

# COME SI MIGLIORA LA DECORTICAZIONE

Le nuove mole diamantate aumentano la resa, resistono di più all'usura e consentono risparmi economici rispetto alle mole tradizionali

Di: **Roberto Montanari**<sup>1</sup> e **Davide Marchini**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Parma

<sup>2</sup> membro e co-fondatore della società FMB-Engine, azienda spin-off dell'Università degli Studi di Parma

**LO DIMOSTRA UNO STUDIO DEL DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE DELL'UNIVERSITÀ DI PARMA CHE HA TESTATO L'INNOVATIVA TIPOLOGIA DI MOLE FORNITA DA OCRIM, AZIENDA LEADER NELLA PRODUZIONE DI IMPIANTI PER IL SETTORE MOLITORIO**

La decorticazione ha lo scopo di rimuovere gli strati più esterni del pericarpo dai chicchi di frumento o, più in generale, dei cereali ai quali viene applicata. Un numero crescente di studi in ambito accademico ed industriale testimoniano i vantaggi della decorticazione dei chicchi prima del processo di macinazione.

- Migliora la resa estrattiva e la purezza della semola ottenuta dalla macinazione del grano duro, dal momento che abbatte la quantità di crusca che può andare a contaminare il prodotto finale.
- La decorticazione garantisce una più elevata sicurezza dei prodotti derivanti dalla macinazione anche dal punto di vista chimico,

poiché la maggior parte dei contaminanti sono contenuti negli strati cruscali più esterni (micotossine).

- La decorticazione può abbattere i costi di investimento iniziali in quanto può accorciare il ciclo tecnologico di macinazione (sono necessarie meno fasi di rottura e separazione per raggiungere la purezza desiderata).
- Velocizza e semplifica il processo di bagnatura dei grani prima della macinazione, infatti rimuovendo alcuni strati di pericarpo, la penetrazione dell'acqua nei chicchi è più rapida e uniforme.
- Se lo si desidera, la decorticazione può consentire la rimozione selettiva degli strati esterni del seme, uno alla volta, quindi sepa-



Figura 1: Dettaglio di una mola e struttura del pacco mole con le 7 mole diamantate

ratamente dagli strati aleuronici. Ciò offre la possibilità di una diversificazione dei prodotti.

Lo studio si è svolto nell'ambito della collaborazione tra l'azienda Ocrim, il dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Parma e un'azienda spin-off della stessa Università di Parma, la Fmb-Eng.In.E.. Ocrim è un'azienda leader nella produzione di impianti per il settore molitorio, in particolare per la macinazione del frumento.

Ocrim produce già sistemi di decorticazione basati sull'utilizzo delle tradizionali mole in carburo di silicio. Tuttavia, la natura minerale di tale materiale può portare alla formazione di crepe e fessurazioni dopo un certo numero di cicli produttivi. Per tale motivo, Ocrim ha deciso di proporre una tipologia di mola innovativa, con un supporto metallico sopra la quale viene depositato un sottile strato di diamanti sintetici.

Tramite un'apposita campagna sperimentale seguita da un processo di analisi e rielaborazione dei risultati, lo studio ha dimostrato come le mole diamantate siano molto più affidabili, abbiano una vita utile molto più lunga, e consentano risparmi dal punto di vista economico, se paragonate alle mole tradizionali.

### Valutazione delle performance delle mole diamantate rispetto alle tradizionali

Le prove sperimentali sono state condotte in parte presso i locali del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Parma, in parte presso un sito produttivo, un mulino per la macinazione di grano duro negli Stati Uniti, la cui linea produttiva era stata realizzata da Ocrim. Le varietà di grano prodotte e processate nella zona sono riconosciute tra le più dure al mondo, quindi si può dire che le mole abbiano lavorato in condizioni particolarmente stressanti.

