



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppi nei processi di preparazione delle miscele Coal Water

Maria Caterina Tilocca



DICAAR

SVILUPPI NEI PROCESSI DI PREPARAZIONE DELLE MISCELE COAL WATER

Maria Caterina Tilocca (Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto B.2: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

Obiettivo: Parte B1 - b - Cattura della CO₂ in Ossi-Combustione

Task: b.1 Caratterizzazione del "coal slurry" di alimentare del reattore. Definizione e trattamento degli effluenti tipici del processo da inviare alla sezione di trattamento fumi

Responsabile del Progetto: ing. Stefano Giammartini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Studi sull'utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana

Responsabile scientifico SOTACARBO: ing. Enrico Maggio

Sommario

L'obiettivo generale del presente lavoro è stato quello di verificare l'efficacia dei getti d'acqua ad alta velocità sui risultati della macinazione dei materiali geologici, con particolare riferimento al carbone Sulcis. Nello specifico sono stati valutati e analizzati gli effetti sulle caratteristiche del prodotto ottenuto utilizzando una macchina di concezione originale in vista della preparazione di sospensioni del carbone in acqua, idonee ad alimentare combustori a letto fluido.

La macinazione dei minerali rientra nel processo di comminuzione che raggruppa un insieme di tecniche tendenti a ridurre il volume dei solidi. Lo scopo fondamentale è quello di liberare il materiale utile dallo sterile per consentire, attraverso successivi processi di concentrazione, il raggiungimento delle proprietà richieste per il prodotto finale, oltre a quello di preparare direttamente prodotti di granulometria idonea a soddisfare le richieste del mercato.

I vari processi che costituiscono nel loro insieme la comminuzione si possono distinguere sulla base dell'intervallo dimensionale entro il quale agiscono, ovvero a seconda delle dimensioni del prodotto in ingresso e delle dimensioni del prodotto finito.

La frantumazione primaria ha un dominio che si estende alle più grandi dimensioni per dar luogo ad elementi di granulometria minore di 100 mm; la frantumazione secondaria riprende questi elementi per ridurli a dimensioni minori di 25 mm; la frantumazione terziaria, in serie con le precedenti, ha come obiettivo l'ulteriore riduzione a frammenti di dimensioni minori di 10 mm.

Alla frantumazione segue eventualmente la macinazione che consiste invece nella riduzione finale dei prodotti provenienti dalla frantumazione terziaria o da quella secondaria in particelle di dimensioni ancora più fini (generalmente $<0,4$ mm per i minerali metalliferi da arricchire per flottazione). L'operazione prende il nome di polverizzazione se effettuata a secco con l'obiettivo di produrre elevate porzioni di fini.

Il piano sperimentale realizzato sulla base delle linee di azione concordate con Sotacarbo comprende le fasi preliminari di preparazione del materiale, la descrizione delle apparecchiature utilizzate, l'esecuzione delle prove al variare dei principali parametri operativi e la discussione sui risultati ottenuti.

Le fasi di preparazione del materiale hanno riguardato la frantumazione mediante frantoio a mascelle e le relative analisi granulometriche mediante vagliatura a secco.

Per le prove sono stati utilizzati due prodotti aventi granulometrie differenti, il primo con dimensione massima di 20 mm e l'altro con una dimensione massima di 10 mm.

Dopo la frantumazione il materiale è stato suddiviso per “quartatura” in campioni omogenei di uguale consistenza, per l'esecuzione delle diverse prove finalizzate attraverso il confronto dei risultati, a mettere in evidenza l'influenza delle variabili operative prese in considerazione nel piano sperimentale per il raggiungimento degli obiettivi prefissati (accertamento della qualità del prodotto e prima valutazione di fattibilità).

I parametri considerati per valutare la bontà della macinazione assistita da water jet utilizzando il mulino HERA progettato e costruito per la specifica applicazione sono stati: la pressione di generazione del getto, la dimensione e la portata degli ugelli, la potenza idraulica e l'energia specifica impiegata per unità di prodotto.

I prodotti ottenuti dalla macinazione sono stati sottoposti ad analisi granulometrica mediante l'utilizzo dei vagli, con rappresentazione dei risultati in tabelle riassuntive e sotto forma di diagrammi.

L'esame dei risultati ottenuti nelle diverse condizioni operative ha riguardato il confronto tra le soluzioni alternative di macinazione (a secco o a umido), la messa in luce dell'influenza dei diversi parametri in gioco e l'effetto della preparazione preliminare del carbone (macinazione con o senza saturazione con acqua dei campioni).

Un ultimo confronto è stato fatto tra i risultati ottenuti dalla macinazione ad umido utilizzando un materiale secco ed uno preliminarmente imbevuto di acqua. Dai risultati ottenuti si evince come l'energia idraulica congiuntamente all'energia meccanica abbia effetti positivi sulla macinazione.

La parte sperimentale del lavoro svolto è preceduta dall'esame approfondito dello stato dell'arte in tema di comminazione dei materiali geologici basata sull'uso di getti d'acqua ad alta velocità, soli o in combinazione con l'energia meccanica in assistenza a macchine di concezione tradizionale.

1. INTRODUZIONE AL PROBLEMA

1.1 Caratteristiche del coal-water slurry

Necessità di sviluppare alternative all'olio combustibile tecnicamente ed economicamente praticabili ha reso lo sviluppo delle miscele di carbone in acqua sempre più interessanti.

Il *Coal Water Slurry* (CWS) può essere definito come una miscela combustibile con circa il 65-70% in peso di carbone, fluida, stabile e, nonostante la presenza di acqua, ad elevato contenuto energetico, poiché utilizza carboni con basso contenuto di materie minerali.

La corretta distribuzione granulometrica del carbone polverizzato e l'aggiunta di una piccola quantità di uno o più additivi conferiscono alla miscela caratteristiche tali da poter essere manipolata, trasportata, stoccata e bruciata come olio combustibile pesante.

Il CWS è sostanzialmente un prodotto di consistenza liquida densa, sviluppato principalmente per sostituire l'olio combustibile nei sistemi per la produzione di energia utilizzando combustori di tipo tradizionale.

Il prodotto è ottenuto con un costo relativamente basso (al prezzo di mercato del carbone reso franco impianto occorre aggiungere il costo della macinazione eventualmente accompagnata da interventi di separazione per eliminare gran parte delle materie minerali presenti prima di procedere alla formazione della sospensione omogenea in acqua).

E' di fondamentale importanza la determinazione delle caratteristiche chimiche e fisiche della miscela in modo tale da poterne prevedere il comportamento durante la movimentazione e la combustione. Occorre quindi determinare e definire:

- Il potere calorifero del combustibile
- La porosità e porosimetria del carbone
- Il pH della soluzione acquosa
- La distribuzione granulometrica del solido in sospensione
- La densità della miscela
- La stabilità all'agglomerazione o alla sedimentazione

- Le proprietà reologiche della miscela
- Il costo di produzione.

Il CWS per poter essere introdotto nei normali esercizi dell'impianto deve avere una buona stabilità statica ed un basso valore della viscosità apparente con un contenuto di carbone almeno intorno al 70%. Le caratteristiche del CWS cambiano a seconda del tipo di carbone che viene utilizzato per la sua formazione. Le proprietà di un CWS di buona qualità dovrebbero avvicinarsi a quelle rappresentate nella seguente tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche medie di un CWS

CARATTERISTICHE	VALORI
Contenuto di carbone [%]	68-70
Potere calorifico superiore [kcal/kg]	5000-5200
Potere calorifico inferiore [kcal/kg]	4600-4800
Viscosità apparente [mPas]	1000
Densità [-]	1,25
Contenuto in peso di ceneri [%]	6
Tenore di zolfo [%]	0,2
Massa <200 mesh [%]	80-85

1.1.1 Preparazione della miscela

L'argomento delle miscele acqua-carbone è stato affrontato in modo approfondito in occasione dello studio commissionato al DIGITA dall'ENEA al quale si rimanda.

Il carbone è preparato con un processo di macinazione completamente ad umido, studiato per ottenere una granulometria ottimale al fine di assicurare i requisiti essenziali per la produzione, conservazione, trasporto e impiego del prodotto nonché per la massimizzazione dell'efficienza energetica in fase di combustione attraverso un'elevata concentrazione del solido rispetto all'acqua (resa del coal-water).

L'aggiunta di additivi chimici esalta le doti di fluidità e stabilità, garantendo un prodotto rispondente alle esigenze del trasporto in condotta e dello stoccaggio prolungato.

In questa sede si richiamano alcune considerazioni utili per inquadrare i risultati della ricerca oggetto del presente rapporto.

1.1.2. Macinazione del carbone

I metodi di comminazione esistenti per la produzione di prodotti di estrema finezza al fine di garantire il requisito della stabilità a lungo termine sono poco efficienti.

Il carbone generalmente utilizzato nelle centrali termoelettriche è di tipo bituminoso con tenore di ceneri intorno a 10-15% e di materie minerali intorno a 20-40%. Per un CWS con contenuti di carbone pari a circa il 70% da impegnare in caldaie progettate solo per olio combustibile, non sono tollerabili contenuti di cenere superiori al 6-7%.

Per quanto riguarda la granulometria del carbone per la preparazione delle miscele convenzionali, le informazioni disponibili in letteratura indicano come dimensione massima delle particelle valori compresi tra 150 e 500 μm . La dimensione media delle particelle è intorno a 10-20 μm , mentre la massa con una dimensione $< 74 \mu\text{m}$ deve essere presente con una percentuale maggiore dell'80 % e la porzione dei finissimi pari a circa il 10%.

Inoltre è importante sottolineare che in fase di preparazione l'arricchimento del carbone può svolgere un ruolo molto significativo nella promozione dell'uso del combustibile. Infatti l'eliminazione anche parziale delle materie minerali inerti porta all'aumento del contenuto termico del carbone per unità di massa, e ad una significativa riduzione dell'impatto ambientale.

Un'importante fase, nella preparazione del CWS convenzionale è proprio la macinazione del carbone a dimensioni molto fini. Poiché le tecniche di lavaggio del carbone più diffuse sono eseguite a umido in presenza di grandi quantità di acqua, il carbone deve essere addensato per eliminare l'acqua in eccesso prima di procedere alla preparazione del CWS.

Bisogna anche considerare il fatto che se si esegue una macinazione troppo fine la miscela risulterà instabile per gli alti valori di viscosità e se si esegue una macinazione troppo grossolana, si avranno problemi di sedimentazione e la miscela risulterà ugualmente instabile.

E' necessario dunque arrivare ad una miscela stabile e questo risultato si può ottenere realizzando curve granulometriche bimodali, ottenute rimacinando una parte del materiale di

dimensioni intermedie: il prodotto ottenuto sarà caratterizzato da percentuali di materiale fine e grossolano che renderanno stabile la miscela.

Lo studio della granulometria è un fattore dunque molto importante per verificare se la miscela presenta caratteristiche soddisfacenti per una efficiente combustione per la quale sono generalmente accettate solo granulometrie al disotto dei 200 micron. La distribuzione granulometrica influenza inoltre direttamente la viscosità, la concentrazione del carbone in sospensione e la stabilità stessa della sospensione. Si è notato come all'aumentare del diametro medio delle particelle venga influenzata direttamente la viscosità, e come la viscosità sia direttamente legata alla concentrazione del carbone ("resa" della miscela).

I risultati del lavoro svolto nell'ambito del presente contratto consentono di valutare, in base alle granulometrie e ai risultati raggiunti con la macinazione assistita da getti d'acqua, la possibilità di destinare i prodotti ottenibili su scala industriale, aventi dimensione media delle particelle intorno a 500 μm e dimensione massima <2 mm, per alimentare, in forma di sospensione acquosa, combustori a letto fluido. In caso contrario la frazione granulometrica eccessivamente grossa dovrebbe essere rimacinata. In questo caso diventerebbe critico l'aspetto della stabilità della miscela.

Tuttavia, se il requisito della stabilità diventa meno importante, si può pensare di preparare la sospensione utilizzando il carbone macinato a dimensioni più grossolane rispetto a quelle di un "coal-water" convenzionale, con il vantaggio di privilegiare la fluidità e ridurre il costo unitario di macinazione.

E' questo il caso di utilizzo del carbone per alimentare un processo di gassificazione in letto fluido nel quale il vapore acqueo necessario per il processo è ottenuto tramite evaporazione nello stesso reattore dell'acqua contenuta nella sospensione. Proprio su questo aspetto è focalizzato il programma di ricerca oggetto del presente rapporto.

2. TECNICHE DI COMMINUZIONE

Si intende per comminuzione l'insieme delle operazioni aventi lo scopo di ridurre la dimensione dei frammenti di un materiale solido. A seconda delle dimensioni finali del prodotto, la comminuzione può essere suddivisa in frantumazione e macinazione. La prima permette di ottenere materiali con particelle di dimensioni fino al millimetro, la seconda fino a dimensioni dell'ordine del micrometro.

La necessità di svolgere operazioni di comminuzione può derivare dalle seguenti motivazioni:

- esigenze di mercato: la vendita può risultare infatti possibile solo realizzando materiali caratterizzati da particolari dimensioni e classificati secondo criteri richiesti dall'utilizzatore finale;
- esigenze funzionali: lo scopo della riduzione dimensionale può essere quello di favorire la manipolazione, il trasporto o lo stoccaggio del materiale;
- necessità di estrarre un particolare componente: un minerale grezzo è in generale formato da varie specie mineralogiche; la separazione e la concentrazione del componente utile può essere realizzata a partire dalla scomposizione del cosiddetto "tout-venant" in frammenti di dimensioni sufficientemente fini;
- necessità di aumentare la superficie specifica di un materiale: questa esigenza si pone quando, per esempio, si devono favorire alcuni processi speciali di trattamento;

Le forze che determinano la rottura del materiale possono agire singolarmente o in maniera combinata. In particolare, in un processo di comminuzione industriale, si possono avere sollecitazioni elementari di compressione, taglio, flessione e urto. Un materiale geologico sottoposto a un sistema tensionale applicato con macchine appositamente disegnate (frantoi o mulini) subisce inizialmente deformazioni elastiche, plastiche o elastoplastiche, seguite da rottura per superamento dei limiti di resistenza.

2.1. Parametri caratterizzanti la comminuzione

Un'operazione industriale di comminuzione è caratterizzata da:

- la natura del solido da frantumare o macinare

- la dimensione massima dei prodotti entranti
- il rapporto di riduzione
- la granulometria e la forma dei prodotti ottenuti
- La capacità di trattamento
- l'energia consumata
- il costo unitario dell'operazione

2.1.1. Natura del solido

Le principali caratteristiche del solido influenzanti la sua macinabilità sono la sua durezza e abrasività, la struttura omogenea o eterogenea, l'umidità e il suo carattere più o meno collante o agglomerante: in generale più queste caratteristiche sono pronunciate più è difficile la macinabilità, in termini di impegno energetico e di consumo dei corpi macinanti e delle parti meccaniche in movimento dell'apparecchiatura utilizzata per portare un solido ad un certo grado di finezza.

2.1.2. Pezzatura del materiale in ingresso

Per quanto riguarda la dimensione massima dei prodotti entranti è già stato detto: l'operazione di comminuzione è diversa, e dunque diverse sono anche le apparecchiature necessarie, in funzione della dimensione del solido entrante.

2.1.3. Rapporto di riduzione

Un parametro importante in sede di riduzione dimensionale di un materiale è il cosiddetto rapporto di riduzione. Generalmente viene indicato con n ed è definito come il rapporto tra la dimensione D del materiale in ingresso al processo di comminuzione e la dimensione d del prodotto finale ottenuto. La formula per esprimere n è la seguente

$$n = \frac{D}{d}$$

Nel caso in cui il materiale sia composto da differenti granulometrie, l'equazione viene così definita:

$$n = \frac{D_{80}}{d_{80}}$$

dove i parametri D_{80} e d_{80} corrispondono alla dimensione della maglia di un ipotetico setaccio attraverso cui passa rispettivamente l'80% del materiale in ingresso al processo e l'80% del materiale ottenuto dopo la comminazione.

Il rapporto di riduzione è il principale parametro di riferimento nella scelta di una macchina che realizza riduzioni dimensionali, ogni macchinario ha il suo caratteristico valore di n per il quale è stato progettato.

Il rapporto di riduzione corrispondente alla frantumazione risulta essere decisamente inferiori a quelli relativi alla macinazione, inoltre tanto maggiore è n tanto più alto sarà il quantitativo energetico richiesto dalla macchina per compiere la comminazione.

2.1.4. Distribuzione granulometrica

Si chiama "granulometria" l'insieme delle proprietà caratterizzanti le dimensioni, le proporzioni e la forma delle particelle costituenti un insieme di solidi dispersi. Le analisi granulometriche, tendenti a misurare la granulometria di un tale insieme, vengono realizzate in laboratorio su campioni rappresentativi dei prodotti da esaminare.

I risultati delle analisi granulometriche sono normalmente riferiti a scale standard di vagliatura e rappresentati mediante le cosiddette curve granulometriche.

Queste sono curve rappresentative della distribuzione granulometrica di un materiale rappresentato in un diagramma in funzione delle aperture dei vagli. Vengono utilizzate per caratterizzare sia il materiale in entrata che quello in uscita dai vari processi di comminazione.

2.1.5 Energia consumata nella comminazione

Si definisce "energia di comminazione" il lavoro richiesto per ridurre alle dimensioni volute il materiale trattato. E' necessario chiarire la distinzione fra tale quantitativo e l'energia fornita all'intero sistema di comminazione. Non tutta l'energia fornita al mulino, o al frantoio, viene infatti utilizzata per la rottura del materiale, ma essa viene dissipata sotto altre forme di energia, spesso in percentuali anche piuttosto consistenti. L'energia di comminazione, anche

detta energia netta, può arrivare a valori del 25-30% rispetto all'energia totale fornita, corrispondenti ad una perdita del 75-80% soprattutto sotto forma di energia termica ed acustica. Numerose teorie sono state avanzate per cercare di esprimere il lavoro speso in un'operazione di comminuzione.

Le più conosciute sono quelle di Rittinger, di Kick e di Bond.

Secondo Rittinger “il lavoro necessario per frantumare o macinare un certo solido è proporzionale alla nuova superficie prodotta durante la comminuzione”.

Secondo Kick “il lavoro necessario per frantumare o macinare un certo solido è proporzionale al volume o alla massa di questo solido”.

L'applicazione sperimentale delle formule di Rittinger e Kick e la pratica industriale hanno mostrato che la legge di Kick è valida soprattutto nelle operazioni di frantumazione e polverizzazione, mentre quella di Rittinger è verificata soprattutto nella macinazione, specialmente in quella a sfere. Bond caratterizza l'attitudine alla macinabilità di un solido con un indice chiamato “Indice di lavoro” o “Work Index” e che è conosciuto più spesso come “Indice di Bond”.

Esso è il lavoro espresso in kWh necessario per ridurre 1 tonnellata corta (907 kg) del minerale da una dimensione teoricamente infinita a una dimensione d_{80} di 100 micron.

Detto W_i l'indice di Bond, la formula di Bond fornisce:

$$W_i = \frac{k}{\rho_s} \left(\frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right) = \frac{k'}{10\rho_s}$$

Il lavoro speso per unità di massa (t corta) si esprime dunque con la formula:

$$W = W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) = 10W_i \left(\frac{\sqrt{D_{80}}}{\sqrt{D_{80}} \sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) = W_i \frac{\sqrt{n-1}}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{100}{d_{80}}}$$

Questa formula permette di determinare l'energia che sarà necessaria per una certa operazione di comminuzione, se si conosce, per il solido considerato, quanta energia è stata spesa per un'altra comminuzione effettuata in un apparecchio dello stesso tipo. Diversi metodi di laboratorio permettono di ricavare il valore di W_i per solidi di cui non si hanno dati pubblicati.

Recentemente Charles ha proposto di utilizzare la seguente formula:

$$dw = -C \frac{dx}{x^n}$$

dove x è la dimensione del solido e C ed n sono costanti.

Sulla base di questa formula, il lavoro necessario per produrre un piccolo cambiamento nella dimensione di un solido è proporzionale a questo cambiamento di dimensione dx ed inversamente proporzionale alla dimensione x del solido elevata ad una certa potenza n .

Ponendo in questa formula $n = 1$ si trova la formula di Kick;

$$W = \int_D^d -C \frac{dx}{x} = -C \left| \log x \right|_D^d = C \log \frac{D}{d}, \text{ con } C = k^n \log e = \frac{k^n}{2,3}$$

con $n = 2$ si ritrova la formula di Rittinger;

$$W = \int_D^d -C \frac{dx}{x^2} = C \left| \frac{1}{x} \right|_D^d = C \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right), \text{ con } C = k^n$$

infine, con $n = 1,5$ si ritrova la formula di Bond;

$$W = \int_D^d -C \frac{dx}{x^{3/2}} = C \left| \frac{2}{\sqrt{x}} \right|_D^d = 2C \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right), \text{ con } C = K/2$$

Il valore di n può essere determinato con dei semplici esperimenti; come è già stato accennato, tale valore dipende dalla natura del solido e dal modo di comminazione, frantumazione o macinazione.

2.1.6. La capacità di trattamento

La capacità dei frantoi a pressione aumenta in funzione dell'apertura della "bocca" di alimentazione della macchina.

La capacità di frantumazione è spesso il parametro che determina la scelta fra frantoi a mascelle e rotativi, soprattutto quando i solidi da frantumare sono duri e abrasivi. Per le capacità più forti si devono necessariamente utilizzare dei frantoi rotativi.

2.1.7. Costo unitario della comminuzione

I principali elementi del costo tecnico della frantumazione sono:

- *Manodopera*: E' la voce di costo più importante nelle piccole installazioni. Una persona normalmente è sufficiente per la sorveglianza e la conduzione di un impianto di frantumazione. Può essere indispensabile un secondo operaio soltanto quando la distribuzione del minerale è difficoltosa (massi di grandi dimensioni o minerale collante).
- *Impegno di forza motrice*: In media dipende fra l'altro, dalla capacità dell'installazione. La frantumazione di un minerale può esigere consumi di energia variabili fra 2,2 ÷ 3,5 kWh/t dalle più grosse alle più piccole installazioni.
- *Consumo e logoramento*: Questi costi variano molto in funzione della durezza e soprattutto dall'abrasività del materiale. In prima approssimazione si ammette che l'usura di metallo è proporzionale al consumo di forza motrice e che il costo di usura è molto vicino al costo della forza motrice. Nelle attuali installazioni l'usura è in media intorno ai 10 g/t nel trattamento di minerali teneri e non abrasivi e 50 g/t per solidi molto abrasivi.
- *Spese di manutenzione*: I costi più incidenti sono quelli relativi alla manodopera addetta.
- *Ammortamenti*: In generale vengono calcolati su 5 o 10 anni in funzione del tipo di solido da frantumare.

2.2. La comminuzione del carbone

In generale il carbone che proviene dalla coltivazione mineraria non è pronto né per l'utilizzo immediato né per le operazioni necessarie per il suo arricchimento. Infatti prima di effettuare la separazione del carbone è necessario come prima operazione ridurre la pezzatura del grezzo mediante frantumazione.

Le tecniche di coltivazione non consentono il trattamento del carbone in sottosuolo. Il grezzo estratto dalla miniera risulta infatti litologicamente disomogeneo in quanto costituito da percentuali variabili di carbone e di sterile (calcari, arenarie, siltiti e argilliti).

L'operazione di frantumazione ha quindi lo scopo fondamentale di liberare gli elementi valorizzabili dai minerali di ganga o anche di ridurre il materiale solido alle dimensioni che saranno dettate dall'utilizzazione. Inoltre effettuarne la riduzione è utile per facilitare il trasporto, fornire il carbone in una forma che può essere di immediata utilizzazione (con eliminazione dei pezzi troppo grandi, riduzione in misure prestabilite e polverizzazione).

2.2.1 Fasi del processo di comminuzione

L'operazione di frantumazione può essere eseguita in più stadi generalmente non più di tre. La frantumazione primaria consente la riduzione dei blocchi di dimensioni decimetriche alla granulometria <10 cm; la secondaria riduce ulteriormente il prodotto della precedente al disotto dei 25 mm. Infine, la frantumazione terziaria dà luogo a elementi di diametro <10 mm. Solitamente quest'ultima prende il nome di granulazione. Essendo il carbone un materiale leggero che si libera dai materiali di ganga a dimensioni grossolane, la frantumazione avviene solitamente mediante l'utilizzo di frantoi a mascelle o a urto.

L'operazione di macinazione per mezzo di mulini o polverizzatori ha il compito di ridurre in prodotti ancora più fini i frammenti ottenuti dalla frantumazione secondaria o terziaria.

2.2.2. Macchine tradizionali utilizzate per la macinazione

I mulini sono macchine che mettono in gioco principalmente forze di compressione, flessione e taglio. Tali forze vengono generate dal fatto che il materiale di alimentazione viene schiacciato fra due superfici parallele dotate di moto relativo in senso longitudinale e/o trasversale l'una rispetto all'altra. Possono lavorare sia a secco sia a umido.

In taluni casi, soprattutto per la comminuzione fine di materiali fragili o poco abrasivi quali il carbone si sfruttano forze d'urto generate da ripetute collisioni ad alta velocità contro piastre fisse o applicate a organi rotanti. Possono lavorare solo a secco.

I principali tipi di mulini utilizzati nella macinazione fine dei minerali sono i cosiddetti mulini a caduta (tumbling mills).

Nella preparazione del carbone la macinazione tramite questi tipi di mulini è rivolta ai seguenti campi d'utilizzo:

- Preparazione di carbone polverizzato a secco per i sistemi di combustione dei generatori di energia;
- Preparazione di sospensioni in acqua di carbone (CWS) per il trasporto con pipeline;
- Arricchimento spinto del carbone tramite processi a umido come la flottazione, la separazione gravimetrica e l'agglomerazione con olio ;
- Concentrazione del carbone tramite processi a secco come la separazione elettrica e magnetica;

La triturazione nei mulini a caduta avviene, inizialmente per impatto e compressione e man mano che le dimensioni dei frammenti di carbone diminuiscono, entrano in gioco altre forze quali l'abrasione e l'attrito. I corpi macinanti (barre o sfere in libera circolazione all'interno della camera di macinazione rotante generalmente di forma cilindrica con asse orizzontale) cadono a cascata o cateratta sulla parte superiore della carica generando forze d'urto, mentre nella parte inferiore predominano le azioni di flessione e taglio.

La caratteristica di queste macchine è quella di utilizzare corpi macinanti aventi dimensioni e peso molto maggiori dei frammenti di carbone da tritare. Per ottenere una polverizzazione molto fine si devono spendere grossi quantitativi di energia, infatti si è visto come l'energia aumenta esponenzialmente al diminuire delle dimensioni del prodotto.

La macinazione può essere suddivisa in più sottoprocessi:

- *macinazione primaria*: è l'operazione che permette di ridurre frammenti di materiale di qualche centimetro di diametro in sabbie, si ottiene quindi un prodotto di dimensioni comprese tra gli 0,5 e i 6 mm;
- *macinazione secondaria* o fine: si ottengono polveri fino all'ordine del centinaio di micrometri;
- *micronizzazione o polverizzazione*: il prodotto in uscita è molto fine e ha quindi dimensioni pari o inferiori al micrometro.

Oltre a questa suddivisione si possono distinguere anche le seguenti modalità di macinazione:

- *macinazione a secco*: viene realizzata quando in un processo industriale i passaggi successivi alla macinazione devono essere realizzati in aria o in ambiente gassoso inerte per in vista dell'ottenimento di un prodotto finale privo di umidità, ovvero quando i corpi macinanti impiegati nei macchinari non possono essere bagnati;
- *macinazione ad umido*: si realizza quando il materiale viene lavorato in presenza di acqua, sia per conseguire vantaggi produttivi (migliore efficienza del processo e minori costi) sia perché il prodotto finale è utilizzato in forma di sospensione acquosa come nel caso delle miscele coal-water. Tale operazione prevede che si realizzi una “torbida” con una consistenza sufficientemente elevata da riuscire ad aderire ai corpi macinanti ma allo stesso tempo una umidità tale da permettere una corretta circolazione del flusso di particelle solide in sospensione all'interno della macchina. La macinazione a umido può rendersi preferibile per particolari problemi di sicurezza quali il controllo di polveri potenzialmente dannose (nocive, incendiabili o esplosive). La diluizione ottimale varia con la composizione granulometrica, sarà tanto maggiore quanto più fine risulta essere il materiale.

La macinazione del carbone avviene solitamente a secco perché nella maggior parte dei casi i suoi usi e campi di applicazione, come per esempio nelle centrali o generatori di energia, si ha interesse a minimizzare perdite di calore dovute all'umidità del combustibile.

La macinazione a umido viene invece effettuata quando per arricchire il carbone si utilizzano metodologie a umido come la flottazione o la separazione per densità, o quando viene eseguita per la preparazione del coal water, che in questi ultimi anni ha ricevuto crescente attenzione.

2.2.3. Parametri operativi della macinazione tradizionale

Alcuni parametri importanti da tener conto nel processo di macinazione e che rappresentano i fattori chiave nella scelta delle macchine di macinazione.

- *Grado di riempimento*: viene indicato con Δ ed è chiamato anche volume della carica, il valore di tale parametro viene espresso come percentuale del volume interno del mulino. La formula per il calcolo di tale parametro è la seguente:

$$\Delta = \frac{V_{carica}}{V_{totale}} 100$$

dove V_{carica} è il volume occupato dai corpi macinanti e dal materiale da macinare e V_{totale} è il volume della giara del mulino.

- *Velocità critica*: è definita come la velocità di rotazione del mulino in corrispondenza della quale si ha centrifugazione del materiale posto al suo interno. Può essere calcolata nel seguente modo:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2g}{D}}$$

dove D è il diametro interno del mulino e g è l'accelerazione di gravità, a seconda delle dimensioni del mulino è necessario trovare un compromesso tra velocità critica e velocità periferica. Il parametro velocità di rotazione del mulino viene quindi espresso come percentuale della velocità critica;

- *Consumo dei corpi macinanti*: nella macinazione a umido le cause di questo fenomeno sono dovute principalmente all'abrasione che il mezzo macinante subisce entrando in contatto con il materiale coinvolto o con gli altri corpi macinanti e alla corrosione della superficie esposta alla macinazione. Nel caso di macinazione a secco la seconda causa viene meno e rimane solamente la prima;
- *Potenza di macinazione*: corrisponde alla potenza che deve essere applicata alla trasmissione del mulino per poter macinare una determinata quantità di materiale e per portarlo da una certa dimensione di partenza ad una finale di granulometria più fine. Nota l'energia richiesta per macinare la potenza può essere ricavata semplicemente nel seguente modo:

$$P = W Q$$

dove con P viene appunto indicata la potenza, con W l'energia impiegata per macinare il materiale e con Q la portata di alimentazione del processo.

- *Rapporto di riduzione*: alcuni mulini permettono di lavorare ad elevati rapporti di riduzione, per quanto riguarda le tipologie di macchine riportate in questa trattazione si ha $n = 15 \div 50$ per i mulini a barre e $n = 30 \div 200$ per i mulini a sfere.

2.2.4. Vantaggi e svantaggi della macinazione a secco e a umido

La macinazione a secco si basa sull'impiego di alte pressioni e dispone di sistemi macinanti con proprietà meccaniche in grado di sopportare elevate sollecitazioni. Questa tecnica è la più frequentemente utilizzata e generalmente si usa per l'ottenimento di particelle fini, specialmente di morfologia piatta.

Particelle di questo tipo comportano, però, qualche problema nello svolgimento di eventuali processi successivi di concentrazione. Un ulteriore svantaggio della macinazione a secco è legato alla produzione di un elevato quantitativo di polveri finissime da sovramacinazione. Risulta quindi necessario inserire apparecchiature apposite per la loro captazione ed evitarne l'immissione nel sistema di lavoro e il contatto con il personale.

A tal proposito, i sistemi utilizzati possono essere tanti, tra cui sono usati, per esempio, separatori a turbina. Si deve inoltre considerare che l'umidità del materiale trattato con macinazione a secco non dovrebbe superare l'1-2%, per umidità superiori è necessario essiccare il solido prima della macinazione.

