

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Ingegneria Industriale - DIN

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Progettazione e Studio di Soluzioni per l'Efficienza Energetica nei Mulini Industriali

Relatore
Prof. Alessandra Bonoli

Presentata da
Mattia Ferdeghini

Sessione di Luglio 2025

Anno Accademico 2025/2026

Indice

0.0.1 Introduzione 1

1 Comminuzione industriale **3**
1.1 Definizioni Principali 3
1.1.1 Rapporto di Riduzione 3
1.1.2 Forze applicate 4
1.1.3 Energia utilizzata e Meccanismi di rottura 4

2 Macinazione **7**
2.1 Mulini Cilindrici 8
2.1.1 Moto della Carica 10
2.1.2 Mulini a Barre 11
2.1.3 Mulini a Sfere 12

3 Analisi Energetica dei Mulini **15**
3.1 Leggi Energetiche 15
3.1.1 Legge di Rittinger 15
3.1.2 Legge di Kick 16
3.1.3 Legge di Bond e Contributi successivi 16
3.1.4 Legge di Charles 17

4 Progettazione di un Mulino per la Comminuzione **19**
4.1 Meccanismi di Trasmissione di Potenza 19
4.2 Fodera interna del mulino 20
4.2.1 Criteri per la progettazione di rivestimenti in gomma 21
4.2.2 Fattori che Influenzano lo Spessore delle Pareti del Mulino 22
4.3 Tipologie di Simulazioni 22

5 Mulino come Motore Elettrico **25**
5.1 Progettazione CAD 25
5.1.1 Simulazione elettromagnetica 28
5.1.2 Simulazione Termica 30
5.1.3 Simulazione di Stress Meccanico 32
5.2 Studio di Fattibilità ed Impatto Economico 33

6 Mulino Senza Motore **37**
6.1 Simulazione ed ottimizzazione 38
6.1.1 Progettazione CAD in 3D 38
6.1.2 Simulazione elettromagnetica 41
6.1.3 Simulazione Termica 42
6.1.4 Simulazione dello Stress meccanico 43
6.2 Studio di fattibilità ed impatto economico 44

7 Conclusioni **47**

Elenco delle figure

1 Meccanismi di Rottura: (a) impatto o compressione, (b) scheggiamento, (c) abrasione 8
2 *a*: Configurazione a Cascata, *b*: Configurazione a Cataratta, *c*: Centrifugazione. . . 11
3 Mulino con scarico centrale 12
4 Mulino con scarico all'estremità 12
5 Mulino a sfere con griglia di scarico 13
6 Fodera in acciaio 21
7 Fodera in gomma con sollevatori 21
8 Usura rispetto alla grandezza dei corpi macinanti 22
9 Usura della fodera in funzione della carica del mulino 22
10 Rotore del motore elettrico, privo di componenti interni 26
11 Schizzo sul da ricavare sul pieno della fodera 27
12 Raccordo del sollevatore 27
13 Fodera del mulino con sollevatori raccordati 27
14 Rivestimento con Sollevatori 27
15 Applicazione delle prima chiusura laterale 28
16 Unione Fodera con Rotore 28
17 Vettori che indicano il verso della corrente 29
18 Vettori che indicano la direzione del campo magnetico 29
19 Temperatura del mulino. Zone rosse più calde, blu più fredde 31
20 Vista in asse con massa 32
21 Vista in prospettiva con massa 32
22 Fodera complessiva sottoposta a stress 33
23 Particolare del sollevatore sottoposto a stress 33
24 Confronto motore elettrico rotativo con uno lineare 37
25 Schizzo bidimensionale del profilo del mulino 39
26 Anelli di bobine posti fuori dal telaio del mulino 40
27 Vista in prospettiva della sezione 40
28 Vista in asse della sezione 40
29 Vista esterna del mulino completo 41
30 Vista del flusso magnetico sulle pareti interne del mulino 42
31 Vista della temperatura esterna del telaio 43
32 Vista in asse del piano di sezione con influenza sull'ambiente circostante 43

0.0.1 Introduzione

Nel settore della lavorazione dei materiali, il processo di comminuzione rappresenta una delle operazioni più energivore. In particolare, la fase di macinazione spicca tra le altre proprio per l'elevato consumo di energia, utilizzata per andare a ridurre le dimensioni delle particelle, trasformandole in prodotti adatti alle esigenze dei vari settori industriali.

La comminuzione è un processo molto settorializzato e con fasi ben distinte, tra cui proprio la macinazione. Questo ci permette di concentrarci esclusivamente sul miglioramento dell'efficienza energetica dei mulini adibiti a questo scopo, analizzandone il comportamento energetico e andando a proporre soluzioni innovative per ridurre le perdite, sia a livello teorico che progettuale. Per fare ciò si andrà a studiare le dinamiche fisiche del sistema per poi sviluppare design ottimali per minimizzare le inefficienze.

La parte teorica della tesi prende spunto dalle leggi energetiche sviluppate nel corso degli anni. Una su tutte è la legge di Bond del 1951, la quale offre un importante parametro di riferimento per la valutazione dell'efficienza energetica nei processi di macinazione: l'indice di lavoro di Bond. Tale parametro permette di quantificare l'energia necessaria per la riduzione dimensionale di materiali specifici ed è ampiamente utilizzato in ambito industriale, dandoci quindi un punto di partenza ed un solido riferimento.

L'obiettivo di questo elaborato è duplice: da un lato, comprendere come l'energia viene sprecata analizzandone la distribuzione e la dissipazione all'interno dei mulini cilindrici rotanti; dall'altro, proporre soluzioni progettuali che permettano di ottimizzarne le prestazioni energetiche. In particolare cercare di proporre soluzioni che si potrebbero realmente implementare andando ad utilizzare logiche di processi di macinazione differenti da quelle viste fino ad oggi. Il lavoro è strutturato come di seguito:

1. Una parte *introduttiva e teorica* iniziale che fornisce una panoramica sul processo di macinazione, includendo una descrizione delle principali tecnologie esistenti e delle leggi energetiche storiche che ne regolano il processo.

2. Una parte *analitica e progettuale*, nella quale verranno esplorate possibili innovazioni tecnologiche, soprattutto dal punto di vista del funzionamento meccanico dei macchinari.

3. Un'implementazione di *simulazioni computazionali* per valutare le prestazioni energetiche dei nuovi design proposti.

4. *Conclusioni* in cui si andranno a confrontare i vantaggi e svantaggi tratti dai metodi proposti rispetto a quelli già utilizzati, andando oltretutto a studiare la fattibilità e la convenienza dell'utilizzo di un nuovo impianto rispetto ad uno tradizionale.

Questa tesi intende offrire un contributo concreto al miglioramento dei processi di macinazione, ponendo le basi per soluzioni più efficienti e sostenibili.

1 Comminuzione industriale

Questo capitolo ha l'obiettivo di introdurre alcuni concetti fondamentali per poi comprendere i concetti proposti successivamente, sempre legati al processo di riduzione dimensionale dei materiali. L'estrazione di minerali da cave o miniere rappresenta solo la prima fase di un ciclo produttivo che, attraverso una serie di operazioni, trasforma il materiale grezzo in un prodotto finito o in una materia prima pronta per essere utilizzata in specifici processi industriali.

In questo elaborato, l'attenzione sarà rivolta esclusivamente alla fase di macinazione, un aspetto cruciale della lavorazione dei materiali per via del suo impatto significativo sul bilancio energetico complessivo. La macinazione, si concentra sulla riduzione dimensionale delle particelle fini, distinguendosi dalle operazioni preliminari dedicate alla frantumazione delle frazioni grossolane.

1.1 Definizioni Principali

Definiamo comminuzione o frammentazione l'insieme delle operazioni con scopo di realizzare una riduzione dimensionale e quindi suddividere il materiale di partenza in più corpi solidi con grandezza minore di quella di partenza. A seconda delle dimensioni finali del materiale lavorato, il processo di comminuzione può essere suddiviso in due parti:

- **Frantumazione** quando il materiale in entrata è grossolano (spesso proveniente direttamente dalla cava) mentre in uscita otterremo corpi nell'ordine del centimetro.
- **Macinazione** è una lavorazione successiva per ottenere una riduzione dimensionale ancora più spinta ottenendo corpi che vanno dal centimetro fino a dimensioni micrometriche, o talvolta anche oltre.

1.1.1 Rapporto di Riduzione

Ora introduciamo un parametro fondamentale, il rapporto di riduzione, indicato solitamente con la lettera n. Esso rappresenta il rapporto tra la dimensione massima (D) del materiale in ingresso all'inizio del processo, e la dimensione massima (d) del prodotto elaborato. La formula che esprime la relazione appena citata è la seguente:

$$n = \frac{D}{d} \tag{1}$$

Nella realtà è molto complicato applicare alla lettera tale definizione per via della grossa oscillazione che potrebbe presentare la granulometria di un materiale. Per fare fronte a questo problema si utilizza un miglioramento più pratico che trasforma la formula in: D_{80} [1]

$$n = \frac{D_{80}}{d_{80}} \tag{2}$$

dove i parametri D_{80} e d_{80} corrispondono all'ipotetica dimensione della maglia di un setaccio attraverso cui riescono a passare rispettivamente l'80% del materiale in ingresso al processo e l'80% del materiale ottenuto dopo la comminuzione. Il rapporto di riduzione è il parametro di riferimento nella scelta di una macchina destinata alla riduzione dimensionale dei materiali. Ogni

[1] La granulometria desiderata viene indicata nel pedice

macchinario è progettato per operare in base a un valore specifico di rapporto di riduzione n, che ne determina le caratteristiche prestazionali. I rapporti di riduzione associati ai processi di frantumazione risultano generalmente inferiori rispetto a quelli richiesti per la macinazione. Inoltre, è logico che un aumento del valore di n implica inevitabilmente un incremento dell'energia necessaria per effettuare la comminuzione.

1.1.2 Forze applicate

Le forze responsabili della rottura del materiale, e quindi della sua riduzione dimensionale, possono agire singolarmente o in combinazione. Nei processi industriali di comminuzione, le principali sollecitazioni meccaniche coinvolte sono: compressione, taglio, flessione e urto. Quando una roccia è sottoposta a tali sollecitazioni, inizialmente subisce deformazioni che possono essere elastiche, plastiche o elastoplastiche. La rottura del materiale avviene nel momento in cui la deformazione supera un determinato valore limite, noto come soglia di resistenza.

Per ottenere una frantumazione del materiale le forze prevalenti saranno quelle di compressione ed urto, mentre per macinare il materiale avremo bisogno anche di sforzi di taglio e di abrasione.

1.1.3 Energia utilizzata e Meccanismi di rottura

Per energia di comminuzione, si intende il lavoro richiesto per ridurre alle dimensioni volute il materiale trattato. E' molto importante notare che solamente una quota minima dell'energia totale è destinata direttamente alla rottura del materiale, ed è proprio qui che poniamo l'attenzione perché vogliamo migliorare proprio questo parametro. La restante parte dell'energia è impiegata per il funzionamento degli impianti, ad esempio per la loro messa in moto. L'energia di comminuzione, detta energia netta, può raggiungere valori del 25-30% rispetto all'energia totale fornita all'intero sistema di comminuzione, ciò significa che si avrà una perdita del 75-70% dell'energia totale, che andrà dispersa o dissipata sotto forma di energia termica (calore) o acustica. Più grande sarà il rapporto di riduzione e maggiore sarà l'energia richiesta, di conseguenza i processi di macinazione saranno più energivori di quelli di frantumazione.

I meccanismi di rottura dei materiali rocciosi sono stati analizzati in modo approfondito da Griffith nel 1921, il quale formulò una teoria basata sulla presenza di microfratture interne che fungono da punti di debolezza meccanica. Secondo Griffith, queste microfratture hanno una forma ellittica allungata e un'orientazione variabile. Applicando i principi della meccanica della frattura, si osserva una concentrazione di sforzi di trazione alle estremità delle microfratture, la cui intensità dipende dall'orientazione delle stesse rispetto alla direzione del carico esterno e dalle proprietà meccaniche del materiale.

Un fattore chiave è l'angolo critico, cioè l'orientamento delle microfratture rispetto alla direzione della forza applicata: in determinate condizioni, l'allungamento delle fratture esistenti e la formazione di nuove rotture avvengono con un minore sforzo. Questo processo porta alla frammentazione del materiale in più parti, man mano che le microfratture si espandono e si collegano tra loro. Questa teoria evidenzia un fenomeno molto importante, ovvero che i materiali di dimensioni maggiori richiedono uno stato di sollecitazione inferiore per rompersi, rispetto a materiali più piccoli. Questo perché le particelle di dimensioni ridotte contengono un numero inferiore di microfratture, richiedendo quindi tensioni maggiori per fratturarsi.

La teoria di Griffith dimostra che la frattura avviene quando l'energia rilasciata durante la deformazione supera l'energia necessaria a creare nuove superfici. Nei materiali fragili, l'energia è dissipata principalmente attraverso la propagazione delle fratture, mentre nei materiali duttili l'energia viene assorbita tramite deformazione plastica, con gli atomi che scivolano l'uno sull'altro senza generare nuove fratture.

Dal punto di vista economico, l'energia necessaria per la comminuzione può essere ridotta in presenza di acqua o di additivi chimici, come tensioattivi, che diminuiscono la resistenza a rottura del materiale. Questi additivi agiscono abbassando l'energia superficiale necessaria per la propagazione delle fratture, rendendo il processo complessivamente più efficiente.

2 Macinazione

La macinazione è l'ultimo stadio del processo di comminuzione. E' un'operazione meccanica che utilizza l'energia immessa per ridurre le dimensioni dei frammenti di un materiale grazie alle azioni congiunte delle forze d'impatto e di abrasione, in modo da ottenere un livello di finezza molto elevato, fino all'ordine dei micrometri. La macinazione può essere divisa in diversi processi.

1. *Macinazione Primaria*: operazione che permette di ridurre frammenti di materiale di qualche centimetro di diametro in sabbie, ottenendo un prodotto di dimensioni comprese tra 6 e 0,5 mm ed grazie a rapporti di riduzione indicativamente tra 15 e 50;

2. *Macinazione Secondaria o Fine*: si ottengono polveri fino all'ordine del centinaio di micrometri, tramite rapporti di riduzione fino a 100;

3. *Micronizzazione o Polverizzazione*: il materiale viene ridotto fino a particelle di dimensioni pari a qualche micron o inferiori. I rapporti di riduzione arrivano fino a 200.

Inoltre si possono distinguere due principali tecniche operative: macinazione a secco e macinazione a umido, ciascuna con caratteristiche, vantaggi e limitazioni specifiche che le rendono adatte a diversi contesti industriali.

Macinazione a Secco. La macinazione a secco viene utilizzata principalmente quando i processi successivi alla macinazione richiedono condizioni asciutte. Questa tecnica produce alte pressioni per via del maggior attrito, ciò significa che sono richiesti macchinari più resistenti per sopportare elevate sollecitazioni meccaniche. È la soluzione più comune nell'industria, in particolare per la produzione di particelle fini di morfologia piatta.