Il mulino lavora su due linee parallele di decorticazione, con una portata di 4 t/ora di prodotto ciascuna. Le decorticatrici montano pacchi mole composti da 7 mole sovrapposte. Una delle due decorticatrici è stata attrezzata con un pacco mole composto interamente di mole in carburo di silicio. Nell'altra, le due mole inferiori, la sesta e la settima, sono state sostitu-

ite con le nuove mole diamantate (Figura 2).



Figura 2 - Rappresentazione in 3D del pacco mole utilizzato per le prove, con le due mole diamantate sul fondo

Le mole diamantate sono caratterizzate da un sottile strato superficiale nel quale sono parzialmente incorporati diamanti sintetici. I diamanti hanno una distribuzione dimensionale attorno ad un particolare valore garantito dal produttore.

Le performance del sistema sono state valutate tramite 3 Indicatori di Performance, o Key performance indicators (Kpi). A fini cautelativi, gli indicatori di usura delle mole si sono concentrati sull'ultima del pacco, quella più in basso, la più soggetta a stress e usura.

- Il primo indicatore, Kpi1 è la resa di decorticazione. Rappresenta il rapporto tra la massa complessiva di prodotto trattato e la relativa massa di crusca separata. Un calo di questo valore nel tempo indica che il sistema sta perdendo la sua efficacia.
- Il secondo indicatore, Kpi2, è rappresentativo dell'usura dei diamanti. Dopo diversi intervalli di tempo, è stata valutata la distribuzione dimensionale dei diamanti tramite l'Image analysis.
- Il terzo indicatore, Kpi3, è relativo alla porzione della superficie delle mole diamantate coperta dai diamanti. Durante la lavorazione, infatti, i diamanti non sono solo soggetti a usura, e quindi a riduzione dimensionale, ma anche al distacco dalla matrice metallica. Questo fenomeno è ben rappresentato dal Kpi3, che va a monitorare la variazione percentuale di superficie coperta dai diamanti nel tempo.

### Kpi 1: Andamento della resa di decorticazione nel tempo

La campagna sperimentale è stata pianificata in modo da dare rilevanza statistica ai risultati. In particolare si è articolata in tre momenti di misurazione, durante la vita utile delle mole, nei quali si è seguito un approccio metodico per la raccolta di una serie di campioni specifici.

Da una prima analisi dei risultati, si sono ricavate una serie di importanti considerazioni:

- Con le mole diamantate si nota un importante miglioramento nella resa di decorticazione all'aumentare dell'assorbimento energetico della macchina.
- Dopo un anno, la resa di decorticazione con le mole diamantate era ancora molto buona, mentre la performance della macchina che montava mole tradizionali ha subito un peggioramento.

### Tabella 1 - Rese di decorticazione ottenute durante i test sperimentali sulle due decorticatrici

#### TIME 0 - INSTALLATION

DHB North	Diamond	Silicon Carbide
65 (A)	7.4%	8.1%
75 (A)	9.5%	9.0%
85 (A)	11.7%	9.3%

#### TIME 1-3 MOUNTHS

DHB North	Diamond	Silicon Carbide
65 (A)	7.6%	8.3%
75 (A)	9.2%	9.0%
85 (A)	11.0%	9.3%

#### TIME 2-12 MOUNTHS

DHB North	Diamond	Silicon Carbide
65 (A)	7.7%	7.9%
75 (A)	9.1%	8.5%
85 (A)	10.9%	8.7%

Durante le prove un'altra valutazione emersa riguarda l'affidabilità dei due dispositivi: quella delle mole diamantate è senza dubbio molto superiore. La loro usura è più graduale, e la struttura metallica di base su cui sono fissati i diamanti previene eventi di guasto e cedimento improvvisi, ai quali invece sono soggette le mole in carburo di silicio a causa della loro natura minerale.