Una maggiore efficienza rispetto alla macinazione a secco, si può raggiungere attraverso la macinazione a umido che richiede una minore spesa di energia per tonnellata trattata (mediamente il 30 % in meno). Altri vantaggi della tecnica a umido riguardano i minori problemi riscontrati negli eventuali successivi processi di classificazione e l'assenza pressoché totale di polveri (vantaggio anche dal punto di vista economico in quanto si evita l'installazione di sofisticate apparecchiature per l'abbattimento).

Alcune difficoltà sono tuttavia connesse alla necessità di realizzare una buona dispersione delle particelle nelle torbide (si utilizzano, quindi, dei prodotti chimici deflocculanti, che, agendo sulla quantità d'acqua presente, permettono di raggiungere dimensioni, per le particelle, anche inferiori al micron, o sicuramente inferiori ai 63 micron, dimensione utile caratteristica per l'industria ceramica), ed a garantire la reversibilità di tale dispersione al fine

di assicurare una buona riuscita negli stadi d'ispessimento successivi alla classificazione, per ottenere il duplice scopo della minimizzazione della quantità d'acqua consumata e la massimizzazione del ricircolo del fluido stesso.

Chiaramente, i singoli casi vanno esaminati separatamente e possono verificarsi situazioni in cui è necessaria una comminazione con concentrazioni di solido molto basse. Ulteriore inconveniente nella macinazione a umido è costituito dall'usura che interessa sia la struttura del mulino sia i corpi macinanti

2.3 Analisi granulometriche

2.3.1 La vagliatura

Per verificare l'accuratezza della macinazione e accertare la rispondenza del prodotto al livello di qualità richiesto si ricorre generalmente a un'analisi granulometrica eseguita per vagliatura a secco o a umido facendo passare il campione su una serie di setacci con aperture calibrate.

Questo insieme di solidi costituisce il "passato" o "passante", o anche il "sottodimensione". La massa di particelle di dimensione maggiore costituisce invece il "rifiuto" o "trattenuto", o anche il "sovradimensione"

L'operazione di setacciatura di controllo è fatta a mano o con apparecchiature apposite, denominate generalmente Ro-Tap, che mettono in movimento la pila di vagli, con il rispetto di particolari norme. I risultati della vagliatura possono differire notevolmente, specialmente nel dominio dei fini e finissimi, a seconda che si ricorra al procedimento a secco o a quello ad umido.

In quest'ultimo caso le classi fini contengono percentualmente proporzioni maggiori di solido che nella corrispondente vagliatura a secco. Ciò consegue, oltre che dalla migliore efficienza del processo ad umido per le fini particelle, anche dal fatto che nella classificazione a secco le particelle grosse restano impolverate, per adesione, dalle particelle più fini, mentre l'acqua risolve quell'adesione ed elimina l'impolveramento.

L'accuratezza della classificazione dipende, oltre che dal tipo di apparecchio usato e dalla sua regolazione, dalla durata dell'operazione, dall'entità della carica di materiale sul vaglio e dalla sua composizione granulometrica.

Per quanto concerne questi due ultimi parametri in particolare, occorre precisare che un vaglio sovraccaricato vede intasarsi facilmente le sue luci calibrate, con conseguente forte riduzione della sua capacità vagliante. Durante la vagliatura il campione da vagliare viene immesso, in piccole porzioni per volta sul primo vaglio della serie e la pila viene posta sul Ro-Tap.

Al termine del tempo fissato per la vagliatura, dai vagli si recuperano separatamente le porzioni di materiale trattenute da ciascuno di essi. Conclusa la vagliatura, si pesano le trancie granulometriche e si esprime la massa di ciascuna trancia come frazione percentuale dell'intero campione. Le masse percentuali ottenute, rappresentano i dati di partenza sui quali calcolare le masse cumulate e con le quali costruire la curva granulometrica.

2.3.2 Curve granulometriche

Le curve granulometriche sono curve rappresentative della distribuzione granulometrica di un materiale rappresentato in un diagramma in scala logaritmico o in scala aritmetica.

I metodi comunemente usati per la rappresentazione grafica delle analisi granulometriche sono di due tipi: il diagramma diretto e il diagramma cumulativo (figura 2.1).

Tanto più una curva risulta espansa orizzontalmente quanto più varia sarà la granulometria del materiale corrispondente, mentre una curva tendente al verticale rappresenta un materiale di dimensioni essenzialmente omogenee. Le curve granulometriche vengono utilizzate per caratterizzare sia il materiale in entrata sia quello in uscita dai vari processi di comminuzione.

Per quanto riguarda il prodotto finale della comminuzione lo scopo è quello di ottenere un materiale che copra un certo intervallo dimensionale, secondo specifiche richieste di mercato, e quindi un materiale caratterizzato da una minima dispersione attorno ad un determinato valore di diametro medio. La corrispondente curva granulometrica dovrà pertanto risultare tendenzialmente verticale.

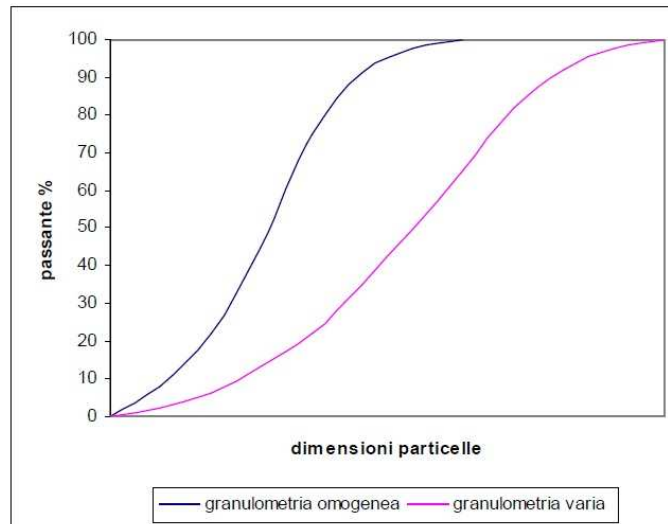


Figura 2.1 Esempi di curve granulometriche

Per effettuare tale analisi è necessario preparare, come detto nel paragrafo precedente, una pila di setacci, in genere sette o otto, con dimensione delle maglie decrescente e posti in successione prestabilita dalle norme tecniche UNI. Il materiale viene poi posto sul primo setaccio e quindi la pila, chiusa da un coperchio, viene inserita in una setacciatrice. Questa, azionata per circa 8 minuti imprime una vibrazione orizzontale e verticale in modo da favorire il passaggio del materiale attraverso le maglie.

Terminata la setacciatura viene pesato il materiale trattenuto su ogni maglia e ne viene calcolato il rapporto percentuale rispetto al peso totale iniziale (frequenza):

$$f_i = 100 \frac{P_i}{P_{\text{tot}}}$$

dove p_i rappresenta il peso trattenuto da ciascuna maglia del setaccio e P_{tot} il peso totale del materiale su cui è stata effettuata l'analisi granulometrica. Le frequenze riportate in un grafico si dispongono secondo una curva a gradini che può essere interpolata dando luogo a una curva a campana più o meno regolare (figura 2.2).

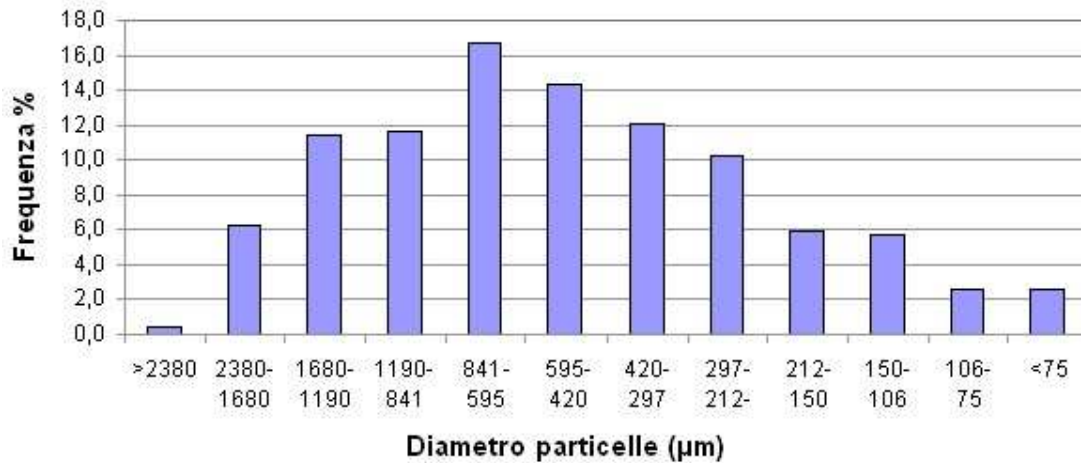


Figura 2.2 Grafico delle frequenze di un analisi granulometrica

Si definisce curva granulometrica cumulativa del passato o passante il diagramma in scala logaritmica o aritmetica che si ottiene setacciando una certa quantità di materia prima e riportando il peso cumulativo percentuale del materiale passato, attraverso le maglie dei setacci, in funzione delle dimensioni delle particelle.

Nella figura 2.3 è riportato un esempio di curva granulometrica del passante:

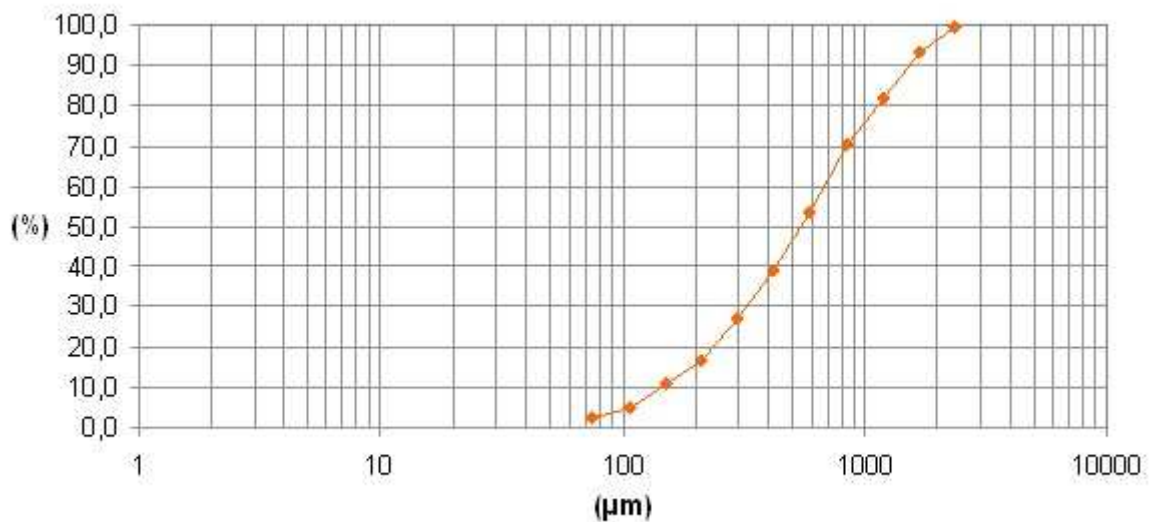


Figura 2.3. Curva cumulativa del passante

Analogamente, sostituendo ai precedenti valori in ordinata i pesi cumulativi percentuali del materiale trattenuto dalle varie maglie della pila di setacci, può essere tracciata la curva granulometrica cumulativa del trattenuto.

Quanto più una curva risulta essere schiacciata tanto più è da considerarsi disperso lo spettro delle dimensioni dei frammenti del materiale, una curva quasi verticale indicherà invece che particelle considerate si distribuiscono principalmente attorno ad un unico valore di diametro. L'utilità di questi ultimi due grafici è che permettono di individuare molto rapidamente, all'interno del materiale campione, quali sono le quantità percentuali di materiale che risultano essere maggiori o minori di una certa dimensione delle particelle.

3 ASPETTI GENERALI DELLA TECNOLOGIA WATERJET

La capacità naturale dell'acqua di dilavare i suoli e penetrare all'interno delle fratture e tra gli spazi intergranulari della roccia asportandone le parti più friabili, è stata sfruttata già in tempi molto antichi.

La tecnologia di taglio dei materiali basata su un getto d'acqua ad altissima pressione è stata sviluppata negli anni intorno al 1960 dal prof. Norman C. Franz dell'università del Michigan, ed il primo sistema industriale fu installato nel 1971 in Kansas.

Durante gli anni settanta furono numerose le attività in cui vennero utilizzati getti a percussione e cavitanti generati a $100 \div 150$ MPa nelle operazioni di taglio, estrazione, perforazione e pulitura di vari tipi di materiali.

A partire dalla fine degli anni '70, anche grazie alla collaborazione tra università, soprattutto americane e aziende, si assistette alla produzione di diversi prototipi di macchine per le lavorazioni in cava basate sulla tecnologia a getto d'acqua.

La grande diffusione dei sistemi water jet a livello industriale è però cominciata in tempi molto più recenti (anni '90), specialmente grazie all'evoluzione di impianti robotizzati, gestiti con controllo numerico, in grado di guidare in modo ottimale il movimento della lancia, ed all'introduzione degli idrogetti additivati con materiali abrasivi, che ha consentito di estendere notevolmente il campo dei materiali lavorabili e la versatilità di questi macchinari.

Le motivazioni che sostengono lo sviluppo di questa applicazione, sono legate fondamentalmente ai vantaggi intrinseci connessi all'impiego della tecnologia a getto d'acqua:

- ridotti fenomeni di usura degli utensili (limitati all'ugello);
- riduzione degli scarti di lavorazione;
- sicurezza e salubrità dell'ambiente di lavoro, grazie alle basse temperature di esecuzione,
- all'abbattimento delle polveri ed all'assenza di scintille e di vibrazioni indotte;
- assenza di rischio di incendio o shock termico per gli addetti alla lavorazione;

- nessuna ripercussione sulle caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche del materiale lavorato;
- elevata precisione anche nelle lavorazioni più complesse;
- possibilità di una completa automazione del processo;
- grande versatilità di impiego con possibilità di realizzare lavorazioni di diverso tipo,
- in qualunque direzione e su un'ampia gamma di materiali (dalla plastica all'acciaio).

Il processo water jet come detto è una nuova tecnologia basata sull'utilizzo di getti d'acqua ad elevatissima pressione e velocità. Il getto è ottenuto iniettando l'acqua attraverso un ugello realizzato con materiali ad elevata durezza e avente un foro di uscita con diametro generalmente compreso tra 0,1 mm e 0,6 mm. La pressione dell'acqua può variare da circa 200 MPa a 400 MPa e la velocità di uscita varia da 500 m/s a 900 m/s. In queste condizioni il getto d'acqua erode velocemente i materiali e può essere utilizzato per tagliare materiali spessi fino a 150 mm.

3.1. Componenti del sistema

In linea generale, un sistema water jet è costituito da tre sezioni fondamentali:

- Il sistema di generazione della pressione di alimentazione;
- Il sistema testa di taglio (lancia-ugello-focalizzatore) che genera il getto d'acqua ad alta velocità;
- Il sistema di controllo e movimentazione della testa di taglio.

Il sistema comprende inoltre il motore (Diesel o elettrico) che alimenta la pompa e l'impianto idraulico realizzato con tubazioni in grado di sopportare gli stress indotti dall'acqua in pressione e che comprende in genere un serbatoio per l'acqua pressurizzata;

3.1.1. La Pompa

La pompa è il segmento dell'impianto che si occupa della pressurizzazione dell'acqua, costituita da valvole di sicurezza per il circuito dell'olio, un sistema di filtrazione e un regolatore di pressione. Le pompe possono essere monostadio a pistoni, multistadio

centrifughe o a due stadi con intensificatori. Sono diversificate in funzione del valore della pressione che si vuole ottenere e del rapporto tra pressione e portata.

All'aumentare del valore della pressione, diventa sempre più critico il problema della precipitazione dei sali disciolti nell'acqua (specialmente calcio e magnesio) e della conseguente formazione di incrostazioni all'interno del sistema; ciò impone l'adozione di efficacissimi sistemi di filtrazione e rende molto difficile, ed il più delle volte antieconomico, il recupero dell'acqua utilizzata. In casi particolari l'acqua può essere fatta ricircolare nel sistema dopo un adeguato trattamento di chiarificazione con l'impiego di flocculanti.

La pompa viene collegata alla testa di taglio attraverso tubi d'acciaio inossidabile inalterabili nel tempo o condotti flessibili con armatura multistrato. Grazie ad un orifizio di zaffiro o diamante l'energia di pressione si trasforma in energia cinetica ad alta velocità.

Nel caso di materiali duri il potere di erosione dell'acqua è ulteriormente incrementato incorporando nel getto una sostanza abrasiva.

3.1.2. L'ugello

Il getto ad alta velocità fuoriesce da un ugello posizionato all'uscita della testa di taglio. Esistono svariati disegni delle sezioni degli ugelli a seconda delle utilizzazioni cui il sistema è preposto. Una perfetta progettazione risulta di fondamentale importanza per l'efficacia del getto prodotto.

Gli ugelli sono la componente più soggetta ad usura nell'intero sistema water jet ad opera delle particelle solide trasportate dall'acqua o di bolle cavitanti. Vengono solitamente costruiti in acciaio o in widia (carburo di tungsteno) se il valore della pressione non supera i 250 MPa, oppure in diamante o zaffiro per valori superiori.

La durata di un ugello dipende anche dal diametro dell'orifizio d'uscita: ugelli più piccoli si consumano prima e sono generalmente più costosi. Dal punto di vista economico, è preferibile l'impiego di pochi ugelli di grande diametro piuttosto che il ricorso ad un alto numero di ugelli (e dunque di getti) più piccoli che determinano la dispersione della potenza idraulica ed, in definitiva, uno sfruttamento meno efficace dell'energia in gioco (a parità di potenza idraulica, l'energia specifica decresce con l'aumento del diametro del getto).

3.1.3. La lancia di taglio

La lancia è costituita da un elemento fisso di collegamento tra la tubazione flessibile e la testa porta ugelli e ha la funzione di impartire a quest'ultima il movimento di traslazione o alimentazione.

In base al tipo di testa portaugelli adottata e al movimento di taglio che essa impone al getto (o ai getti), in combinazione con il moto di alimentazione, si possono distinguere:

- **Getti semplici:** consistono in un unico getto che fuoriesce dall'ugello e viene guidato dal movimento di traslazione della lancia. Nel caso in cui questa tipologia di getto venga impiegata nell'esecuzione di tagli profondi, sorgono dei problemi per quanto riguarda la penetrazione della testa di taglio all'interno del piccolo solco creato dal getto. Infatti, all'aumentare della distanza di impatto il getto si sfrangia sempre di più, fino a risultare completamente nebulizzato per la perdita di energia cinetica, causata dall'attrito con l'aria; ciò determina una notevole riduzione dell'efficacia dell'azione di taglio esercitata dal getto che deve quindi essere mantenuto sufficientemente vicino al materiale da tagliare (all'incirca entro una distanza di 10 cm, in dipendenza dal diametro dell'ugello adottato).
- **Getti Rotanti:** constano di più getti perfettamente equilibrati (o due getti disposti a 90° oppure tre getti a 120°) cui viene impresso un veloce movimento di rotazione (500 – 600 giri/min) accompagnato da quello di traslazione. Viene così descritta una traiettoria epicicloidale che ottimizza il tempo di contatto tra il getto e la roccia.
- **Getti Oscillanti:** la testa con tali getti è più semplice della precedente, essendo priva del giunto rotante; il movimento oscillante del getto è accompagnato da quello di traslazione in modo da ottenere anche in questo caso una copertura uniforme dell'area colpita, descrivendo una traiettoria a zig-zag. L'angolo di oscillazione è in genere di 45° con frequenza di oscillazione pari a 20 – 25Hz.
- **Getti Multipli traslanti:** si ha un'azione che possiamo definire "a rastrello". La testa dispone di più ugelli fissi che, durante il moto di traslazione, descrivono traiettorie rettilinee parallele. L'inconveniente di questo sistema consiste nel fatto che la portata totale è suddivisa tra i singoli getti e ciò determina un decadimento dell'energia del singolo getto, che si sfrangia più rapidamente. E' generalmente preferibile ricorrere a

pochi ugelli (tre o quattro) di maggiore diametro piuttosto che a molti ugelli di diametro minore.

3.4 Variabili operative

Le principali variabili operative che influenzano l'azione del taglio sono:

- la pressione e la portata del getto;
- la distanza di impatto dall'orifizio d'uscita dell'ugello (stand-off distance);
- il tempo di permanenza del getto nel punto di impatto (legato alla velocità di traslazione della lancia porta ugelli);
- l'inclinazione e verso di avanzamento del getto;
- La velocità risultante dai moti di alimentazione e di taglio.

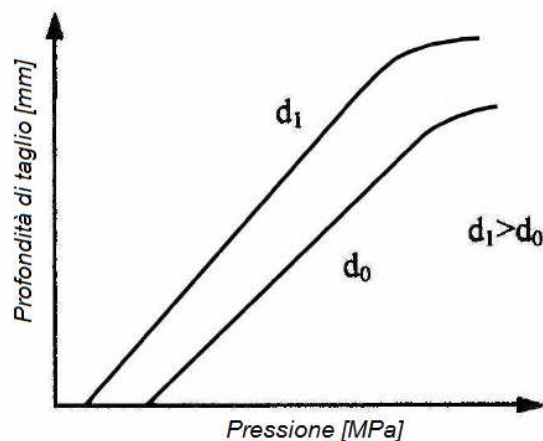


Figura 3.1 . Andamento della velocità di taglio in funzione della pressione

A parità di diametro dell'ugello, la profondità di taglio risulta proporzionale alla pressione del getto (Figura 3.1).

Esiste una soglia del valore della pressione, funzione delle caratteristiche di resistenza proprie del materiale trattato, sotto la quale gli effetti provocati dal getto risultano trascurabili. L'aumento della pressione, oltre all'aumento della velocità di uscita del getto e della profondità di taglio, comporta la diminuzione del consumo specifico di acqua (m^3 consumati/ m^2 tagliati), l'aumento del consumo di energia elettrica, l'aumento degli attriti

(e perciò della quantità di energia dissipata sotto forma di calore) e l'aumento dell'usura dell'ugello.

Superato un certo valore critico si verificano inoltre altri effetti negativi, tali produrre una diminuzione che l'approfondimento relativo diminuisce; raggiunto questo valore conviene quindi aumentare la potenza del getto agendo sulla sua portata (impiegando quindi ugelli di diametro maggiore), lasciando invariato il valore della pressione.

Oltre che dalla pressione, la profondità del taglio dipende anche dalla portata d'acqua.

Si ricava la potenza idraulica W :

$$W = P Q$$

Dove Q è la portata e P la pressione. Quindi, all'aumentare della portata, aumenta a parità di pressione, la potenza idraulica del getto e si fa meno rapido il decadimento della sua energia ad opera dell'attrito con l'aria: l'azione di taglio risulta, in definitiva, più efficace.

Superata la pressione critica, la potenza idraulica può essere utilmente incrementata aumentando la portata piuttosto che la pressione.

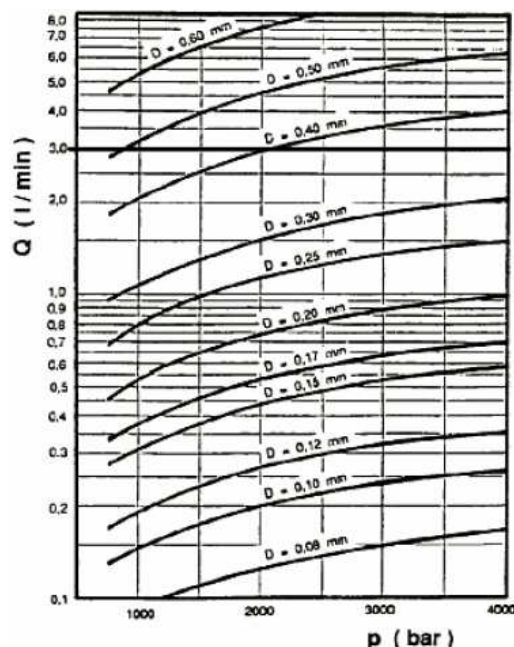


Figura 3.2. Variazione della portata in funzione della pressione e del diametro dell'ugello

La portata d'acqua in uscita dipende essenzialmente dal diametro dell'ugello e dal valore della pressione (Figura 3.2).

L'energia specifica E_s (energia spesa per unità di massa o di volume) è data dal rapporto tra la potenza idraulica W e la capacità di trattamento C nell'unità di tempo :

$$E_s = \frac{W}{C}$$

E' importante anche considerare la distanza d'impatto del getto perché il getto d'acqua tende a sfrangiarsi all'aumentare della distanza dall'ugello, fino alla sua completa nebulizzazione; quindi al crescere della distanza tra l'orifizio di uscita e il materiale da tagliare, il getto d'acqua perde energia.

Di conseguenza, l'efficacia del taglio è fortemente condizionata dalla distanza di stand-off e ciascun dispositivo water-jet è caratterizzato da una distanza di taglio ottimale, la quale dipende da diversi parametri, fra cui principalmente il diametro e la conformazione dell'ugello. La pratica sperimentale ha dimostrato che tale distanza può raggiungere fino a 50 volte il diametro dell'orifizio senza che il getto subisca apprezzabili diminuzioni di efficacia.

Il terzo aspetto riguarda invece la velocità di traslazione del getto. Il tempo di permanenza del getto nel punto di impatto è direttamente connesso alla velocità con cui si muove la testa porta ugelli rispetto al materiale da tagliare; al crescere di tale velocità diminuisce la profondità del solco calcolabile mediante formule empiriche.

In un primo momento, la profondità di taglio aumenta proporzionalmente all'aumentare del tempo di permanenza del getto nel punto di impatto ma, dopo un certo tempo, generalmente pochi secondi, insistere con il getto sullo stesso punto non produce risultati rilevanti per quanto riguarda l'azione di taglio e comporta un inutile spreco di energia. Le lance a getto rotante od oscillante, attraverso il loro movimento rapido, ovviano a questo comportamento ottimizzando l'efficacia della loro azione.

Nei getti semplici, il tempo di permanenza del getto nel punto di impatto può venire regolato attraverso la velocità di traslazione trasversale della lancia. Aumentando la velocità di traslazione del getto si ottiene anche un aumento della velocità areale di taglio (superficie tagliata nell'unità di tempo, indice quindi della produttività della lavorazione), fino ad un livello massimo oltre il quale l'andamento si inverte fino ad annullarsi.

L'ultima variabile che influenza l'azione di taglio operata dal getto è la direzione nella quale questo viene orientato (individuata attraverso l'inclinazione del getto ossia l'angolo formato tra il getto e la superficie di contatto acqua - materiale). Inoltre, se la testa di taglio è inclinata, l'azione risulta più incisiva se il verso di avanzamento è coincidente con quello di orientazione del getto, più blando se si procede in verso opposto; nel primo caso si sfrutta infatti l'effetto di pre-rottura operato dal getto riflesso nella direzione d'avanzamento sulla parte di roccia non ancora raggiunta dal getto.

3.5 Portata, potenza idraulica e energia specifica del getto

La velocità del getto dipende esclusivamente dalla pressione dell'acqua e non è influenzata dalla geometria dell'ugello. Tale velocità può essere calcolata in funzione della pressione usando un'equazione relativa ai fluidi incomprimibili.

La portata del getto viene quindi determinata così calcolata moltiplicando l'area della sezione del getto per la sua velocità;

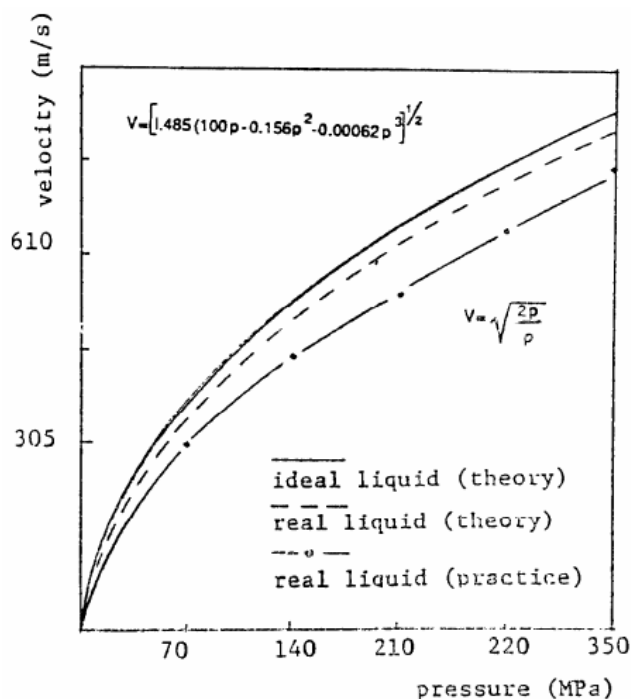


Figura 3.3. Velocità del getto d'acqua in funzione della pressione

la sezione del getto può essere messa in relazione con la sezione dell'orifizio dell'ugello mediante il coefficiente di deflusso, che dipende dalla forma dell'ugello. Tutti i calcoli che

seguiranno sono fondati sul teorema di Bernoulli valido per liquidi ideali, anche se l'esperienza ha dimostrato che un liquido reale spinto attraverso un ugello si comporta in modo differente rispetto a uno ideale (Figura 3.3).

Se v è la velocità del getto e d il diametro dell'ugello, il volume d'acqua Q pompato attraverso l'ugello nell'unità di tempo è dato dall'equazione:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}}$$

Essendo, secondo il teorema di Bernoulli:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}}$$

p la pressione del getto

ρ la massa volumica dell'acqua.

La massa m_t di acqua uscente da un ugello di diametro d nell'unità di tempo sarà:

$$m_t = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}}$$

La forza di reazione e la potenza del getto d'acqua sono espressi da:

$$F = m_t \cdot v \quad \text{e} \quad P = Q \cdot p$$

Tutti questi calcoli sono relativi a liquidi ideali e a una perfetta eiezione dell'ugello (coefficiente di deflusso pari a 1,0). Se si tiene conto del coefficiente d'efflusso, il quale esprime il fenomeno di contrazione che subisce il getto all'uscita dall'orifizio, si ricava la portata:

$$Q = C_D \cdot v \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

dove Q è la portata [m^3/s], d il diametro dell'orifizio [m], v la velocità dell'acqua [m/s] e C_D il coefficiente di contrazione della vena. Sostituendo l'espressione della velocità nell'equazione della portata, si ha:

$$Q = C_D \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}} \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

Infine, moltiplicando la portata per la pressione totale, si ottiene la potenza idraulica del getto:

$$W = p_t \cdot Q = p_t \cdot C_D \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}} \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

Il coefficiente di contrazione C_D è posto pari a 1.7 secondo le caratteristiche dell'ugello utilizzato.

E' evidente che una maggiore potenza può essere ottenuta aumentando la pressione oppure la portata. Tuttavia, per W costante, l'efficacia del taglio è maggiore quando, superata la pressione critica, si aumenta la portata e non la pressione.

4. COMMINUZIONE WATERJET

4.1 Limiti delle tecniche di macinazione tradizionali

La comminuzione di sostanze minerali è spesso un'operazione dispendiosa e ad alto impegno energetico soprattutto per la preparazione di prodotti finemente divisi.

La macchina di macinazione ideale dovrebbe essere di ingombro piccolo in relazione alla capacità di trattamento che è interessante massimizzare al fine di contenere i costi operativi.

Per perseguire questo obiettivo è importante che le forze agenti siano applicate direttamente agli elementi da macinare: a questo proposito l'utilizzazione di getti d'acqua generati ad alta pressione possono offrire un'opportunità molto interessante.

Nel campo della macinazione ad umido, i mulini a caduta che utilizzano corpi macinanti (sfere o barre) all'interno di cilindri rotanti per ottenere finezze di macinazione fino a dimensioni dell'ordine dei micrometri rappresentano la soluzione tecnologica generalmente utilizzata. Essi fanno uso di considerevoli cariche circolanti (tipicamente da 2 a 5 volte l'alimentazione fresca) lavorando in circuito chiuso con idonei apparecchi di classificazione deputati al controllo granulometrico del prodotto finale.

Questa categoria di mulini è caratterizzata da bassa efficienza energetica a causa delle pesanti perdite sotto forma di calore generato, consumo della corazza e dei corpi macinanti di acciaio, sovramacinazione e rumore, oltre alla quota impiegata per mantenere in rotazione il sistema.