Tuttavia, la macinazione a secco presenta alcuni svantaggi. Il primo è la produzione di polveri fini, infatti la sovramacinazione[2] genera particelle estremamente fini, rendendo necessaria l'installazione di sistemi di captazione per evitare che le polveri si disperdano nell'ambiente di lavoro. Il secondo è l'umidità limitata, poiché il materiale trattato non deve superare un'umidità del 2-3%; per livelli superiori è necessario un processo di essiccazione prima della macinazione. D'altro canto, la macinazione a secco offre vantaggi come un'usura minore delle parti interne del mulino e un peso inferiore di carica macinante e rivestimenti rispetto alla macinazione a umido.

Macinazione a Umido. Per avere un'efficienza migliore della macinazione a secco, si passa a quella ad umido. Durante questa operazione si genera un impasto liquido, chiamato torbida, che deve possedere una consistenza specifica: abbastanza viscosa da aderire ai corpi macinanti ma sufficientemente fluida per garantire una corretta circolazione all'interno del mulino. La diluizione ottimale della torbida dipende dalla composizione granulometrica del solido da macinare, infatti più esso sarà fine, tanto maggiore sarà la quantità di liquido necessaria.

I principali vantaggi della macinazione a umido sono un minore consumo energetico, infatti è mediamente richiesto il 30% in meno di energia per tonnellata trattata rispetto alla macinazione a secco. L'assenza di polveri, che elimina i problemi legati alla dispersione delle particelle fini, riducendo i costi per l'installazione di sistemi di abbattimento. Tuttavia presenta anche degli svantaggi,

[2] Quando il materiale viene macinato più del dovuto

quali un'usura maggiore, dove sia i corpi macinanti che le pareti interne del mulino subiscono un deterioramento più rapido. Una maggiore difficoltà operativa, perché è richiesta un'attenta gestione per garantire una buona dispersione delle particelle nella torbida e per evitare problemi di sedimentazione.

Confronto e Considerazioni Generali. Le due tecniche di macinazione non sono in competizione ma complementari, poiché ciascuna è più indicata per specifiche condizioni operative. La scelta tra macinazione a secco e a umido dipende da fattori come il tipo di materiale, i requisiti del processo industriale e le condizioni ambientali. La macinazione è inoltre caratterizzata da una significativa inefficienza energetica. Gran parte dell'energia cinetica dei corpi macinanti si dissipa in forma di calore, rumore e vibrazioni, lasciando solo una frazione effettivamente impiegata per la rottura delle particelle. Nonostante l'evoluzione dei design dei mulini, il processo rimane altamente dispendioso, poiché la frattura avviene attraverso urti ripetuti e casuali che spesso rompono sia le particelle già liberate sia quelle ancora da liberare.

Meccanismi di Rottura La macinazione è un processo più casuale rispetto alla frantumazione e può avvenire attraverso diversi meccanismi:

- *Impatto o compressione*: Forze perpendicolari alla superficie della particella che causano la rottura.
- *Scheggiamento*: Forze oblique che provocano una frammentazione parziale.
- *Abrasione*: Forze parallele alle superfici che erodono gradualmente il materiale.

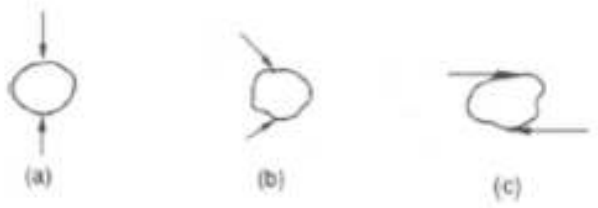


Figura 1: Meccanismi di Rottura: (a) impatto o compressione, (b) scheggiamento, (c) abrasione

Questi meccanismi, combinati con il movimento casuale dei corpi macinanti, rendono la macinazione un processo complesso e probabilistico, in cui è difficile controllare l'efficienza e ottimizzare il consumo energetico. Tuttavia, l'adozione di tecniche di macinazione più efficienti e l'impiego di tecnologie innovative possono contribuire a ridurre gli sprechi e migliorare le prestazioni complessive.

2.1 Mulini Cilindrici

I mulini cilindrici sono macchine a struttura cilindrica ad asse orizzontale, progettate per ruotare ad alta velocità. Al loro interno vengono collocati corpi macinanti che, in combinazione con il movimento rotatorio, riducono le dimensioni del materiale in ingresso attraverso meccanismi come compressione, urto, taglio e abrasione. Questi corpi macinanti, generalmente costituiti da sfere o

barre, variano per dimensioni e materiale, adattandosi alla granulometria del materiale da trattare: più piccoli per materiali fini, più grandi per particelle grossolane.

I mulini rotanti sono ampiamente utilizzati nell'industria mineraria per la macinazione di particelle con dimensioni iniziali tra 5 e 250 mm, riducendole fino a granulometrie comprese tra 40 e 300 µm. A seconda delle esigenze, esistono diverse configurazioni, tra cui mulini quadrati, mulini tubolari (con lunghezza fino a quattro volte il diametro) e mulini a camere. Questi ultimi, utilizzati principalmente nella macinazione a secco di materiali come clinker di cemento, dividono il volume interno in sezioni separate da setti forati, che regolano il passaggio del materiale e ne consentono una riduzione progressiva.

Parametri Operativi dei Mulini.

- *Grado di Riempimento* (Δ), generalmente varia tra il 30% e il 55%.

$$\Delta = \frac{V_{carica}}{V_{totale}} \cdot 100 \tag{3}$$

  - V_{carica}: volume occupato da corpi macinanti e materiale da macinare.
  - V_{totale}: volume totale del mulino.

- *Densità della Carica* (ρ_c), dipende dal materiale dei corpi macinanti. Ad esempio:
  - Acciaio e ghisa: $7000 kg/m^3$
  - Blocchi di silice: $2700 kg/m^3$
  - Allumina sinterizzata: $3400 kg/m^3$

- *Velocità Critica* (ω_c), è la velocità di rotazione alla quale i corpi macinanti si trovano in uno stato di centrifugazione. Si calcola con la formula:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2g}{D}} \tag{4}$$

  - D: diametro interno del mulino.
  - g: accelerazione di gravità.

  In pratica, la velocità operativa del mulino è espressa come percentuale della velocità critica per trovare un compromesso ottimale tra efficienza e stabilità.

- *Consumo dei Corpi Macinanti*
  - Macinazione a umido: l'usura è causata dall'abrasione tra corpi macinanti, materiale lavorato e corrosione dovuta al contatto con il liquido.
  - Macinazione a secco: l'usura è dovuta esclusivamente all'abrasione, riducendo il consumo complessivo.

- *Potenza di Macinazione* (P), è la potenza necessaria per ridurre una determinata quantità di materiale da una granulometria iniziale a una finale. Si calcola come:

$$P = W \cdot Q \tag{5}$$

- W: energia specifica richiesta per macinare il materiale.
- Q: portata di alimentazione del processo.

Una formula più dettagliata associa la potenza alle caratteristiche geometriche del mulino:

$$P = K \cdot D^{2.5} \cdot L \cdot \Delta \cdot u \cdot \rho_c \tag{6}$$

- D: diametro del mulino (m).
- L: lunghezza del mulino (m).
- Δ: grado di riempimento (%).
- u: velocità di rotazione (% della velocità critica).
- ρ: densità della carica (kg/m^3).
- K: costante legata alla configurazione del mulino.

- *Rapporto di Riduzione* (n), indica il rapporto tra le dimensioni del materiale in ingresso e quelle in uscita:
  - Mulini a barre: $n = 15 \div 50$.
  - Mulini a sfere: $n = 30 \div 200$.

Non esiste un mulino universale capace di trattare qualsiasi materiale o granulometria. La scelta del mulino e dei suoi parametri operativi dipende dalle proprietà del materiale, dal grado di finezza richiesto e dalle caratteristiche specifiche del processo. Comprendere e ottimizzare i parametri come la velocità di rotazione, il grado di riempimento e la densità della carica è essenziale per garantire un'elevata efficienza e un basso consumo energetico.

2.1.1 Moto della Carica

I mulini rotanti sono dispositivi caratterizzati dall'uso di corpi macinanti liberi, piccoli rispetto al volume del mulino ma pesanti e duri rispetto alle particelle di minerale da trattare. Durante il funzionamento, i corpi macinanti vengono sollevati lungo la parete ascendente del cilindro grazie alla rotazione e all'attrito con la superficie del mulino. Quando raggiungono una posizione di equilibrio dinamico, cadono lungo traiettorie paraboliche, impattando contro il materiale o tra loro. Questo movimento sottopone il materiale a una combinazione di pressioni, attriti e urti, che ne determina la riduzione dimensionale.

La velocità di rotazione del mulino gioca un ruolo cruciale nel determinare il comportamento della carica e, di conseguenza, la qualità del prodotto e l'usura delle parti interne. A velocità basse, la configurazione operativa, detta a **cascata**, favorisce il rotolamento dei corpi macinanti lungo le pareti fino alla punta della carica. Questo comportamento porta a una macinazione per abrasione, che produce particelle fini, ma comporta un'usura elevata dei rivestimenti e una maggiore formazione di melma. Al contrario, a velocità più elevate si realizza la configurazione a **cataratta**, in cui i corpi macinanti seguono una traiettoria parabolica e impattano direttamente sul materiale. Questo tipo di macinazione, dominata dagli impatti, genera particelle più grossolane e riduce l'usura dei rivestimenti rispetto alla configurazione a cascata.

Un'ulteriore condizione, da evitare assolutamente, è quella in cui la velocità del mulino raggiunge o supera la velocità critica. In questo caso, i corpi macinanti vengono centrifugati contro le pareti del cilindro, perdendo il movimento relativo rispetto al materiale da macinare, con un conseguente blocco dell'azione macinante. Per garantire un funzionamento ottimale, i mulini operano tipicamente tra il 50% e il 90% della velocità critica, bilanciando la capacità produttiva con l'efficienza energetica e l'usura delle parti.

Il comportamento dei corpi macinanti e del materiale all'interno del mulino è determinato da due fasi principali del loro moto: nella fase di sollevamento, il movimento è circolare e segue le pareti del cilindro, mentre nella fase di caduta il movimento diventa parabolico, culminando nella punta della carica, dove avviene la maggior parte della macinazione. In particolare, la configurazione a cataratta sfrutta al massimo l'energia cinetica dei corpi macinanti per garantire impatti efficaci sulla carica del mulino e quindi sul materiale da macinare, riducendo al minimo il contatto diretto con le pareti, che altrimenti comporterebbe un'usura eccessiva del rivestimento interno.

Le dinamiche operative di un mulino rotante rappresentano un delicato equilibrio tra efficienza e sostenibilità. La scelta della velocità di rotazione, combinata con un'adeguata configurazione del sistema, consente di ottimizzare il consumo energetico andando ad aumentare la capacità produttiva e minimizzare l'usura dei componenti, assicurando un funzionamento efficace e duraturo.

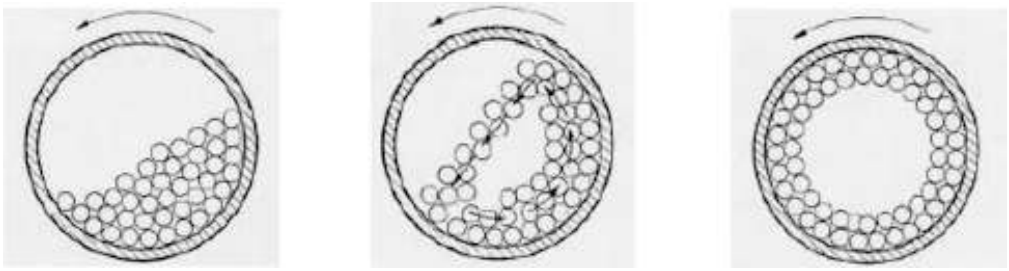


Figura 2: a: Configurazione a Cascata, *b*: Configurazione a Cataratta, *c*: Centrifugazione.

2.1.2 Mulini a Barre

I mulini a barre sono macchine usate per la macinazione grossolana o come granulatori. Funzionano con un cilindro orizzontale cavo che contiene barre metalliche pesanti. Queste, sollevate dalla rotazione del mulino, ricadono sul materiale frantumandolo. La lavorazione può avvenire in ciclo aperto, dove il materiale entra ed esce senza controllo delle dimensioni, o in ciclo chiuso, dove un classificatore separa le particelle già macinate da quelle che richiedono ulteriori lavorazioni.

Una caratteristica distintiva dei mulini a barre è il rapporto tra lunghezza e diametro del cilindro, compreso tra 1,5 e 2,5. Questo evita che le barre, più corte di pochi centimetri rispetto alla lunghezza del mulino, si incastrino durante la rotazione. Per evitare deformazioni o rotture, le barre non superano i 6 metri e sono realizzate in materiali resistenti come ghisa o acciaio ad alto contenuto di carbonio. Questi materiali riducono i costi operativi, consentendo alle barre di consumarsi fino a dimensioni minime senza compromettere il funzionamento.

Il prodotto dei mulini a barre presenta una curva granulometrica stretta, con una percentuale limitata di particelle fini e finissime. Questa caratteristica li rende adatti per produrre sabbie per calcestruzzi. Le operazioni possono essere a secco o a umido. La lavorazione a umido offre vantaggi come un miglior controllo della produzione, l'eliminazione delle polveri e il recupero delle frazioni fini.

Le superfici interne dei mulini sono rivestite con fodere progettate per resistere all'usura e agli urti, favorendo il movimento del materiale. Questi rivestimenti, costruiti in ghisa, acciaio fuso o materiali alternativi come l'allumina sinterizzata e la gomma, sono scelti in base all'applicazione. Nell'industria ceramica si preferiscono materiali non metallici per evitare contaminazioni che comprometterebbero il prodotto. I rivestimenti in gomma, nonostante offrano vantaggi come maggiore durata, riduzione del rumore e facilità di installazione, presentano limiti in ambienti con temperature elevate o con l'uso di alcuni reagenti chimici.

I mulini a barre possono essere classificati in base al sistema di alimentazione e scarico. I modelli con scarico all'estremità accolgono il materiale da un lato e lo rilasciano dall'altro, mentre quelli con scarico centrale distribuiscono il materiale lavorato attraverso canali circonferenziali posti al centro del cilindro. Questa configurazione è preferita per ottenere prodotti grossolani con una minima percentuale di fini.

Dal punto di vista operativo, i mulini a barre lavorano tra il 50% e il 65% della velocità critica, favorendo una configurazione a cascata in cui le barre mantengono un movimento parallelo, agendo come rulli frantumatori. Questo metodo garantisce una macinazione efficace, con rapporti di riduzione compresi tra 15 e 50, inferiori a quelli dei mulini a sfere. Infine, il consumo delle barre varia in base al tipo di lavorazione. Nella macinazione a umido si registra un consumo di acciaio tra $0,1kg$ e $1,0kg$ per tonnellata di materiale trattato, mentre nella macinazione a secco il consumo è inferiore.