L'usura del pacco con mole tradizionali, dopo

12 mesi di attività, era evidente anche visivamente. Si poteva osservare un assottigliamento del materiale abrasivo e una modifica della forma del profilo delle mole, tanto più evidente quanto più ci si spostava verso il basso. Per questo motivo i responsabili del mulino hanno deciso di sostituire il pacco mole in carburo di silicio poche settimane dopo l'ultima campagna di misurazioni, quindi dopo poco più di anno dall'istallazione.

**Kpi 2 & 3: Indicatori di usura superficiale delle mole diamantate**

Per determinare l'usura superficiale delle mole diamantate si è utilizzato, come detto, uno strumento di analisi delle immagini. Il software è stato sviluppato dal team Fmb Eng.In.E., azienda spin-off dell'Università di Parma. Nel dettaglio, sono stati raccolti 150 campioni fotografici casualmente su tutta la superfi-

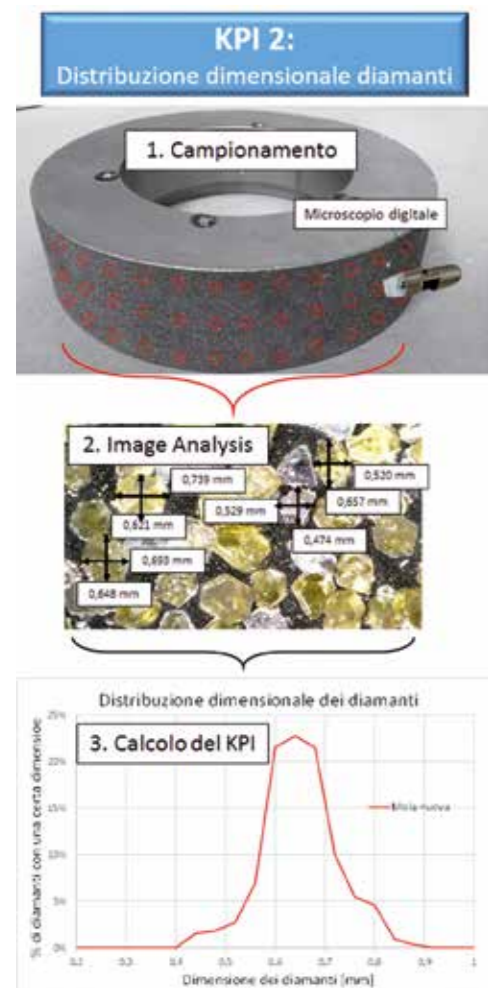


Figura 3 - Schema riassuntivo della procedura utilizzata per il calcolo del KPI2

cie abrasiva della mola. L'operazione è stata condotta inizialmente sulla mola nuova, e poi dopo un anno dall'istallazione della stessa, in modo da poter osservare le differenze.

Il Kpi2 è stato estrapolato dalla misurazione delle dimensioni di tutti i diamanti sulle foto, dalle quali si è potuta ricavare la distribuzione dimensionale dei diamanti sintetici. La Figura 3 mostra la procedura utilizzata per calcolare l'indicatore: il grafico sul fondo mostra la distribuzione dimensionale dei diamanti ricavata sulla mola nuova.

Un altro aspetto importante che influenza l'efficacia di decorticazione è la porzione di superficie della mola effettivamente coperta con diamanti, rappresentata dal Kpi3. Il software di analisi è in grado di riconoscere, tramite analisi colorimetrica, la porzione delle immagini costituita da diamanti e quella costituita invece da superficie metallica. La procedura è stata ripetuta su ciascuna immagine, in modo da definire un livello medio e