L'energia specifica varia tipicamente entro il campo (10 – 20) kWh/t, in funzione dell'indice di macinabilità del materiale alimentato, mentre il tasso di consumo delle parti soggette a logoramento è dell'ordine di 100 fino a 500 g/t, a seconda dell'abrasività del materiale e del grado di finezza richiesto.

Questo rende la macinazione convenzionale alquanto dispendiosa, soprattutto per le sostanze di difficile macinabilità alle dimensioni fini, tra le quale rientra lo stesso carbone, per le quali il costo specifico può raggiungere diversi €/t.

Pertanto la ricerca di nuove tecniche di macinazione è di grande interesse, testimoniato da un forte impegno in fase di ricerca e sviluppo al fine di portare le soluzioni studiate allo stadio di applicazione commerciale.

4.2. Vantaggi delle tecniche innovative

In questo contesto prospettive interessanti possono essere attribuite a metodi innovativi di comminuzione basati sull'uso di getti d'acqua ad alta velocità il cui potenziale di disgregazione è già correntemente utilizzato per svariate operazioni quali il taglio di diversi materiali, lo scavo delle rocce e la pulitura industriale.

Tale potenziale è riconducibile ai seguenti aspetti:

- La velocità del getto d'acqua generato a pressioni dell'ordine di alcune centinaia di MPa è dell'ordine di grandezza della celerità del suono in aria (da 1 a 3 volte) e pertanto la potenza concentrata sul bersaglio può raggiungere valori molto alti;
- per effetto dell'alta intensità dell'energia incidente si iniziano numerose microfratture che dal punto colpito si propagano verso l'interno del materiale;
- il processo di rottura è piuttosto complesso e gli effetti che si manifestano comprendono una polverizzazione spinta nella zona di impatto seguita, temporalmente e spazialmente, dalla formazione delle microfratture grazie all'azione idrodinamica per la quale l'acqua penetra all'interno delle discontinuità preesistenti e/o di nuova formazione generando sollecitazioni di trazione, accompagnata e da sforzi di taglio legati alla presenza di deformazioni differenziali. L'efficienza di rottura aumenta se le fratture sono interamente riempite di acqua (attraverso degassamento, trattamenti termici o imbibizione preliminare).

4.3. Soluzioni tecniche sperimentate

Nel passato sono stati effettuati diversi tentativi per sviluppare tecniche idonee basate sull'uso di getti d'acqua ad alta velocità per la comminuzione delle sostanze minerali e del carbone.

4.3.1 Azione diretta del getto d'acqua

In linea di principio l'azione disgregatrice del getto d'acqua appare interessante per la capacità di indurre sollecitazioni di trazione alla quali le sostanze di natura minerale, soprattutto se interessate da porosità permeabili, oppongono minore resistenza, contrariamente alle convenzionali macchine ad azione meccanica che applicano prevalentemente sollecitazioni di compressione, statica o dinamica.

Tuttavia le seguenti considerazioni rendono conto delle difficoltà incontrate nel tentativo di rendere praticamente fattibili le tecniche basate unicamente sull'impiego di energia idraulica:

- la comminazione di granulometrie grossolane fino a un grado di finezza spinto utilizzando la sola azione diretta del getto d'acqua implica la necessità di assicurare un tempo sufficientemente lungo per lo sviluppo del processo, a spese della capacità di trattamento con conseguente incremento del consumo energetico e aumento del costo specifico dell'operazione;
- questa è una limitazione intrinseca del concetto nei confronti della macchina ideale che dovrebbe essere estremamente semplice e con alta capacità di trattamento in relazione all'ingombro.

4.3.2 Sinergia meccanico-idraulica

Esiste ed è stata sperimentata con indicazioni interessanti la soluzione alternativa consistente nella combinazione dell'energia meccanica, normalmente utilizzata nelle macchine di macinazione tradizionali, con l'energia idraulica trasferita mediante getto d'acqua in rapporto sinergico.

La possibilità di ridurre il consumo delle parti meccaniche in movimento relativo e di limitare la contaminazione del prodotto macinato costituisce un ulteriore vantaggio, soprattutto nel caso di materiali abrasivi.

4.4. Stato dell'arte in tema di comminuzione water jet

Le caratteristiche dei diversi prototipi realizzati e i principali contributi alla conoscenza riguardante i processi speciali di comminuzione sono nel seguito brevemente riassunti.

4.4.1 Water jet mills

Le soluzioni inizialmente adottate facevano essenzialmente affidamento sulla sola energia del getto d'acqua, con uso secondario di azioni meccaniche. I risultati furono incoraggianti nonostante i valori elevati dell'energia specifica dovuta alla bassa capacità di trattamento.

Una prima esperienza interessante è stata effettuata nel corso dello studio sperimentale su un prototipo basato sul concetto della “revolving chamber” (figura 4.1), partendo dall'assunto che i migliori risultati di comminuzione fine del carbone potessero ottenersi in condizioni di rapido movimento.

In questo tipo di apparecchiatura vengono esaltati fenomeni di “attrition” o intenso sfregamento mutuo tra i grani solidi costretti ad addensarsi in forma di torbida spessa per effetto della forza centrifuga generata dalla rotazione veloce della camera.

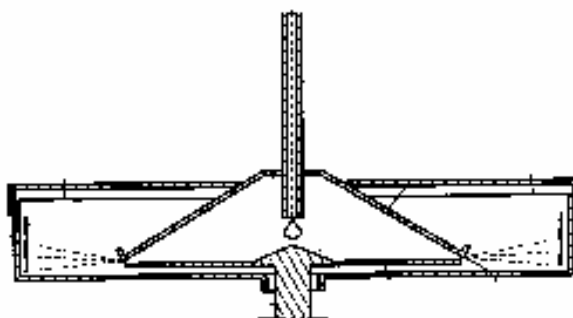


Figura 4.1. Schema dell'apparecchio di comminuzione a camera rotante

I risultati degli esperimenti hanno mostrato che il minimo consumo energetico si verificava a basse velocità di rotazione della camera. Inoltre si è trovato che l'energia specifica diminuiva in misura significativa all'aumentare della portata di carbone in ingresso, fino a un limite

consentito dalla particolare geometria del sistema. D'altro canto risultò che il ricorso a più alte pressioni di generazione dei getti d'acqua comportava un aumento dell'energia specifica.

Un'ulteriore interessante indicazione suggerita dagli esperimenti ha riguardato il tempo di permanenza del materiale che doveva essere limitato per raggiungere i migliori risultati del processo di macinazione.

Un concetto simile è stato realizzato utilizzando una lancia fornita di una testa con due o più ugelli opportunamente angolati ruotante all'interno di un recipiente contenente la carica di carbone.

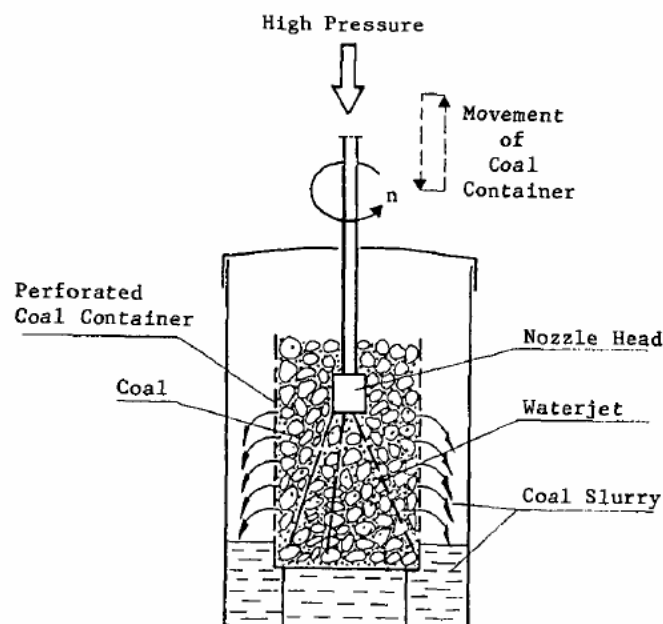


Figura 4.2. Rappresentazione schematica del principio di funzionamento della lancia rotante

Una variante sul tema, basata sull'azione disagregatrice della sola energia idraulica, consisteva in un contenitore cilindrico perforato dotato di un lento movimento alternativo in direzione verticale per consentire una migliore distribuzione dell'energia dei getti messi in movimento circolare dalla rotazione veloce della lancia coassiale (figura 4.2).

In effetti l'energia specifica risultò pari a circa la metà rispetto alla configurazione con la sola rotazione della lancia, indicando chiaramente l'importanza del movimento cinematico relativo per cercare di massimizzare la probabilità di impatto dei getti con i grani di carbone.

E' stata altresì sottolineata, a conclusione dello studio, l'influenza positiva della concentrazione di carbone rispetto all'acqua all'interno del contenitore per favorire il contatto reciproco delle particelle solide.

4.4.2 Water jet-assisted comminution

Al fine di superare gli inconvenienti insiti nelle tecniche di disgregazione basate sulla sola azione diretta dei getti, con particolare riferimento ai valori elevati dell'energia specifica, è stata esplorata la soluzione consistente nella combinazione dell'energia idraulica con l'energia meccanica trasmessa al materiale da macinare tramite il movimento relativo di due piastre affacciate di forma conveniente.

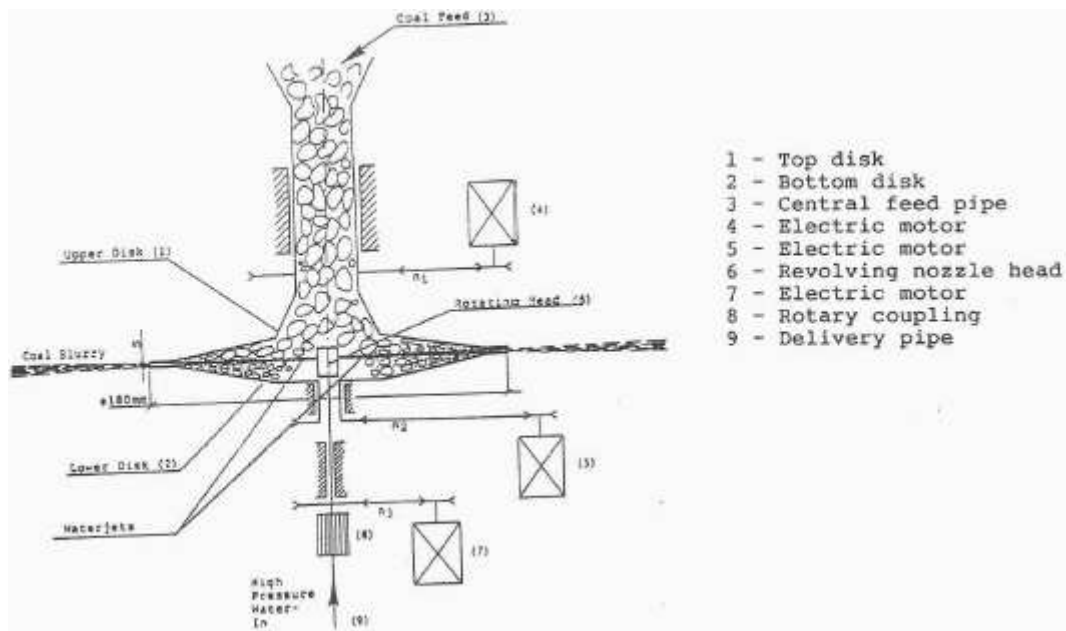


Figura 4.3. Mulino water jet a dischi rotanti

Questo principio è stato adottato in un apparecchio denominato “double disk mill” consistente in una camera di macinazione con pareti convergenti delimitata da due dischi rotanti con velocità differenziale regolabile indipendentemente (figura 4.3).

All'interno di tale spazio confinato agivano due getti radiali generati attraverso ugelli applicati a una lancia rotante posizionata verticalmente al centro del sistema, come mostrato in figura 4.3

Il carbone veniva alimentato dall'alto e il prodotto della comminuzione veniva scaricato insieme all'acqua attraverso l'apertura anulare periferica. Il compito dei dischi rotanti era

quello di assistere attivamente i getti d'acqua nel lavoro di rottura e di prevenire possibili intasamenti assicurando così il flusso regolare della torbida prodotta.

Le prestazioni tecniche ottenibili sono state esaminate al variare dei parametri operativi principali, quali la pressione di generazione dei getti, la pezzatura del carbone in alimentazione, la dimensione dello "slot" di scarico, le velocità dei dischi superiore e inferiore e la velocità di rotazione della lancia. Il risultato della comminuzione è stato valutato misurando il volume di materiale macinato a dimensioni minori di 75 micrometri con un singolo passaggio.

Il valore minimo dell'energia specifica è stato raggiunto a pressioni relativamente basse (intorno a 10 MPa), facendo girare il disco superiore ad alta velocità, mantenendo fisso quello inferiore e ruotando la lancia a velocità intermedia.

La possibilità di lavorare a pressioni ridotte comporterebbe il vantaggio di limitare il costo del sistema di pressurizzazione e di facilitare lo svolgimento dell'operazione.

4.4.3 Effetti di cavitazione

La possibilità di sfruttare vantaggiosamente fenomeni di cavitazione (implosione rapida di bolle di vapore instabili all'interno di un liquido) ha portato alla realizzazione di un'apposita macchina sperimentale di concezione complessa.

Il materiale da trattare veniva immesso in una prima camera dove veniva sottoposto a una prima fase di comminuzione sotto l'azione di getti d'acqua ad alta velocità. Le particelle venivano quindi trasferite a una seconda camera dove subivano un'ulteriore macinazione a dimensioni molto fini grazie all'azione disgregatrice della cavitazione. Infine il flusso di particelle in sospensione acquosa veniva trasferito a una terza camera nella quale aveva luogo la produzione di ultra-fini (di dimensioni minori di 15 micrometri) per effetto di collisioni reciproche in ambiente altamente turbolento.

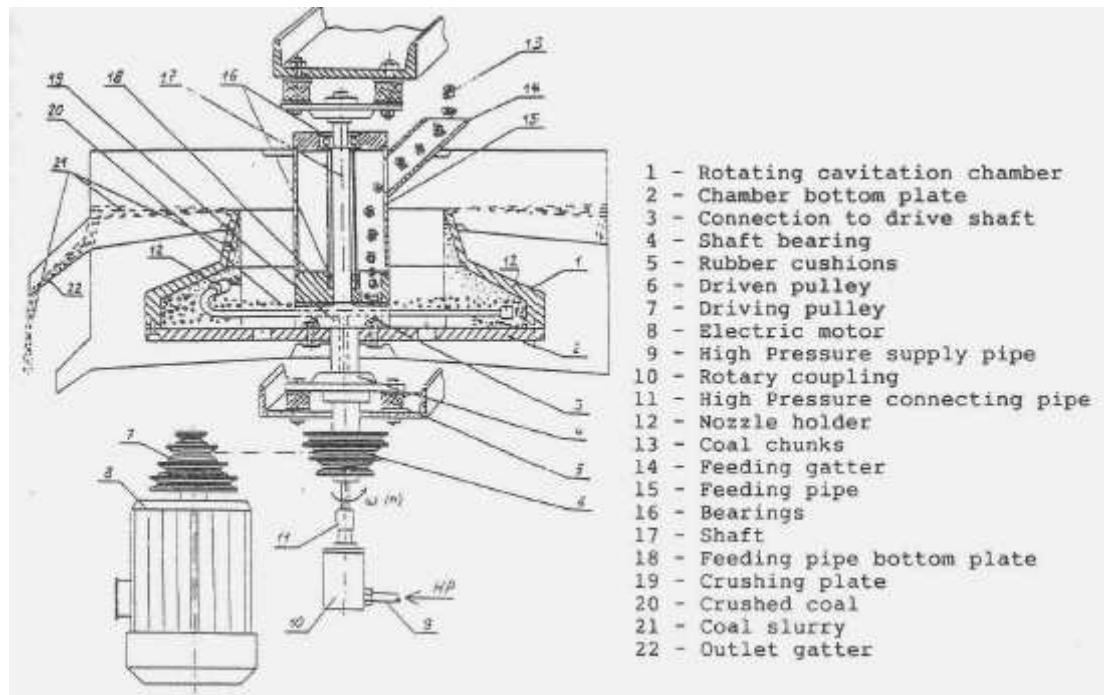


Figura 4.4. Apparecchio di comminuzione basato su fenomeni di cavitazione

Con l'apparecchiatura sopra descritta, schematicamente illustrata in figura 4.4, sono state effettuate diverse serie di prove ottenendo utili indicazioni ai fini dell'ulteriore sviluppo del processo.

In particolare è stato esplorato l'effetto della pressione del liquido all'interno della camera di cavitazione. Si è potuto rilevare che un incremento della pressione da 25 a 38 MPa non produceva alcun sensibile miglioramento dell'effetto di cavitazione ma si verificava un aumento del grado di comminuzione a causa della pressione più alta all'interno della camera di miscelazione finale, a spese tuttavia di una maggiore energia specifica.

4.4.4. Concetto dei getti contrapposti

Il concetto dei getti contrapposti, già applicato per la micronizzazione pneumatica a secco di minerali teneri (talco, caolino, etc.), è sembrata una soluzione interessante per la macinazione fine del carbone utilizzando getti d'acqua ad alta pressione per accelerare le particelle solide e portarle a collidere con elevata velocità, con l'obiettivo di realizzare una disgregazione spinta per urto reciproco.

Considerando che i getti hanno velocità dell'ordine delle centinaia di m/s in funzione della pressione, come rappresentato nel paragrafo dedicato agli aspetti generali della tecnologia waterjet, la velocità relativa dei volumi elementari di fluido, raddoppiata fino all'istante immediatamente precedente l'impatto, raggiunge valori elevatissimi. Pertanto gli effetti di comminazione risultano amplificati per effetto della grande forza d'urto di tipo impulsivo che agisce sulle particelle solide al momento dell'impatto, anche ipotizzando che la loro velocità non raggiunga, al termine del tempo di accelerazione, quella del fluido.

Curando adeguatamente la coerenza dei getti e focalizzando il flusso attraverso tubi collimatori di lunghezza opportuna e di piccolo diametro, la probabilità di collisione può raggiungere valori molto alti, prossimi all'unità, aumentando al massimo la carica del solido, compatibilmente con le condizioni necessarie per assicurare un flusso regolare con buone caratteristiche idrodinamiche.

Il concetto è schematizzato in figura 4.5, tratta dal documento di deposito del relativo brevetto, ed è illustrato dall'immagine di figura 4.6 che mostra l'effetto di due getti contrapposti generati da due ugelli collocati a distanza di stand-off pari a circa 30 cm.

La validità pratica della tecnica è stata sperimentata nel caso della micronizzazione del carbone anche in vista della preparazione di miscele coal-water.

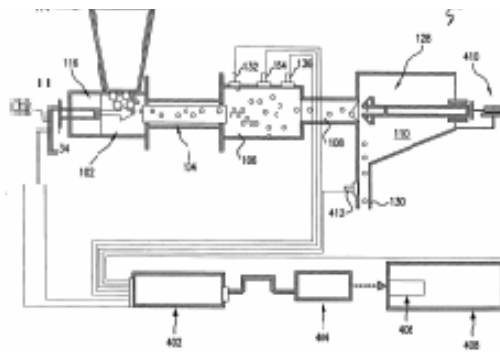


Figura 4.5. Schema dal mulino a getti contrapposti

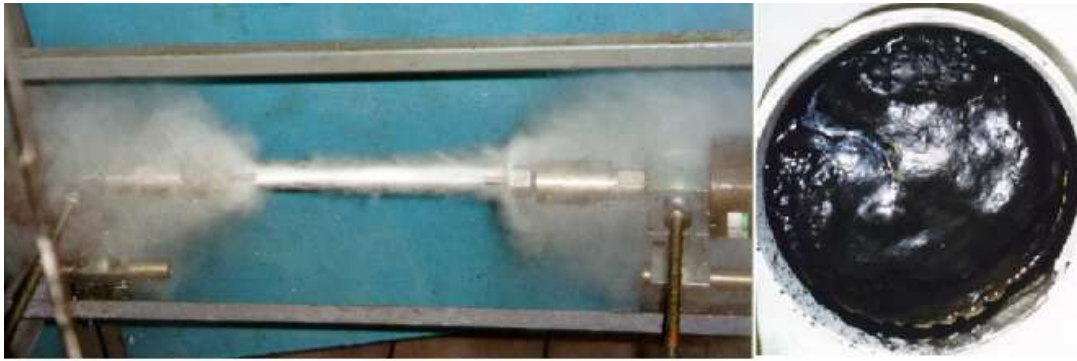


Figura 4.6. Effetto dei getti contrapposti nella micronizzazione del carbone.

Pur in presenza di risultati interessanti che giustificano ulteriori sforzi di ricerca e sviluppo, la tecnica non presenta ancora i necessari requisiti per una applicabilità commerciale a causa dei valori ancora troppo alti dell'energia specifica finora ottenuti, probabilmente perché la rottura delle particelle è affidata a un solo urto per tempi brevissimi senza possibilità di replica.

La soluzione dei getti contrapposti esprime la migliore efficacia nel campo della macinazione a dimensioni estremamente fini, per la quale può competere con i metodi tradizionali soprattutto nel caso di materiali abrasivi.

4.4.5 Macinazione per urto su piastra

Un approccio simile è stato adottato per cercare di incrementare la capacità di trattamento e ridurre quindi l'energia specifica di macinazione anche a costo di rinunciare al vantaggio offerto dalla soluzione dei getti contrapposti.

L'apparecchio sperimentale sviluppato presso l'ex DIGITA, basato prevalentemente su forze d'urto, consisteva in una struttura senza parti mobili composta da due camere di macinazione in serie: quella superiore, con geometria a cono rovescio, terminava con un'apertura calibrata, in corrispondenza della quale era collocata in posizione verticale la lancia water jet, mentre in quella inferiore, con geometria cilindrica, era collocata una piastra di acciaio duro in posizione perpendicolare all'asse (figura 4.7).

Il materiale da trattare, frantumato a dimensioni dell'ordine del centimetro, era alimentato lateralmente nella camera superiore dove subiva un primo stadio di comminazione ad opera del getto d'acqua; i grani erano quindi forzati ad attraversare l'orifizio calibrato e venivano

proiettati ad alta velocità contro la piastra nella camera inferiore dove aveva luogo lo stadio finale del processo. Il materiale fine fluiva insieme all'acqua attraverso una serie di fori e veniva scaricato lateralmente, mentre la frazione grossa veniva accumulata nella parte conica terminale e poteva essere riciclata fino a raggiungere la granulometria desiderata.

L'inconveniente principale messo in luce dalle sperimentazioni consisteva in una bassa capacità di trattamento determinata dalla ridotta sezione di passaggio tra le due camere.

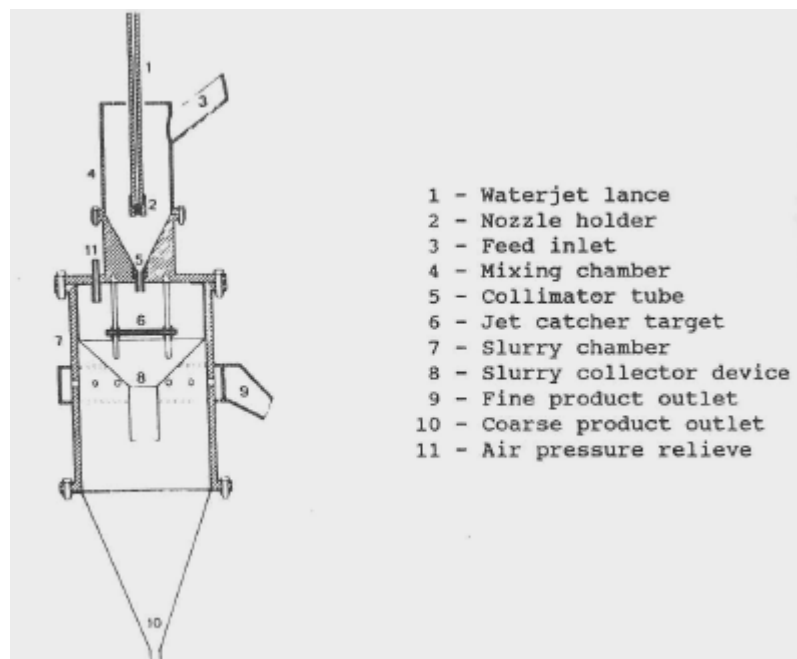


Figura 4.7. Apparecchio di disaggregazione per urto su piastra.

Al fine di superare questa strozzatura, è stato successivamente realizzato un nuovo apparecchio sperimentale, basato sullo stesso principio, denominato "rotating jet mill". L'orifizio circolare è stato sostituito da un'apertura anulare tra la parete esterna della camera superiore e un nucleo centrale di forma conica con vertice arrotondato. In questo caso la lancia terminava con due ugelli angolati in modo da dirigere i getti d'acqua verso l'apertura ed era dotata di movimento di rotazione veloce.

Come nel modello iniziale, il materiale era sottoposto a due stadi di comminazione, il primo per azione diretta del getto accompagnata da fenomeni di "attrition", il secondo per urto contro la piastra collocata nella camera inferiore, nella quale si verificavano anche urti secondari tra le particelle solide in movimento con traiettorie incrociate.

La finezza di macinazione era determinata dall'area della sezione di passaggio, dalla dimensione dei grani in alimentazione, dalla pressione di generazione dei getti, dal diametro degli ugelli e, in certa misura, anche dalla portata di solido in ingresso.

Pur in presenza di una maggiore capacità di trattamento in relazione all'ingombro dell'apparecchiatura, l'energia specifica risultava ancora troppo alta. Tuttavia le indicazioni ottenute si sono rivelate molto utili nella progettazione, realizzazione e sviluppo del mulino HERA, con il quale sono state realizzate le sperimentazioni oggetto del presente contratto.

L'efficacia potenziale del concetto è stata sperimentata, oltre che sul carbone, anche su diversi materiali a struttura composita, ottenendo interessanti risultati di disgregazione selettiva concernenti sia il trattamento di calcestruzzo frantumato con scopi di recupero e riciclo degli inerti ripuliti dal legante cementizio, sia l'operazione di sfangamento di un grezzo di bauxite contenente argilla difficile da rimuovere con altri metodi.

4.4.6 Automacinazione in ambiente turbolento

Sono stati realizzati diversi modelli di apparecchiature sperimentali di questo tipo, sia per scopi di indagine scientifica, sia in vista di possibili applicazioni industriali, soprattutto per quanto concerne la macinazione di sostanze tenere quali il carbone (figura 4.8).

L'idea ispiratrice è stata quella di massimizzare la capacità di trattamento e ridurre nel contempo l'impegno energetico, cercando di favorire fenomeni di sfregamento tra le particelle in condizioni di intenso affollamento in ambiente turbolento.

Il getto d'acqua, generato per mezzo di un ugello primario di piccolo diametro, aspira per effetto Venturi il materiale da macinare all'interno della camera di miscelazione insieme a una grande quantità di aria.

Prima di uscire attraverso un tubo di deflusso di diametro sufficientemente grande, il materiale è macinato a una finezza che dipende essenzialmente dal tempo di permanenza.

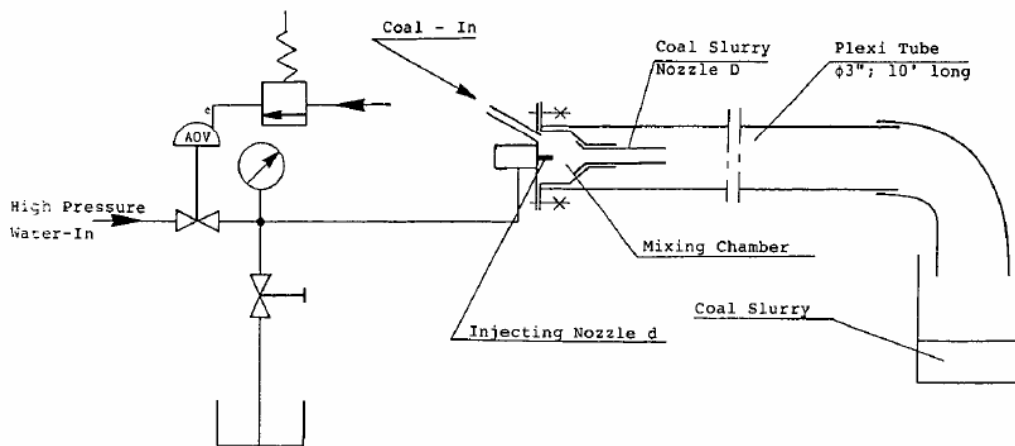


Figura 4.8. Schema dell'apparato sperimentale per prove di automacinazione

Il concetto sopra delineato è stato applicato nella preparazione di miscele fluide di carbonella (charcoal) in sospensione acquosa, ottenendo i risultati sintetizzabili come segue:

- la grande efficacia nella comminuzione con getto d'acqua è facilitata dalla scarsa resistenza del materiale a sollecitazioni di taglio;
- La frazione granulometrica tra 10 e 20 μm è molto ben rappresentata e viene incrementata con l'aumento della pressione;
- Il consumo energetico specifico, fattore importante che caratterizza l'efficienza della tecnologia, è risultato direttamente proporzionale alla pressione, confermando i risultati ottenuti da altri ricercatori. Pertanto la condizione più favorevole dal punto di vista economico dovrà comportare l'uso di pressioni non eccessivamente elevate.

4.4.6. Pretrattamenti Termici

Risultati di comminuzione interessanti possono essere conseguiti attraverso la combinazione dell'energia termica con l'energia idraulica. Il calore favorisce infatti l'insorgere di nuove fratture o la propagazione di quelle preesistenti facilitando il processo di comminuzione fine.

Tra le indicazioni emerse dalle prove sperimentali sull'efficacia della soluzione sono da evidenziare la minore dispersione granulometrica del prodotto ottenuto e il minore consumo di energia idraulica per ottenere lo stesso grado di finezza.

4.5. Meccanismo di azione del getto d'acqua

La tecnologia water jet è basata sull'azione dinamica del getto d'acqua ad alta velocità generato a pressioni che possono arrivare fino a diverse centinaia di MPa. Gli ugelli impiegati nella pratica industriale hanno un diametro normalmente minore di 1,5 mm e pertanto l'area della zona colpita alle normali distanze di impatto (< 20-40 volte il diametro dell'ugello) è dell'ordine di pochi mm².

La potenza del getto è quasi interamente trasmessa al materiale generando sulla superficie colpita un picco di pressione molto alto che permane per un tempo determinato dalla velocità di spostamento del getto. L'effetto risultante è l'erosione di un certo volume di materiale secondo meccanismi che dipendono dalle sue caratteristiche alla piccola scala.

4.5.1. Aspetti scientifici dell'interazione getto-bersaglio

La capacità di concentrare una grande potenza su una piccola area è la ragione principale del successo della tecnologia in numerose applicazioni industriali. I campi di maggior interesse sono rappresentati in figura 4.9.