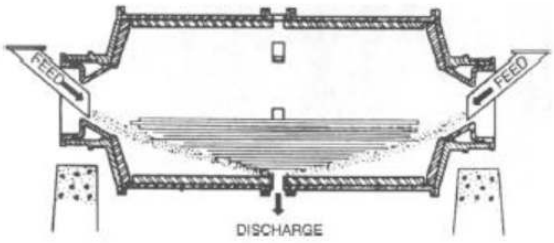


Figura 3: Mulino con scarico centrale

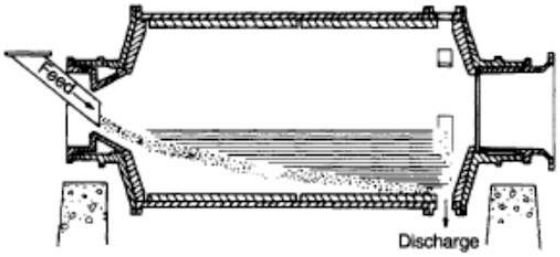


Figura 4: Mulino con scarico all'estremità

2.1.3 Mulini a Sfere

I mulini a sfere sono macchine utilizzate per la macinazione di materiali attraverso corpi macinanti sferici, che generano la rottura delle particelle per effetto degli impatti. Questi corpi macinanti, realizzati generalmente in acciaio o ghisa, possono riempire fino a circa la metà del volume del mulino. Le sfere, grazie alla loro maggiore area superficiale per unità di peso rispetto alle barre, sono particolarmente adatte per la produzione di particelle fini, rendendo i mulini a sfere ideali per ottenere granulometrie comprese tra $10\mu m$ e $500\mu m$, tipiche dell'industria ceramica.

L'alimentazione dei mulini a sfere deve rispettare un valore massimo di D_{80} compreso tra $10mm$ e $25mm$. Superare questa soglia richiederebbe l'uso di mulini di diametro maggiore, con conseguente riduzione dell'efficienza di macinazione. A differenza dei mulini a barre, i mulini a sfere non sono vincolati dalla lunghezza dei corpi macinanti, il che permette una maggiore flessibilità nel rapporto lunghezza/diametro. Questo rapporto può variare da $1:1$ fino a $2:1$ o oltre, in base al tipo di circuito, al minerale lavorato, alla dimensione massima dell'alimentazione e alle esigenze specifiche del processo.

I mulini a sfere possono essere classificati in base al sistema di scarico. I mulini con scarico assiale, utilizzati principalmente per la macinazione fine, offrono semplicità operativa e un consumo energetico inferiore di circa il 15% rispetto ai mulini con griglia di scarico. Questi ultimi, invece, sono adatti sia alla macinazione a secco che a umido e riducono il tempo di permanenza delle particelle all'interno del mulino, limitando la sovramacinazione e favorendo una granulometria più grossolana.

La macinazione avviene nel punto di contatto tra le sfere e le particelle di minerale, ed è un processo casuale in cui ogni particella, sia essa grossolana o fine, ha la stessa probabilità di essere colpita. L'efficienza della macinazione dipende da diversi fattori, tra cui la densità della polpa, che deve essere la più alta possibile compatibilmente con la fluidità del sistema. Un'eccessiva diluizione della polpa aumenta i contatti metallo-metallo, portando a un maggiore consumo delle sfere e a una riduzione dell'efficienza. Si consiglia una concentrazione di solidi compresa tra il 65% e l'80% in peso.

La dimensione delle sfere varia a seconda del tipo di macinazione. Nella macinazione primaria si utilizzano sfere di diametro compreso tra $5cm$ e $10cm$, mentre nella macinazione secondaria si preferiscono sfere di diametro tra $2cm$ e $5cm$. Il consumo delle sfere varia in base alle caratteristiche del minerale e al processo, oscillando tra $0,1kg$ e $1,0kg$ per tonnellata di materiale trattato. Le sfere, generalmente sferiche, possono essere costruite anche in forme cilindriche o coniche, e devono avere una durezza uniforme per garantire un consumo regolare. I principali meccanismi di usura sono abrasione, corrosione e impatto, con l'abrasione che rappresenta la causa principale di perdita di materiale.

I rivestimenti interni dei mulini a sfere sono progettati per resistere all'usura e favorire il movimento della carica. Materiali come ghisa, acciaio al manganese e leghe al cromo sono usati per rivestimenti robusti, mentre la gomma, spesso preferita per la riduzione del rumore e la facilità di installazione, trova applicazione in condizioni meno abrasive. Rivestimenti sagomati a spirale o con sporgenze favoriscono la miscelazione della polpa e il trasporto del materiale verso l'uscita, migliorando la produttività e riducendo il consumo energetico.

Dal punto di vista operativo, i mulini a sfere lavorano tra il 70% e l'80% della velocità critica. A velocità più elevate, le sfere più grandi operano in configurazione a cataratta, impattando direttamente sulle particelle più grossolane. Questo approccio è ideale per la macinazione di materiali duri o grossolani, garantendo rapporti di riduzione elevati compresi tra 30 e 200, superiori rispetto ad altri tipi di mulini. La flessibilità operativa e la capacità di ottenere granulometrie estremamente fini rendono i mulini a sfere una soluzione versatile ed efficiente per diverse applicazioni industriali.

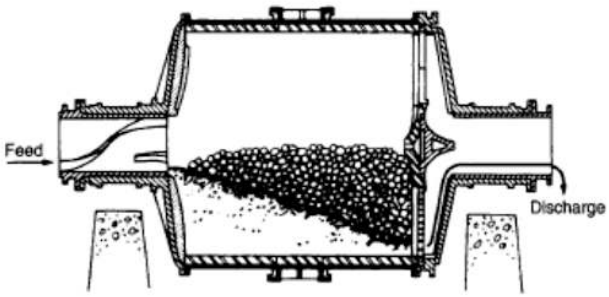


Figura 5: Mulino a sfere con griglia di scarico

3 Analisi Energetica dei Mulini

3.1 Leggi Energetiche

La comminuzione è un processo caratterizzato da un'elevata richiesta energetica, motivo per cui la valutazione del consumo di energia riveste un ruolo cruciale nell'industria. Le leggi matematiche che descrivono questo fenomeno si basano sulla relazione tra l'energia impiegata e l'entità della riduzione dimensionale del materiale trattato. Tuttavia, una delle principali difficoltà nell'analisi dell'efficienza dei sistemi di macinazione e frantumazione risiede nel fatto che solo una piccola frazione dell'energia totale fornita alla macchina è effettivamente utilizzata per la rottura del materiale, mentre la maggior parte viene assorbita dal sistema stesso sotto forma di calore, vibrazioni e deformazioni non utili al processo. Inoltre, misurare con precisione l'energia realmente assorbita da un corpo sottoposto a comminuzione risulta complesso, poiché il processo coinvolge molteplici variabili difficili da isolare.

Sebbene nel tempo siano state sviluppate diverse leggi per correlare l'energia fornita alla macchina con il grado di riduzione dimensionale ottenuto, nessuna di esse si è rivelata del tutto soddisfacente. In particolare, esiste un legame tra l'energia richiesta per la frattura del materiale e la nuova superficie generata, ma questa relazione può essere determinata solo se l'energia destinata specificamente all'aumento della superficie è misurabile separatamente. Studi sperimentali hanno evidenziato che nei mulini a sfere meno dell'1% dell'energia totale è effettivamente utilizzata per la macinazione, mentre il resto si dissipa in calore e altre forme di energia non direttamente impiegabili per la riduzione dimensionale.

Ora verranno illustrate alcune delle principali teorie sviluppate nel tempo per descrivere il comportamento energetico della comminuzione. Sebbene basate principalmente su osservazioni empiriche, queste leggi forniscono strumenti utili per l'analisi e l'ottimizzazione dei processi industriali.

3.1.1 Legge di Rittinger

La legge di Rittinger, formulata nel 1867, si basa sull'idea che l'energia necessaria per ridurre la dimensione di un materiale sia direttamente proporzionale all'aumento della sua superficie specifica. Questo concetto si fonda sull'ipotesi che tutta l'energia impiegata nella frammentazione venga trasformata in energia superficiale, senza dispersioni in deformazioni o altri effetti secondari. Inoltre, affinché questa teoria sia valida, è necessario che il materiale di partenza sia strutturalmente integro e che le superfici create siano nuove, senza fratture preesistenti che possano ridurre l'energia effettivamente assorbita nel processo.

Secondo Rittinger, se un blocco di materiale con dimensione iniziale D viene suddiviso in N frammenti di dimensione d, la superficie specifica risultante sarà proporzionale a $1/d$. Questo porta alla formulazione della legge di Rittinger nella forma:

$$W = K(\frac{1}{d} - \frac{1}{D}) \tag{7}$$

dove K è un parametro che dipende dal materiale. Introducendo il rapporto di riduzione n, definito come $n = \frac{D}{d}$, la formula può essere riscritta come:

$$W = K(\frac{1-n}{D}) \tag{8}$$

Questa legge trova la sua principale applicazione nei processi di macinazione di materiali molto fini, dove l'aumento della superficie specifica per unità di massa è particolarmente elevato.

3.1.2 Legge di Kick

La legge di Kick, formulata nel 1885, si basa sul principio che l'energia necessaria per modificare la configurazione di un corpo di materiale uniforme e geometricamente simile sia proporzionale al suo volume. Secondo questa teoria, l'energia impiegata per la frantumazione è interamente energia di deformazione, senza considerare l'aumento della superficie specifica. Kick sostiene che l'energia richiesta per ridurre un materiale da una dimensione iniziale D a una dimensione finale d dipenda dal rapporto di riduzione in modo logaritmico, secondo la formula:

$$W = K' \ln(\frac{D}{d}) \tag{9}$$

dove K' è una costante che dipende dal materiale e dalla macchina utilizzata. Un aspetto chiave della teoria di Kick è che l'energia richiesta per unità di massa rimane costante indipendentemente dalle dimensioni iniziali del materiale. Ciò significa che, se un materiale viene ridotto prima da D_1 a D_2 e poi da D_2 a D_3, e se il rapporto di riduzione $\frac{D_1}{D_2}$ è uguale a $\frac{D_2}{D_3}$, allora l'energia necessaria per entrambe le fasi sarà la stessa.

Questa legge è tipicamente applicata nel campo della frantumazione, ovvero per materiali grossolani, poiché in questa fase del processo la variazione della superficie specifica non è il parametro dominante.

3.1.3 Legge di Bond e Contributi successivi

La legge di Bond, proposta nel 1951, rappresenta un modello intermedio tra le teorie di Rittinger e Kick. Secondo Bond, l'energia richiesta per la comminuzione dipende dalla dimensione iniziale delle particelle, ma in modo meno accentuato rispetto al modello di Rittinger. Il principio alla base di questa teoria è che l'energia applicata a un corpo solido si distribuisca inizialmente all'interno della sua massa, risultando proporzionale a D^3, per poi concentrarsi sulla superficie delle fessure quando inizia la rottura, diventando proporzionale a D^2.

Questa teoria ha trovato un ampio impiego industriale perché descrive il comportamento di materiali che presentano caratteristiche intermedie tra quelli per cui sono validi i modelli di Rittinger e Kick, come particelle non perfettamente integre e di dimensioni intermedie tra molto fini e grossolane. L'energia richiesta per la comminuzione è espressa dalla formula:

$$W = \frac{K''}{\rho_s} \cdot (\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}) \tag{10}$$

dove K'' è una costante dipendente dal materiale e dalla macchina utilizzata e ρ_s è la densità del materiale.

Indice di macinabilità di Bond. Un concetto fondamentale introdotto da Bond è proprio l'indice di macinabilità di Bond, o Work Index (w_i), rappresenta l'energia necessaria per ridurre una

tonnellata di materiale da una dimensione iniziale teoricamente infinita a una granulometria finale di $100\mu m$. Esso è rappresentato dalla formula:

$$w_i = \frac{K''}{\rho_s} \cdot (\frac{1}{100} - \frac{1}{\sqrt{\infty}}) \tag{11}$$

Questo indice, specifico per ogni materiale, permette di calcolare direttamente l'energia richiesta per qualsiasi processo di riduzione dimensionale tra due dimensioni D e d, secondo la formula:

$$W = 10 \cdot w_i \cdot (\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}) \tag{12}$$

L'indice di Bond è largamente adottato nell'industria della macinazione per stimare il dispendio energetico di un processo e confrontare la lavorabilità di materiali diversi. Sebbene sia stato sviluppato su basi empiriche e la sua determinazione avvenga in laboratorio, esso rimane uno strumento fondamentale per la progettazione degli impianti industriali. Per adattare il modello alle condizioni operative reali, Bond ha introdotto coefficienti correttivi che migliorano l'accuratezza delle stime energetiche, ancora oggi utilizzati nella pratica ingegneristica.

Grazie alla sua ampia applicabilità e affidabilità, la legge di Bond è tuttora il riferimento principale per il calcolo del consumo energetico nella comminuzione, nonostante le sue limitazioni nel rappresentare in modo preciso il fenomeno della macinazione.

3.1.4 Legge di Charles

La legge di Charles, formulata nel 1972, rappresenta un modello energetico generale che riassume in un'unica espressione le teorie di Rittinger, Kick e Bond. L'energia richiesta per la comminuzione è definita dalla relazione:

$$W = -C\frac{dx}{x^n} \tag{13}$$

- x è la dimensione iniziale del materiale,
- dx è la variazione dimensionale subita,
- C è una costante dipendente dalle proprietà del materiale,
- n è una costante legata al campo di macinazione considerato.

A seconda del valore di n, la legge di Charles può descrivere i diversi modelli energetici:

- Per $n = 2$ si ottiene la *legge di Rittinger*, applicabile alla macinazione fine.
- Per $n = 1$ si ottiene la *legge di Kick*, adatta alla frantumazione di materiali grossolani.
- Per $n = 1,5$ si ottiene la *legge di Bond*, che rappresenta un modello intermedio applicabile alla macinazione con mulini a barre e a sfere.

Questa formulazione consente di comprendere come all'aumentare del grado di comminuzione richiesto cresca proporzionalmente anche l'energia necessaria per l'operazione, fornendo un quadro completo del consumo energetico in funzione delle dimensioni del materiale lavorato.

4 Progettazione di un Mulino per la Comminuzione

In questo capitolo analizzeremo diverse soluzioni che potrebbero essere implementate per rimpiazzare i metodi tradizionali di comminuzione. Alcune proposte saranno simili a quelle attuali, mentre altre rappresentano ipotesi innovative che, se attuate, potrebbero portare a un notevole miglioramento dell'efficienza.

Innanzitutto, verranno spiegate le idee di fondo alla base di ciascun progetto; successivamente saranno presentati brevemente i componenti scelti per il miglioramento del mulino, con relative spiegazioni e motivazioni.

Per ogni caso verrà analizzato il comportamento dei vari modelli, attraverso simulazioni e ponendo l'attenzione sugli aspetti innovativi rispetto ai mulini tradizionali. Qualora emergano potenziali miglioramenti, verranno discussi e proposti, indicando anche possibili sviluppi futuri per incrementare ulteriormente le prestazioni.

Infine, si metteranno a confronto gli aspetti positivi e negativi di ciascuna soluzione, valutando la fattibilità della loro realizzazione e fornendo una comparazione dei costi rispetto ai modelli attuali.

4.1 Meccanismi di Trasmissione di Potenza

Per andare a capire come poter migliorare il design della macchina, dobbiamo prima capire in quali aree è possibile ottenere un miglioramento. Il meccanismo generale di trasmissione di potenza deve garantire una coppia iniziale sufficientemente elevata per avviare la macchina, e allo stesso tempo mantenere una velocità di rotazione sostenuta senza eccessive perdite di energia.

