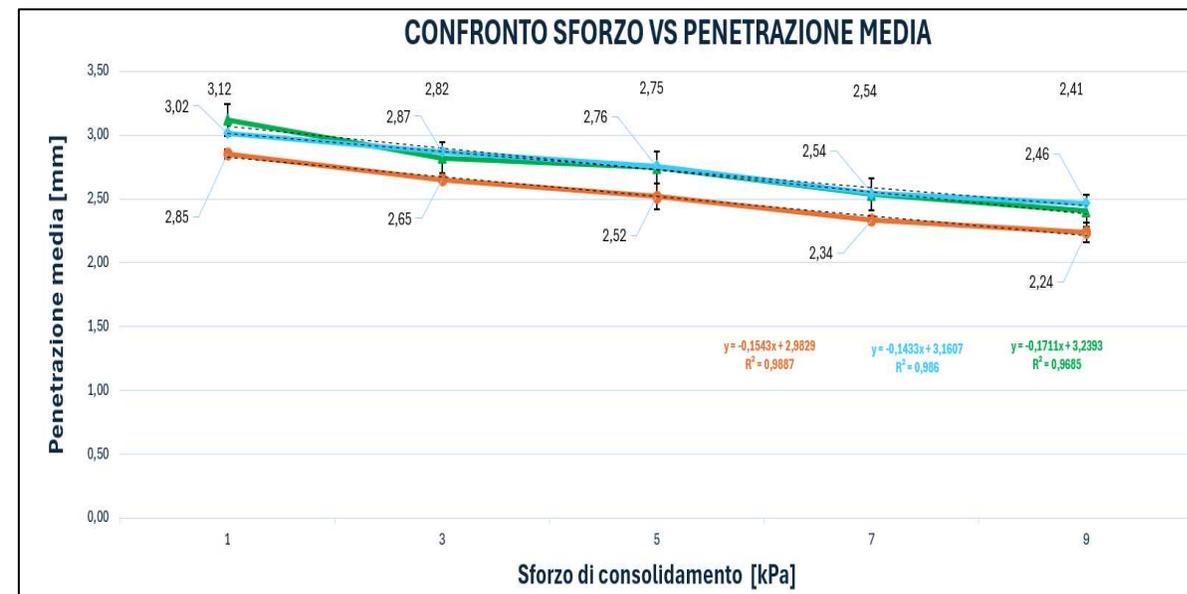


Figura 10. Andamento penetrazione - sforzo per polvere ceramica

Nello svolgimento delle prove a parità di energia cinetica solo l'andamento della penetrazione è risultato confrontabile a quello ottenuto per la prova di ball indentation con la sfera da 8mm. Esso è riuscito a replicare la tendenza dei valori di penetrazione ottenuti, pressoché per entrambe le polveri. Si nota però, come essa combaci con maggiore esattezza nel caso della polvere ceramica.

L'attività didattica svolta ha permesso l'apprendimento di numerosi punti cardine della meccanica dei solidi e l'analisi dei seguenti aspetti influenti incontrati durante le prove:

- **Consolidamento**
- **Umidità**
- **Minimizzazione delle zone grigie**
- **Porosità**