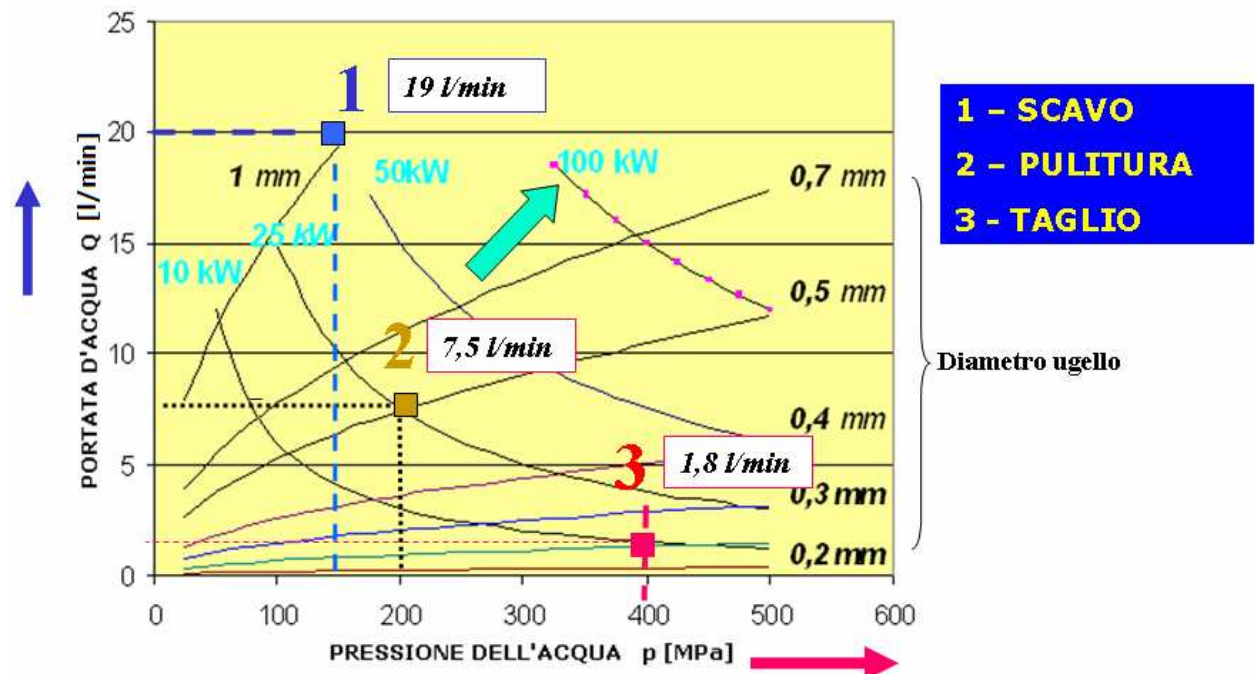


Figura 4.9. Prospettive di applicazione della tecnologia water jet (getti puri)

In effetti, un aspetto distintivo della tecnologia è rappresentato dalla sua flessibilità, dovuta alla possibilità di modificare i diversi parametri quali la pressione (e quindi la potenza del singolo getto), il tipo, il diametro e il numero di ugelli (area di impatto) e la velocità di traslazione e la cinematica del movimento composito della lancia (tempo di azione sul bersaglio), oltre ad altri parametri influenti quali la distanza di impatto (stand-off), l'inclinazione del getto e le sue caratteristiche idrodinamiche che danno luogo alla vasta famiglia "water jet" (getti stazionari, pulsanti, autocavitanti, abrasivi etc.).

Questi parametri possono essere modificati per ottimizzare gli effetti desiderati su un dato materiale. Nel caso di materiali geologici eterogenei, costituiti da diverse specie minerali o interessati da microfratture preesistenti disposte in modo disuniforme, l'individuazione del campo di ottimalità per l'insieme dei parametri può essere resa difficile dalla variabilità locale delle caratteristiche del materiale.

Infatti l'area di impatto del getto ha spesso estensione minore delle dimensioni dei vari componenti minerali presenti o degli elementi volumetrici delimitati da microfratture. Conseguentemente il getto in movimento intercetta zone aventi diverse caratteristiche meccaniche e/o strutturali, con l'ulteriore complicazione dovuta al fatto che la superficie di contatto tra i diversi elementi non sempre corrisponde a condizioni di minore resistenza.

In questi casi la ricerca di un modello concettuale del meccanismo di disgregazione risulta difficile e complessa. In effetti, nonostante siano state elaborate diverse teorie da parte dei ricercatori nel corso degli anni, nessuna di queste è in grado di spiegare in modo soddisfacente il comportamento dei diversi materiali sotto l'azione del getto d'acqua.

Alcune delle teorie proposte puntano sulla porosità e la permeabilità della roccia senza prendere in considerazione altre caratteristiche importanti, quali la composizione mineralogica e la dimensione degli elementi costituenti. Ulteriori sviluppi delle stesse teorie non hanno consentito di migliorare in modo apprezzabile la rispondenza dei modelli ai dati sperimentali, con particolare riferimento alla scarsa spiegazione della presenza di una pressione di soglia al disotto della quale gli effetti prodotti dal getto d'acqua risultano trascurabili.

Altri approcci teorici sono stati focalizzati sul comportamento fragile del materiale e sul processo di propagazione delle fratture, mettendo in evidenza l'influenza della dimensione

dei cristalli minerali. E' stata presa in considerazione anche la differenza di comportamento delle rocce sedimentarie rispetto a quelle di origine eruttiva.

Il contributo alle conoscenze apportato dal team di ricerca presso l'Università di Cagliari si è sostanziato nella proposta di un meccanismo di disgregazione basato sulla propagazione delle fratture per "effetto cuneo", con particolare attenzione alle condizioni capaci di favorire la penetrazione dell'acqua in pressione nella porosità del materiale.

La validità dell'ipotesi è stata verificata su campioni di granito ma può essere estesa a tutti i materiali compreso il carbone.

4.5.2. Prove sperimentali

Le prove di "idrotaglio" sono state effettuate su un campione di granito sardo conosciuto commercialmente con la denominazione di "Grigio Perla", le cui proprietà di interesse sono riassunte nella tabella 4.1.

Tabella 4.1. Caratteristiche porosimetriche del granito "Grigio Perla"

Porosità totale [%]	0.8			
Porosità specifica [mm ³ Hg/g]	3.1			
Dimensione dei vuoti [μm]	10-1	1- 0.1	0.1-0.001	≤ .001
Indice dei vuoti [%]	21.05	44.08	34.87	0
Superficie specifica dei vuoti [m ² /g] *	0.05			

* con l'ipotesi di forma cilindrica

Le prove di taglio sono state eseguite su 4 campioni di forma parallelepipedica con spessore 5 cm e lati di base di 20 cm, i primi tre impregnati con diverse sostanze liquide, il quarto lasciato inalterato allo stato secco.

La procedura di impregnazione dei pori comunicanti comprendeva il riscaldamento preliminare in muffola a 80°C per eliminare l'umidità naturalmente presente e la successiva immersione per 24 h alla stessa temperatura in acqua, olio o cera fusa, prescelti per le loro diverse proprietà (in particolare viscosità e tensione superficiale) dalle quali dipende la capacità di saturare i vuoti in sostituzione dell'aria.

Per le sperimentazioni è stata utilizzata una lancia water jet dotata di ugello di diametro 1,25 mm traslante alla velocità di 1,5 m/min; il getto diretto perpendicolarmente alla superficie del campione agiva con una distanza di stand-off di 10 mm.

Per ciascun campione è stato esplorato l'effetto della pressione (80, 160 e 240 MPa) sulla profondità di taglio misurata con calibro di profondità, mantenendo una distanza di 5 cm tra i tagli sullo stesso campione al fine di evitare possibili interferenze.

4.5.3 Risultati delle sperimentazioni

I risultati in termini di profondità di taglio in funzione della pressione di generazione del getto d'acqua sono rappresentati dai grafici di figura 4.10 per le quattro condizioni esplorate (campione secco o impregnato con acqua, olio o cera fusa, preparati secondo le modalità sopra descritte).

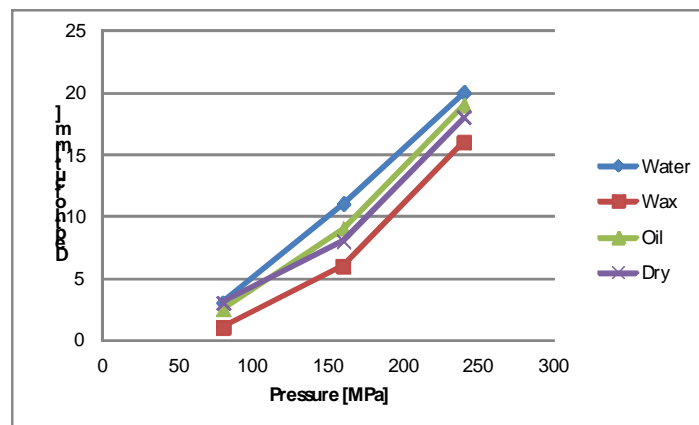


Figura 4.10. Profondità di taglio[mm] alle diverse condizioni sperimentali

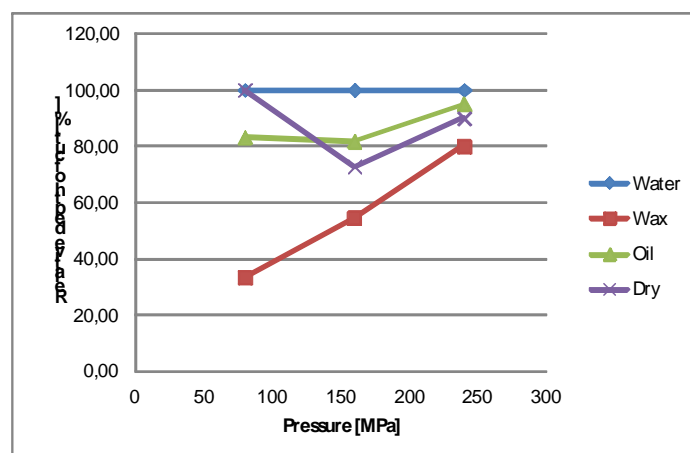


Figura 4.11. Decremento della profondità di taglio nei campioni fatto pari a 100 il valore massimo corrispondente alla saturazione dei pori con acqua.

Si è trovato che la profondità di taglio aumenta sempre con la pressione, pressoché linearmente per il campione saturato con acqua. I valori di profondità ottenuti nei diversi casi si discostano maggiormente alla pressione intermedia di 160 MPa. Gli stessi risultati sono espressi in termini relativi rispetto ai valori ottenuti per il campione saturato con acqua (figura 4.11).

Le curve di figura mostrano chiaramente che i valori più alti per la profondità di taglio si ottengono quando la roccia è impregnata con acqua, mentre la presenza di cera, che ottura i pori ostacolando la penetrazione del getto, rappresenta la condizione più sfavorevole.

I casi di campione secco o impregnato di olio si collocano in posizione intermedia, anche se l'efficacia del getto sembra leggermente inferiore per il primo, almeno nel campo delle pressioni più alte. Verosimilmente l'olio è capace di esercitare sulle pareti dei pori una sollecitazione maggiore rispetto all'aria, compressa dall'impatto del getto, ma a causa della sua viscosità ha bisogno di pressioni di spinta maggiori rispetto all'acqua per penetrare all'interno del materiale.

4.5.4 Ipotesi di modello concettuale

Il diverso comportamento dei campioni può essere spiegato prendendo in considerazione un meccanismo di disgregazione del materiale da parte del getto d'acqua derivato dal modello proposto da Erdman–Jesnitzer e altri, costruito sulla base di dati sperimentali ottenuti facendo impattare il getto su un punto fisso della superficie bersaglio e misurando in funzione del tempo la velocità di penetrazione dell'acqua all'interno del solido.

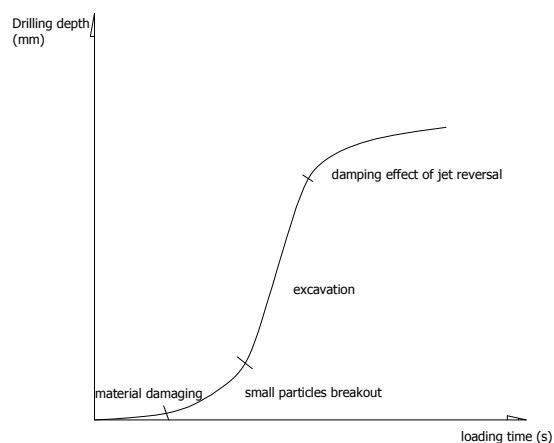


Figura 4.12. Modello di disgregazione proposto da Erdman – Jesnitzer et al.

La curva, rappresentata in figura 4.12, aveva il tipico andamento a S, generalmente ricorrente nelle sperimentazioni di scavo o perforazione ad opera di utensili meccanici.

L'evoluzione della curva consente di individuare diverse fasi del fenomeno:

- In un primo stadio del processo di disgregazione, l'azione del getto d'acqua si esplica nella "plasticizzazione" di un piccolo volume di materiale sotto forma di polvere finissima nell'intorno della zona colpita; immediatamente dopo comincia a svilupparsi il fenomeno di apertura e propagazione dei difetti strutturali già presenti nel materiale che quasi sempre rappresentano punti di debolezza (microfratture, piani di clivaggio, superfici di separazione tra i cristalli, pori), con espulsione di alcuni frammenti liberi;
- Il secondo stadio è il risultato dell'intersezione delle discontinuità e conseguente ulteriore liberazione di frammenti che vengono espulsi determinando un'accelerazione della velocità di penetrazione;
- Nel terzo stadio del processo il getto d'acqua agisce sulle pareti del cratere creato nella fase precedente, applicando sulla superficie concava una pressione amplificata di impatto diretto, con conseguente formazione di importanti fratture e espulsione di grossi frammenti; ne risulta un incremento considerevole della velocità di penetrazione che raggiunge il valore massimo del suo gradiente di crescita;
- Il processo si conclude con un ultimo stadio caratterizzato da un progressivo declino della velocità di penetrazione a causa della perdita di potenza del getto e dell'interazione negativa con il flusso uscente.

Secondo il modello sopra delineato i difetti strutturali, sempre presenti nei materiali geologici con composizione eterogenea, giocano un ruolo fondamentale.

Considerando la roccia come un sistema, allo stato di stress indotto dall'impatto del getto (carico), il materiale oppone una resistenza alla propagazione delle discontinuità (capacità), esprimibile attraverso la tenacità di frattura (fracture toughness K_{Ic} [$\text{MPa} \times \text{m}^{1/2}$]).

La buona correlazione trovata tra la "pressione di soglia" e la tenacità di frattura sembra corroborare la correttezza di fondo del modello proposto. D'altro canto si può argomentare che esso non tiene conto dell'effetto della pressione idraulica indotta dal getto d'acqua penetrato all'interno delle fratture. Il realtà questa pressione interna, determinata dalla forza

di impatto, origina una sollecitazione impulsiva di trazione all'estremità della frattura che contribuisce in misura importante alla sua propagazione (effetto cuneo).

Il fenomeno infine cessa a causa della perdita di energia assorbita per vincere la resistenza incontrata dal flusso fluido entro spazi estremamente stretti e in conseguenza del rilascio della pressione di impatto dopo il breve tempo di azione del getto in movimento trasversale.

Lo sviluppo del modello di Erdman-Jesnitzer è illustrato sinteticamente per immagini in figura 4.13 ove il "carico" del sistema è rappresentato dalla pressione interna dell'acqua sulle superfici combacianti di una discontinuità e la "capacità" dalla resistenza di frattura.

La pressione generata all'interno delle fratture sature d'acqua, interconnesse idraulicamente con il getto d'acqua impattante sulla superficie del materiale solido, dipende dalla velocità del getto e dalle caratteristiche porosimetriche (distribuzione dimensionale dei pori e loro forma).

Come già accennato in sede di presentazione della tecnologia water jet, la velocità v [m/s] e la portata del getto q [m³/s] dipendono dalla pressione e dalla dimensione dell'ugello secondo le formule:

$$v=(2gP/\rho)^{1/2}$$

$$q= v Ar$$

dove P [Pa] è la pressione di generazione del getto, ρ [kg/m³] è la massa volumica dell'acqua e Ar [m²] è l'area della sezione contratta del getto ("vena contracta") immediatamente dopo l'uscita dall'ugello.

Utilizzando ugelli di diametro normale d e lavorando con distanza di impatto ridotta ($<50 d$), l'estensione della zona di impatto è praticamente equivalente all'area della sezione della "vena contracta".

Su tale zona la sollecitazione di compressione trasmessa al materiale non è uniforme ma varia con andamento "a campana", presentando un valore massimo pari alla pressione di generazione del getto nel punto centrale e andamento decrescente verso la periferia. Il valore medio della distribuzione è grosso modo pari alla metà della "pressione di stagnazione" dell'acqua immediatamente a monte dell'ugello (figura 4.13).

La principale differenza rispetto al modello originario proposto dalla scuola tedesca è rappresentato dal ruolo assegnato alle fratture che sono viste come via di trasmissione della pressione idraulica e non semplicemente come punti di debolezza meccanica del materiale. Questo nuovo concetto permette di spiegare i dati sperimentali ottenuti, mettendo in evidenza l'importanza del grado di saturazione dei pori con diversi fluidi di impregnazione nel processo di disgregazione water jet.

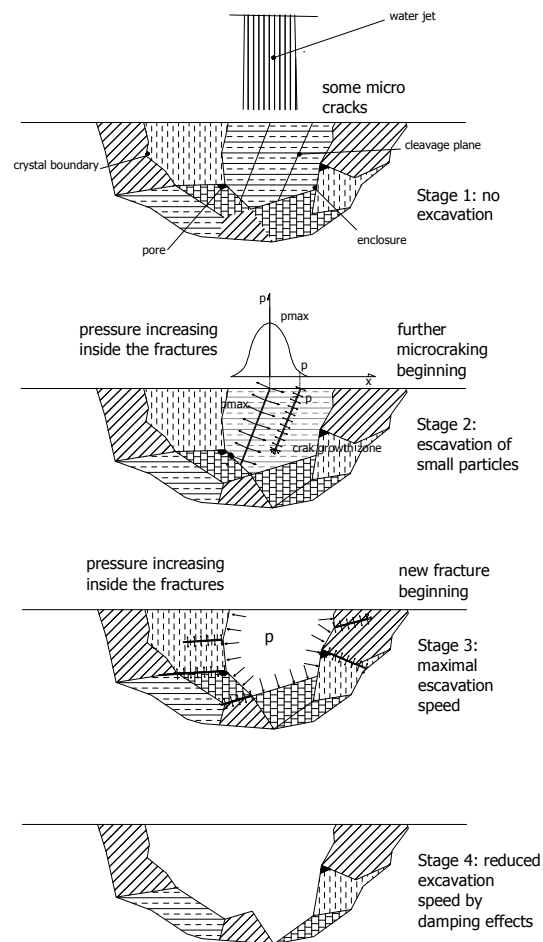


Figura 4.13. Rappresentazione schematica del nuovo meccanismo proposto per la disgregazione di materiali eterogenei con getto d'acqua.

4.5.5. Proposta di meccanismo di disgregazione

Secondo il nuovo modello proposto, quando il getto colpisce la superficie di un materiale saturo la pressione di impatto è trasferita istantaneamente al fluido impregnante, idealmente

senza flusso, generando sollecitazioni di trazione all'estremità delle fratture presenti nella zona di influenza. Il processo di disgregazione per espulsione dei frammenti liberi di roccia assume pieno sviluppo quando viene superato il limite di resistenza e le fratture si propagano incrociandosi con le altre discontinuità.

Se il getto colpisce una roccia allo stato secco, una parte della sua energia cinetica viene persa per il lavoro di penetrazione dell'acqua nel solido, ostacolata dalla piccolissima dimensione dei vuoti e per la compressione dell'aria in essi contenuta.

Inoltre il tempo limitato di azione del getto non consente una penetrazione profonda, data la bassa velocità del flusso nei pori determinata dalle condizioni di estrema impervietà. Conseguentemente si registra una forte diminuzione della velocità di taglio e un incremento dell'energia specifica rispetto al caso di roccia satura.

Nel caso di impregnazione con olio la pressione del getto si trasmette sulle pareti dei vuoti attraverso un fluido caratterizzato da una viscosità centinaia di volte maggiore di quella dell'acqua e che pertanto trasmette con minore efficacia le tensioni che controllano il processo di propagazione delle fratture. E' inoltre da considerare che con l'olio non si raggiungono probabilmente condizioni di completa saturazione.

Nel caso delle prove con il campione immerso in cera fusa è verosimile ipotizzare che l'impregnazione dei pori sia trascurabile e che lo stato depositato sulla superficie funzioni da ostacolo alla trasmissione, all'interno della struttura del materiale, delle sollecitazioni di trazione responsabili dell'effetto cuneo.

Il fatto che alle alte pressioni di generazione del getto le curve della profondità di taglio tendano a convergere suggerisce che quando la potenza di impatto cresce l'effetto cuneo perde importanza e diventa predominante la sollecitazione di urto diretto in accordo con il meccanismo originale di Erdman-Jesnitzer.

Le indicazioni del nuovo modello si sono rivelate molto interessanti anche per cercare di migliorare le prestazioni del mulino HERA per la macinazione del carbone.

4.3 Macinazione assistita da getti d'acqua: il mulino rotativo Hera

4.3.1 Esperienze iniziali

Il precursore di HERA è stato il “rotating jet mill” descritto nel capitolo dedicato allo stato dell’arte in tema di tecniche innovative di comminuzione.

I risultati ottenuti dalle sperimentazioni con quell’apparecchio hanno indicato che:

- Per una data regolazione dei parametri e delle variabili operative la dimensione di comminuzione tendeva ad aumentare al crescere della granulometria in ingresso, come del resto facilmente prevedibile;
- per valori costanti della pressione P, la finezza del prodotto, rappresentata dal d_{80} , (apertura del vaglio virtuale attraverso il quale passerebbe l’80% del materiale) è risultata grosso modo inversamente proporzionale al diametro dell’ugello, ossia alla radice quadrata della portata d’acqua Q (e quindi anche alla potenza dei getti $W = P \times Q$);
- all’aumentare della pressione si otteneva un prodotto più fine anche se l’effetto era progressivamente minore fino a diventare trascurabile all’aumentare della sezione anulare di passaggio del materiale tra le due camere;
- a parità di pressione, incrementando la sezione di passaggio aumentava la granulometria del prodotto;
- la portata di alimentazione aveva scarsa influenza sulla finezza di macinazione;
- la velocità di rotazione della lancia si è rivelata molto importante, soprattutto nella condizione di regolazione “stretta” dell’apertura di scarico: una rotazione più veloce riduce infatti il tempo di impatto dei getti sulle singole particelle solide, con conseguente tendenza all’aumento della granulometria del prodotto;
- la capacità di trattamento aumentava con la pressione di generazione dei getti e con l’apertura di passaggio; essa era anche influenzata dalla dimensione massima dei grani in alimentazione poiché è necessario un tempo di permanenza più lungo nella camera superiore dell’apparecchio per ottenere il grado di finezza desiderato;
- tuttavia l’energia specifica consumata per ottenere una determinata finezza del prodotto aumenta considerevolmente con la pressione mentre diminuisce leggermente utilizzando ugelli di diametro maggiore;

Al termine della campagna sperimentale si è tratta la conclusione che si potevano ottenere benefici considerevolmente migliori lavorando con alta capacità di trattamento senza

aumentare la potenza idraulica attraverso un diverso concetto basato sulla combinazione sinergica con l'energia meccanica (Bortolussi et al., 1993).

Questo concetto è stato applicato con la realizzazione di HERA.

4.3.2. Applicazione dell'energia meccanica

Per l'applicazione dei getti d'acqua in combinazione con l'energia meccanica, la forma simmetrica della camera di macinazione intorno a un asse verticale, quale quella dei frantoi rotativi, rappresenta la soluzione più semplice dal punto di vista geometrico e funzionale.

I frantoi rotativi sono macchine in cui il materiale da frantumare viene rotto per schiacciamento tra una parete fissa di forma conica o cilindro-conica inversa ad asse verticale e un corpo conico, dotato di un movimento eccentrico, posto all'interno dello spazio delimitato dalle pareti della camera. Il materiale scende gradualmente per gravità e subisce durante il tragitto cicli di compressione con frequenza determinata dalla velocità di rotazione della parte mobile della macchina.

Il funzionamento di questo tipo di frantoio rispecchia quello del frantoio a mascelle con la differenza che in questo caso si realizza una serie ininterrotta di azioni alternate di compressione e di rilascio. Ciò si traduce nel fatto che il frantoio rotativo lavora in continuazione in metà del suo volume mentre il frantoio a mascelle lavora la metà del tempo nella totalità del suo volume. Nella figura 4.14 seguente è descritto lo schema di una parte del frantoio rotativo.

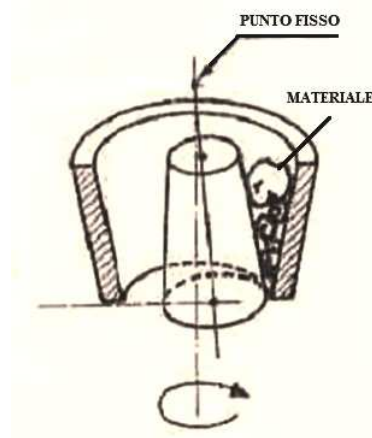


Figura 4.14. Schema di un particolare di un frantoio rotativo

Una caratteristica importante di questi frantoi è che essi possono funzionare con la camera di frantumazione completamente riempita; inoltre l'alimentazione non richiede alcuna speciale precauzione salvo il caso di materiali umidi e collanti.

Dal punto di vista dell'utilizzazione la differenza essenziale fra frantoi a mascelle e rotativi risiede nella capacità di trattamento. Si può dire che per una data dimensione massima di immissione i frantoi rotativi funzionano con portate maggiori rispetto ai frantoi a mascelle. In particolare, a parità di dimensione di alimentazione e di rapporto di riduzione, i frantoi rotativi hanno una capacità 4-5 volte maggiore di quella di un frantoio a mascelle a doppio effetto tipo Blake.

Non è stata tuttavia stabilita, per i frantoi rotativi, una formula specifica per il calcolo della capacità analoga a quella dei frantoi a mascelle, che peraltro può essere utilizzata per indicazioni di prima approssimazione.

Inoltre i frantoi a mascelle sono meno influenzati da alimentazioni umide e collanti che tendono ad accumularsi nei frantoi rotativi. D'altro canto questi ultimi si alimentano più facilmente di quelli a mascelle, poiché il loro movimento continuo evita i bloccaggi ed il formarsi di cavità nella massa di materiale all'interno della camera.

4.3.3 Caratteristiche costruttive di HERA

Il mulino rotativo *Hera* è una macchina di macinazione provvista di getti rotanti ad alta velocità (HERA acronimo di: High Energy Reduction Apparatus), concepito e realizzato per la macinazione dei minerali con sinergia water jet, nell'assunto che la combinazione tra forze meccaniche e idrauliche potesse garantire alte capacità di trattamento e un buon grado di finezza. I componenti principali di HERA sono descritti in figura 4.15:

- il cono di carico (1)
- la parte fissa chiamata campana (2)
- la parte mobile chiamata mantello (3)
- la lancia rotante con due ugelli (4).

Il modello di HERA installato nel laboratorio waterjet del DICAAR è visibile in figura 4.16

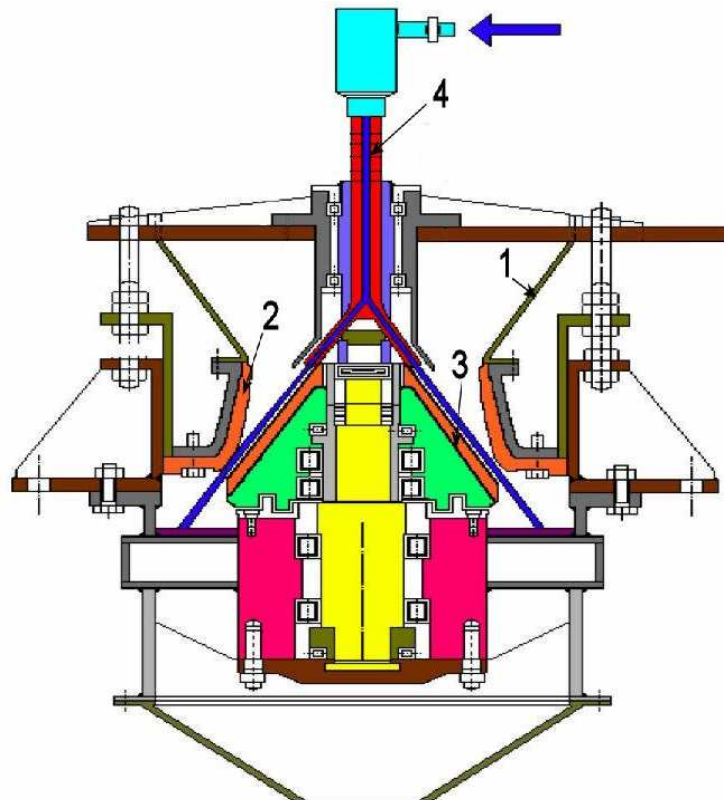


Figura 4.15. Schema del mulino rotativo con getti rotanti ad alta velocità (HERA)



Figura 4.16. Sperimentazioni con il mulino HERA

4.3.4. Parametri di regolazione

Questa macchina dispone di un sistema di regolazione che prevede sei variazioni di eccentricità da poter scegliere con la rispettiva corsa desiderata (tabella 4.2).

Tabella 4.2. Variazione dell'eccentricità con relativa corsa

ECCENTRICITA' [mm]	CORSA [mm]
0,62	1,24 (150°)
1,20	2,40 (120°)
1,70	3,40 (90°)
2,08	4,16 (60°)
2,32	4,64 (30°)
2,40	4,80 (0°)

La regolazione minima e massima della pezzatura del prodotto in uscita dal mulino è rappresentata dalla distanza tra la parte fissa (campana) e la parte mobile (mantello), misurata in corrispondenza dello scarico. La campana può essere posizionata rispetto al mantello con spostamento verticale, in modo da variare lo spazio tra le due parti, da cui dipende la pezzatura desiderata del prodotto.

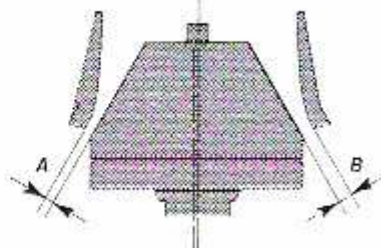
I due ugelli sono applicati all'estremità della lancia tramite una terminazione a Y rovesciato e ruotano alla stessa velocità di rotazione del mantello, al quale sono solidalmente collegati e sono posizionati su un piano verticale perpendicolare a quello passante per il diametro congiungente i punti di minima e massima.

La regolazione della camera è prevista da minimo di 0.8 mm a massimo di 5 mm . Per questa prova è stata utilizzata una regolazione minima pari a 1 mm e massima di $2,5 \text{ mm}$. Come riportato nella seguente tabella 4.3, estratta dal manuale di istruzione Hera N. I-1359, si evidenziano le varie regolazioni riguardo all'eccentricità scelta.

Tabella 4.3. Regolazioni in relazione all'eccentricità (dal manuale operativo HERA)

POSIZIONE ECCENTRICO	1 (150°)		2 (120°)		3 (90°)		4 (60°)		5 (30°)		6 (0°)	
ECCENTRICITÀ	0,62		1,20		1,7		2,09		2,32		2,40	
CORSA	1,24		2,4		3,4		4,16		4,64		4,80	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
REGOLAZIONE MIN.	1,00	2,07	1,26	3,32	0,82	3,76	1,24	4,84	1,03	5,04	0,96	5,12
S = spess. regolazione	39 mm		40,5		40,5 mm		42 mm		42 mm		42 mm	
REGOLAZIONE MAX.	4,75	5,82	5,00	7,08	5,32	7,51	4,99	7,84	4,78	8,04	5,46	9,52
S = spess. regolazione	46,5 mm		48 mm		49,5 mm		49,5 mm		49,5 mm		51 mm	

A lato chiuso B lato aperto



5. PROGRAMMA SPERIMENTALE HERA

5.1 Procedura adottata

Il piano sperimentale è stato concepito con lo scopo di valutare gli effetti dei getti d'acqua ad alta pressione sulla macinazione del carbone in combinazione con forze di tipo meccanico, utilizzando il mulino HERA installato presso il laboratorio Waterjet del DICAAR. Il carbone utilizzato per le prove proviene dalla miniera di Nuraxi Figus della CarboSulcis S.p.A.

La prima fase del programma ha riguardato la preparazione dei campioni frantumati alla dimensione richiesta da HERA, utilizzando un frantoio a mascelle e un vaglio di controllo con apertura 20 mm. Il materiale così ottenuto è stato quindi omogeneizzato e suddiviso fino ad ottenere 8 campioni, ciascuno con peso di circa 3 kg. Uno dei campioni è stato utilizzato per l'analisi granulometrica mediante setacciatura.

Sono state effettuate due serie di prove: la prima a secco variando la portata di alimentazione alla macchina, la seconda applicando la sinergia waterjet mantenendo le stesse condizioni operative al fine di enucleare, attraverso la comparazione dei risultati, il contributo dell'energia idraulica.