Analizzando la composizione del meccanismo di trasmissione, si individuano diversi elementi principali:

- *Motore di azionamento*: è la fonte di energia meccanica del mulino, generalmente elettrico o diesel.
- *Cambio*: permette di variare la velocità di rotazione del mulino, aumentando la coppia iniziale quanto necessario.
- *Giunti*: l'accoppiamento che trasferisce la forza dal cambio all'albero principale del mulino può essere elastomerico, a disco, flangiato o a ingranaggi. Questo componente deve assorbire le vibrazioni e ridurre l'impatto dei carichi improvvisi.
- *Cuscinetti*: supportano l'albero e riducono l'attrito.

Metodi di trasmissione. Conosciute ora le componenti principali responsabili del moto del mulino, si possono elencare le principali tipologie di trasmissione di potenza:

- *Trasmissione di potenza diretta*: il motore è collegato direttamente all'albero tramite un giunto, trasferendo la forza motrice senza intermediari. Questo metodo è adatto per mulini di piccole dimensioni che non richiedono molta coppia.
- *Trasmissione di potenza tramite cambio*: è il meccanismo più comune per i mulini di dimensioni medio-grandi. In questo sistema, il cambio permette di aumentare la coppia quando necessario, ad esempio nelle fasi iniziali di avviamento.

- *Trasmissione di potenza attraverso ingranaggi periferici*: in questa configurazione la potenza viene trasmessa tramite una serie di ingranaggi e ruote dentate, che trasferiscono il moto al mulino. È un metodo adatto per mulini ad alta capacità.

- *Trasmissione di potenza centrale*: in alcuni mulini la forza motrice viene trasmessa tramite un ingranaggio centrale, posizionato al centro del cilindro. Questo consente una distribuzione uniforme della forza.

Fattori che incidono sulle Prestazioni. Concentrandosi ora sui fattori che influenzano le prestazioni del meccanismo di trasmissione, è possibile individuare alcuni elementi principali che possono aumentare o diminuire l'efficienza generale. Ovviamente la potenza e la velocità del motore sono i fattori che incidono maggiormente sull'efficienza complessiva del sistema: per questo motivo, i parametri e le caratteristiche del motore devono essere valutati con particolare attenzione.

Un altro elemento che influisce sull'efficienza è la qualità e la precisione nella produzione di giunti e ingranaggi. Questi componenti sono fondamentali per la trasmissione della potenza dal motore al cilindro del mulino e devono minimizzare il più possibile le perdite di energia. Qualsiasi difetto di fabbricazione può comportare una diminuzione dell'efficienza e, di conseguenza, un aumento dei costi a causa dell'energia sprecata.

Infine, è importante considerare la lubrificazione e una manutenzione adeguata. Una corretta lubrificazione di cuscinetti, ingranaggi e altri componenti coinvolti nella trasmissione di potenza riduce notevolmente l'attrito e, di conseguenza, anche l'usura. Questo comporta un duplice vantaggio: da un lato, si prolunga la durata dei componenti, riducendo la frequenza e i costi di manutenzione; dall'altro, diminuisce il consumo di energia grazie alla riduzione dell'attrito.

4.2 Fodera interna del mulino

Se utilizziamo la gomma come superficie di rivestimento interno, si ottengono diversi vantaggi rispetto ai tradizionali rivestimenti in metallo. Innanzitutto, la gomma garantisce una maggiore tenuta stagna, prevenendo la fuoriuscita di liquidi e riducendo l'erosione precoce delle pareti del mulino.

L'installazione risulta più facile, veloce e sicura, grazie a un peso fino all'80% inferiore rispetto a un rivestimento in acciaio. Anche la manutenzione è più rapida e meno frequente, sia per la maggiore durata dovuta a un minore attrito (e quindi a una minore usura), sia perché il peso ridotto facilita le operazioni di rimozione e installazione. Le fodere in gomma sono inoltre progettate per resistere a strappi e tagli provocati dal materiale in macinazione e offrono anche ottime caratteristiche abrasive.

Infine, grazie alla riduzione del peso complessivo, è possibile aumentare il carico del mulino per compensare la differenza di peso rispetto ai rivestimenti metallici, migliorando ulteriormente le prestazioni dell'impianto.

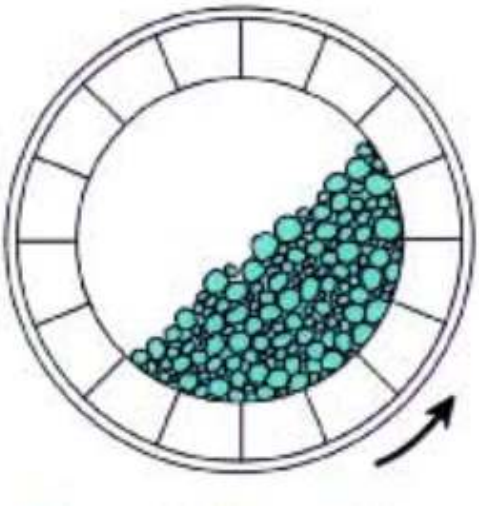


Figura 6: Fodera in acciaio

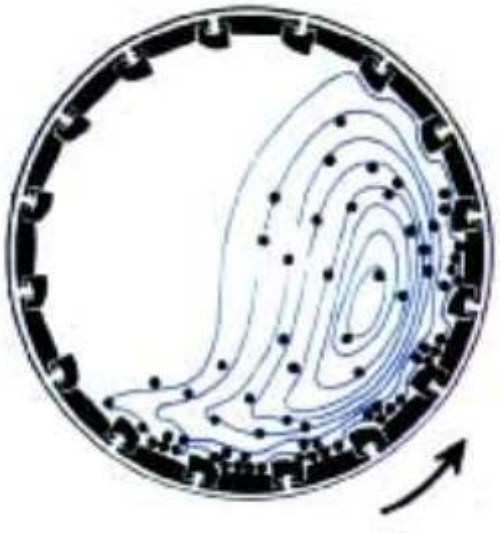


Figura 7: Fodera in gomma con sollevatori

4.2.1 Criteri per la progettazione di rivestimenti in gomma

Progettare correttamente un rivestimento in gomma per un mulino richiede di considerare una serie di fattori operativi e dimensionali. Uno degli aspetti più importanti è la disposizione dei sollevatori: la distanza tra essi può essere variata per favorire una durata superiore del rivestimento, una maggiore capacità produttiva oppure un equilibrio tra questi due aspetti.

Anche le condizioni operative giocano un ruolo chiave. La gomma lavora al meglio a temperature inferiori ai 70°C e in ambienti con pH compreso tra 4 e 7. Sebbene esistano mescole in grado di resistere a temperature o pH più estremi, queste opzioni sono più costose e vengono impiegate solo quando strettamente necessario.

Un altro elemento da considerare è la forma dei sollevatori: questa va scelta in funzione della velocità di rotazione del mulino, del suo diametro e della dimensione media delle sfere utilizzate per la macinazione. L'obiettivo è ottenere una traiettoria ottimale dei corpi macinanti, affinché questi cadano con la giusta energia. Questo tipo di analisi viene spesso condotto tramite software di simulazione dedicati per la progettazione dei mulini.

Infine, lo spessore del rivestimento è un parametro che incide sul diametro interno del mulino: maggiore è lo spessore, minore sarà il volume utile interno e maggiore sarà la potenza richiesta dalla trazione (a mulino scarico).

L'usura della gomma dipende da molti fattori, tra cui la durezza del minerale, la dimensione del materiale in ingresso e le condizioni di frantumazione all'interno del mulino. Per questo motivo, la scelta del materiale del rivestimento deve sempre essere calibrata in base alla specifica applicazione.

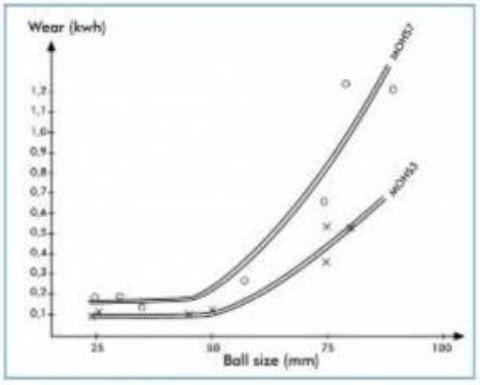


Figura 8: Usura rispetto alla grandezza dei corpi macinanti

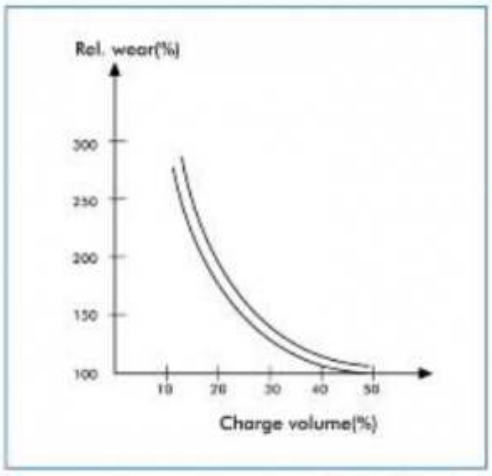


Figura 9: Usura della fodera in funzione della carica del mulino

4.2.2 Fattori che Influenzano lo Spessore delle Pareti del Mulino

Lo spessore delle pareti di un mulino è determinato da molteplici fattori strutturali, operativi e ambientali. Le dimensioni del mulino, in particolare diametro e lunghezza, influiscono direttamente sulle sollecitazioni interne: all'aumentare delle dimensioni, cresce la necessità di rinforzare le pareti. Anche il rapporto tra lunghezza e diametro incide sulla distribuzione delle tensioni lungo la struttura.

Il materiale utilizzato per la costruzione gioca un ruolo fondamentale. Gli acciai al carbonio o legati sono i più comuni, ma spesso vengono impiegati rivestimenti interni in gomma o ceramica per ridurre l'usura e prolungare la durata, permettendo in alcuni casi di alleggerire la struttura portante. Il carico totale esercitato dal materiale da macinare e dalle sfere, combinato con la velocità di rotazione, genera forze centrifughe che aumentano le sollecitazioni radiali e richiedono spessori adeguati per evitare deformazioni e rotture.

Anche le condizioni ambientali possono influire: temperature elevate riducono le prestazioni meccaniche dei materiali, mentre ambienti corrosivi impongono l'adozione di sovraspessori o di materiali protettivi per evitare il degrado nel tempo.

Lo spessore può essere determinato tramite metodi analitici, applicando formule ingegneristiche, oppure con approcci numerici più avanzati, come l'analisi agli elementi finiti. In alcuni casi, dati sperimentali e prove pratiche completano la progettazione, garantendo la massima affidabilità.

4.3 Tipologie di Simulazioni

Possiamo elencare diverse tipologie di simulazioni, che sarà possibile effettuare grazie all'utilizzo di un software multifisico:

- *Conjugate Heat Transfer (IBM)*: simula lo scambio termico tra il fluido (massa interna) e il solido (le pareti interne del mulino), consentendo di valutare l'efficienza della dissipazione del calore e il rischio di surriscaldamento delle componenti.

- *Dynamic Analysis*: analisi tempo-dipendente che tiene conto dell'inerzia dei corpi e permette di valutare le sollecitazioni e le forze agenti su uno o più componenti durante il funzionamento del mulino.
- *Thermomechanical Analysis*: analizza simultaneamente il comportamento termico e strutturale dei materiali, combinando gli effetti delle sollecitazioni termiche e meccaniche (sia in condizioni stazionarie sia variabili nel tempo). Viene spesso applicata alla massa da macinare tramite analisi agli elementi finiti.
- *Electromagnetic Analysis*: simula i fenomeni elettromagnetici, utilizzata in questo caso per studiare i campi magnetici generati dalla corrente elettrica e la loro interazione con i magneti, analizzando forze come la coppia e la potenza trasmessa al mulino.

Soluzioni progettuali. Esploreremo principalmente progetti finalizzati a migliorare l'efficienza dei mulini. Il primo progetto (*Cap. 5, pag. 25*) adotta un approccio tradizionale: interviene sul funzionamento del mulino per ridurre le principali dispersioni di energia, mantenendo però il principio base della comminuzione.

Il secondo progetto (*Cap. 6, pag. 37*) invece, si spinge oltre e mira a rivoluzionare le aree in cui si verificano le maggiori perdite energetiche, modificando radicalmente le soluzioni costruttive per ottenere un miglioramento significativo delle prestazioni.

5 Mulino come Motore Elettrico

In questo progetto si propone di modificare il modello di trazione tradizionalmente utilizzato nei mulini. Solitamente il moto rotatorio è generato da un motore esterno che, tramite una serie di collegamenti meccanici, prevalentemente ruote dentate o cinghie, trasmette la rotazione alla cassa del cilindro. Come visto, ogni sistema di trasmissione, anche se realizzato alla perfezione e correttamente lubrificato, presenta comunque perdite di energia dovute ad attrito, calore e rumore.

Per ridurre queste inefficienze, si può considerare una soluzione alternativa che preveda la movimentazione diretta delle pareti del mulino, eliminando gli elementi intermedi della trasmissione di potenza. In quest'ottica, risulta interessante l'idea di trasformare il mulino in un motore elettrico sfruttando la sua geometria cilindrica. Sebbene esistano diverse tipologie di motori elettrici, il principio di base rimane quello di utilizzare due cilindri (o alberi concentrici), uno dei quali viene messo in rotazione rispetto all'altro grazie alle forze magnetiche.

In questa configurazione, il cilindro della cassa del mulino potrebbe essere pensato come l'elemento rotante del motore (Rotore), allestito in modo da avere una trasmissione di potenza diretta, per essere messo in rotazione. Questa soluzione consentirebbe di eliminare ingranaggi e cinghie, semplificando la catena di trasmissione e riducendo sia i costi di realizzazione che le perdite energetiche dovute ai passaggi intermedi. L'energia di rotazione verrebbe così fornita direttamente al cilindro, limitando le inefficienze quasi esclusivamente al rendimento del motore elettrico stesso.

Tuttavia, questa scelta presenta anche alcune criticità. La principale riguarda la fattibilità tecnica ed economica: se da un lato si riduce la quantità di componenti meccaniche, dall'altro la realizzazione di un motore elettrico integrato direttamente nel cilindro del mulino potrebbe comportare costi molto elevati rispetto alle soluzioni tradizionali. Un altro aspetto da valutare è l'eventuale influenza dei campi magnetici prodotti dal motore sul materiale da macinare, soprattutto se questo è sensibile ai fenomeni di magnetismo. In tal caso, sarà necessario studiare soluzioni di isolamento o schermatura per evitare interferenze con il processo di macinazione.

La ricerca dovrà quindi approfondire sia le possibili strategie di contenimento dei costi, sia le soluzioni tecniche per prevenire effetti indesiderati sul materiale trattato.

5.1 Progettazione CAD

Per poter sperimentare e analizzare diverse configurazioni operative del mulino, è stato necessario partire dalla sua modellazione tridimensionale. Il punto di partenza scelto è stato il modello CAD[3] 3D di un motore elettrico, dal quale si è provveduto a separare il rotore dallo statore. L'attenzione si è concentrata sul rotore, utilizzato come telaio portante del mulino: la sua struttura cilindrica lo rende infatti ideale per ospitare, lungo le pareti interne, i rivestimenti superficiali destinati a interagire con il materiale da macinare.