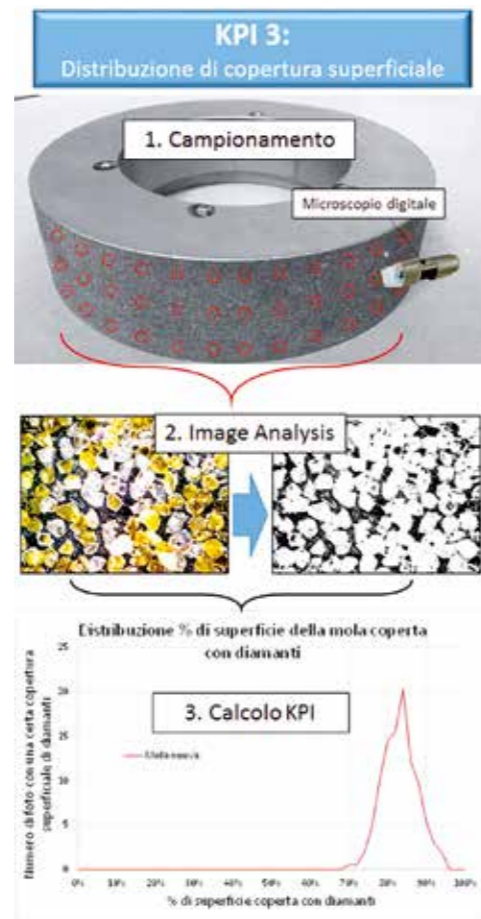


Figura 4 - Schema riassuntivo della procedura utilizzata per il calcolo del KPI3

una distribuzione dei livelli di copertura della superficie delle mole. Le operazioni per il calcolo del Kpi3 sono riassunte dalla Figura 4. Il grafico sul fondo mostra la distribuzione della copertura con diamanti della superficie della mola nuova ed è stato ricavato analizzando gli indici di copertura di tutte le foto raccolte.

I due indicatori hanno consentito di quantificare oggettivamente l'usura delle mole nel tempo, ben rappresentata dalla Figura 5.

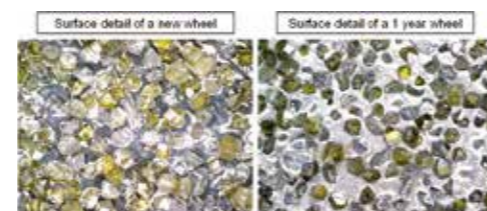


Figura 5 - Esempio comparativo tra le condizioni superficiali di una mola diamantata a nuovo e dopo un anno

Confrontando i risultati ottenuti dalle due campagne sperimentali (sulle mole nuove e dopo un anno), ciò che si ottiene è mostrato in Figura 6. Dopo 1 anno si osserva una chiara diminuzione delle dimensioni medie dei diamanti ed un allargamento nella distribuzione. Il grafico più in alto rappresenta le distribuzioni dimensionali dei diamanti: dopo un anno si è osservata una riduzione

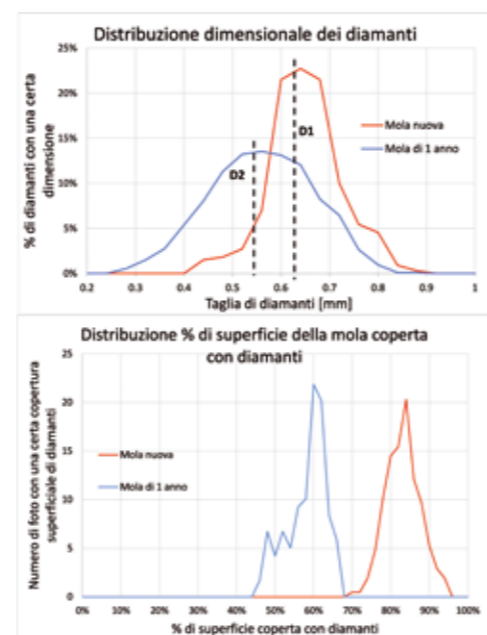


Figura 6 - Distribuzione dimensionale dei diamanti ottenuta con il software di Image Analysis (sopra) e distribuzioni delle aree coperte da diamanti sulle mole (sotto)

dimensionale del 15% circa. Il grafico più in basso, invece, mostra la distribuzione delle percentuali di superficie coperte con diamanti sulle 150 foto analizzate. Dopo 12 mesi, il valore medio è passato dall'80 al 60%, come mostrato in *Figura 6*.