Al termine di ciascuna prova il prodotto ottenuto è stato vagliato, pesato e sottoposto ad analisi granulometrica, previa essiccazione nel caso delle prove con sinergia waterjet.

I parametri studiati nel caso delle prove "a umido" sono stati la portata di alimentazione, la pressione di generazione dei getti d'acqua, il diametro degli ugelli e quindi la portata idraulica dei getti. Per ciascuna prova è stata determinata la capacità di trattamento allo scarico.

La torbida prodotta veniva raccolta in un contenitore, lasciata sedimentare per qualche ora; l'acqua chiarificata veniva quindi eliminata per sifonatura. Successivamente il campione veniva messo in stufa a 50 °C per il tempo necessario all'essiccazione. Sul prodotto essiccato è stata effettuata l'analisi granulometrica mediante vagliatura a secco con setacciatura "Ro-Tap".

Il piano di prove della prima fase sperimentale, comprendente la macinazione a secco di confronto, è schematizzato nella tabella 5.1.

Tabella 5.1. Quadro delle prove della prima fase del piano sperimentale

SIGLA	Diam. Ugello [mm]	Pressione [MPa]	Granulometria alimentazione
PROVA 1 S	-	-	< 20 mm
PROVA 1 WJ	0,8	50	< 20 mm
PROVA 2 WJ	0,8	100	< 20 mm
PROVA 3 WJ	0,8	150	< 20 mm
PROVA 4 WJ	0,5	100	< 20 mm
PROVA 5 WJ	0,5	150	< 20 mm
PROVA 6 WJ	0,5	180	< 20 mm

La seconda fase del programma era rivolta a confermare sperimentalmente la possibilità di migliorare le prestazioni del sistema ricorrendo a un trattamento preliminare di impregnazione con acqua del carbone sulla base delle indicazioni fornite da uno studio teorico e sperimentale concernente il meccanismo di azione del getto d'acqua nel processo di disgregazione di materiali geologici eterogenei.

Le relative prove sono state effettuate, oltre che sul materiale frantumato sotto 20 mm, anche su campioni di granulometria più fine (< 10 mm) allo scopo di confermare le previsioni teoriche sull'effetto positivo della saturazione della porosità del carbone sui risultati della macinazione waterjet.

Il piano della seconda fase di prove è schematizzato nella tabella 5.2.

Tabella 5.2. Quadro delle prove della seconda fase del piano sperimentale

SIGLA	Diam. Ugello [mm]	Pressione [MPa]	Granulometria alimentazione
PROVA 2 S	-	-	< 10 mm
PROVA 7 WJ	0,5	100	< 10 mm
PROVA 8 WJ	0,5	100	< 20 mm

Con riferimento ai parametri geometrici del mulino (cfr. tabella 4.3) è stata scelta la condizione di regolazione N. 1 (eccentricità 1mm; corsa 1,24 mm) alla quale corrisponde un intervallo di oscillazione dell'apertura di scarico tra 1,00 e 2,07 mm.

La scelta è stata dettata dall'obiettivo di limitare a circa 2 mm la dimensione massima degli elementi del prodotto macinato.

5.2 Il materiale utilizzato

Il lotto di carbone grezzo, avente pezzatura variabile compresa tra 5 e 10cm, con alcuni elementi di dimensione maggiore di 15cm, è stato cernito a mano per eliminare i componenti sterili di “ganga” e ottenere un materiale con caratteristiche simili, per composizione, a quelle presumibilmente ottenibili attraverso gli usuali processi di arricchimento basati su metodi gravimetrici.

5.2.1 Caratteristiche del carbone Sulcis

Il carbone Sulcis, sulla base dei dati di letteratura, è definito “carbone sub-bituminoso a lunga fiamma”, secondo la classificazione americana ATSM D 338, che in funzione del grado di impurità classifica il carbone in antracite, bituminoso, sub-bituminoso e lignite. I dati caratteristici del carbone Sulcis sono rappresentati nella sottostante tabella 5.3.

Tabella 5.3 . Caratteristiche tipiche del carbone Sulcis (Analisi immediate, analisi elementari, e Potere Calorifico Inferiore)

Umidità	10,5 %
Materie volatili	39 %
Ceneri	16 %
Carbonio fisso	52,5 %
Zolfo	6,06 %
Potere Calorifico Inferiore - Hi [kcal/kg]	5000 - 6000

Macroscopicamente il carbone Sulcis appena abbattuto si presenta di colore nero brillante con intercalazioni di strati e lenti a lucentezza variabile (Figura 5.1) che vira verso il grigio opaco a seguito di ossidazione; sono spesso presenti “pattern” di intensa fratturazione secondo piani di clivaggio ortogonali tra loro e lungo i quali possono osservarsi sottili scaglie di natura carbonatica.



Figura 5.1. Campione di carbone Sulcis cernito a mano proveniente dalla miniera di Nuraxi Figus.

5.2.2 Porosità del carbone

In materiali particolarmente porosi come il carbone, lo spazio all'interno del corpo solido può essere occupato dall'acqua o da gas oppure da una combinazione di entrambi.

Nei carboni esistono due sistemi di pori, uno con diametro medio intorno a 500 Å l'altro con 5-15 Å. Quest'ultimo ha una caratteristica peculiare; infatti, pur possedendo un piccolo volume, dà luogo ad una grande superficie interna, circa 200 m²/g, mentre nell'altro sistema la superficie specifica non supera 1 m²/g.

Kirsch ha proposto un modello (figura 5.2), basato su studi effettuati con i raggi X, che distingue tre tipi di strutture nei carboni di vario rango:

- **struttura aperta**, caratteristica di un carbone di basso rango con una percentuale di carbonio intorno all'85% ; il carbone in questo caso è molto poroso , le lamelle che lo compongono sono connesse in modo incrociato e orientate in tutte le direzioni;
- **struttura liquida**, tipica dei carboni bituminosi con percentuale di carbonio compresa tra 85-91%, in questo caso la porosità è notevolmente diminuita o addirittura è nulla per il fatto che adesso fra le lamelle stanno scomparendo i legami di tipo incrociato e si stanno orientando;
- **struttura antracite**, comune ai carboni di alto rango con un contenuto di carbonio superiore al 91%, in questo caso le lamelle sono tutte orientate nella stessa direzione di conseguenza fra le lamelle si formano delle strutture a canalicoli che fanno aumentare la porosità.

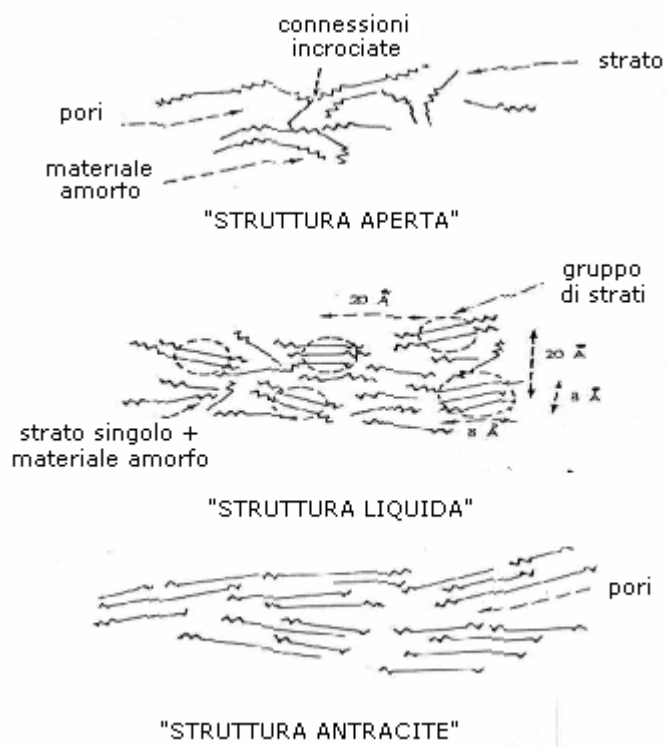


Figura 5.2. Modello della struttura del carbone (Kirsch)

Il modello proposto da Kirsch permette di affermare che, nella fase iniziale del processo di formazione del carbone, esistono molti gruppi polari e un esteso sistema di porosità di grosse dimensioni che gli consentono di assorbire grandi quantità di umidità; col procedere del processo di carbonizzazione sia i gruppi polari che i porosità scompaiono gradualmente e durante l'ultima fase si forma un nuovo sistema di porosità capaci di assorbire il gas prodotto durante la diagenesi. E' infatti nota la capacità dei carboni bituminosi di assorbire metano.

La porosità è una caratteristica molto importante perché influenza tutte le lavorazioni a cui è sottoposto il carbone, in particolare tutti quei processi di epurazione che sfruttano proprietà superficiali come la flottazione e l'agglomerazione; in questi processi la presenza della porosità è un ostacolo per la diffusione del collettore sulla superficie delle particelle e ne determina un eccessivo consumo a causa dell'adsorbimento di questo. La porosità totale di un carbone deidratato può essere misurata come differenza fra la densità del campione e quella dello stesso campione dopo che è stato immerso sotto pressione nel mercurio o nell'elio.

Mentre per il mercurio esiste un limite nel riempimento dei porosità (infatti si è stimato che alla pressione di 150 kPa vengono riempiti dal mercurio solo i porosità di diametro maggiore di $10 \mu\text{m}$), per l'elio si ipotizza che tutta la porosità sia accessibile. Nella pratica solitamente si usano porosimetri a mercurio per lo studio di solidi porosi con diametro dei porosità compreso fra 4 nm e

350000 nm.

Nella fase sperimentale dei lavori di ricerca svolti nei laboratori dell'ex-DIGITA (recentemente incorporato nel DICAAR), la porosità è stata misurata mediante porosimetro Carlo Erba S 200; i “test” sono stati effettuati su campioni aventi granulometria compresa tra 1 e 5 mm. La tecnica impiegata fornisce informazioni sulla macro e meso porosità (dimensione dei pori rispettivamente maggiori di 50 nm e compresi tra 2 e 50 nm).

La porosità totale corrisponde al volume di mercurio penetrato nei pori del carbone per effetto di incrementi di pressione che vanno da 1 kPa a 200 MPa. La pressione è correlata al raggio dei pori dalla equazione di Washburn:

$$p \cdot r = 2 \gamma \cos \theta$$

dove r è il raggio dei pori; p = pressione assoluta; γ = tensione superficiale del mercurio; θ = angolo di contatto.

La porosità totale del Sulcis, misurata con porosimetro a mercurio, riferita all'unità di massa del campione, è risultata pari a 53,34 mm³/g, molto più alta di quella relativa alla maggior parte dei carboni commerciali.

5.3 Preparazione dei campioni per le prove

5.3.1 Frantumazione

La prima fase della preparazione di campioni per le prove di macinazione water jet-assistita ha riguardato la frantumazione mediante frantoio a mascelle a semplice effetto del carbone, privo dei materiali di ganga provenienti dagli intercalari sterili e contenente quindi le sole “ceneri inerenti”.

La granulometria del prodotto frantumato, avente dimensione massima intorno a 20 mm, compatibile con le caratteristiche geometriche del mulini HERA, è stata ottenuta mediante utilizzo di frantoio a mascelle da laboratorio (Figura 5.3) successivamente vagliato manualmente con setaccio a maglia quadrata (Figura 5.4).



Figura 5.3 . Frantoio a mascelle



Figura 5.4. Setaccio con apertura 20 mm

Il carbone così frantumato è stato sottoposto a omogeneizzazione e quartatura, mediante l'utilizzo di un campionatore a setti paralleli ottenendo campioni omogenei per le prove di macinazione con il mulino HERA, ciascuno di massa pari a circa 3 kg, ritenuta sufficiente per una buona rappresentatività dei risultati.

5.4. Analisi granulometrica dei campioni dell'alimentazione



Figura 5.5 . Setacciatrice Ro-Tap



Figura 5.6. Serie di setacci

Per la vagliatura nel campo delle classi fini è stata utilizzata la setacciatrice Ro-Tap (figura 5.5), che imprime alla pila di vagli di apertura decrescente un movimento combinato di rotazione e scuotimento mirato a favorire la discesa del materiale e ad assicurare una precisione elevata dell'operazione (figura 5.6). La sequenza dei setacci utilizzata nella prova è stata quella con lati liberi della maglia quadrata di 1.7 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.3 mm.

In fase di valutazione dei risultati delle successive prove di comminuzione, i dati relativi all'analisi granulometrica dei campioni macinati alle diverse condizioni operative sono stati confrontati con i dati relativi alla vagliatura dei campioni di alimentazione, per determinare i riferimenti numerici tipici delle operazioni di comminuzione quali il parametro di tendenza centrale, rappresentato dal valore del d_{50} , e il parametro di dispersione, rappresentato dal rapporto $(d_{75}-d_{25})/d_{50}$.

La distribuzione granulometrica dal carbone frantumato è riportata in Figura 5.7. I valori del d_{50} e del d_{80} sono risultati pari a 5,7 e 14,1mm, rispettivamente.

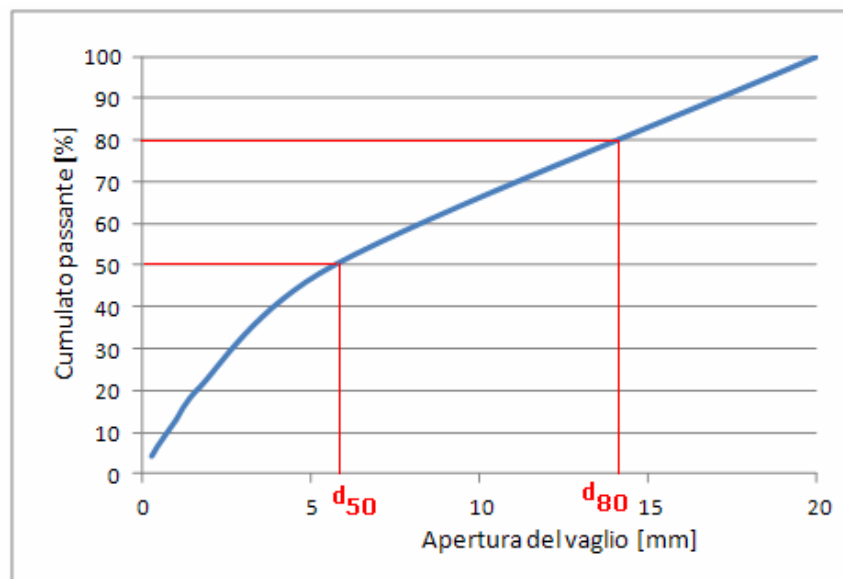


Figura 5.7. Curva granulometrica del carbone frantumato sotto 20 mm

Inoltre, per le prove con carbone preventivamente impregnato con acqua è stata eseguita una frantumazione con top size 10 mm, la cui curva granulometrica è riportata in figura 5.8.

I valori del d_{50} e del d_{80} sono risultati pari a 3,2 e 7,3mm, rispettivamente.

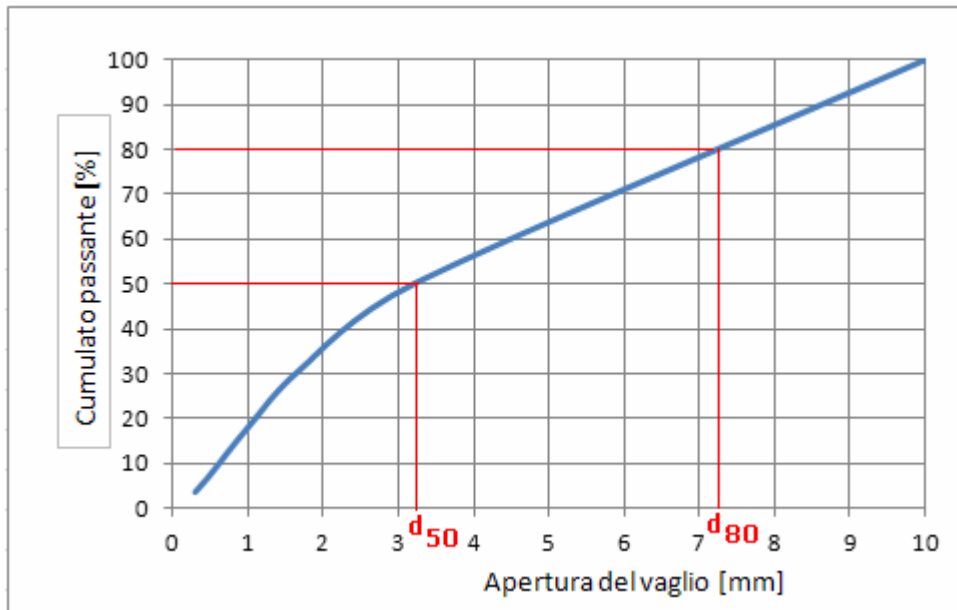


Figura 5.8. Curva granulometrica del carbone frantumato sotto 10 mm

5.5 Modalità di esecuzione delle prove con HERA

5.5.1. Prove di macinazione “ a secco”

Al fine di mettere in evidenza il contributo dei getti d’acqua sui risultati dell’operazione di macinazione, è stata effettuata la serie di prove di macinazione a secco sul materiale frantumato sotto 20 mm, utilizzando solo l’energia meccanica nelle stesse condizioni operative previste per le prove di macinazione con sinergia water jet.

Il campione, caricato nella tramoggia di testa veniva riversato mediante nastro trasportatore nella camera di macinazione del mulino. In queste prove la variabile di cui si è tenuto conto è stata la portata di alimentazione, ossia la quantità di materiale scaricata nella camera di frantumazione rapportata al tempo di durata della prova.

Allo scopo di verificare l’insorgere di fenomeni di accumulo all’interno della camera di frantumazione è stato altresì misurato il tempo di deflusso del prodotto allo scarico.

Infine, con l’intento di stimare la possibile influenza sulla capacità di trattamento della granulometria dell’alimentazione sono state effettuate alcune prove “spot” su campioni

frantumati con granulometria più fine (<10 mm), senza riscontrare variazioni significative per quanto concerne sia la portata in uscita, mantenutasi intorno a 2,6 kg/min, sia la granulometria del prodotto.

D'altro canto appare evidente che per un materiale di determinate caratteristiche e per una data geometria della camera di frantumazione (ampiezza della bocca, angolo di presa tra le parti del mulino in moto relativo, eccentricità e apertura allo scarico, velocità di rotazione della campana rispetto al mantello fisso) esiste una dimensione massima della pezzatura in ingresso oltre la quale si verificano fenomeni di intasamento con conseguente caduta rapida della portata smaltibile.

Per la macchina impiegata per le prove, tale dimensione limite superiore può essere indicata in circa 40 mm.

5.5.2. Prove di macinazione water jet-assistita

Le prove “a umido” sono state effettuate con l'utilizzo dei getti ad alta velocità. In queste prove i parametri studiati sono stati la pressione dell'acqua e il diametro degli ugelli. La pressione ha assunto i valori di 50, 100, 150, 170, 180 [MPa], mentre sono stati utilizzati ugelli con diametro 0.8 mm e a 0.5 mm.

A parità di potenza del getto, anche nelle prove di macinazione con assistenza water jet si è riscontrata una scarsa influenza della portata in alimentazione sulla portata di solido allo scarico, assunta come rappresentativa della capacità di trattamento della macchina.

Al fine di valutare la capacità di trattamento effettiva, per ogni prova si sono misurati sia il tempo di alimentazione sia quello di scarico dal mulino, variabile tra 15 e 25 s a seconda delle condizioni operative. La limitata differenza riscontrata per le prove a umido tra i due tempi denota un passaggio rapido nel mulino rispetto al caso della macinazione a secco.

Le prove ad umido (figura 5.9) sono state eseguite secondo la procedura seguente:

1. Caricamento del campione nella tramoggia di alimentazione;
2. Regolazione della pressione utilizzata per la generazione dei getti d'acqua;
3. Regolazione della velocità del nastro trasportatore attraverso variatore meccanico;
4. Avvio del mulino rotativo e attivazione dei getti d'acqua;
5. Avvio del nastro trasportatore;
6. Valutazione tempo di caduta del materiale;

7. Misura del tempo della portata in uscita;
8. Spegnimento della pompa water jet, arresto del mulino e del nastro trasportatore;
9. Recupero del prodotto allo scarico del mulino e sedimentazione del materiale in sospensione per alcune ore in condizioni di riposo;
10. Sifonatura dell'acqua in eccesso;
11. Essiccazione dei campioni in stufa a 50°C per circa una settimana;
12. Analisi granulometriche mediante vagliatura a secco;

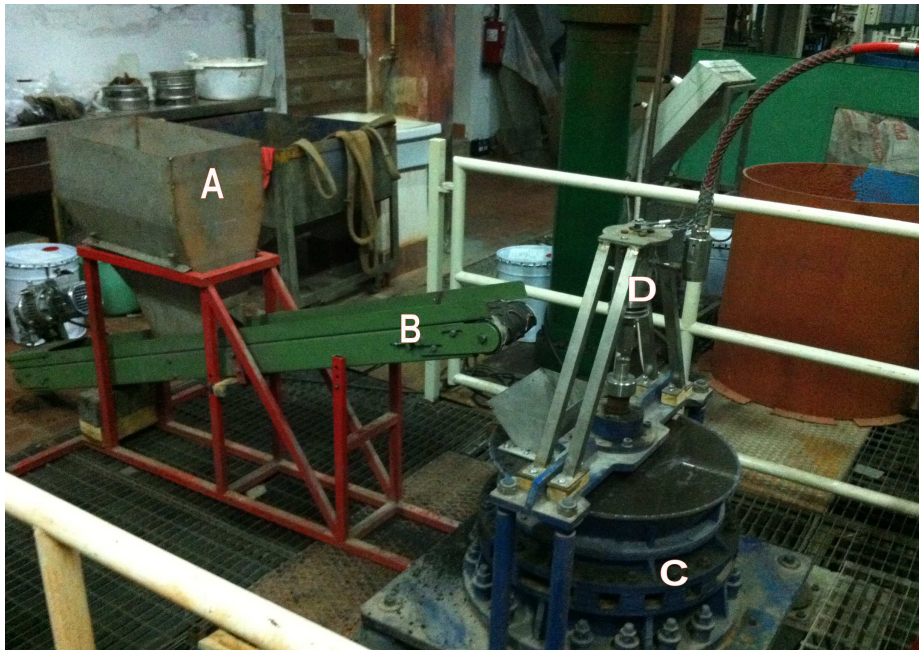


Figura 5.9. Impianto per il trattamento. A) Tramoggia di alimentazione; B) Nastro trasportatore; C) Mulino rotativo; D) Sistema d'immissione dell'acqua

Per valutare gli effetti della macinazione sui campioni ottenuti è stata effettuata l'analisi granulometrica mediante vagliatura a secco.

5.5.3 Condizioni operative

Il quadro complessivo delle prove della prima fase del programma sperimentale è rappresentato nella tabella seguente 5.4.

Tabella 5.4. Quadro delle condizioni operative adottate nelle prove sul materiale tal quale

SIGLA	CONDIZIONI OPERATIVE				
	Diam. Ugello [mm]	Pressione [MPa] *	Portata H ₂ O [l/min]	Potenza idr. [kW]	Granul. alim.
PROVA 1 S	-	-			< 20 mm
PROVA 1 WJ	0,8	50	8,5 x 2	14	< 20 mm
PROVA 2 WJ	0,8	100	12,0 x 2	40	< 20 mm
PROVA 3 WJ	0,8	150	14,7 x 2	74	< 20 mm
PROVA 4 WJ	0,5	100	4,7 x 2	16	< 20 mm
PROVA 5 WJ	0,5	150	5,7 x 2	29	< 20 mm
PROVA 6 WJ	0,5	180	6,3 x 2	38	< 20 mm

La velocità del getto d'acqua in m/s per le diverse condizioni operative aveva i valori forniti dalla tabella 5.5 seguente:

Tabella 5.5. Velocità del getto d'acqua alle diverse condizioni operative

DIAMETRO UGELLO [mm]	PRESSIONE [MPa]			
	50	100	150	180
0,5		435	532	583
0,8	307	435	532	

Si osserva che le prove 1WJ e 4WJ presentano un valore confrontabile della potenza idraulica (intorno a 15 kW); altrettanto succede per le prove 2WJ e 6 WJ (intorno a 39 kW).

Il raffronto dei risultati a parità di potenza consentirà di individuare la migliore combinazione dei parametri del getto per quanto concerne sia la granulometria del prodotto, sia l'energia specifica spesa.

5.6. Risultati sperimentali ottenuti

Di seguito vengono riportati per ogni singola prova i parametri utilizzati, e, per ogni singolo campione ottenuto, i risultati dell'analisi granulometrica in forma grafica attraverso gli istogrammi dei pesi percentuali delle classi granulometriche prese in considerazione. Per ciascuna classe, alla colonna relativa al prodotto della macinazione è stata affiancata quella relativa al materiale in ingresso.

Per una migliore interpretazione dei risultati occorre sottolineare che la classe <1,7 mm comprende per il campione in alimentazione il campo esteso tra 1,7 e 20 mm (10 mm nel caso della frantumazione più fine) mentre per il prodotto della macinazione è limitata superiormente dalla dimensione massima, intorno a 2 mm, consentita dall'apertura dello scarico del mulino (variabile tra 1,00 e 2,07 mm corrispondente alla regolazione prescelta per le prove).

5.6.1. Macinazione a secco

Per tutte le prove, il tempo di scarico che è risultato essere più lungo del tempo di alimentazione al mulino (circa tre volte maggiore con leggere variazioni a seconda delle condizioni operative).

Il tempo medio di permanenza del materiale all'interno della camera può essere valutato correttamente solo nel caso di marcia continua a regime, dividendo la portata in ingresso (uguale in questo caso a quella del solido in uscita) per il volume della camera di comminazione occupata dal materiale. Una stima grossolana nel caso delle prove effettuate con campioni di quantità limitata può essere dedotta dalla differenza tra il tempo di alimentazione (intorno a 15s per campioni di cieca 3 kg) e il tempo di deflusso (intorno a 70s).

Attraverso le prove a secco si è accertato che la portata allo scarico era sostanzialmente indipendente dalla portata in ingresso, indicando chiaramente la sua dipendenza principalmente dall'apertura allo scarico a parità degli altri parametri di regolazione del mulino (eccentricità, velocità di rotazione).

Pertanto è sembrato inutile mantenere la portata in alimentazione quale variabile operativa principale lasciando più spazio all'indagine sull'influenza delle altre variabili.

La prova 1 S ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.10.

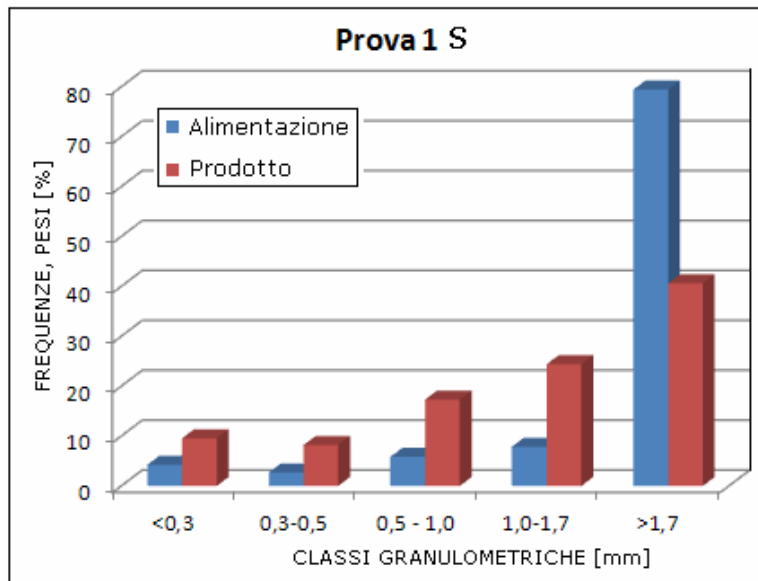


Figura 5.10. Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione a secco 1S

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 2,6 kg/min. Si nota una distribuzione granulometrica caratterizzata da una bassa proporzione di fini.

5.6.2 Macinazione con assistenza water jet

La prova 1 WJ ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.11.

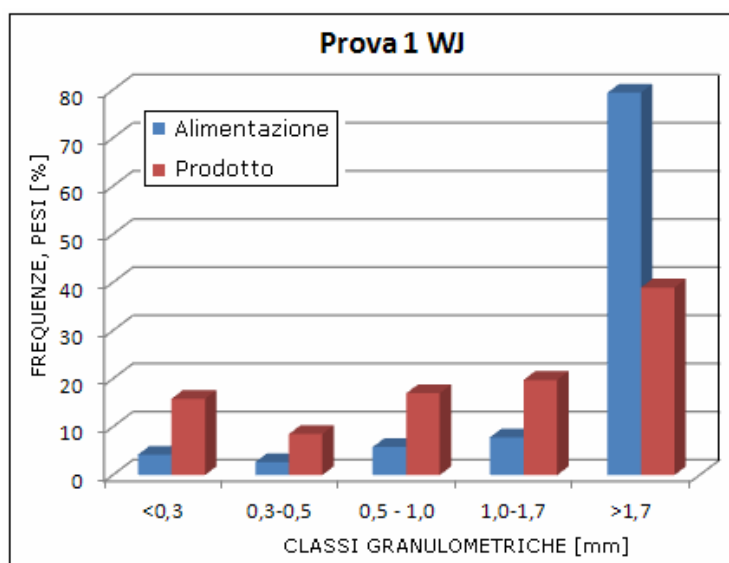


Figura 5.11. Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione con sinergia water jet 1W

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 5,4 kg/min, circa due volte maggiore di quella relativa al funzionamento a secco. La proporzione di fini risulta maggiore rispetto alla macinazione a secco a causa dell'azione di urto dei getti d'acqua.

La prova 2 WJ è ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.12.

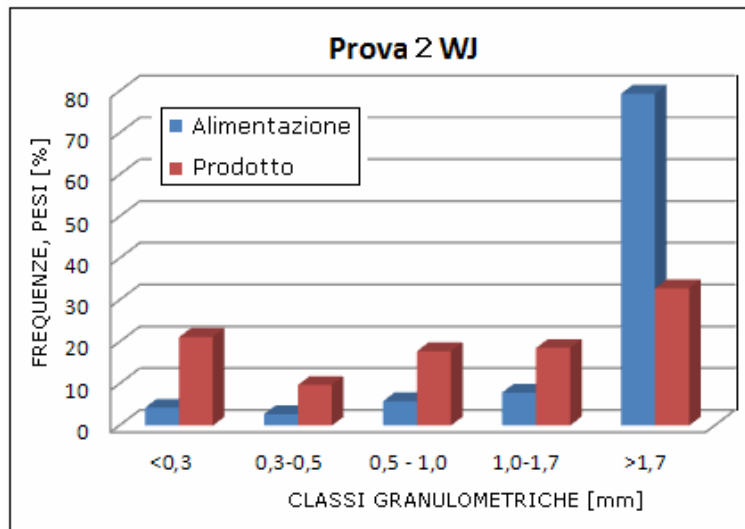


Figura 5.12. Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione con sinergia water jet 2W

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 7,3 kg/min (2,8 volte maggiore rispetto alla prova a secco). La proporzione di fini risulta ulteriormente aumentata in conseguenza della più alta potenza del getto.

La prova 3 WJ è ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.13.

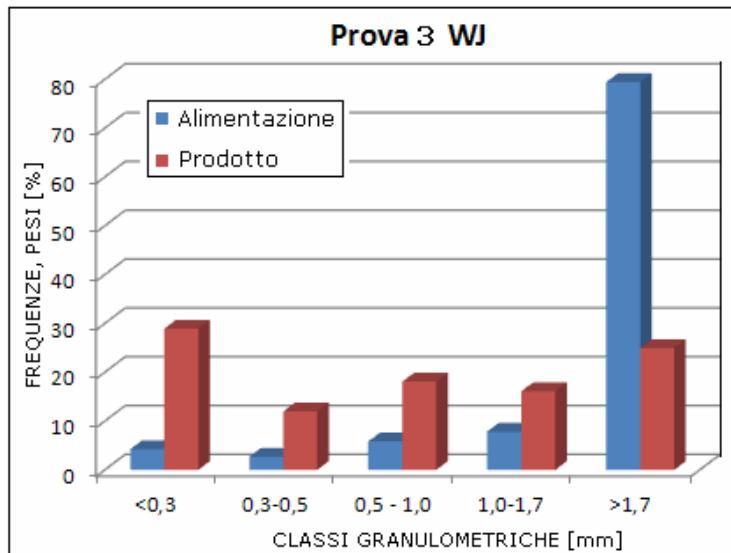


Figura 5.13. Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione con sinergia water jet 3W

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 7,7 kg/min (tre volte maggiore rispetto alla prova a secco). La proporzione di fini risulta massima e prevalente rispetto alle altre classi granulometriche del prodotto.