Per il rivestimento interno è stata progettata una soluzione in gomma, materiale selezionato non solo per la sua compatibilità con i campi elettromagnetici generati dal sistema (in quanto non interferente), ma anche per i vantaggi meccanici già descritti in precedenza. La gomma, essendo notevolmente più leggera rispetto ad altri materiali strutturali, contribuisce a ridurre significativamente le forze d'inerzia durante la rotazione. Una minore inerzia complessiva consente un migliore

[3] Computer-Aided Design

controllo delle operazioni, una maggiore efficienza nella gestione della velocità di rotazione e una riduzione degli sforzi trasmessi agli organi del macchinario.

Dopo questa fase preliminare, il primo intervento sul modello CAD ha riguardato la semplificazione del rotore, eliminando il profilo scanalato interno, elemento non necessario nel nuovo contesto funzionale e fonte di inutile ingombro. Il risultato è un cilindro cavo, pronto a fungere da base per l'inserimento dei componenti specifici del mulino. Sulla superficie esterna di questo cilindro sono stati posizionati magneti permanenti, fissati mediante una scanalatura a coda di rondine che assicura un accoppiamento stabile e sicuro.

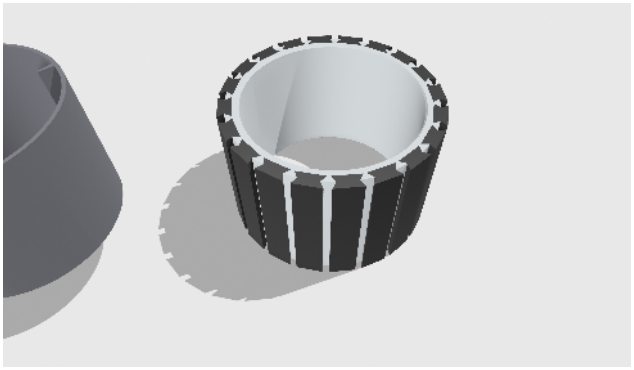


Figura 10: Rotore del motore elettrico, privo di componenti interni

L'intero corpo è stato poi scalato di un fattore dieci per simulare una macchina industriale su scala reale, portando il diametro del cilindro a 2,6 metri. Tale dimensionamento consente di rispettare le proporzioni tipiche dei mulini industriali e di effettuare simulazioni significative dal punto di vista fisico e meccanico.

A questo punto si è proceduto con la modellazione dettagliata del rivestimento interno in gomma. Su di esso sono stati integrati i sollevatori (lifters), componenti indispensabili per sollevare e far ricadere il materiale durante la rotazione, migliorando così l'efficacia della macinazione. Il numero di sollevatori è stato determinato scegliendo un passo di 20 cm tra un elemento e l'altro; con un diametro di 2,6 metri (circa 8,5 piedi) si è ottenuto un numero ottimale pari a circa 40 sollevatori distribuiti lungo la circonferenza.

La geometria dei sollevatori è stata sviluppata a partire da uno schizzo 2D conforme ai criteri progettuali fondamentali. Il volume è stato poi ricavato tramite un'estrusione dalla fodera in gomma e replicato lungo l'intero perimetro interno mediante una funzione di rotazione attorno al centro della circonferenza. Tutti gli spigoli dei sollevatori esposti all'interno, soggetti a urti e sollecitazioni, sono stati raccordati per migliorare la resistenza e la durata.

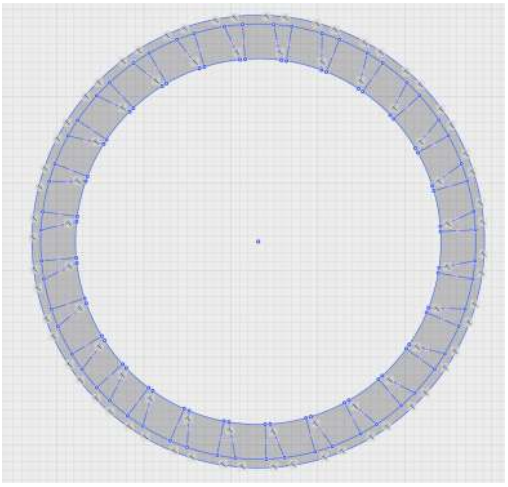


Figura 11: Schizzo sul da ricavare sul pieno della fodera

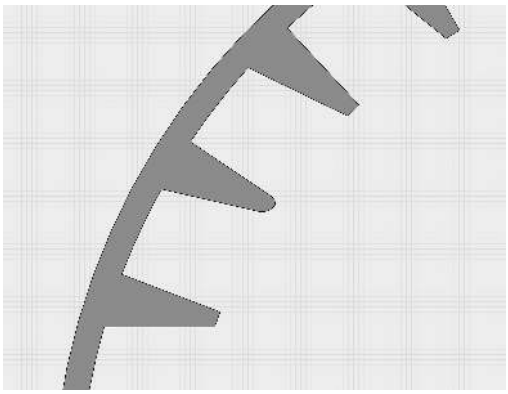


Figura 12: Raccordo del sollevatore

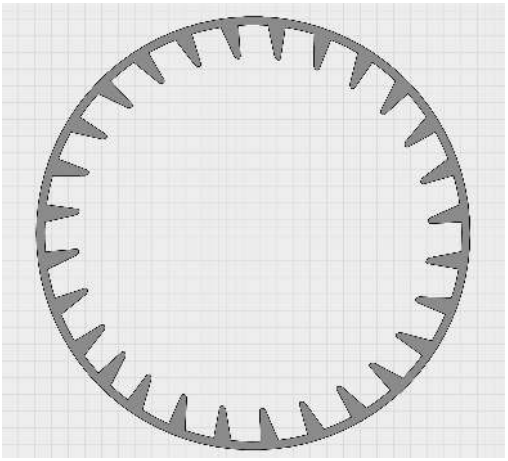


Figura 13: Fodera del mulino con sollevatori raccordati

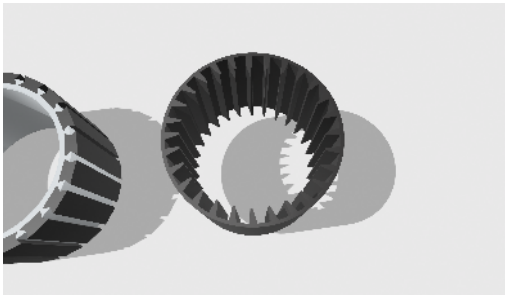


Figura 14: Rivestimento con Sollevatori

Successivamente, il rivestimento è stato unito alla cassa del rotore, formando un corpo unico, coerente con la struttura portante. Sono state poi inserite le chiusure laterali del mulino, necessarie per rendere il modello realistico dal punto di vista fisico e per prepararlo alle simulazioni di funzionamento.

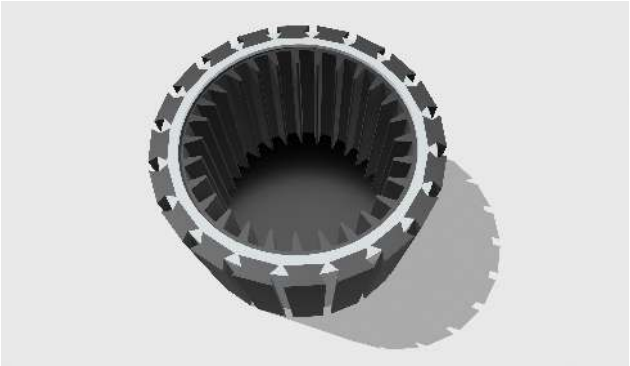


Figura 15: Applicazione delle prima chiusura laterale

Infine, è stato aggiunto lo statore esterno, anch'esso scalato di un fattore dieci, così da completare l'architettura del sistema motore-mulino e consentire l'avvio delle simulazioni previste nella fase successiva dell'esperimento.

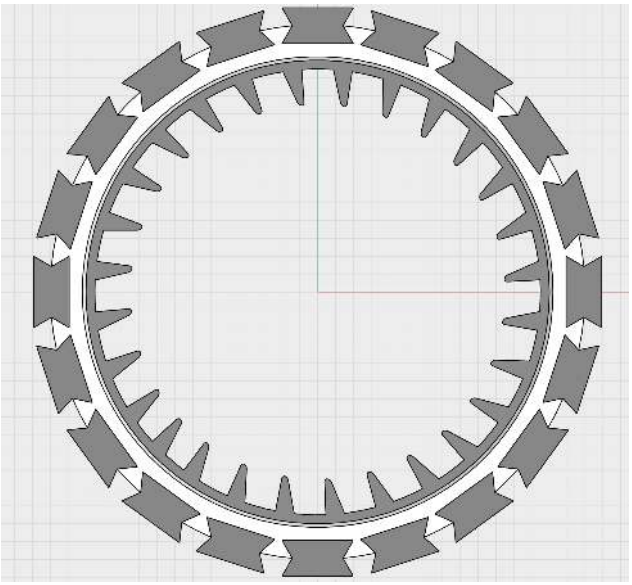


Figura 16: Unione Fodera con Rotore

5.1.1 Simulazione elettromagnetica

Dopo aver completato la modellazione tridimensionale del mulino, si è passati alla preparazione della simulazione elettromagnetica, finalizzata a valutare la distribuzione del campo magnetico generato e la sua interazione con i materiali costituenti la macchina.

Il primo passaggio ha riguardato la definizione dell'area di analisi, ovvero lo spazio entro cui il software calcola la propagazione dei flussi elettromagnetici. È stato creato un volume di analisi di 7×7 metri, con il mulino posizionato al centro, per garantire un campo di osservazione sufficientemente ampio e privo di interferenze ai bordi.

Successivamente, si è proceduto con l'assegnazione dei materiali a ciascun componente del sistema, scelta fondamentale per determinare la corretta risposta del modello durante la simulazione. In particolare:

- Gomma per il rivestimento interno e le fodere laterali;
- Acciaio inossidabile per il telaio (cassa del rotore e dello statore), selezionato per le proprietà meccaniche e la relativa stabilità magnetica;
- Rame per le bobine, materiale altamente conduttivo necessario a generare il campo magnetico tramite passaggio di corrente;
- Acciaio dolce tipo M19 per i magneti permanenti (con curva B-H definita);
- Aria per il volume esterno, al fine di rappresentare correttamente il comportamento del campo in assenza di materia.

Dopo aver definito i materiali, il modello è stato sezionato lungo i suoi assi principali per ottenere superfici selezionabili, utili all'impostazione del flusso di corrente nelle bobine. Per ciascuna bobina è stata scelta una tipologia chiusa, assegnando la faccia interna come area di flusso. È stata posta particolare attenzione all'uniformità del verso del flusso tra le diverse bobine: un'inversione avrebbe generato un campo magnetico opposto, compromettendo la coerenza del sistema e producendo forze indesiderate e contrarie. Le bobine utilizzate in simulazione presentano le seguenti caratteristiche:

- Diametro del filo: $1mm$
- Numero di avvolgimenti: 6000
- Corrente: $5A$

Prima di procedere con il calcolo finale, è stata eseguita una verifica per rimuovere eventuali interferenze tra i corpi, così da evitare errori di compenetrazione nel modello. Infine, è stata generata la *mesh*[4] del dominio, suddividendo il volume in celle finite per consentire al software di eseguire la simulazione secondo i principi dell'analisi agli elementi finiti (FEM).

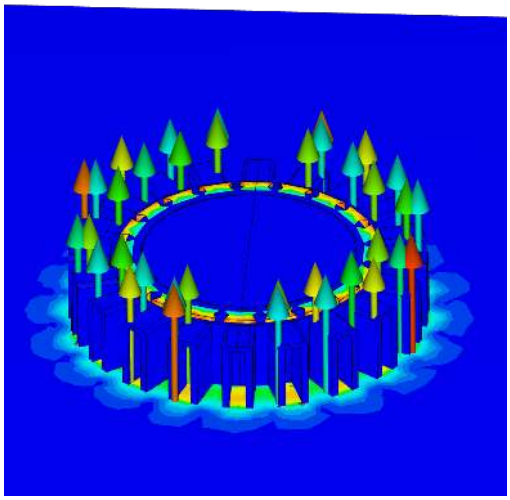


Figura 17: Vettori che indicano il verso della corrente

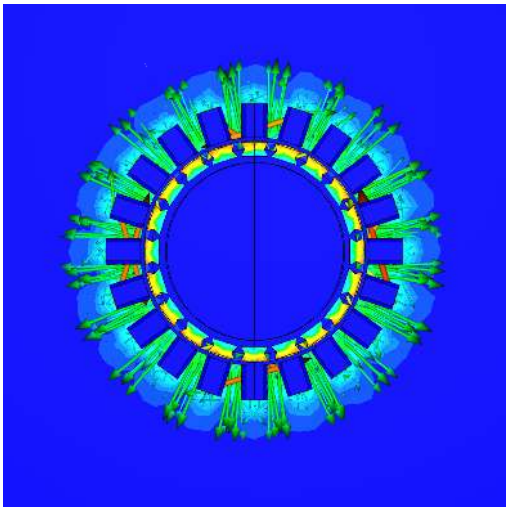


Figura 18: Vettori che indicano la direzione del campo magnetico

[4]Operazione del calcolatore che crea una superficie da analizzare, passando da un dominio infinito ad uno discreto sui cui si possono effettuare calcoli

Dalle immagini ottenute possiamo dire che il modello si comporta proprio come un normale motore elettrico. L'obiettivo principale di ottenere un mulino con una trasmissione diretta grazie all'elettromagnetismo, ispirandosi ad un comune motore elettrico, si può dire quindi raggiunto. Chiaramente le dimensioni così grandi vanno ad inficiare sulle performance, che risentono soprattutto del peso molto elevato.

5.1.2 Simulazione Termica

Tentativo di simulazione termica con modello Conjugate Heat Transfer (CHT). Nel tentativo di approfondire gli aspetti termici legati al funzionamento del mulino, è stata inizialmente considerata una simulazione basata sul modello Conjugate Heat Transfer (CHT), una metodologia che permette di analizzare lo scambio termico tra un fluido e un solido. L'obiettivo era approssimare il comportamento termico della massa da macinare trattandola come fluido, per poterla poi andarla a comparare con un solido, ovvero le pareti del mulino.

Per questa analisi, è stato creato un volume interno di fluido che riempiva metà mulino, simulando un grado di riempimento del 50%. Sono stati quindi impostati i parametri necessari: forza di gravità, assegnazione dei materiali ai vari componenti e definizione delle condizioni al contorno (*boundary conditions*[5]).

Per le pareti interne del mulino, è stata applicata la condizione di "*rotating wall*", che simula il movimento rotatorio delle superfici solide a contatto con il fluido. È fondamentale mantenere la velocità angolare del sistema al di sotto della soglia critica. Considerando che un motore brushless standard lavora tra i $300 rad/s$ e gli $800 rad/s$ e che il sistema è stato scalato di un fattore 10, è stata ipotizzata inizialmente una velocità angolare di circa $30 rad/s (286 rpm)$. Tuttavia, il calcolo della velocità critica per un mulino di $2.600 mm$ di diametro ha restituito un valore di circa $2,75 rad/s$. Applicando un margine di sicurezza del 65%, si è adottata una velocità finale di $1,8 rad/s$, pari a circa $17 rpm$, valore assegnato alle superfici interne del mulino.

Nonostante la cura nell'impostazione, la simulazione non ha prodotto risultati validi: il software ha restituito un errore bloccante, causato dall'assegnazione della condizione "rotating wall" a superfici appartenenti al dominio solido, invece che a quello fluido. In termini pratici, questa condizione può essere applicata solo alle interfacce tra solido e fluido, non su superfici completamente solide. Di conseguenza, il simulatore ha rilevato l'incongruenza e ha bloccato la simulazione.