Considerando questi aspetti, sono emersi tre meccanismi principali di deterioramento delle mole diamantate:

1. Riduzione della taglia media dei diamanti.
2. Incremento della varianza della distribuzione dimensionale dei diamanti: l'usura non è un fenomeno regolare e controllato, perciò i suoi effetti non si manifestano sempre con la stessa entità.
3. Riduzione del numero medio di diamanti per unità di superficie: in alcuni casi, l'usura può portare ad un distacco improvviso. Tutti questi fenomeni alterano la funzionalità della decorticatrice. Per garantire le stesse performance con condizioni peggiori delle mole, si dovrà via via aumentare l'assorbimento energetico della macchina. Ovviamente si raggiungerà, a certo punto, un livello di usura al quale anche le mole diamantate devono essere sostituite. Tuttavia la loro vita utile è risultata molto superiore a quella delle mole tradizionali.

### Il ciclo di vita delle mole diamantate

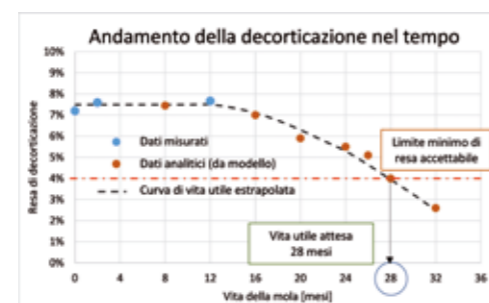
Le mole tradizionali in carburo di silicio hanno mediamente una vita utile di circa 1 anno, che può variare in funzione del prodotto trattato. Dopo un tale periodo, solitamente le loro condizioni sono troppo compromesse e si rende necessaria la loro sostituzione. Dal momento che dopo un anno di operatività le mole diamantate sono risultate in condizioni ancora buone, per stimarne la vita utile è stato sviluppato un modello predittivo in grado di estrapolarne il comportamento nel tempo. I tre Kpi sono stati utilizzati per ricavare la relazione che lega le condizioni superficiali della mola e l'efficacia del processo di decorticazione (e quindi la resa produttiva) nel tempo. Ciò ha consentito di definire un valore plausibile di vita utile per le mole diamantate.

La curva di vita ottenuta è rappresentata in *Figura 7*. Come si nota, le prestazioni restano costanti per i primi 12 mesi, nonostante il processo di usura sia già iniziato. In seguito,

l'usura diventa troppo pesante e la resa di decorticazione inizia a calare. Questo calo, inoltre, non sarà costante, dal momento che l'usura delle mole aumenta in modo più che lineare col tempo. Per tal motivo, negli ultimi mesi il processo sarà più rapido. Questa tendenza è diversa da quella osservata con le mole tradizionali, per le quali le rese iniziano a peggiorare sin dall'inizio.

I risultati indicano una vita utile attesa delle mole diamantate di circa 28 mesi. Questo valore si riferisce alla mola situata nella posizione peggiore, ossia l'ultima in basso del pacco e rappresenta un miglioramento molto significativo se lo si paragona alla durata media di 1 anno circa di una mola in carburo di silicio. In più, come detto, il processo di usura delle mole diamantate avviene in modo molto più graduale e controllabile, e ciò garantisce una ripetibilità molto superiore delle performance.

In definitiva, le mole diamantate sono risultate molto più durature ed affidabili di quelle tradizionali in carburo di silicio.