La prova 4 WJ è ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.14.

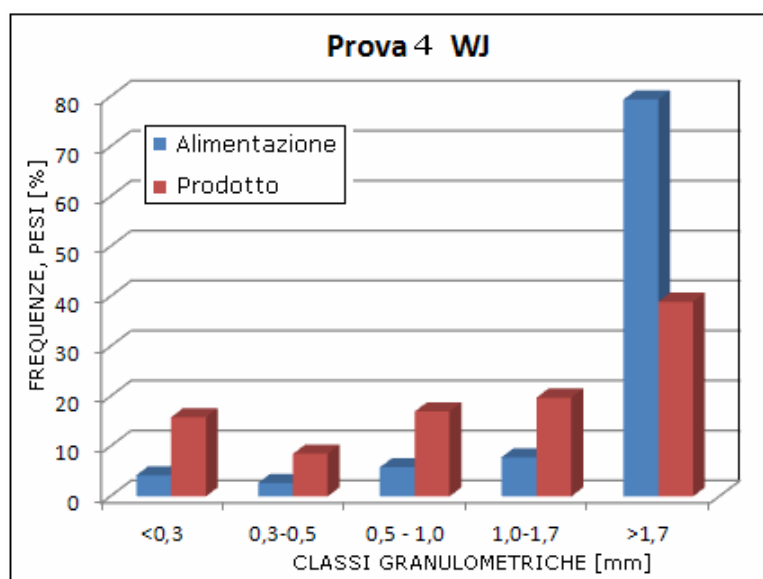


Figura 5.14. Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione con sinergia water jet 4W

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 3,6 kg/min (quasi il 40% più alta nei confronti della prova a secco). La granulometria risulta molto simile a quella ottenuta con la prova 1WJ essendo le potenze idrauliche praticamente le stesse, intorno ai 15 kW.

La capacità di trattamento è tuttavia notevolmente minore, indicando che per questo aspetto diventa prevalente l'effetto della portata d'acqua da cui dipende la forza di trascinamento verso il basso del materiale.

La prova 5 WJ ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.15.

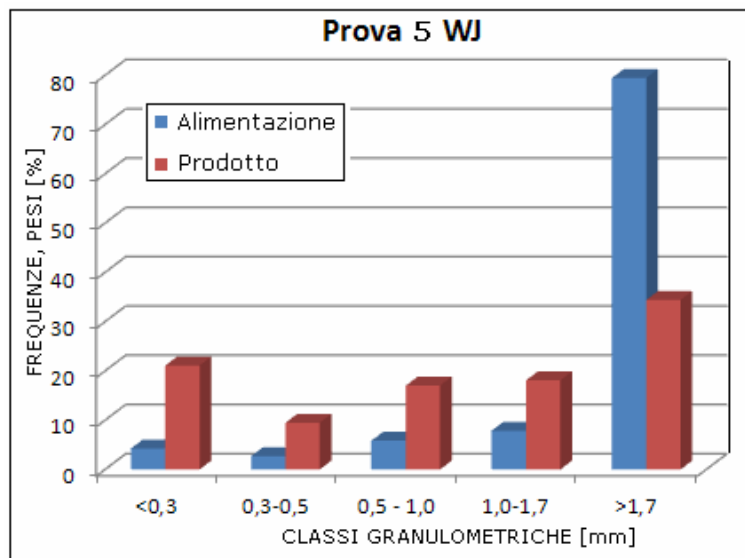


Figura 5.15. Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione con sinergia water jet 5W

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 4,4 kg/min.

La prova 6 WJ ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.16.

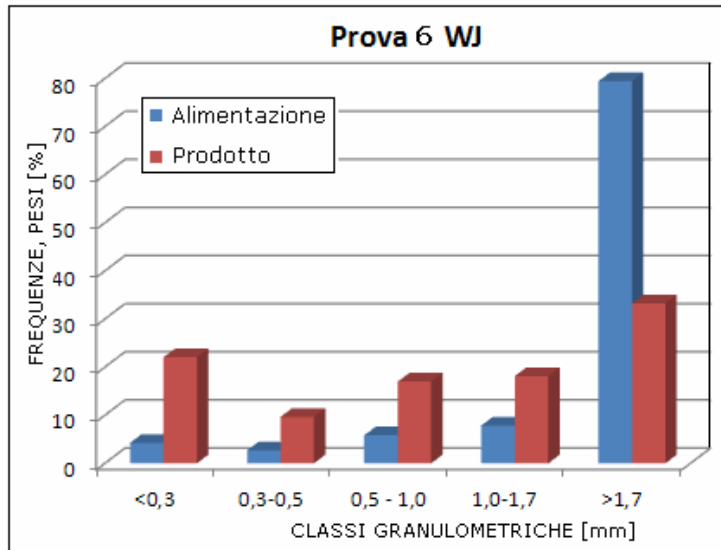


Figura 5.16 . Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione con sinergia water jet 6W

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 5,5 kg/min.

Non si nota alcun sensibile scostamento della granulometria del prodotto rispetto ai dati relativi al caso precedente spiegabile con il limitato incremento della pressione (da 150 a 180 MPa).

Non deve sorprendere neppure la coincidenza quasi perfetta degli ultimi due istogrammi con quello della prova 2 WJ, essendo effettuate su livelli di potenza idraulica prossimi nei tre casi, anche se con diverse combinazioni tra pressione e portata d'acqua.

5.6.3 Macinazione con assistenza water jet previa imbibizione

In questa seconda fase del programma sperimentale le prove sono state effettuate alimentando il mulino con campioni imbevuti di acqua secondo le procedura precedentemente descritta.

Una prima prova, contrassegnata dalla sigla 7WJ, è stata eseguita su un campione con granulometria grossolana (top size 20 mm); la seconda, contrassegnata dalla sigla 8WJ, su un campione con granulometria fine (top size 10 mm), mantenendo costante la pressione a 100 MPa e utilizzando ugelli con diametro pari a 0,5 mm (tabella 5.6).

I passi successivi alla raccolta della torbida in uscita dal mulino sono gli stessi seguiti per le precedenti prove di macinazione su campioni in condizioni naturali di umidità.

Per confronto è stata eseguita una prova di macinazione a secco anche su un campione frantumato sotto 10 mm (prova 2S), mantenendo inalterati i parametri di regolazione della macchina.

Tabella 5.6. Quadro delle condizioni operative adottate nelle prove sul materiale impregnato

SIGLA	CONDIZIONI OPERATIVE				
	Diam. Ugello [mm]	Pressione [MPa]	Portata H ₂ O [l/min]	Potenza idr. [kW]	Granul. alim.
PROVA 2 S	-	-	-	-	< 10 mm
PROVA 7 WJ	0,5	100	4,7 x 2	16	< 20 mm
PROVA 8 WJ	0,5	100	4,7 x 2	16	< 10 mm

La prova 2S eseguita senza assistenza water jet ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.17.

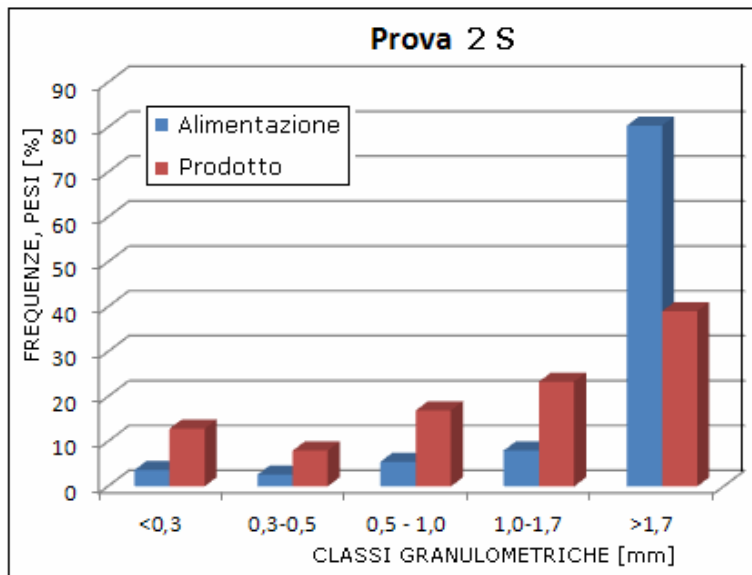


Figura 5.17. Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione a secco 2S

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 5,5 kg/min.

La prova 7WJ eseguita con assistenza water jet ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.18.

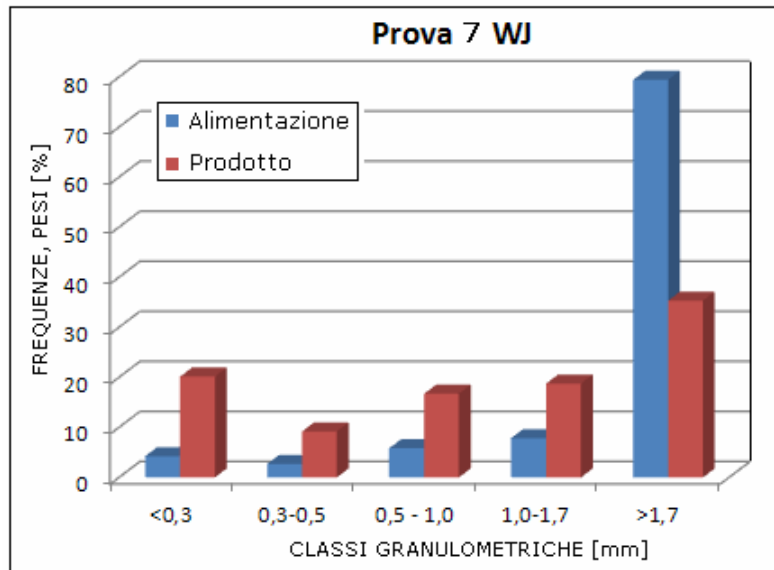


Figura 5.18. Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione con sinergia water jet 7W

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 5,8 kg/min. La granulometria del prodotto si avvicina a quella ottenuta con la prova 6WJ ma le potenze idrauliche sono ora considerevolmente diverse: 16 contro 40 kW, meno della metà!).

A parità di combinazione dei parametri idrodinamici (100 MPa con diametro dell'ugello di 0,5 mm per le due e 7WJ) l'effetto della procedura preliminare di impregnazione si traduce in un miglior grado di finezza (il peso della classe <0,3 mm passa da a mm, passa da mm a mm) mentre quello della classe > 1,7 mm.

Anche la capacità di trattamento risulta incrementata (5,8 kg/min contro i 4,6 kg/min della prova 4WJ) per effetto del più rapido passaggio attraverso il mulino determinato dal grado di finezza raggiunto in minor tempo dal campione saturato con acqua.

La prova 8WJ ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dall'istogramma di figura 5.19.

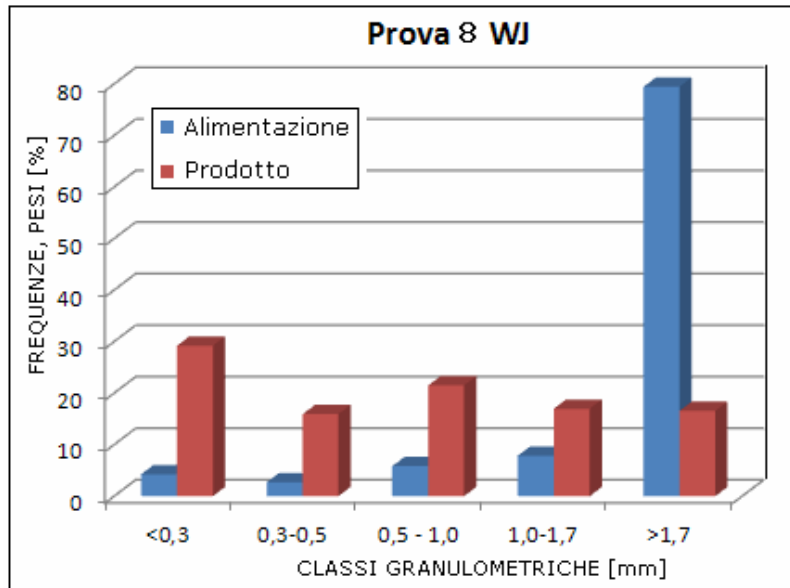


Figura 5.19. Istogramma della granulometria del prodotto della prova di macinazione con sinergia water jet 8W

La capacità di trattamento ottenuta dividendo il peso del campione per il tempo misurato allo scarico è risultata pari a 5,5 kg/min impegnando una potenza di appena 16 kW.

La granulometria del prodotto si avvicina a quella ottenuta con la prova 3WJ nella quale è stata impiegata una potenza idraulica di oltre 70 kW.

Gli effetti dell'impregnazione preliminare del materiale sono risultati veramente importanti, soprattutto nel caso di granulometrie più fini, per i motivi rappresentati in sede di interpretazione scientifica dei risultati (cfr. paragrafi 5.10 e 5.11).

5.7. Analisi dei risultati

Al fine di ricavare i parametri sintetici della distribuzione granulometrica dei prodotti ottenuti alle diverse condizioni sperimentali (valore di tendenza centrale e grado di dispersione), i risultati dell'analisi granulometrica sono stati rappresentati mediante le curve delle frequenze cumulate che consentono di calcolare graficamente in modo immediato il peso di materiale che passerebbe attraverso un setaccio virtuale di apertura crescente.

I diagrammi riportano in ordinate il peso cumulo passante [%] e in ascisse le dimensioni granulometriche d [mm] entrambi in scala aritmetica. I valori del d_{50} , d_{80} , d_{25} e d_{75} sono stati ricavati dalle curve con procedure di interpolazione o estrapolazione.

5.7.1 Prove a secco sui campioni con umidità naturale

La prova 1S è ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5.20.

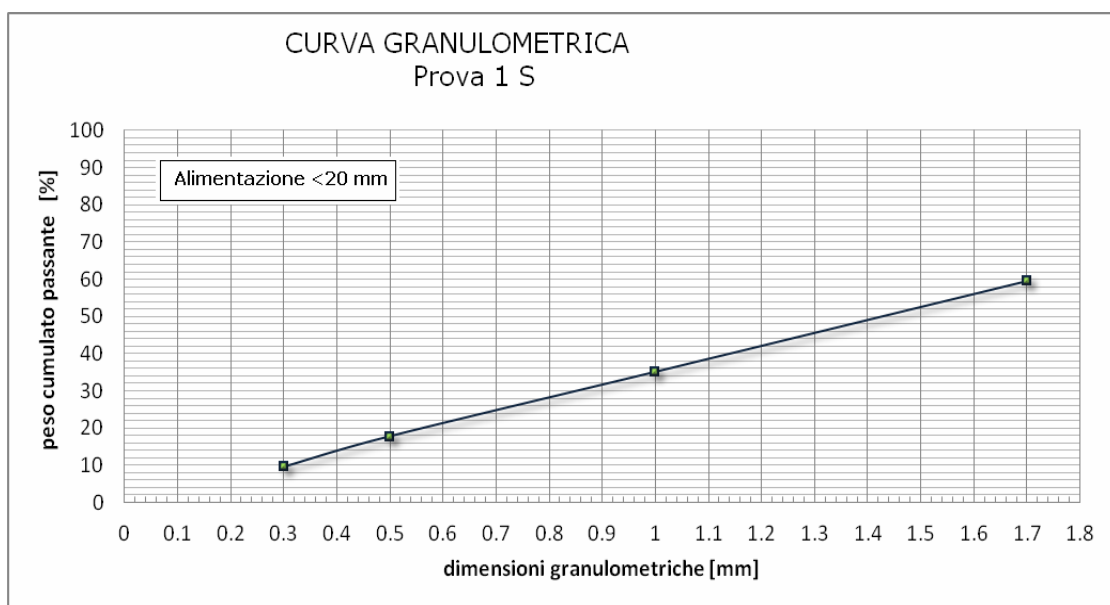


Figura 5.20. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 1S

La prova 2S è ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5.21.

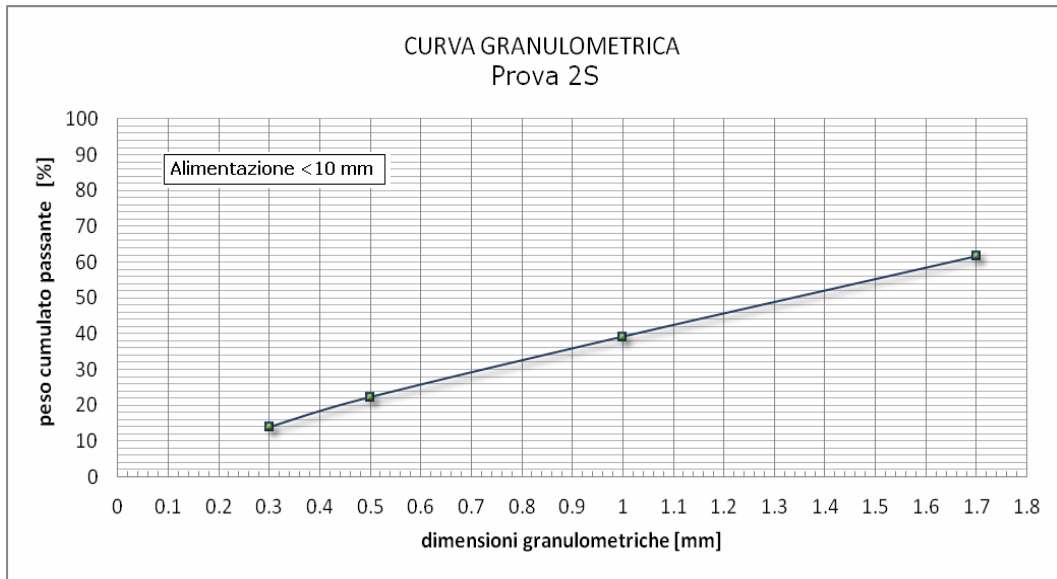


Figura 5.21. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 2S

Le distribuzioni granulometriche della macinazione a secco riassunte nei dati di tabella 5.7 dove n è il rapporto di riduzione e $\theta = (d_{75} - d_{25})/d_{50}$ l'indice di dispersione.

Tabella 5.7. Parametri riassuntivi della granulometria dei prodotti delle prove a secco

MACINAZIONE WATER JET	d_{25} [mm]	d_{50} [mm]	d_{75} * [mm]	n -	θ -
Prova 1S	0,71	1,43	2,39	4,01	1,7
Prova 2S	0,57	1,33	1,95	5,00	1,1

*Valori sovrastimati ottenuti per estrapolazione lineare

5.7.2 Prove con assistenza water jet sui campioni con umidità naturale

La prova 1WJ è ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5.22.

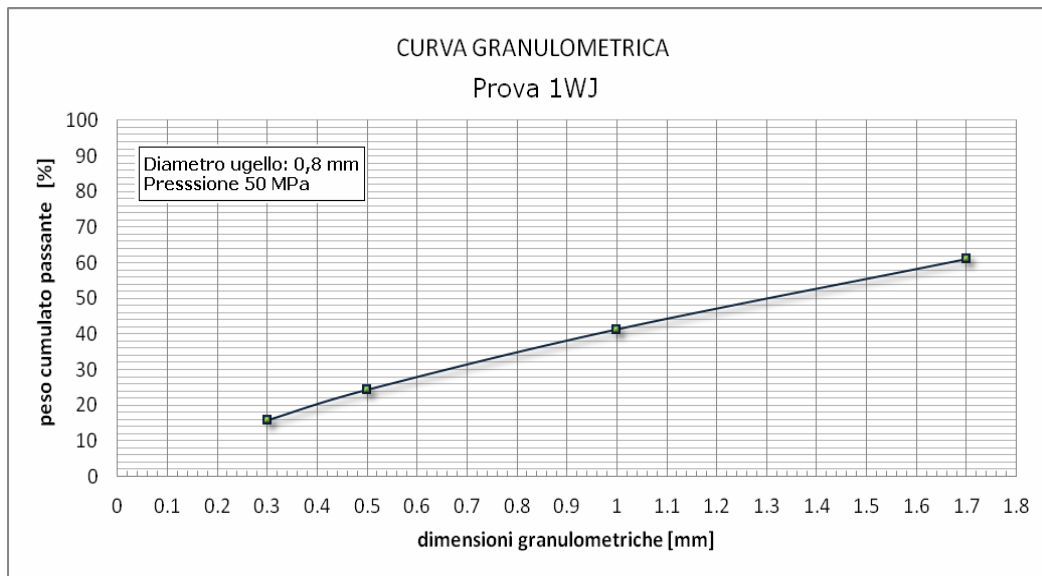


Figura 5.22. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 1WJ

La prova 2WJ è ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5.23.

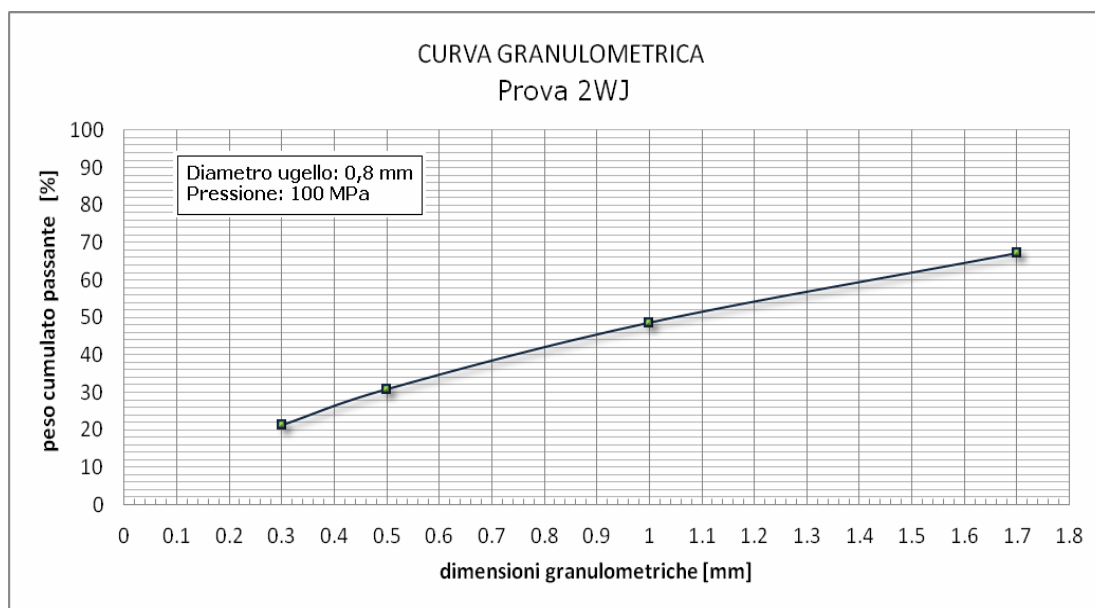


Figura 5.23. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 2WJ

La prova 3WJ è ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5.24.

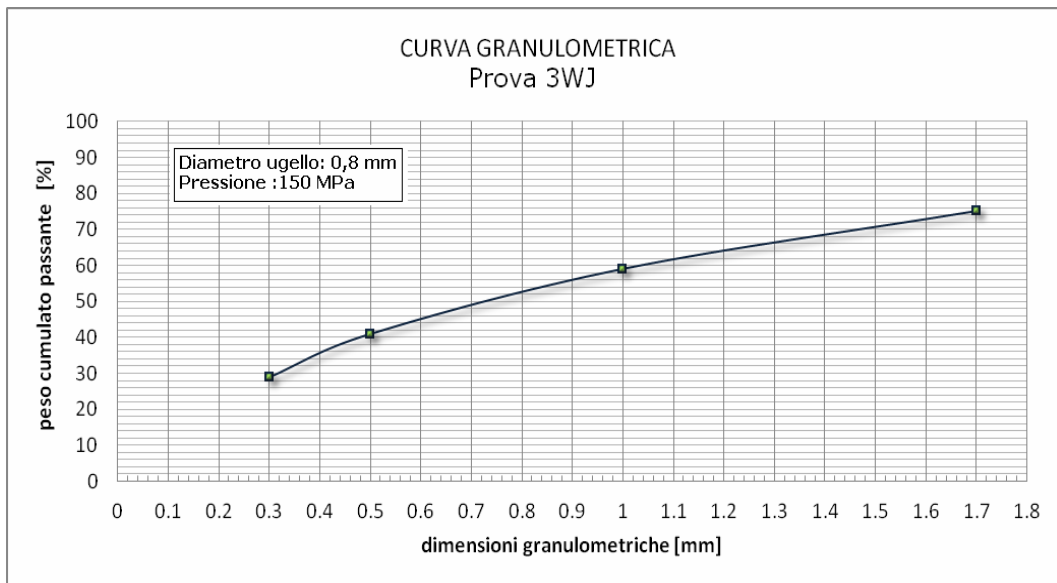


Figura 5.24. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 3WJ

La prova 4WJ ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5.25.

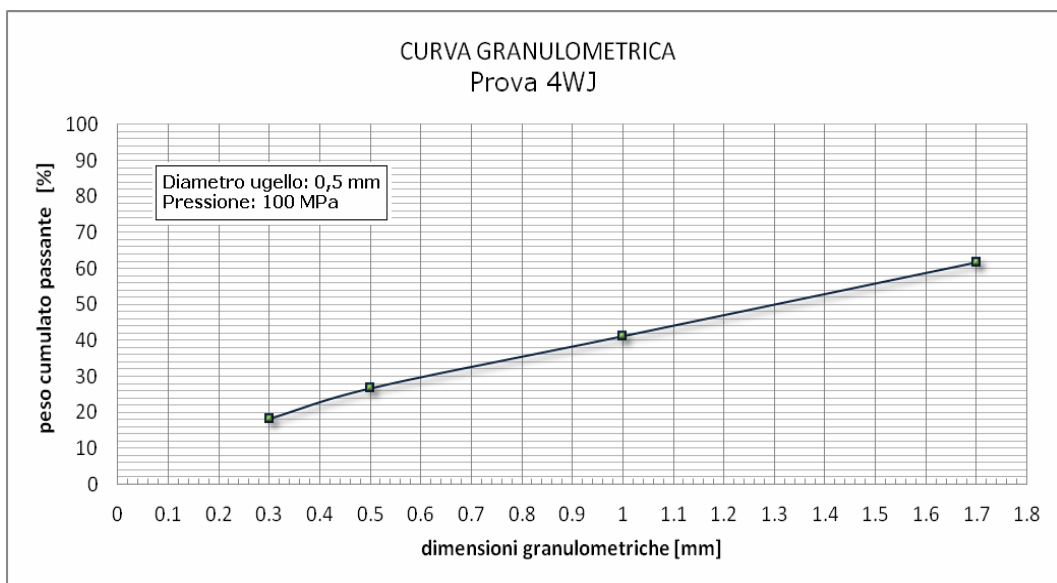


Figura 5.25. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 4WJ

La prova 5WJ ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5 26.

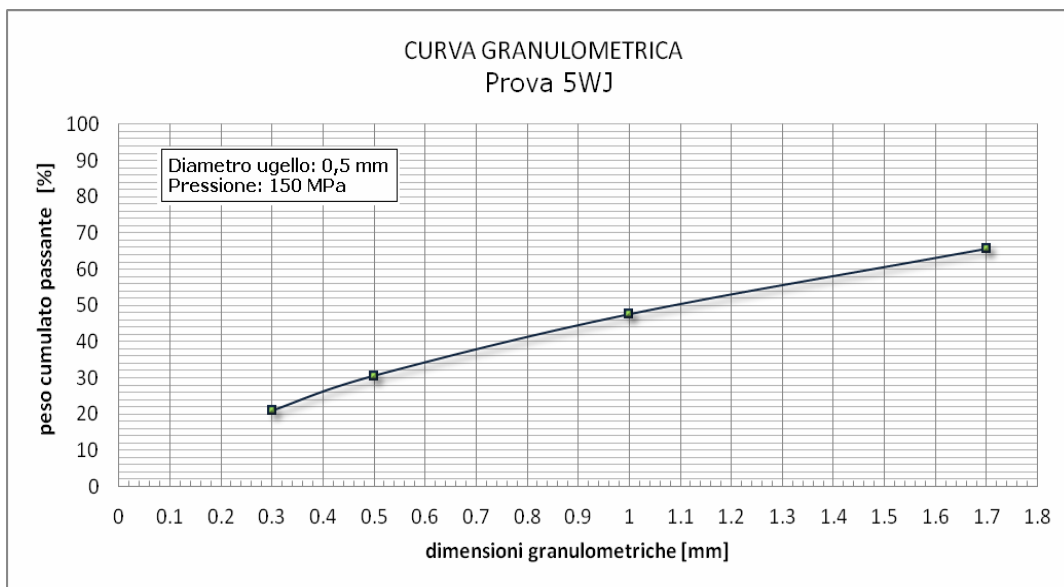


Figura 5.26. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 5WJ

La prova 6WJ ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5.27.

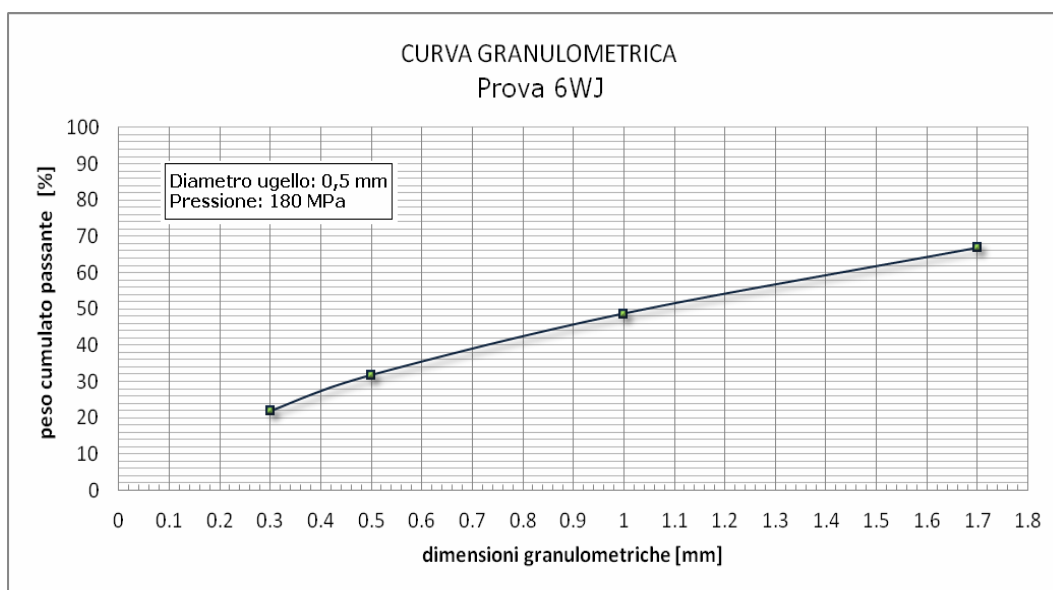


Figura 5.27. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 6WJ

I valori dei parametri riassuntivi delle distribuzioni granulometriche dei prodotti sono rappresentati nella tabella 5.8 insieme ai dati del rapporto di riduzione (rapporto tra i valori del d_{50} dell'alimentazione e del prodotto) e del parametro di dispersione

$$\theta = (d_{75} - d_{25})/d_{50} .$$

Tabella 5.8. Parametri riassuntivi della distribuzione granulometrica dei prodotti ottenuti in condizioni normali di umidità dei campioni

MACINAZIONE WATERJET	d ₂₅ [mm]	d ₅₀ [mm]	d ₇₅ [mm]	n	θ
Prova 1 WJ	0,50	1,28	2,04	4,50	1,4
Prova 2 WJ	0,37	1,00	2,02	5,64	1,5
Prova 3 WJ	0,24	1,71	1,69	8,03	1,3
Prova 4 WJ	0,46	1,14	2,01	5,01	1,4
Prova 5 WJ	0,38	1,07	1,77	5,33	1,2
Prova 6 WJ	0,35	1,03	1,89	5,53	1,4

Dai dati della tabella si evince quanto segue a conferma di quanto anticipato in precedenza:

5.7.3 Prove sui campioni imbevuti con acqua

La prova 7WJ ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5.28.