A fronte di questa incompatibilità tecnica, si è deciso di semplificare ulteriormente l'analisi termica, mantenendo lo stesso obiettivo fisico. Si è quindi optato per assegnare localmente una temperatura costante su alcune pareti interne della fodera in gomma, rappresentando un istante specifico della rotazione in cui il materiale da macinare (considerato fluido) è a contatto diretto con le pareti del mulino. Anche se meno dettagliata rispetto alla simulazione CHT, questa modalità consente comunque di stimare in modo attendibile i gradienti termici e le zone soggette ad accumulo di calore, fornendo un valido supporto alle valutazioni termiche del progetto.

Simulazione di Scambio Termico con l'aria dell'ambiente Per questa simulazione, si è considerato il mulino all'interno di un volume di controllo esterno (*external flow volume*[6]), immerso nell'aria. Questo approccio permette di analizzare lo scambio termico tra i vari componenti

[5]Le condizioni al contorno definiscono i limiti del dominio di studio e le interazioni tra questo dominio e il suo ambiente esterno

[6]Necessario per definire un dominio in cui andare a compiere la simulazione

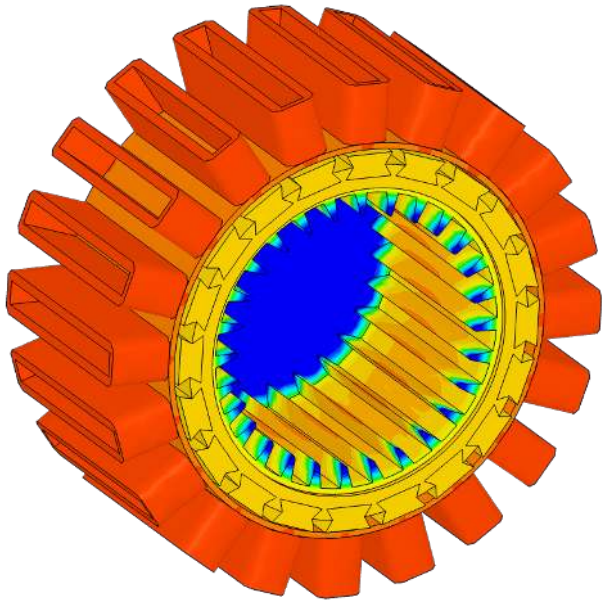


Figura 19: Temperatura del mulino. Zone rosse più calde, blu più fredde

del mulino, con particolare attenzione alle parti che non generano calore ma che sono soggette a riscaldamento indiretto, e all'effetto raffreddante dell'aria circostante.

Trattandosi ancora di un modello CAD qualitativo, l'obiettivo principale è individuare le aree più soggette a criticità termica, per valutare possibili miglioramenti progettuali.

La prima fase ha previsto l'assegnazione dei materiali a ciascun componente, definendo così le proprietà conduttive e parametri come la densità, fondamentali per comprendere la diffusione del calore. Successivamente sono state impostate le condizioni al contorno ("*Boundary Conditions*"): per l'aria è stato adottato un flusso termico convettivo ("*Convective Heat Flux*"), per la superficie interna della fodera in gomma un flusso termico superficiale ("*Surface Heat Flux*"), mentre per i componenti interni generatori di calore si è utilizzato un flusso termico volumetrico ("*Volume Heat Flux*").

La simulazione restituisce quindi un immagine che possiamo definire come una mappa delle zone in cui si concentra la trasmissione di calore. In questa fase prototipale, l'attenzione è rivolta soprattutto all'individuazione delle aree potenzialmente problematiche, piuttosto che ai valori assoluti di temperatura.

Dall'analisi emerge che la gomma laterale di chiusura, essendo a contatto con l'aria, funge da dissipatore, raffreddando il calore proveniente dagli altri componenti. Tuttavia, il dato più interessante riguarda la distribuzione del calore nei sollevatori: il calore tende a concentrarsi nella loro parte centrale, in quanto le estremità vengono raffreddate dalle pareti esterne a contatto con l'aria. Questo fenomeno, probabilmente, si verificherà anche nel modello definitivo, poiché in generale le pareti laterali continueranno a fungere da dissipatori piuttosto che da fonti di calore.

L'analisi suggerisce quindi di prestare particolare attenzione alla progettazione dei sollevatori, in quanto potrebbero accumulare calore nelle zone centrali, con possibili effetti negativi sia sul trattamento del materiale sia sull'usura della fodera.

Simulazione di Scambio Termico con la massa da macinare all'interno del Mulino Se nello scambio termico si considera anche la presenza della massa da macinare all'interno del mulino, è possibile valutare l'ulteriore interazione termica tra le pareti (che in questa configurazione raggiungono temperature più elevate rispetto a un impianto tradizionale) e il materiale interno.

Per la simulazione sono stati mantenuti i parametri già adottati nella fase precedente, aggiungendo la temperatura della massa da macinare come flusso termico convettivo. È stato inoltre utilizzato un coefficiente di trasferimento termico elevato, dato che la massa sarà successivamente agitata e sollecitata, mentre la temperatura iniziale è stata impostata su un valore medio standard.

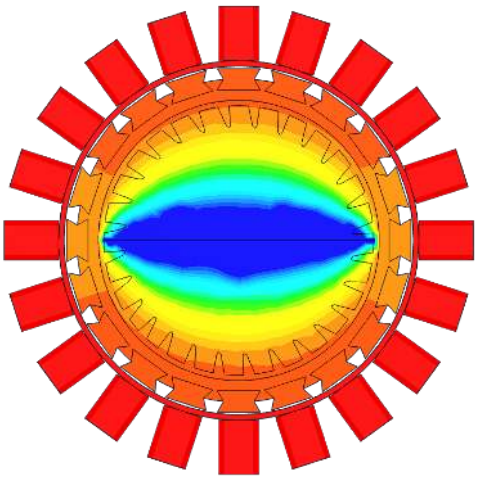


Figura 20: Vista in asse con massa

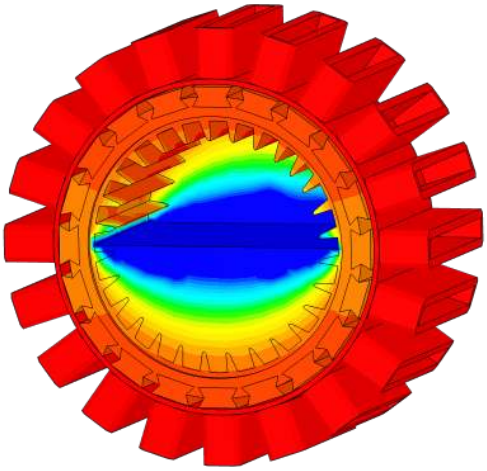


Figura 21: Vista in prospettiva con massa

Dall'analisi delle simulazioni, emerge che la massa interna tende a sottrarre calore agli altri componenti del mulino, contribuendo così alla dissipazione termica. Anche se la massa non è in moto in questa fase, si può già osservare come il calore venga redistribuito tra le diverse parti coinvolte nel processo di macinazione.

Le conclusioni principali confermano che i sollevatori rappresentano la parte più critica dal punto di vista termico, soprattutto nella loro zona centrale, non direttamente raffreddata dalle pareti esterne a contatto con l'aria. Tuttavia, la presenza della massa da macinare aiuta a dissipare parte del calore e a raffreddare le altre componenti, anche se le aree più calde su cui porre attenzione rimangono localizzate nelle zone di contatto tra fodera e sollevatori.

5.1.3 Simulazione di Stress Meccanico

L'obiettivo di questa simulazione è verificare se, in presenza delle nuove forze generate dal funzionamento del mulino, la durata della fodera e, in particolare, dei sollevatori rimanga invariata oppure si riduca a causa di stress eccessivi.

Per questo esperimento, ci si concentra esclusivamente sulla fodera, semplificando al massimo le condizioni di contorno. Come vincolo esterno di rigidità è stata selezionata la parete curva esterna della fodera, che è solidale al telaio del mulino. Il materiale utilizzato per la fodera è la gomma e, come di consueto, si è proceduto alla generazione della mesh.

Per quanto riguarda le forze applicate, si è scelto di applicare una forza principale su tutta la superficie di un singolo sollevatore (in particolare, il quarto a destra rispetto all'asse verticale cen-

trale del mulino), in modo che fosse il più possibile orientato a $45°$, ricreando un angolo d'impatto del materiale coerente con le condizioni reali. Sono inoltre state applicate forze minori sul fondo della fodera per maggiore completezza.

L'analisi è stata condotta applicando tali forze solamente a un sollevatore e alle porzioni adiacenti della fodera, rappresentando così un istante caratteristico da analizzare successivamente in dettaglio.

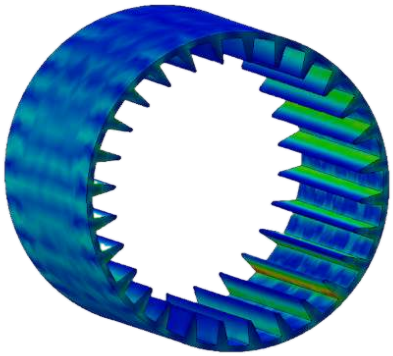


Figura 22: Fodera complessiva sottoposta a stress

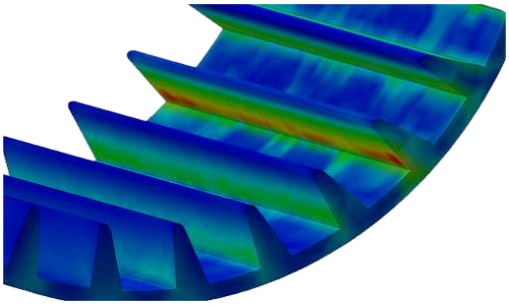


Figura 23: Particolare del sollevatore sottoposto a stress

Come mostrano i risultati, si osserva una concentrazione di stress maggiore in corrispondenza del collegamento tra la fodera e il sollevatore, localizzata principalmente sul sollevatore stesso. Questo effetto è probabilmente dovuto alla presenza di un angolo vivo nel punto di giunzione tra il fondo della fodera e il sollevatore; raccordando opportunamente questa zona si potrebbe ottenere una distribuzione delle forze più omogenea.

Per quanto riguarda il fondo della fodera, anch'esso sottoposto a carichi (seppur di entità minore), non si riscontrano variazioni significative né si evidenziano livelli di stress potenzialmente critici.

Analizzando il comportamento complessivo, si nota come le altre zone del mulino non siano significativamente sollecitate quando la massa da macinare impatta su un singolo sollevatore, come considerato nell'analisi. Le sollecitazioni residue sugli altri sollevatori risultano minime e diminuiscono rapidamente allontanandosi dal punto di applicazione del carico.

In conclusione, si riscontra una concentrazione di forze superiore alla norma sul sollevatore analizzato, ma non si rilevano deformazioni strutturali rilevanti. Si può quindi concludere che, pur modificando le forze in gioco, l'integrità strutturale della fodera e la sua resistenza a fatica nel tempo rimangono pressoché invariate. Si suggerisce, inoltre, che il modello attuale possa essere ulteriormente migliorato raccordando il collegamento tra sollevatore e fondo della fodera, al fine di ottenere una migliore distribuzione degli stress e di conseguenza migliorarne le prestazioni a fatica.

5.2 Studio di Fattibilità ed Impatto Economico

Il presente capitolo si propone di sintetizzare i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte sul modello di mulino basato sul principio di azionamento elettromagnetico, valutandone la fattibilità tecnica, i limiti fisici riscontrati e l'aspetto economico in caso di una sua ipotetica realizzazione su

scala industriale. Oltre a verificare la coerenza e l'attendibilità dei risultati simulativi, si intende anche valutare la possibilità che il modello analizzato possa costituire un punto di partenza per eventuali soluzioni innovative nel campo della macinazione industriale.

La modellazione CAD, ha permesso di trasformare l'idea iniziale in un prototipo virtuale dettagliato. Partendo dalla geometria di un motore elettrico brushless, si è effettuato un ridimensionamento per renderlo adatto alle dimensioni tipiche di un mulino industriale. La successiva integrazione di una fodera specifica per la macinazione ha reso il modello un compromesso tra le caratteristiche di un motore elettrico e quelle di un mulino cilindrico. Tale operazione ha evidenziato immediatamente un vincolo critico: la non scalabilità diretta dei componenti elettromagnetici. La realizzazione di magneti permanenti di lunghezze nell'ordine dei metri, infatti, incontra ostacoli di natura pratica (produzione, trasporto, montaggio) e teorica (efficienza, distribuzione del campo magnetico), per non parlare del costo esorbitante che renderebbe impensabile l'installazione di un impianto del genere. I materiali magnetici attualmente disponibili non garantiscono prestazioni proporzionali all'aumento dimensionale, principalmente a causa della crescente incidenza degli effetti parassiti e delle perdite energetiche. Questo limite implica che, nonostante il fascino della semplicità teorica, una realizzazione concreta su scala industriale appare difficile con le tecnologie attualmente disponibili, a meno di non effettuare profonde revisioni del principio costruttivo.

Le simulazioni elettromagnetiche hanno confermato la validità teorica del principio di azionamento, dimostrando che l'interazione tra statore e parte rotante interna è in grado di generare le forze necessarie alla movimentazione dei corpi macinanti. Questo risultato è significativo, in quanto attesta la correttezza fisica del modello teorico proposto. Tuttavia, le simulazioni hanno anche mostrato una forte sensibilità del sistema alle tolleranze dimensionali e alla precisione del controllo delle correnti negli avvolgimenti. Un'applicazione industriale richiederebbe quindi una sensoristica avanzata e sofisticati algoritmi di controllo per prevenire fenomeni di disallineamento e instabilità rotazionale. Inoltre, sarebbe necessario considerare attentamente l'impatto economico e manutentivo di un sistema del genere, che, pur eliminando i tradizionali organi di trasmissione meccanici (come riduttori e cinghie), potrebbe comportare elevati costi di regolazione e monitoraggio, particolarmente problematici in ambienti industriali caratterizzati da polveri e condizioni aggressive.

Anche la simulazione termica ha rilevato criticità significative, specialmente nella gestione del calore all'interno del mulino. È stata osservata una distribuzione termica non uniforme, con le aree centrali dei sollevatori che tendono a raggiungere temperature superiori rispetto alle zone periferiche. Questa disomogeneità potrebbe causare, nel tempo, un degrado accelerato dei materiali, soprattutto qualora si utilizzassero rivestimenti caratterizzati da una bassa resistenza agli stress termici continuativi. Pertanto, potrebbe rendersi necessaria l'implementazione di un sistema di raffreddamento specifico per le zone maggiormente soggette al surriscaldamento, comportando ulteriori complessità tecniche e costi aggiuntivi. Inoltre, la presenza del materiale macinato, che tende a trattenere calore, introduce ulteriori variabili difficilmente controllabili durante l'esercizio operativo. Questi aspetti suggeriscono che la gestione termica debba essere affrontata fin dalle prime fasi progettuali.