**Figura 7 - Evoluzione della resa di decorticazione nel tempo per una decorticatrice con mole diamantate**

### Valutazioni economiche

Per una valutazione economica, sono state prese in considerazione una serie di voci di costo connesse alla macchina. Il costo complessivo delle diverse soluzioni impiantistiche, infatti, non deriva solo dall'investimento iniziale, ma anche da diversi costi operativi. L'analisi si è focalizzata sulle voci di costo differenziali tra i diversi scenari, derivanti soprattutto dagli interventi di manutenzione. Le prestazioni produttive delle alternative sono invece state considerate equivalenti. Sono quindi stati valutati i costi degli interventi di manutenzione ma anche i costi opportunità e quelli degli scarti. L'incidenza di queste varia-

bili è inversamente proporzionale alla durata delle mole: più saranno durature meno saranno i costi operativi.

Come detto, i pacchi mole sono composti da 7 mole decorticatrici. Nei test, le prestazioni di un pacco mole tradizionali sono state confrontate con quelle di un pacco in cui le ultime due mole erano diamantate. Sarebbe comunque possibile realizzare pacchi mole con un numero superiore di mole diamantate, fino a 7. Per tal motivo, le valutazioni economiche sono state applicate ai tutti i possibili scenari alternativi, per comprendere che impatto possano avere.

Le mole tradizionali in silicio hanno una vita utile di 12 mesi, che si traduce in un certo costo annuo operativo. Questo valore è stato confrontato con il costo annuo di pacchi con mole diamantate, calcolati al variare della loro vita utile. Lo scopo di quest'analisi era quello di ricavare un punto di pareggio, o break-even point, tra le soluzioni impiantistiche alternative, ossia una durata minima per le mole diamantate che assicuri almeno lo stesso livello di costi operativi annui rispetto ai pacchi mole tradizionali.



**Figura 8 - Costo annuo equivalente del pacco mole al variare della vita utile: determinazione della durata di pareggio (break-even point) per due soluzioni alternative**

La soluzione con 2 mole diamantate ha dato un punto di pareggio tra i 15 e i 16 mesi, mentre utilizzando 7 mole diamantate il break-even point sale a 23-24 mesi (come mostrato in *Figura 8*). Ovviamente le soluzioni intermedie daranno risultati compresi tra i 16 e i 24 mesi. Ad ogni modo, ciascuna delle alternative che prevede l'utilizzo di mole diamantate garantisce una performance economica migliore rispetto al pacco con 7 mole in carburo di silicio, in quanto la loro



durata è stata stimata in almeno 28 mesi. Ciò significa che il sovrapprezzo iniziale per le mole diamantate è più che compensato dal miglioramento delle performance e dalla maggiore durata.

### Conclusioni

Lo studio ha messo in luce una serie di vantaggi derivanti dalla sostituzione delle mole

tradizionali in carburo di silicio con le innovative mole diamantate per la decorticazione del grano. L'analisi si è concentrata sia su aspetti operativi sia su valutazioni economiche, e ha consentito di ricavare alcune importanti conclusioni:

- I dati mostrano un calo più lento delle prestazioni di decorticazione usando le mole diamantate rispetto a quelle tradizionali.

- Dopo 12 mesi di lavoro, a dispetto di una certa usura superficiale, le mole diamantate mantengono ancora lo stesso livello di resa di decorticazione.
- La vita utile di una mola diamantata è stata stimata in almeno 28 mesi, quindi più del doppio rispetto ai 12 mesi di una mola tradizionale. Inoltre la mole diamantata, grazie alla loro struttura di base metallica e non minerale, hanno una maggiore affidabilità e garantiscono una ottima stabilità di prestazioni.
- Nonostante richieda un maggiore investimento iniziale, un pacco mole con mole diamantate avrà un break-even point tra i 16 e i 24 mesi (in funzione del numero di mole diamantate inserite) se confrontato con un pacco mole tradizionale. Ad esempio con 2 mole diamantate, dopo 15 mesi il sistema inizierà a lavorare in condizione di risparmio. Per questo motivo, la scelta delle mole diamantate è risultata conveniente anche dal punto vista economico.