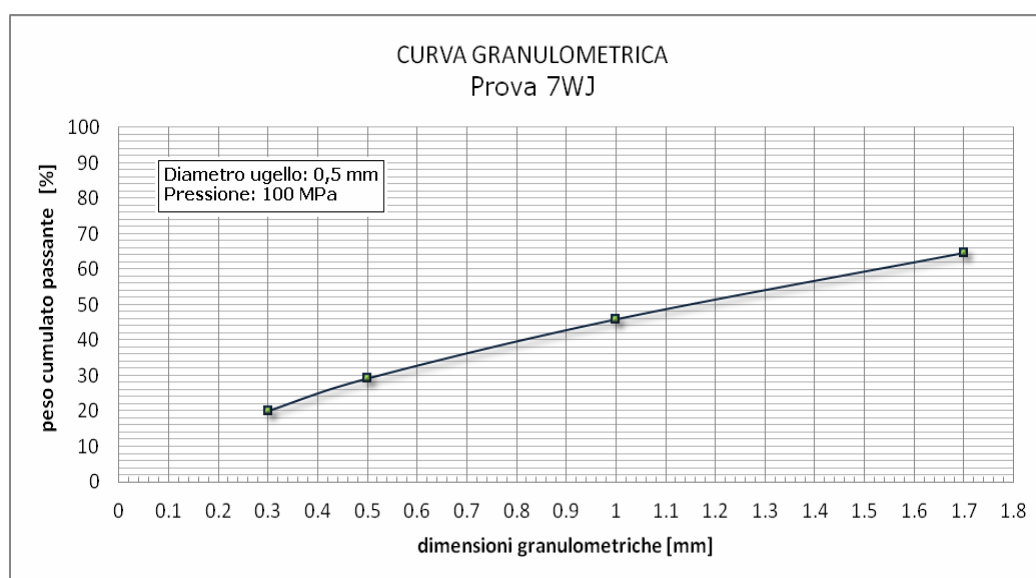


Figura 5.28. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 6WJ

La prova 8WJ ha fornito un prodotto con granulometria rappresentata dalla curva delle frequenze cumulate di figura 5.29.

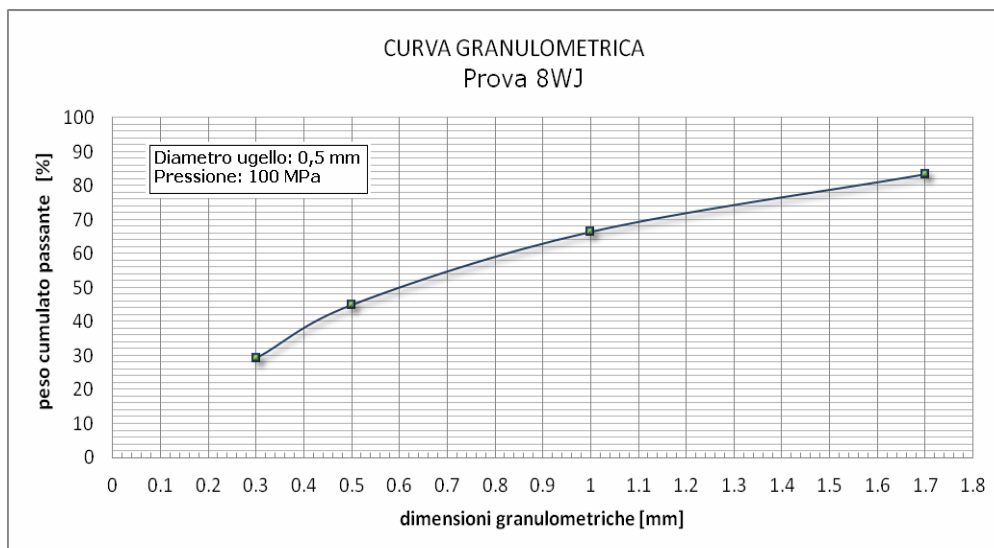


Figura 5.29. Distribuzione granulometrica del prodotto della prova 6WJ

Le distribuzioni granulometriche sono riassunte nei dati di tabella 5.9.

Tabella 5.9. Parametri riassuntivi della distribuzione granulometrica dei prodotti ottenuti previa saturazione con acqua dei campioni

MACINAZIONE WATERJET	d ₂₅ [mm]	d ₅₀ [mm]	d ₇₅ [mm]	n	θ
Prova 7WJ	0,41	1,12	1,90	4,99	1,3
Prova 8WJ	0,27	0,60	1,35	5,00	1,1

5.8. Influenza delle variabili operative

5.8.1 Correlazione tra d₅₀ e pressione water jet

I grafici appena descritti permettono di individuare molto rapidamente nel campione quali sono le percentuali di materiale che risultano essere maggiori o minori di una certa dimensione di particelle. Diventa inoltre intuitivo il concetto di d₅₀ e il calcolo del rapporto di riduzione già citato.

Per il calcolo del d₅₀ è sufficiente tracciare una retta orizzontale alla quota dell'50% di frazione in peso (in ordinata) e verificare la dimensione (in ascissa) in corrispondenza della quale si trova punto di incontro tra la suddetta retta e la curva granulometrica.

Questo valore indica l'ipotetica dimensione della maglia di un setaccio attraverso il quale passa il 50 % del materiale in ingresso al processo.

Tanto più una curva è schiacciata e più è ampio lo spettro delle dimensioni delle particelle, viceversa una curva quasi verticale indica la presenza di una distribuzione di particelle di dimensioni molto vicine ad un certo valore di diametro. Analogamente è possibile ricavare il valore del d_{25} e d_{75} necessari per il calcolo dello scarto probabile. Il grado di dispersione θ permette di verificare la distribuzione granulometrica e l'efficacia della macinazione.

Di seguito viene riportato un confronto tra i d_{50} relativi alla macinazione ad umido con water jet e livelli di pressione crescenti (figure da 5.30 a 5.33).

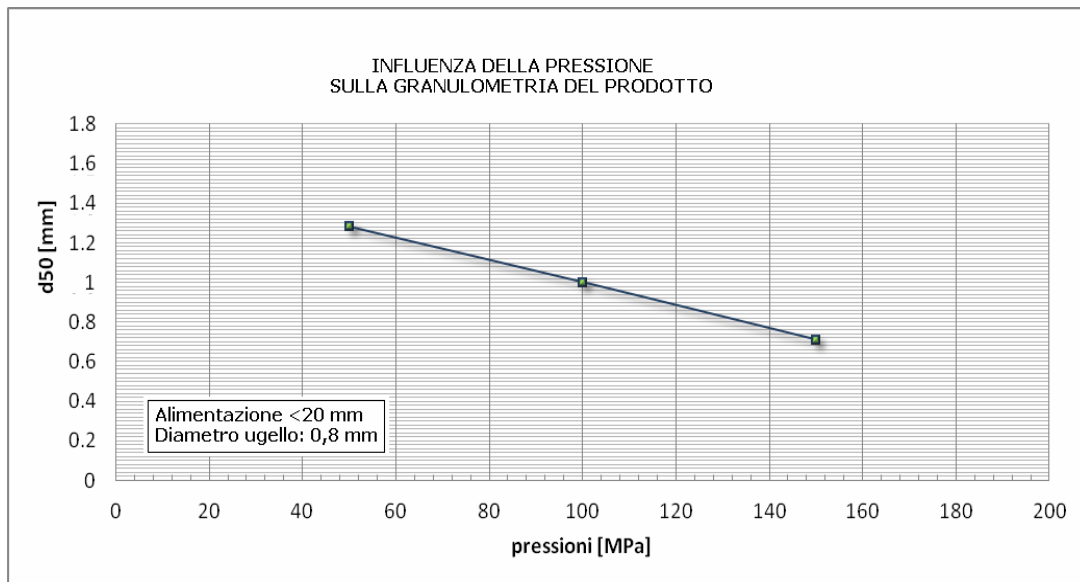


Figura 5.30. Influenza della pressione di generazione dei getti sul grado di finezza del prodotto rappresentato dal parametro d_{50}

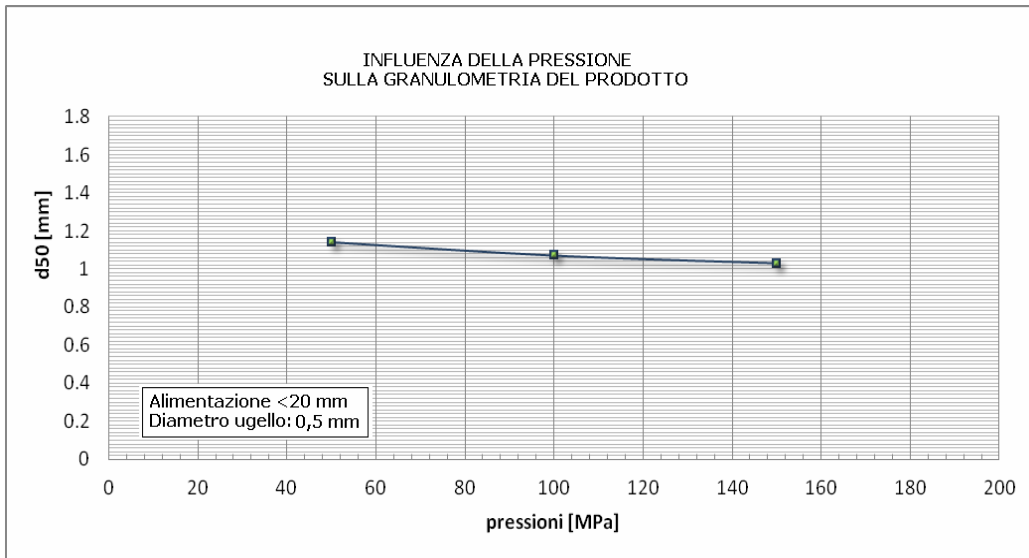


Figura 5.31. Influenza della pressione di generazione dei getti sul grado di finezza del prodotto rappresentato dal parametro d_{50}

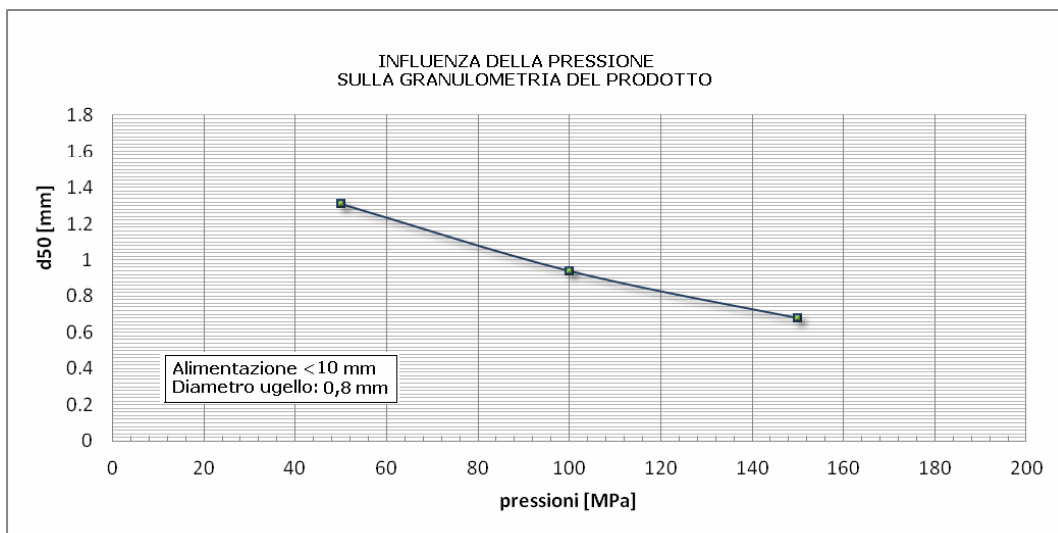


Figura 5.32. Influenza della pressione di generazione dei getti sul grado di finezza del prodotto rappresentato dal parametro d_{50}

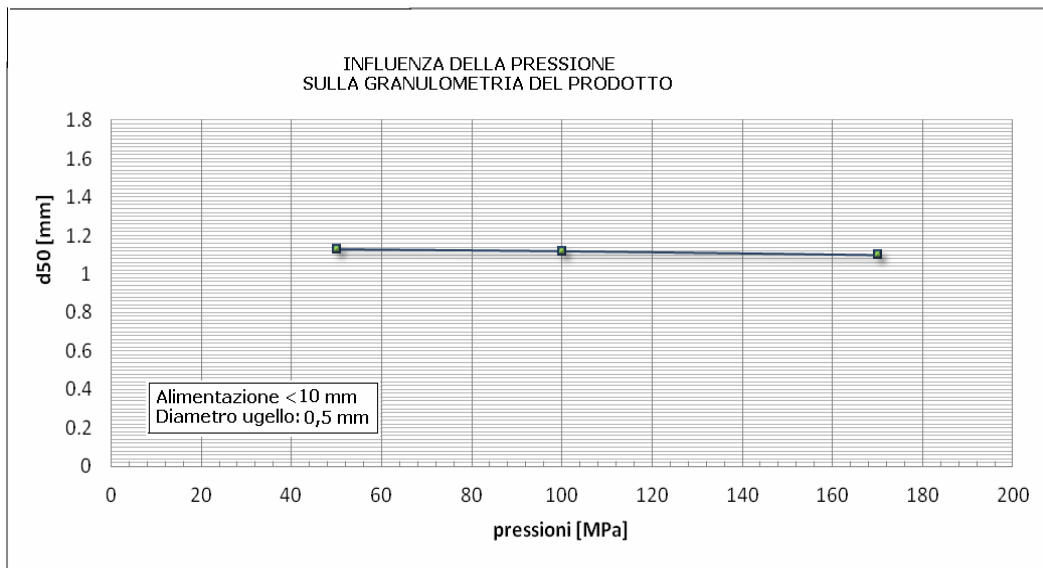


Figura 5.33. Influenza della pressione di generazione dei getti sul grado di finezza del prodotto rappresentato dal parametro d_{50}

Il confronto tra le quattro curve del d_{50} in funzione della pressione suggerisce le seguenti considerazioni:

- il grado di finezza del prodotto della macinazione migliora considerevolmente (il d_{50} diminuisce) al crescere della pressione di generazione del getto utilizzando ugelli di diametro 0,8 mm, mentre non è praticamente influenzato dalla pressione passando al diametro 0,5 mm;
- la pezzatura del materiale in alimentazione ha scarsa rilevanza sulla granulometria del prodotto per tutti i valori della pressione esplorati;

Per una più immediata comprensione dell'influenza complessiva delle condizioni operative (pressione, diametro degli ugelli, granulometria e stato del campione in alimentazione) il valore del d_{50} è rappresentato graficamente nel diagramma a barre di figure 5.34, 5.35 e 5.36, dove appaiono evidenti i gradienti di variazione in funzione della pressione a parità di diametro degli ugelli per le due diverse granulometrie dell'alimentazione e le due condizioni di umidità assorbita per immersione in acqua dalla porosità del carbone .

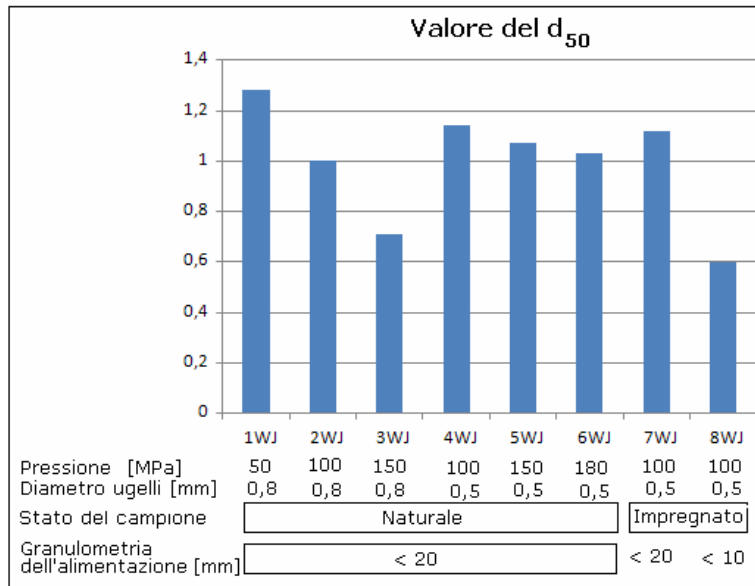


Figura 5.34. Valore del d_{50} in funzione delle condizioni operative

L'effetto dell'impregnazione preliminare dei pori del carbone risulta molto evidente per la prova con il campione frantumato a 10 mm mentre è praticamente trascurabile per il campione di granulometria più grossa.

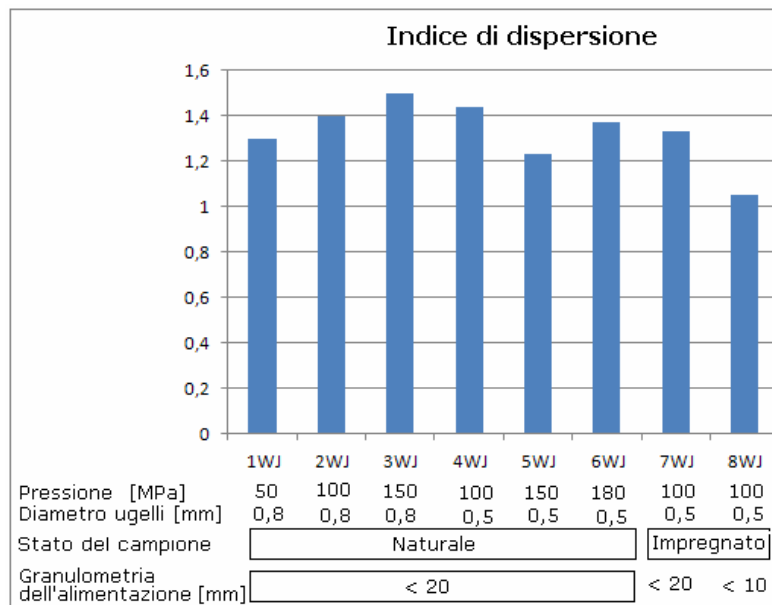


Figura 5.35. Valore dell'indice di dispersione $(d_{75}-d_{25})/d_{50}$ in funzione delle condizioni operative

Per i campioni allo stato naturale l'indice di dispersione della granulometria del prodotto, a parità di diametro dell'ugello, cresce con la pressione (aumenta la proporzione dei fini), salvo il caso apparentemente anomalo della prova 4WJ, mentre diminuisce, a parità di potenza dei getti (16

kW), passando dal campione <20mm al campione <10 mm nel caso delle prove sui campioni impregnati (il prodotto è più fine e la granulometria meno dispersa).

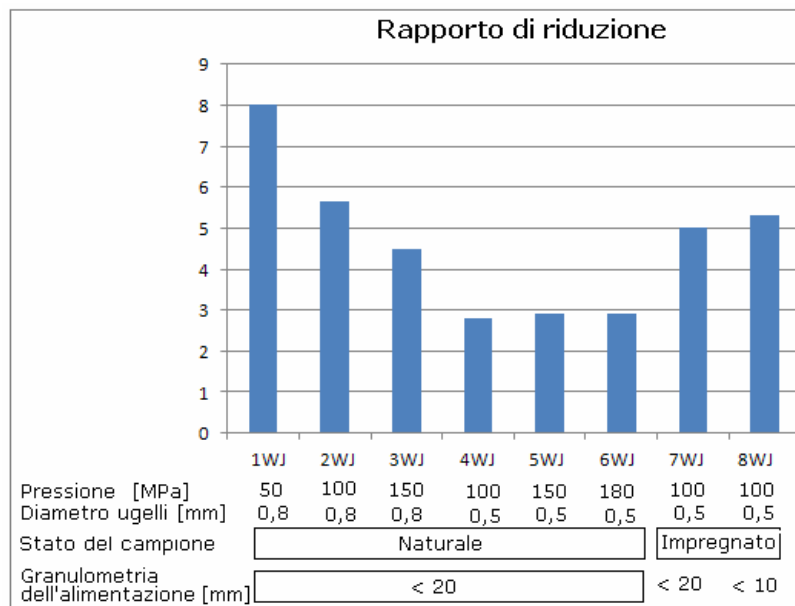


Figura 5.36 . Valore del rapporto di riduzione D_{50}/d_{50} in funzione delle condizioni operative

Il rapporto di riduzione D_{50}/d_{50} decresce sensibilmente all'aumentare della pressione con l'ugello di diametro 0,8, mm mentre si mantiene praticamente costante con l'ugello più piccolo (0,5 mm) nelle condizioni di campione naturale, riflettendo l'andamento delle curve del d_{50} . Per i campioni impregnati il rapporto di riduzione sale notevolmente rispetto ai valori ottenuti con lo stesso diametro di ugello per tutte le prove senza impregnazione preventiva.

I valori del rapporto di riduzione sono risultati molto bassi rispetto ai livelli conseguiti normalmente con le operazioni industriali di macinazione primaria per l'ottenimento di analoghi gradi di finezza. Questo esito dipende dal fatto che per le prove sono stati utilizzati campioni frantumati con granulometria molto minore rispetto a quella accettabile dal modello di mulino HERA (40 mm).

E' pertanto ragionevole ipotizzare che il rapporto di riduzione raggiunga valori almeno doppi alimentando la macchina con materiali frantumati alla granulometria massima consentita, con possibile lieve modificazione dei risultati, salvo il caso delle prove in condizioni di saturazione con acqua dei campioni per le quali si è registrata una grande sensibilità a variazioni della granulometria.

5.8.2 Correlazione tra Energia specifica e capacità di trattamento

Vengono descritti i valori dell'energia specifica E_s relativi alla macinazione ad umido per valutarne l'andamento in funzione della capacità di trattamento e della pressione (figure da 5.37 a 5.40).

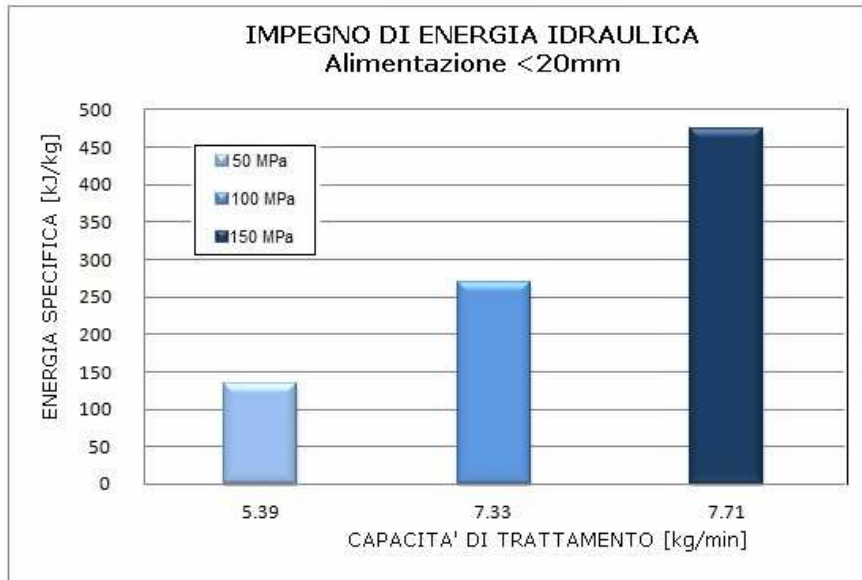


Figura 5.37. Confronto Energia specifica E_s in funzione della capacità di trattamento per diversi livelli di pressione. Diametro ugello: 0,8 mm

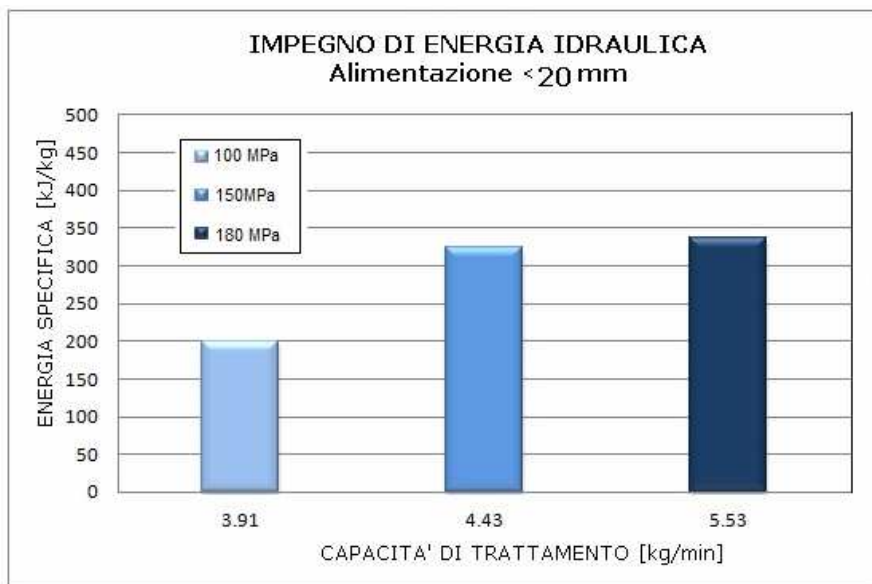


Figura 5.38. Confronto Energia specifica E_s in funzione della capacità di trattamento per diversi livelli di pressione. Diametro ugello: 0,5 mm

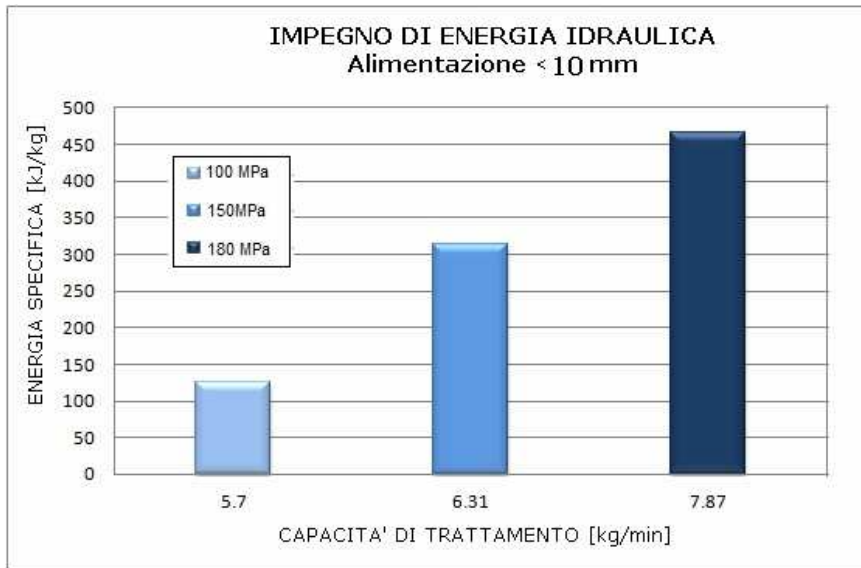


Figura 5.39. Confronto Energia specifica E_s in funzione della capacità di trattamento per diversi livelli di pressione. Diametro ugello: 0,8 mm

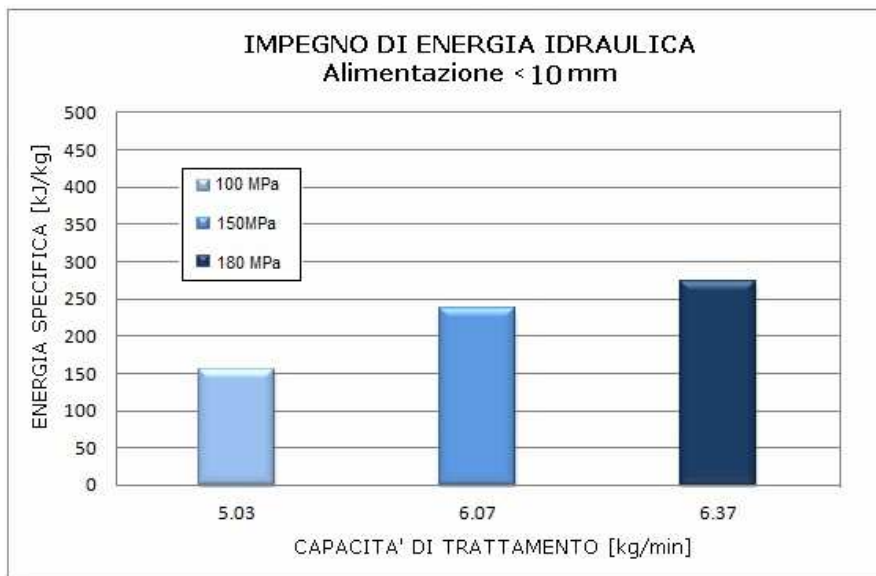


Figura 5.40. Confronto Energia specifica E_s in funzione della capacità di trattamento per diversi livelli di pressione. Diametro ugello: 0,5 mm

L'esame comparativo dei diagrammi a colonne indica chiaramente che:

- L'energia specifica aumenta con la pressione e con il diametro degli ugelli; ne consegue che l'aumento della potenza idraulica, nonostante produca una maggiore capacità di trattamento, è sempre svantaggioso dal punto di vista dell'efficienza;
- La granulometria del materiale in ingresso non determina sensibili variazioni dell'energia specifica consumata con la macinazione water jet.

Accanto all'energia idraulica occorre considerare anche l'energia meccanica richiesta per far funzionare la macchina a vuoto e per contribuire al lavoro di comminazione di incerta valutazione ma comunque molto minore dell'energia idraulica (meno del 10% del totale).

5.8.3 Capacità di trattamento in funzione dei parametri idrodinamici

La capacità di macinazione in funzione della pressione e del diametro degli ugelli è mostrata nel diagramma a colonne di figura 5.41.

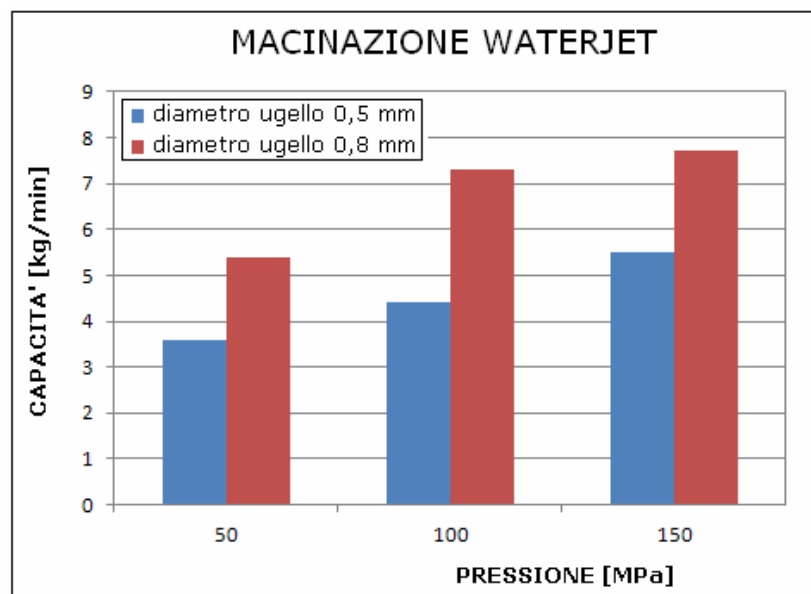


Figura 5.41. Capacità di trattamento in funzione della pressione e del diametro degli ugelli

Si deduce chiaramente che:

- la capacità di trattamento cresce con la pressione;
- l'aumento della capacità di trattamento conseguente all'incremento della pressione non è in grado di compensare il corrispondente aumento della potenza complessiva dei due getti a parità di diametro dell'ugello (l'energia specifica cresce quasi proporzionalmente);

- a parità di pressione la capacità di trattamento diminuisce sensibilmente utilizzando ugelli di diametro più piccolo.

5.9 Soluzioni alternative di comminazione con HERA

I risultati ottenuti al con diverse condizioni sperimentali, presentati e discussi nei paragrafi precedenti, trovano conferma anche attraverso l'esame comparativo dell'andamento delle rispettive curve granulometriche.