Infine, l'analisi strutturale ha fornito conferme positive sulla stabilità del sistema sotto le sollecitazioni previste. Le tensioni massime rilevate sono risultate significativamente inferiori ai limiti di snervamento dei materiali scelti, senza criticità tali da mettere a rischio l'integrità strutturale complessiva del mulino. Tuttavia, è stata posta attenzione particolare all'usura della fodera interna, soggetta al continuo impatto dei corpi macinanti. Sebbene i risultati simulati non abbiano

evidenziato problemi immediati, è importante considerare che l'usura è un fenomeno progressivo, fortemente influenzato dal tipo di materiale trattato, dalla sua granulometria e dalla durata dei cicli produttivi. Sarebbe quindi opportuno prevedere sistemi di controllo periodico e adottare strategie di diagnostica predittiva per monitorare efficacemente l'evoluzione dell'usura nel tempo, prevenendo eventuali guasti improvvisi e migliorando così la durabilità del sistema.

6 Mulino Senza Motore

Nel contesto dell'ottimizzazione energetica dei mulini per la macinazione, un approccio innovativo consiste nel ripensare in modo radicale il meccanismo di trasmissione dell'energia al materiale da frantumare. Tradizionalmente, il moto rotatorio viene fornito all'intero cilindro del mulino che, ruotando, mette in movimento i corpi macinanti e la massa da trattare. Questa soluzione comporta tuttavia perdite energetiche inevitabili dovute ad attriti meccanici, dissipazione in calore e rumore, oltre che all'inerzia della struttura rotante.

Una strategia alternativa consiste nel disaccoppiare il moto della massa da macinare da quello del cilindro, cercando di generare un moto interno efficace anche a mulino statico. L'idea chiave è stimolare direttamente il movimento dei corpi macinanti, o della massa stessa, utilizzando forze elettromagnetiche. In pratica, si propone di rendere i corpi macinanti ferromagnetici e di guidarne la traiettoria interna tramite un campo magnetico dinamico, variabile nel tempo e nello spazio.

Questo concetto trae ispirazione dai sistemi di spinta elettromagnetica, nei quali il movimento è ottenuto senza la necessità di trascinare meccanicamente tutta la struttura. In tali sistemi, come nei carrelli a levitazione magnetica o nelle macchine industriali automatiche (dove servono movimenti rapidi e precisi) il moto viene indotto direttamente sull'oggetto mobile tramite campi elettromagnetici variabili, senza l'intermediazione di un albero motore o di un sistema di trasmissione tradizionale.

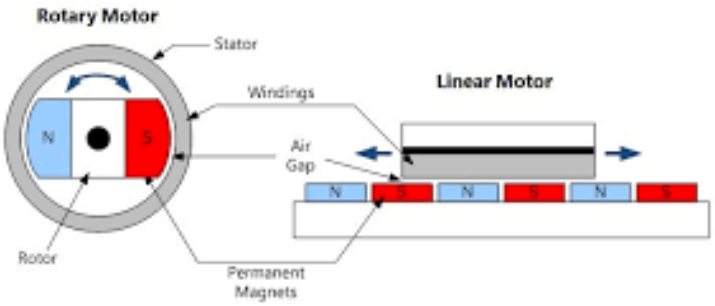


Figura 24: Confronto motore elettrico rotativo con uno lineare

Il principio di funzionamento si basa sul controllo localizzato del campo magnetico, che genera forze mirate in grado di spingere o attrarre un elemento mobile lungo traiettorie predefinite. Questo approccio consente di evitare il trascinamento dell'intero sistema, riducendo drasticamente le perdite per attrito e aumentando la precisione nel controllo del moto.

Applicando questo concetto alla macinazione industriale, si ipotizza di non muovere il mulino, ma di indurre direttamente il moto dei corpi macinanti al suo interno. L'obiettivo è ricreare l'effetto dinamico della rotazione del cilindro, responsabile del sollevamento e della caduta delle sfere, senza la necessità di far ruotare fisicamente l'involucro esterno. Un campo elettromagnetico opportunamente modulato può guidare le sfere lungo traiettorie circolari controllate, ricreando le condizioni di impatto necessarie alla frantumazione del materiale. Il ragionamento si basa quindi sull'idea di muovere solo gli elementi attivi nella macinazione, riducendo complessità meccanica, consumi energetici e usura dei componenti.

Questa soluzione offre molteplici vantaggi. In primo luogo, l'eliminazione della rotazione del cilindro riduce drasticamente le perdite di energia per attrito nei supporti, nei giunti e negli elementi

di trasmissione, con un conseguente miglioramento dell'efficienza energetica globale. In secondo luogo, il moto indotto elettromagneticamente può essere controllato in modo estremamente preciso, sia in intensità sia in direzione, consentendo strategie di macinazione ottimizzate in base alle caratteristiche del materiale. Inoltre, l'assenza di parti meccaniche in movimento riduce la necessità di manutenzione, limita l'usura e aumenta la durata del macchinario.

Occorre però considerare che l'efficacia di tale sistema dipende in parte dalla natura del materiale trattato. Se il materiale non è influenzabile da campi magnetici, il moto interno dovrà essere indotto esclusivamente tramite corpi macinanti ferromagnetici. Qualora invece anche la massa da macinare fosse ferromagnetica o contenesse componenti sensibili ai campi magnetici, l'interazione diretta tra campo elettromagnetico e materiale potrebbe rendere la comminuzione ancora più efficiente, grazie a un'azione uniforme e diffusa su tutto il volume trattato. In tal caso, si potrebbe anche ridurre o eliminare la necessità dei corpi macinanti, semplificando ulteriormente la componentistica interna del mulino, oltre che quella concettuale.

Tuttavia, è necessario valutare attentamente eventuali effetti collaterali, come l'aderenza del materiale alle pareti o la formazione di grumi, nonché la compatibilità del processo con le proprietà meccaniche e chimiche del materiale trattato. Se ben gestita, questa condizione potrebbe non rappresentare uno svantaggio, ma un'opportunità per una macinazione ancora più controllata e mirata.

6.1 Simulazione ed ottimizzazione

Per simulare e ottenere risultati sperimentali rilevanti, verranno condotte diverse tipologie di test, in particolare tre principali analisi. Poiché il modello considerato è ancora ipotetico e pensato per un'applicazione industriale, oltre ai dati numerici delle simulazioni, l'attenzione sarà rivolta soprattutto alla valutazione della fattibilità della soluzione proposta.

La prima simulazione sarà quella elettromagnetica, fondamentale per verificare le forze prodotte dalle bobine e stabilire se il sistema sarebbe in grado di movimentare efficacemente la massa interna. Questa analisi permetterà anche di valutare la potenza generata, i limiti operativi e gli effetti termici, al fine di comprendere l'impatto sulle prestazioni complessive del mulino.

La seconda sarà incentrata sulla trasmissione di calore. Sarà necessario valutare sia il calore trasferito dalla massa macinante alle pareti del mulino, dovuto alla rottura delle particelle, sia il contributo termico delle bobine e la relativa interazione con i magneti.

Infine, sarà condotta una simulazione con stress meccanico per valutare la risposta strutturale delle pareti interne del mulino alle forze provocate dalle sollecitazioni e dai continui urti dovuti alla caduta della massa macinante.

6.1.1 Progettazione CAD in 3D

Per la modellazione del mulino è stato scelto un impianto su scala industriale, con diametro interno di 2 metri e lunghezza di 4 metri. Il corpo cilindrico è stato progettato per rimanere statico, prevedendo un rivestimento interno in gomma vulcanizzata da $50mm$ che separa lo spazio utile dalle pareti esterne in acciaio spesse $20mm$.

La modellazione è partita dalla realizzazione del telaio e dei relativi rivestimenti e bobine su un piano bidimensionale, come se fossero sezionati. Ciò ha permesso di semplificare la struttura

del mulino in una figura 2D, successivamente rivoluzionata attorno all'asse centrale per ottenere la geometria tridimensionale.

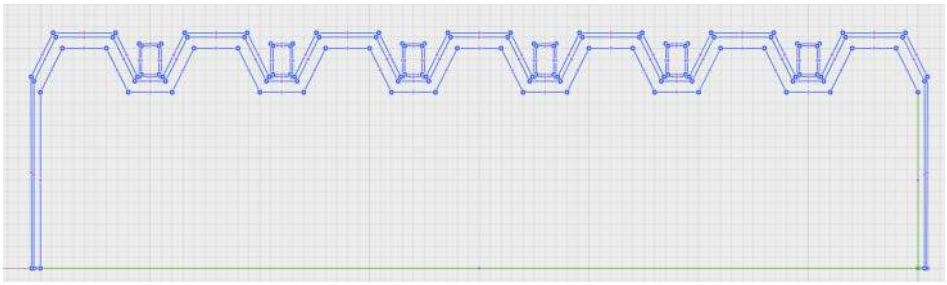


Figura 25: Schizzo bidimensionale del profilo del mulino

Il concetto alla base del progetto consiste nel creare dei canali lungo la superficie interna del mulino, dove agiscono le forze dei campi elettromagnetici generati dalle bobine esterne. Per ottenere questo effetto, si è scelta una forma trapezoidale dei canali, che elimina angoli retti potenzialmente deboli anche se raccordati. Ogni canale risulta lungo $200mm$, con il materiale da macinare che va a depositarsi al suo interno. Gli angoli interni formati dalla rivoluzione dei trapezi sono stati raccordati con un raggio di $40mm$ per eliminare spigoli vivi, notoriamente punti di debolezza sopratutto se soggetti a urti e sollecitazioni.

Per la movimentazione della massa macinante, è stata ipotizzata una griglia di bobine toroidali disposte attorno alla superficie esterna del tamburo. In ciascuna sezione circolare sono state collocate 24 bobine, distanziate di $15°$ l'una dall'altra. Questo pattern è stato replicato lungo l'asse del cilindro in 6 posizioni equidistanti, ottenendo un totale di 144 bobine.

La singola bobina è stata modellata analogamente al profilo del mulino, senza rappresentare ogni singolo avvolgimento ma approssimandola come un corpo unico. È stata quindi posizionata quasi a contatto con il telaio ed estrusa per $200mm$, ruotata di $5°$ per renderla tangente al cilindro e avvicinata di $5mm$ per il corretto allineamento. Sebbene nel modello risulti sospesa, in una realizzazione reale sarebbe sufficiente un anello di supporto passante per tutte le bobine, utile anche per il raffreddamento liquido in caso di surriscaldamento. Gli spigoli sono stati arrotondati con raggi di $20mm$ all'interno, $30mm$ all'esterno sui lati lunghi e $5mm$ sui lati corti. Completata la prima bobina, è stata copiata e ruotata di $15°$ fino a formare l'intero anello di 24 bobine, replicato poi 6 volte lungo l'asse mediante traslazione di $600mm$.

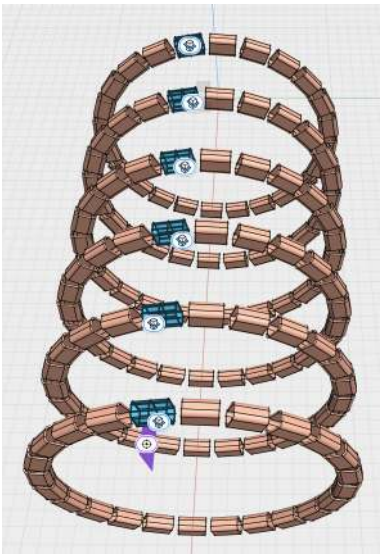


Figura 26: Anelli di bobine posti fuori dal telaio del mulino

Ogni bobina è indipendentemente e grazie alla corrente alternata a frequenza variabile, genera campi rotanti o pulsanti a seconda della strategia di movimentazione interna. Chiaramente una volta coordinare, le bobine andranno a generare un campo magnetico, variante nel tempo, che sarà il responsabile del movimento della massa interna.

Il risultato finale della modellazione rappresenta un sistema industrialmente credibile: il mulino rimane statico dal punto di vista meccanico, ma è potenzialmente attivo internamente grazie all'azione elettromagnetica controllata. L'intero progetto è pronto per essere utilizzato come base di calcolo per simulazioni magnetiche e dinamiche, o come modello per una futura prototipazione reale in scala.

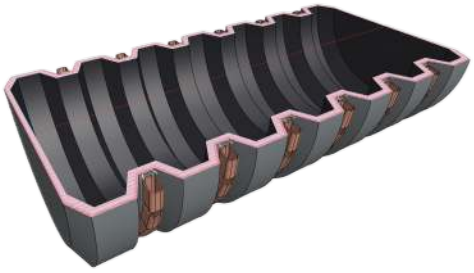


Figura 27: Vista in prospettiva della sezione

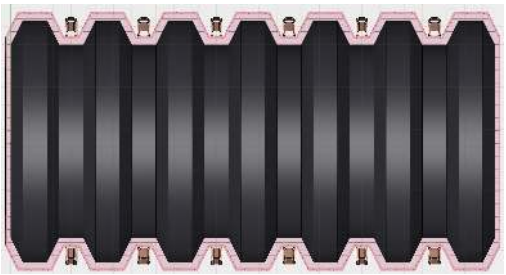


Figura 28: Vista in asse della sezione



Figura 29: Vista esterna del mulino completo

6.1.2 Simulazione elettromagnetica

Questa simulazione riveste un ruolo fondamentale, poiché consente di valutare l'efficacia del modello e di verificare se l'idea alla base del progetto sia valida e funzionale.

Le condizioni di simulazione prevedono l'assegnazione dei materiali corretti a ciascun componente: rame per le bobine, gomma per la fodera interna e acciaio per la struttura esterna del cilindro. Sono stati inseriti due volumi di controllo: il primo (esterno) rappresenta l'aria a contatto con le pareti del mulino, utile per analizzare la propagazione del flusso elettromagnetico generato dalle bobine; il secondo (all'interno del cilindro) è caratterizzato da proprietà magnetiche (seppur minime) per valutare la risposta e la sollecitazione della massa da macinare. Per le bobine, si è scelto di selezionare tutte le sezioni sul lato corto, individuando così una faccia interna su cui applicare la corrente.

Avviata la simulazione, si è proceduto ad analizzare il flusso del campo magnetico generato dalle bobine sul cilindro del mulino.

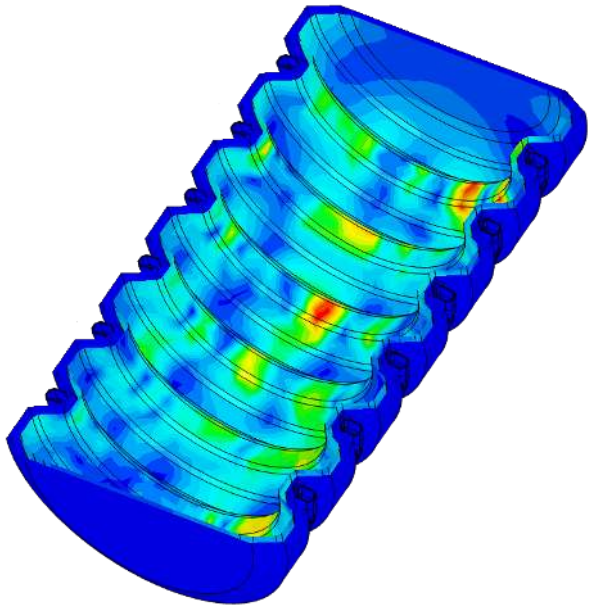


Figura 30: Vista del flusso magnetico sulle pareti interne del mulino

Dai risultati ottenuti, si osserva che il campo magnetico non risulta ben distribuito e uniforme: emergono aree ad alta concentrazione (zone rosse) e altre con scarsa influenza elettromagnetica (zone blu). La causa di questa non uniformità rimane incognita, però sicuramente può essere attribuita a diversi fattori, tra cui per esempio la necessità di ottimizzare il design del prototipo.