Un primo confronto tra soluzioni alternative riguarda i risultati ottenuti con la macinazione water jet rispetto a quelli ottenuti con macinazione a secco a parità dei parametri di regolazione della macchina.

I dati sperimentali sono stati quindi elaborati allo scopo di valutare l'influenza combinata della pressione e del diametro degli ugelli sulla granulometria del prodotto in uscita.

Infine un terzo approccio alla comprensione del meccanismo di disgregazione è stato effettuato confrontando i risultati relativi alla macinazione waterjet su un campione tal quale e su uno della stessa composizione granulometrica preliminarmente saturato con acqua.

5.9.1 Macinazione a secco versus macinazione water jet

I due diagrammi seguenti (figura 5.42 e 5.43) corrispondono al confronto tra i risultati ottenuti dall'analisi granulometrica relativa alla macinazione a secco e quelli ottenuti dalla macinazione assistita da getti d'acqua.

Il raffronto è stato eseguito per entrambe le granulometrie di frantumazione dei campioni preparati per le prove: <20 mm e <10 mm.

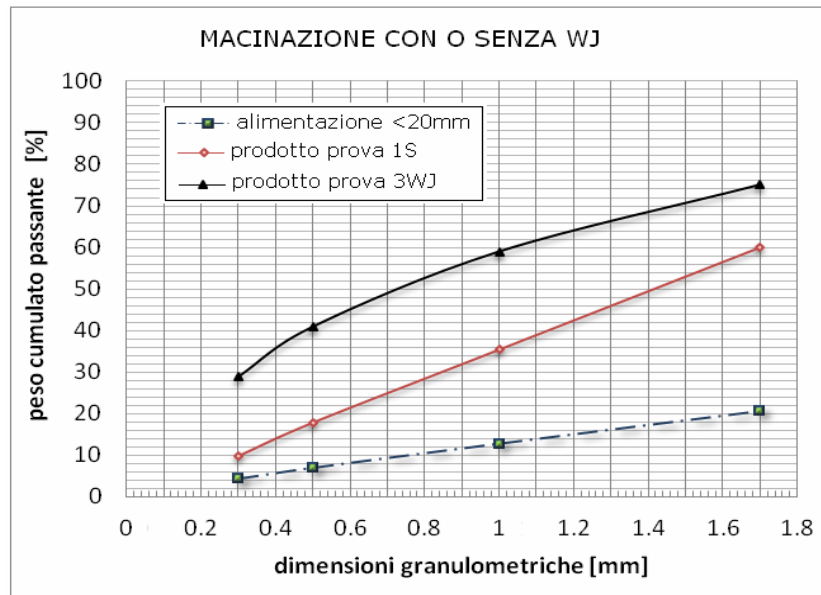


Figura 5.42. Confronto tra macinazione a secco e macinazione water jet.
Diametro ugello 0,8 mm

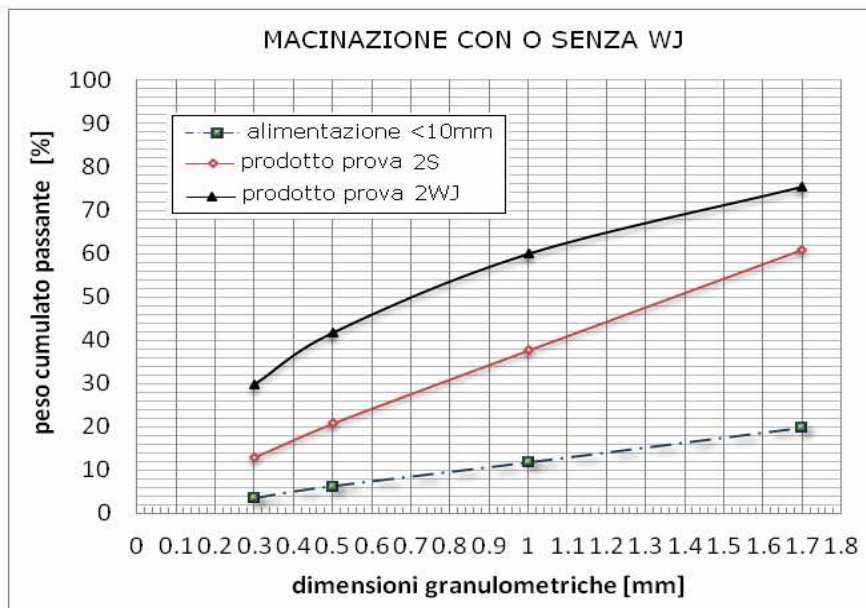


Figura 5.43. Confronto tra macinazione a secco e macinazione water jet.
Diametro ugello 0,8 mm

Il confronto tra le curve riportate nelle due figure dimostra la scarsa influenza della granulometria di frantumazione del materiale di alimentazione sulla granulometria dei prodotti finali.

D'altro canto è chiaramente evidente il contributo dell'energia idraulica alla finezza di macinazione.

5.9.2 Influenza della pressione sulla granulometria del prodotto.

I due diagrammi seguenti (figura 5.44 e 5.45) corrispondono al confronto tra i risultati ottenuti dall'analisi granulometrica relativa alla macinazione assistita da getti d'acqua con i due tipi di ugello.

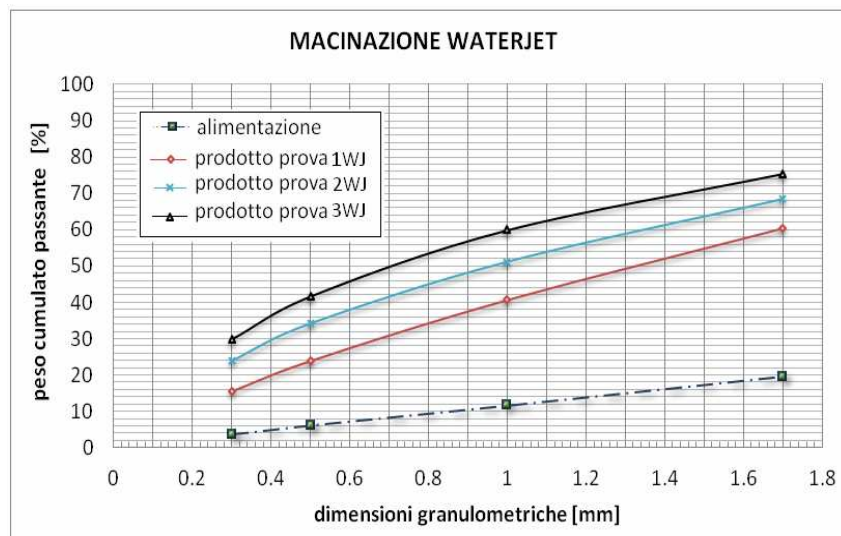


Figura 5.44. Influenza della pressione sul grado di finezza della macinazione.

Diametro ugello 0,8 mm. Granulometria alimentazione <20mm

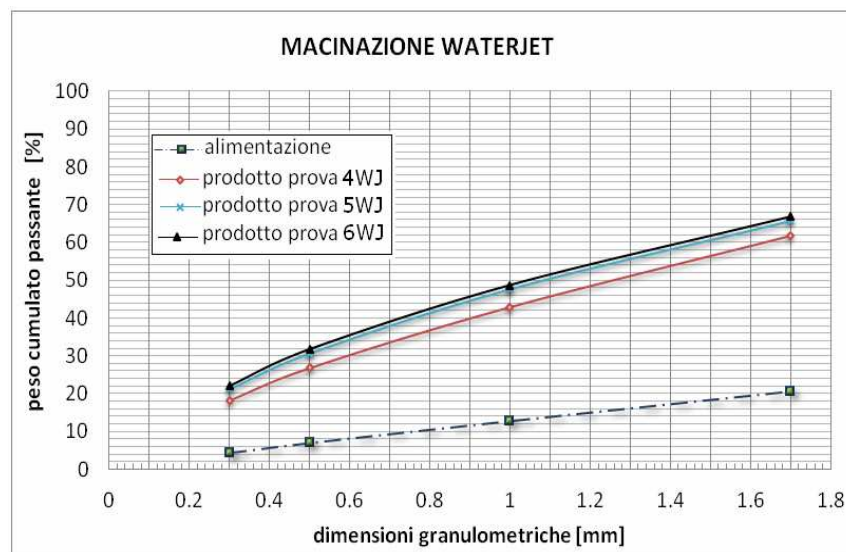


Figura 5.45. Influenza della pressione sul grado di finezza della macinazione.

Diametro ugello 0,5 mm. Granulometria alimentazione <20mm

5.10 Influenza dell'umidità del carbone

Come si è anticipato nel paragrafo 4.5 dedicato all'analisi del meccanismo di azione del getto d'acqua su materiali geologici occorre evidenziare che:

- quando una roccia è satura di acqua la velocità di disgregazione aumenta sensibilmente rispetto a quella relative al materiale tal quale;
- L'effetto tende ad attenuarsi nel campo delle pressioni elevate;

Per consentire il confronto dei risultati ottenuti nella comminuzione con il mulino HERA nelle due condizioni con o senza impregnazione preventiva con acqua del carbone frantumato sotto 10 mm è stata eseguita una prova di macinazione aggiuntiva su un campione "secco", identificata con la signa "Prova 9WJ", alle stesse condizioni operative adottate per la corrispondente prova 8WJ su carbone saturo di acqua. La relativa curva granulometrica è compresa tra i grafici di figure 5.46 e 5.47.

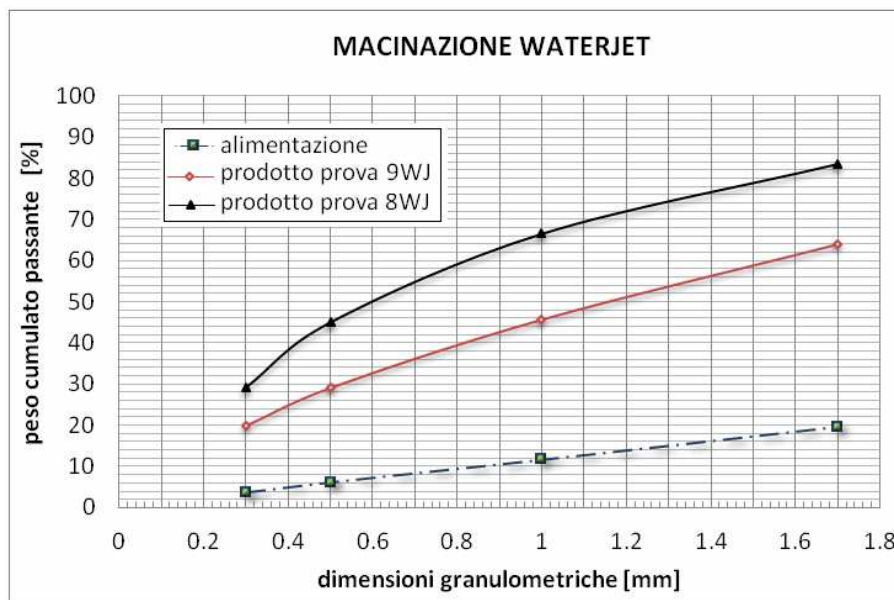


Figura 5.46. Influenza dell'impregnazione con acqua sul grado di finezza del prodotto.

Granulometria alimentazione <10m. Pressione 100 MP. Diametro ugello 0,5 mm.

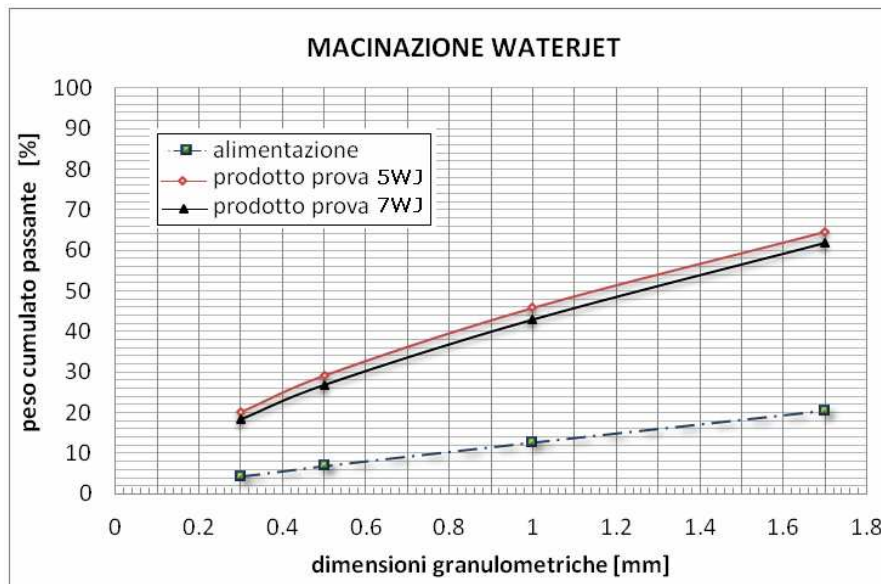


Figura 5.47. Influenza dell'impregnazione con acqua sul grado di finezza del prodotto.
 Granulometria alimentazione <20mm. Pressione 100 MPa. Diametro ugello 0,5 mm.

Si evince chiaramente che l'impregnazione produce effetti molto marcati sul campione frantumato alla dimensione di 10 mm mentre il fenomeno è molto meno evidente nel caso del campione frantumato a 20 mm.

5.11 Discussione

5.11.1 Influenza della variabili operative

Si rinvia ai paragrafi precedenti l'esame dell'influenza sui risultati della comminazione del carbone Sulcis con il sistema HERA (caratteristiche granulometriche del prodotto, capacità di trattamento, energia specifica, etc.), esercitata da:

- Granulometria di frantumazione dei campioni
- Portata di alimentazione in ingresso
- Pressione di generazione dei getti
- Diametro degli ugelli
- Potenza idraulica

Non è il caso di ripetere le considerazioni già espresse, mentre sembra utile riflettere sui risultati conseguiti previo trattamento di impregnazione del materiale utilizzato per le prove, e in particolare sul fatto che gli effetti positivi sono stati riscontrati soprattutto nel caso della granulometria di frantumazione più fine (<10mm).

Il fenomeno è interpretabile immaginando il getto che colpisce i singoli grani. Il grano di carbone ha una sua porosità, prevalentemente in forma di discontinuità di tipo planare (microfratture e clivaggi) che risulteranno riempite d'acqua per effetto del fenomeno di imbibizione.

Quando il getto colpisce una zona satura d'acqua, applica una pressione che si distribuisce all'intero liquido. Essendo l'acqua incomprimibile questa tende a esercitare una forte pressione sulle pareti della discontinuità, rompendo il grano in maniera più efficace rispetto al caso di un grano con porosità riempita di aria. Infatti, essendo l'aria un gas comprimibile la pressione trasmessa alle pareti del grano risulterà minore.

Un'altra differenza sostanziale in questa fase sperimentale è stata riscontrata nel trattamento dei due differenti materiali di alimentazione frantumati alle due granulometrie rispettivamente sotto 10 e 20 mm.

I risultati granulometrici del materiale fine imbevuto, rispetto a quello di grana più grossa, risultano essere migliori, in particolare nelle classi granulometriche fini. Un grano grosso ed uno fine immersi nell'acqua verranno impregnati in misura diversa. Ipotizzando che l'impregnazione in entrambi i casi interessi lo strato prossimo alla superficie dei grani, la proporzione del volume del grano interessato dall'impregnazione risulta minore per il grano grosso rispetto al grano più fine. Dunque per i motivi prima citati, un grano fine saturo d'acqua risponde meglio ad una sollecitazione del getto d'acqua in pressione.

5.11.2. Consumo di acqua

I dati del consumo di acqua in termini assoluti e rapportato al flusso di materiale solido nel mulino è fornito nella tabella 5.10.

Tabella 5.10. Consumo di acqua e diluizione della torbida in uscita nella macinazione water jet

MACINAZIONE WATERJET	PORTATA H ₂ O [l/min]	CAPACITA' [kg/min]	DILUIZIONE TORBIDA [kg/l]
CAMPIONE Prova 1 WJ	17,0	5,4	3,1
CAMPIONE Prova 2 WJ	24,0	7,3	3,3
CAMPIONE Prova 3 WJ	29,4	7,7	3,8
CAMPIONE Prova 4 WJ	9,4	3,6	2,6
CAMPIONE Prova 5 WJ	11,4	4,4	2,6
CAMPIONE Prova 6 WJ	12,6	5,5	2,3
CAMPIONE Prova 7 WJ	9,4	5,8	1,6
CAMPIONE Prova 8 WJ	9,4	5,5	1,7

Il prodotto scaricato dal mulino HERA consiste in una torbida avente una concentrazione di carbone nell'acqua (diluizione) variabile a seconda delle condizioni operative, come rappresentato in tabella riferita alle prove eseguite con i campioni di alimentazione frantumati alla dimensione < 20 mm.

Risultati sostanzialmente simili sono stati ottenuti con anche con i campioni frantumati preliminarmente sotto i 10 mm alle stesse condizioni idrodinamiche dei getti d'acqua, a conferma della trascurabile influenza della granulometria in ingresso sulla portata di prodotto solido allo scarico del mulino, che dipende essenzialmente dalla regolazione dei parametri geometrici e funzionali della macchina.

Si osserva che il rapporto di solido rispetto al liquido espresso in g/l cresce al diminuire del diametro degli ugelli.

La proporzione di carbone nella torbida in uscita dal mulino HERA nelle varie prove di macinazione con assistenza water jet è riportata nel diagramma a barre di figura 5.48.

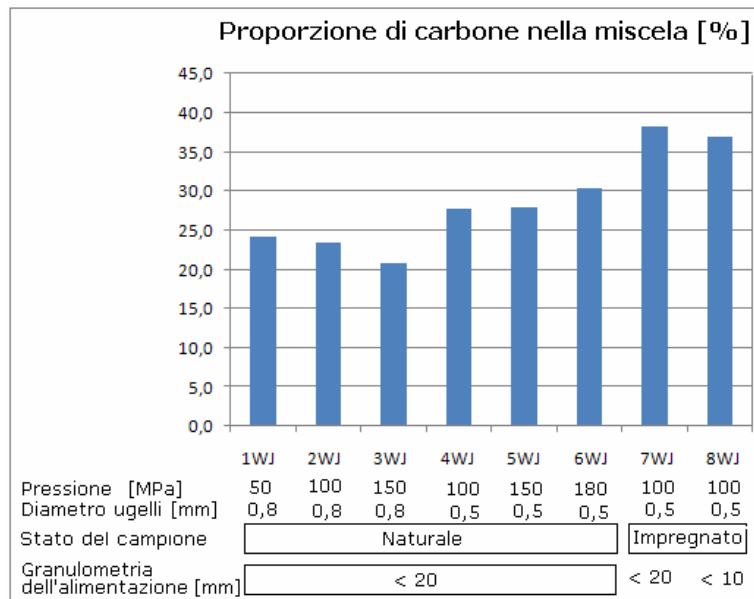


Figura 5.48. Proporzione ponderale del carbone nella torbida in uscita alle diverse condizioni operative

E' interessante notare che con le prove sul materiale preliminarmente impregnato con acqua si raggiungono valori non molto discosti da quelli attribuibili a una sospensione avente fluidità idonea per una movimentazione in condotta.

Rispetto ai livelli di "resa in carbone" delle miscele coal-water convenzionali (intorno al 70%) l'acqua in eccesso da eliminare sarebbe intorno al 60%.

I vantaggi offerti dall'imbibizione preliminare potrebbero essere ulteriormente migliorati attraverso idonee azioni atte a favorire il processo di impregnazione accorciando i tempi necessari e/o incrementando la quantità di acqua assorbita fino a completa saturazione della porosità del carbone.

Tali azioni potrebbero consistere in:

- trattamenti termici per favorire un ampliamento della dimensione dei vuoti all'interno del solido;
- eliminazione dei gas sotto vuoto;
- impregnazione per immersione in acqua sotto pressione.

6. SVILUPPO INDUSTRIALE DELLA TECNOLOGIA

6.1 Problemi di scale-up

Per l'applicazione industriale del nuovo concetto basato sulla sinergia water jet in combinazione con forze di tipo meccanico, la capacità nominale del sistema deve essere considerevolmente incrementata attraverso un aumento di scala dell'unità di comminazione che tuttavia può modificarne la funzionalità, mentre non sussistono problemi per le altre sezioni di impianto, con particolare riferimento alla frantumazione, alla vagliatura e al trattamento della torbida.

Si può ragionevolmente assumere che la capacità massima di mulini rotativi del tipo di HERA è grosso modo proporzionale all'area della sezione anulare dello scarico, ossia al diametro del "mantello" moltiplicato per la distanza media dalla "campana".

Conseguentemente, la potenza idraulica complessiva dovrà essere adeguatamente aumentata tenendo conto dell'energia specifica richiesta dalla macinazione del carbone stimabile, limitando la pressione a 100 MPa, in 150 kJ/kg (corrispondenti a circa 40 kWh/t), ulteriormente riducibili grazie alle possibili economie di scala e all'ottimizzazione del sistema. La potenza idraulica necessaria può essere ottenuta utilizzando ugelli di diametro maggiore, incrementando il loro numero e studiando la loro posizione all'interno della camera di comminazione.

Con lo "scale-up" ci si deve aspettare un aumento della granulometria del prodotto, essendo difficile mantenere una regolazione così stretta quale quella del prototipo di laboratorio. Tuttavia anche l'altezza della camera di comminazione aumenta proporzionalmente con le dimensioni della macchina consentendo di aumentare il grado di riempimento e il tempo di permanenza con il vantaggio di una migliore efficienza di comminazione.

6.2 Fasi a valle della macinazione waterjet

L'operazione successiva alla macinazione, necessaria per le ulteriori fasi del trattamento o per rendere in carbone disponibile per processi di combustione dove è necessario limitare al minimo l'umidità, consiste nell'addensamento della torbida per sedimentazione in opportuni

apparecchi di ispessimento (tipo Dorr o “Lamella” thickener), con eliminazione dell’acqua in eccesso per sfioro e raccolta del solido addensato alla punta inferiore attraverso la quale è asportato per mezzo di pompa a membrana o peristaltica.

I finissimi di carbone trascinati dall’acqua di sfioro possono essere recuperati in un secondo stadio di sedimentazione, eventualmente accelerata con flocculanti.

L’acqua chiarificata può essere riciclata alla pompa del sistema waterjet, previa operazione di filtrazione eventualmente preceduta da separazione con microcicloni o centrifughe.

Data la granulometria dei prodotti ottenuti con le prove di macinazione utilizzando il mulino HERA, la sedimentazione della maggior parte del carbone avviene in tempi molto brevi, dell’ordine di qualche minuto, mentre quella dei finissimi, che tuttavia rappresentano una frazione secondaria (poche unità percentuali), richiede qualche ora.

La bassa percentuale di finissimi dei prodotti di macinazione waterjet rende l’operazione di filtrazione semplice e poco onerosa dal punto di vista economico.

6.3 Prospettive di applicazione della tecnologia HERA per la preparazione di miscele coal-water

6.3.1. Combustione per la produzione di vapore e/o calore

Come si è detto a proposito delle miscele coal-water di tipo convenzionale, concepite per processi di combustione in sostituzione dell’olio combustibile con immissione in caldaia attraverso ugelli spruzzatori di disegno speciale, le caratteristiche della sospensione devono assicurare precise condizioni di stabilità e viscosità per esigenze di stoccaggio e pompabilità. A questo proposito la granulometria di macinazione rappresenta un aspetto critico.

Queste caratteristiche non sono ottenibili con la macinazione secondo la tecnologia HERA con la quale si ottengono prodotti aventi granulometria eccessivamente grossa per quell’impiego.

La selezione di una frazione con distribuzione adeguata della dimensione delle particelle solide sarebbe tecnicamente possibile ricorrendo a una successiva operazione di

vagliatura del prodotto uscente dal mulino, ma risulterebbe troppo onerosa dal punto di vista economico a causa dell'eccessiva carica circolante richiesta dalla rimacinazione del sopravaglio.

Tuttavia questo aspetto critico verrebbe superato utilizzando un diverso sistema di combustione basato sul concetto del letto fluido. In questo caso la granulometria del prodotto di HERA, dell'ordine di grandezza del millimetro, corrisponderebbe molto bene a quella richiesta per il buon funzionamento della caldaia.

Resterebbe ancora aperto il problema dello "stoccaggio" prolungato della sospensione, difficilmente risolvibile anche ricorrendo a agitazione intensa, per difficoltà tecniche e eccessivo costo. Una soluzione potrebbe essere trovata nell'impiego quasi immediato della sospensione, ispessita fino alla diluizione desiderata, "by-passando" in tal modo gli inconvenienti della sedimentazione e della segregazione granulometrica.

Dal punto di vista energetico, l'alimentazione del sistema di combustione con carbone in sospensione acquosa rappresenta certamente uno svantaggio rispetto all'alimentazione con materiale macinato a secco a causa del calore assorbito dall'evaporazione dell'acqua.

La convenienza andrebbe tuttavia pesata prendendo in considerazione anche altri fattori quali la rispondenza della granulometria alle esigenze del letto fluido, aspetti di sicurezza legati alla conservazione, trasporto e manipolazione del carbone, nonché il costo globale dal trattamento all'utilizzazione, finale includendo le operazioni intermedie.

Per quanto concerne la granulometria, occorre evidenziare che i combustori a letto fluido richiedono dimensioni delle particelle solide ben calibrate entro una classe stretta, con limitata presenza di polveri finissime.

Con riferimento agli aspetti della sicurezza, è bene tenere conto dei possibili rischi connessi alla infiammabilità e all'esplosività delle polveri fini di carbone allo stato secco, problemi del tutto assenti in caso di trattamenti a umido.

Molto più complessa è la valutazione dell'economicità complessiva costo globale che dipende da una serie di ipotesi concernenti la dimensione dell'impianto e la composizione dell'intera filiera industriale.

6.3.2 Gassificazione per la produzione di idrogeno

I sistemi avanzati di generazione dell'energia elettrica e/o termica basati sulla gassificazione del carbone sono potenzialmente preferibili alle tecnologie tradizionali di combustione diretta perché meno costosi e più rispettosi dell'ambiente.

Quando il carbone è portato a contatto con vapore e ossigeno le reazioni termochimiche che si sviluppano portano alla formazione di un "syngas", principalmente costituito da ossido di carbonio e idrogeno, che possono essere usati per azionare turbine a gas.

Inoltre la gassificazione rappresenta lo stadio iniziale del processo di produzione dell'idrogeno a partire da combustibili fossili che termina con le fasi di lavaggio del gas e della cattura degli ossidi di carbonio.

Per questo processo l'alimentazione del sistema con miscele coal-water insieme all'ossigeno e al vapore acqueo non comporterebbe alcuna penalizzazione riconducibile alla presenza di acqua nel combustibile poiché la quantità di vapore iniettato dall'esterno, necessario per le reazioni di conversione, sarebbe sostituita da quella generata all'interno dello stesso reattore senza alcun aggravio energetico e con il possibile vantaggio di una semplificazione impiantistica complessiva.

Per tutte le considerazioni sopra esposte, il la miscela combustibile preparata con la tecnologia HERA potrebbe diventare molto interessante in vista della produzione di syngas in reattore a letto fluido.

7. CONCLUSIONI

I dati ottenuti dalle prove di laboratorio portano ad interessanti conclusioni.

La macinazione assistita da water jet è risultata essere più efficace rispetto alla macinazione a secco perchè si sono ottenuti migliori gradi di finezza del materiale macinato con un grado di dispersione granulometrica significativamente minore. Si ottengono risultati migliori per pressioni crescenti.

L'uso dei getti d'acqua ad alta pressione aumenta inoltre le capacità di trattamento andando ad incidere positivamente sui costi di gestione, anche se è da considerare il consumo di energia per la generazione dei getti d'acqua che non compensa la corrispondente riduzione dell'energia meccanica.

E' inoltre presumibile una limitazione dell'usura delle parti meccaniche del mulino per effetto dell'azione lubrificante dell'acqua.

I migliori risultati sono stati ottenuti utilizzando un materiale preliminarmente imbevuto di acqua, la macinazione risulta essere più omogenea e con un grado di dispersione ulteriormente ridotto.

L'obiettivo proposto in questo lavoro deve rappresentare un punto di partenza per uno studio più approfondito. Maggiore attenzione merita la macinazione del materiale imbevuto, risultato essere il miglior esito sperimentale. Sarebbe opportuno un incremento del numero di prove e un approfondimento di parametri operativi non considerati.

BIBLIOGRAFIA

- **R Ciccù, G. Mei & C. Tilocca & P. Deiana, 2010.** Suitability of the Sulcis Coal for CWS Preparation. *Twenty-Seventh Annual International Pittsburgh Coal Conference: Coal - Energy, Environment and Sustainable Development. Istanbul/Turkey/ 11 – 14 ottobre 2010. ISBN : 1-890977-27-6*
- **Bortolussi A., Ciccù R., Grosso B.:** Wedge effect influence in water jet cutting of rocks, *21° International Symposium on Mine Planning and Equipment selection - MPES 2012, New Delhi, India, November 28-30, 2012* Wedge effect influence in water jet cutting of rocks;
- **Ciccù R., Mei G., Tilocca C., 2010.** Studio sperimentale sulle miscele coal water (CWF). (in: *Report ENEA 20_DIGITA_RT_5252_CW, 2010*).
- **Giovanni Mei, Raimondo Ciccù, Caterina Tilocca and Alessandro Mazzella, 2011.** Preparation of CWS from a Low-Rank Coal. *The Proceedings of 36th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems. The Clearwater Clean Coal conference. Sheraton Sand Key, Clearwater, Florida, USA, 5-9 giugno 2011. ISBN No. 978-0-932066-36-4.*
- **Ciccù R., Imolesi E., Careddu N.:** "Waterjet comminution of coal with the HERA machine", *5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, February 3-5, 1998; New Delhi, India. Ed. by M.M. Vijay, N.R. Babu, T. Yahiro;*
- **R. Ciccù and E. Imolesi:** Waterjet-assisted mineral comminution, *Proc. 13th Int. Conf. on Jetting Technology, Cagliari, October 1996*
- **Ghiani M.,** Dispense del corso di Preparazione dei minerali, *Università di Cagliari;*
- **AA.VV., 1990,** Il bacino carbonifero del Sulcis: geologia, idrogeologia, miniera Carbosulcis S.p.A., *Rimin S.p.A., Montan Consulting GMB*
- **Mazurkiewicz, J. White, P. Karlic:** Effect of feed rate during comminution of coal by high energy waterjet, *Coal Preparation (1988), Vol. 6*
- **M. Mazurkiewicz and G. Galecki:** Coal and Minerals comminution with high pressure waterjet assistance, *Proc. XVIII Int. Min. Proc. Congr., Sydney, 1993, Vol. 1, pp. 131-138.*
- **Ciccù, M. Mazurkiewicz:** Coal disintegration and beneficiation by high pressure water jets, *Anais II Congresso Italo-Brasileiro de Engenharia de Minas, Sao Paulo, 1993.*
- **A. Bortolussi, P. Carbini, R. Ciccù and M. Ghiani:** Waterjet grinding of coal, *Proceedings IVth Int. Conf. on High Sulphur coals, Lexington 1993*
- **L.G. Austin, J. McClung:** Size reduction of coal, in: *Coal Preparation, J.W. Leonard (Ed.) AIME, New York (1-979)*

- **A.A. Griffith:** The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. I Trans . R. Soc. Series A*, 22L-163-198 (1920-L92L)
- **M. Agus, P. Carbini, R. Ciccu, M. Ghiani, F. Satta, C. Tilocca, 1994.** Influence of coal properties in surface – based separation processes. *Preprints of the 12th International coal preparation congress, Cracow - Poland 23 – 27 may, 1994, vol.2, pp. 913 – 922.*
- **Evans, C.D. Pomeroy:** The strength, fracture and workability of coals *Pergamon Press Ltd. (1-973)*
- **J.A. Herbst:** Energy requirements for the fine grinding of coal in an attritor, *Final report, contract No*
- **P. Somasundaran and I.J. Lin:** Effect on the Nature of the Environment on Comminution Processes, *Ind. Eng. Chem" Process. Des. Dev. , 32I-33L (L972)*
- **EY-77-S-02-4560** *University of Utah (1978)*