Nonostante l'assenza di una forza netta e di una direzione di spinta ben definita, un aspetto rilevante è la presenza del flusso magnetico all'interno delle pareti dei canali in cui si trova la massa da macinare. Questo suggerisce che, pur richiedendo revisioni progettuali per ottenere una generazione di campo magnetico più omogenea, il principio alla base del modello sia corretto e rappresenti una strada promettente. In conclusione, anche in presenza di criticità progettuali, il concetto risulta valido e meritevole di ulteriori sviluppi.

6.1.3 Simulazione Termica

Per la simulazione termica, come nelle precedenti analisi, sono stati assegnati i materiali ai vari componenti: rame per le bobine, gomma per la fodera interna, metallo per il telaio, aria per il volume esterno e le proprietà del materiale da macinare per il volume interno.

Successivamente sono state impostate le condizioni al contorno (*boundary conditions*): ai componenti del mulino è stato attribuito un flusso termico volumetrico ("*volume heat flux*"), mentre per i volumi interni ed esterni è stata applicata la modalità di flusso termico convettivo ("*convective heat flux*"), selezionando le superfici interessate e assegnando i parametri standard dell'aria.

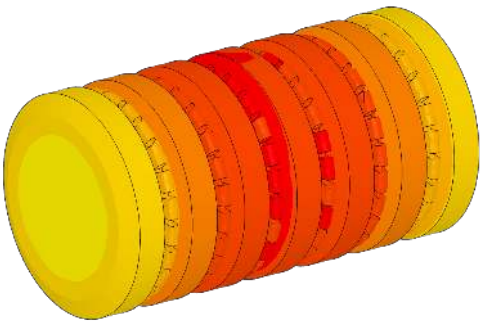


Figura 31: Vista della temperatura esterna del telaio

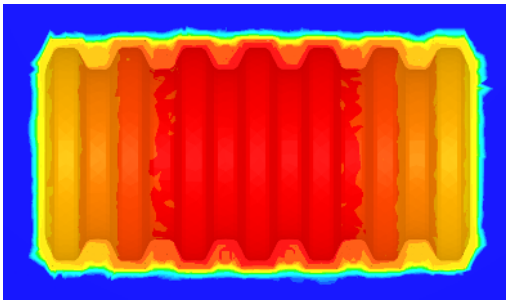


Figura 32: Vista in asse del piano di sezione con influenza sull'ambiente circostante

I risultati della simulazione sono chiari: emerge un problema di distribuzione e dissipazione del calore lungo il cilindro del mulino. L'ambiente esterno raffredda principalmente le estremità, sia del telaio che della fodera e delle bobine, mentre il calore tende a concentrarsi nella zona centrale. Questo può portare a un'usura prematura di alcune parti della fodera e a una possibile gestione non ottimale della massa da macinare, che rischia di surriscaldarsi se si trova al centro del mulino.

L'analisi della sezione inoltre, fa notare due dettagli: il primo è che la temperatura dell'aria circostante diminuisce con la distanza dal mulino, come è giusto che sia; il secondo invece è che i canali esterni del telaio che ospitano le bobine presentano una temperatura uniforme, quasi come se non ci fosse passaggio d'aria tra le bobine e il telaio stesso. Da questo si deduce che la separazione tra bobine e telaio è fondamentale: se fossero a diretto contatto, la dissipazione sarebbe ancora minore e la temperatura aumenterebbe ulteriormente.

Per risolvere queste criticità si possono adottare diverse strategie. Innanzitutto, progettare un sistema di raffreddamento dedicato, in particolare per trasferire il calore dalla zona centrale verso le aree periferiche, così da ottenere una temperatura più omogenea. Un'altra soluzione potrebbe essere la riduzione della lunghezza del mulino: dividendo il mulino in due unità più corte, si aumenterebbe la superficie esposta all'ambiente e quindi l'efficienza del raffreddamento (a fronte di nuovi vantaggi e svantaggi impiantistici).

6.1.4 Simulazione dello Stress meccanico

Questo prototipo si differenzia in modo sostanziale dai mulini tradizionali, soprattutto per quanto riguarda la forma della fodera. È quindi fondamentale analizzare il suo comportamento quando è sottoposto a carichi gravosi sulle superfici, in particolare nelle aree di ricaduta del materiale da macinare. Anche se la configurazione a cataratta prevede che il materiale ricada prevalentemente su sé stesso, si generano comunque stress meccanici rilevanti sulla fodera.

Per questa simulazione, come di consueto, sono stati assegnati i materiali corretti ai vari componenti, con particolare attenzione alla fodera in gomma vulcanizzata. Per riprodurre la situazione reale, è stata effettuata una simulazione statica di stress meccanico, imponendo forze su specifiche porzioni del cilindro. La fodera è stata sezionata con un piano parallelo all'asse longitudinale, definendo tre zone distinte: una centrale (angolo di $10°$) dove si concentrano le forze maggiori, in quanto rappresenta la principale area di impatto, e due zone laterali adiacenti ($15°$ per parte) su cui

è stato applicato un carico minore, per rappresentare un effetto più realistico e meno concentrato delle sollecitazioni.

A ciascuna superficie è stato assegnato il relativo valore di forza negativa sull'asse y, sommando l'effetto alla gravità già presente nel modello.

Dai risultati, la zona centrale della fodera risulta la più sollecitata. In particolare, i canali (soprattutto sul fondo) sono le aree maggiormente interessate, poiché il materiale, durante il ciclo di sollevamento e caduta, tende a impattare e a strisciare proprio in queste zone. Al di fuori dei canali e nelle aree laterali, le sollecitazioni risultano minime o nulle, poiché la caduta omogenea della massa mantiene il materiale principalmente all'interno dei canali stessi.

6.2 Studio di fattibilità ed impatto economico

L'idea alla base di questo studio nasce da un'ipotesi di miglioramento del sistema tradizionale di comminuzione molto azzardata, andando ad eliminare la rotazione del mulino. L'eliminazione del movimento rotatorio del cilindro, che rappresenta uno degli elementi più energivori e maggiormente soggetti a usura negli impianti tradizionali, apre importanti prospettive di innovazione tecnologica. Quindi ora si cerca di valutare la validità teorica, la coerenza dei risultati ottenuti mediante simulazione, e la fattibilità tecnica ed economica di realizzazione per un mulino statico con movimentazione interna generata attraverso campi elettromagnetici.

La fase iniziale di modellazione CAD ha riguardato la progettazione tridimensionale del sistema in scala industriale. L'obiettivo era realizzare un mulino completamente statico esternamente ma dinamico all'interno, grazie all'applicazione mirata di campi elettromagnetici controllati. Dal punto di vista costruttivo, questo approccio ha presentato numerose sfide: le cavità interne, progettate con sezioni trapezoidali raccordate per facilitare il convogliamento della massa macinante e resistere a urti ripetuti, richiedono una notevole precisione realizzativa. Inoltre, la necessità di installare e gestire singolarmente 144 bobine toroidali esterne con correnti alternate variabili ha reso evidente la complessità tecnica ed economica associata al progetto, già in fase prototipale. Tuttavia, la modellazione CAD ha permesso di validare il concetto dal punto di vista meccanico, confermando la sua realizzabilità almeno in ambienti controllati e su scala ridotta.

Le simulazioni elettromagnetiche hanno dimostrato la presenza del flusso magnetico interno, che però risulta ancora fortemente disomogeneo, alternando zone di elevata intensità a zone con minime influenze magnetiche. Questo risultato conferma la validità generale del principio concettuale, ma evidenzia al contempo la necessità di un'ulteriore ottimizzazione progettuale. Tra le cause possibili della disomogeneità riscontrata vi sono la forma non ottimale dei canali, la disposizione delle bobine non ancora ideale e una non completa sinergia tra le frequenze di eccitazione. Nonostante tali criticità, la simulazione ha confermato una misurabile interazione tra bobine e massa interna, indicando che il progetto possiede significative potenzialità di sviluppo.

Dal punto di vista termico, le simulazioni hanno rilevato alcune criticità legate alla distribuzione del calore, che si concentra prevalentemente nella zona centrale del mulino, dove l'efficacia del raffreddamento ambientale risulta ridotta e dove le bobine rappresentano un'ulteriore problematica visto l'ulteriore apporto termico. Questo potrebbe provocare un'usura accelerata della fodera e un potenziale surriscaldamento della massa trattata. Inoltre, la limitata circolazione d'aria tra bobine e telaio diminuisce la capacità dissipativa generale del sistema. Pertanto, sarebbe fondamentale prevedere un sistema di raffreddamento attivo e considerare una modularizzazione del mulino in

sezioni più corte, al fine di ottimizzare la gestione termica e migliorare la dissipazione del calore, seppur a scapito di un incremento della complessità impiantistica.

Infine, la simulazione strutturale ha confermato l'efficacia della configurazione proposta nell'assorbire le sollecitazioni dovute agli impatti del materiale macinante. La geometria dei canali, combinata con l'uso di una fodera in gomma vulcanizzata, consente di concentrare le sollecitazioni nelle aree previste, garantendo un buon livello di sicurezza strutturale. Tuttavia, la necessità di manutenzione periodica rimane essenziale, in particolare nella zona centrale dei canali, dove l'usura potrebbe compromettere nel tempo la funzionalità complessiva del sistema.

7 Conclusioni

Abbiamo analizzato due modelli innovativi di mulini per la macinazione, entrambi capaci, almeno in linea teorica, di incrementare significativamente l'efficienza rispetto ai tradizionali metodi di comminuzione. Sebbene le simulazioni condotte non rappresentino ancora una verifica sperimentale definitiva dell'efficacia reale dei prototipi, esse hanno fornito preziose indicazioni sulla fattibilità tecnica e sulla validità concettuale dei modelli proposti.

Le simulazioni effettuate si sono rivelate fondamentali per individuare criticità e punti di forza di ciascun progetto, nonostante i limiti intrinseci legati alla fase prototipale. In particolare, il software utilizzato, pur essendo adatto allo scopo generale, non ha consentito simulazioni completamente esaustive per via delle proprie limitazioni intrinseche dovute al fatto che non è stato progettato su misura per questa tipologia di test. È stato quindi necessario condurre simulazioni adattando i modelli alle caratteristiche del software disponibile, poiché quelli specialistici sono solitamente di difficile accesso perché proprietari e utilizzati esclusivamente dalle aziende leader del settore.

Nonostante tali limiti, i risultati ottenuti hanno dimostrato chiaramente il potenziale per ulteriori sviluppi dei due prototipi. Con adeguate ottimizzazioni progettuali sarebbe infatti possibile passare a una fase sperimentale più avanzata, eventualmente supportata da simulazioni più approfondite e specifiche, anche grazie a strumenti software più performanti e mirati.

Dal punto di vista economico, l'implementazione di queste tecnologie innovative comporterebbe certamente sfide rilevanti. In particolare la complessità costruttiva, il numero e la tipologia dei componenti necessari alla movimentazione elettromagnetica, nonché la precisione richiesta nelle fasi di assemblaggio e installazione rappresentano significativi costi iniziali. Tuttavia, l'eliminazione delle tradizionali parti meccaniche rotanti consentirebbe, sul lungo periodo, una consistente riduzione dei costi energetici e manutentivi. Di conseguenza, a fronte di un investimento iniziale più elevato, si avrebbero importanti risparmi sui costi operativi e manutentivi, oltre a un significativo beneficio ambientale derivante dalla maggiore efficienza energetica.

In conclusione, l'approccio proposto appare promettente, introducendo un'innovazione rilevante rispetto ai metodi tradizionali di macinazione. Sebbene permangano alcune limitazioni tecniche ed economiche, la solidità concettuale e gli incoraggianti risultati preliminari suggeriscono ampi margini di sviluppo futuro. Pertanto, questo lavoro costituisce un punto di partenza fondamentale per ulteriori ricerche e ottimizzazioni, al fine di trasformare una promettente proposta teorica in una soluzione concretamente applicabile su scala industriale.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare la Professoressa Alessandra Bonoli, che ha accolto con entusiasmo la mia idea e le mie proposte, concedendomi la libertà di sperimentare e di proporre nuovi concetti senza alcun vincolo. Il suo supporto è stato fondamentale per lo sviluppo di questo lavoro.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, che è sempre stata e sempre sarà un punto fermo imprescindibile. Mi ha sostenuto in ogni percorso, aiutandomi a crescere e a maturare. In particolare, ringrazio i miei genitori, figure di riferimento a cui aspiro perché non avrei potuto desiderare di meglio. Spero un giorno di poter essere per i miei figli ciò che loro sono stati per me.

Non potrei dimenticare i miei amici, il cui sostegno è stato altrettanto importante. Preferisco non nominarli uno ad uno per non rischiare di dimenticare qualcuno, ma so che ognuno di loro conosce bene il ruolo e l'importanza che ha avuto per me. Li ringrazio per essermi stati vicini nei momenti difficili, così come per aver condiviso quelli più felici e gioiosi. In ogni caso, ciò che conta davvero per me è aver vissuto insieme a loro momenti importanti della mia vita.

Riferimenti Bibliografici e Sitografici

[1] B.A. Wills and T.J. Napier-Munn, *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*, 7^{th} ed., Butterworth-Heinemann, 2006.

[2] B.A. Wills and J.A. Finch, *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*, 8^{th} ed., Butterworth-Heinemann, 2016.

[3] Morrell, Stephen and Man, Y., (1997), *Using modeling and simulation for the design of full scale ball mill circuits*, Minerals Engineering - MINER ENG. 10. 1311-1327. 10.1016/S0892-6875(97)00123-4.

[4] Ansys, *Unlocking the Power of CFD-DEM Coupling: Modeling Fluid-particulate Systems*, `https://www.ansys.com/blog/modeling-fluid-particulate-systems`, consultato Aprile 2025.

[5] Vulcan Group, *Mulino a sfere e rivestimenti interni*, `https://vss.asia/it/ball-mill-liner/`, consultato Aprile 2025.

[6] Simscale, *Particle Simulation of a Mill*, `https://www.simscale.com/projects/afischer/mill_profile_particle_analysis/`, consultato Aprile 2025.

[7] Macchine MFG, *Motori lineari: Principio, caratteristiche e applicazioni*, `https://www.machinemfg.com/it/linear-motors-principle-and-characteristic` consultato Aprile 2025.

[8] Macchine MFG, *Come funzionano i motori elettrici? Una guida completa*, `https://www.machinemfg.com/it/electric-motors-work/`, consultato Aprile 2025.

[9] Macchine MFG, *Esplorazione dei tipi di motore e dei principi di produzione*, `https://www.machinemfg.com/it/motor-types-and-principles/`, consultato Aprile 2025.

[10] Beker3D, *Tipologie di simulazioni per un mulino industriale*, `https://www.becker3d.com/session/ball_mill_fea` `https://www.becker3d.com/session/sag_mill` `https://www.becker3d.com/session/rotary_calciner` `https://www.becker3d.com/session/drum_sph_dem` , consultato Aprile 2025.