



Esame di fine corso

Cod. Progetto 4262/2/668/2015 - Cod. Intervento 4262/004/636/DEC/22
Titolo: Tecnico per la gestione di impianti di produzione della carta
Sede del corso: Verona - VR - 37138 - Via Don Giovanni Minzoni, 50

La raffinazione separata

di Pasqual Francesco



Scuola Interregionale
di tecnologia per tecnici Cartari

Istituto Salesiano «San Zeno» - Via Don Minzoni, 50 - 37138 Verona
fcs.istitutosalesianosanzeno.it - scuolacartaria@sanzeno.org

INDICE

- 1 INTRODUZIONE E CENNI STORICI**
- 2 OBIETTIVI DELLA RAFFINAZIONE**
- 3 MORFOLOGIA DELLE FIBRE E COMPORTAMENTO ALLA RAFFINAZIONE**
 - 3.1 Fibra lunga (Softwood)
 - 3.2 Fibra corta (Hardwood)
 - 3.3 Eucalipto
 - 3.4 BCTMP (Bleached Chemi-Thermomechanical Pulp)
- 4 RAFFINAZIONE SEPARATA VS RAFFINAZIONE MISTA**
 - 4.1 Limiti della raffinazione mista
 - 4.2 Principi della raffinazione separata
 - 4.3 Analisi delle Guarniture per Fibra Lunga e Fibra Corta
- 5 VANTAGGI TECNICI ED ECONOMICI**
- 6 TABELLA RIASSUNTIVA DELLE FIBRE E CONDIZIONI IDEALI**
- 7 PROVA SPERIMENTALE: RAFFINAZIONE MISTA, SEPARATA ED ENZIMATICA**
 - 7.1 Metodologia sperimentale
 - 7.2 Confronto grado di scolantezza
 - 7.3 Confronto lunghezza di rottura
 - 7.4 Conclusioni della prova
- 8 CONCLUSIONI**
- 9 BIBLIOGRAFIA**

1. INTRODUZIONE E CENNI STORICI

La raffinazione rappresenta una delle fasi più importanti nel processo di produzione della carta, in quanto determina in larga misura le proprietà finali del foglio. Si tratta di un trattamento meccanico applicato alle fibre di cellulosa che ne modifica la struttura fisica rendendole idonee alla formazione di un reticolo resistente e uniforme.

Dal punto di vista storico, la raffinazione ha subito un'evoluzione significativa. I primi sistemi, come le pile a magli, utilizzate fino al XVII secolo, operavano una battitura discontinua e poco controllata delle fibre. Un salto tecnologico fondamentale avvenne con l'introduzione dell'Olandese (Hollander), che rese possibile regolare la distanza tra le lame e quindi controllare l'intensità del trattamento.

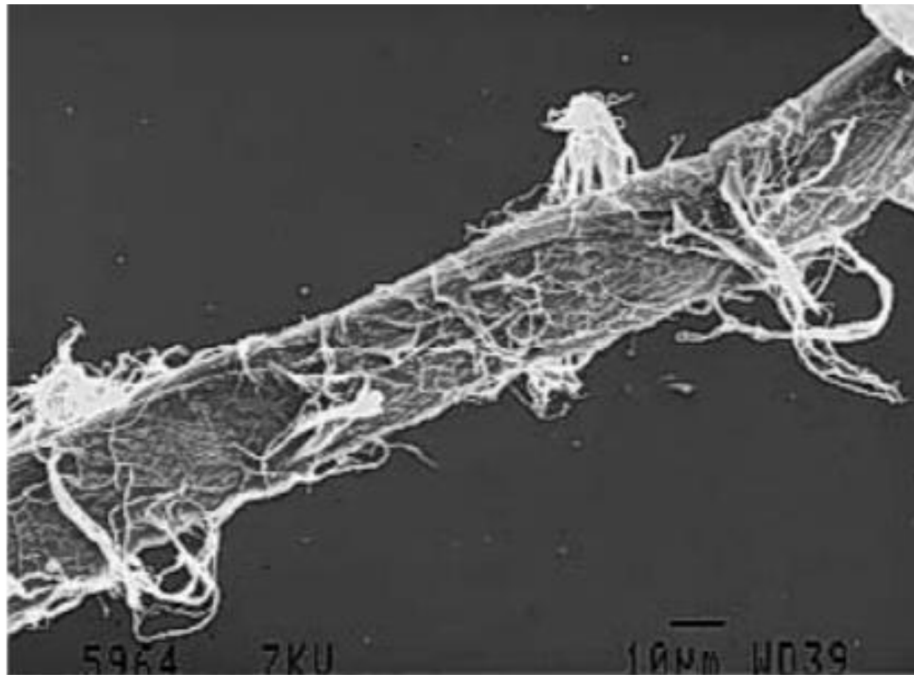
Nel corso del XX secolo, con l'aumento delle capacità produttive e delle esigenze qualitative, si è passati ai raffinatori conici e successivamente ai raffinatori a dischi, oggi largamente diffusi negli impianti industriali per la loro efficienza e capacità di lavorare in continuo.

2. OBIETTIVI DELLA RAFFINAZIONE

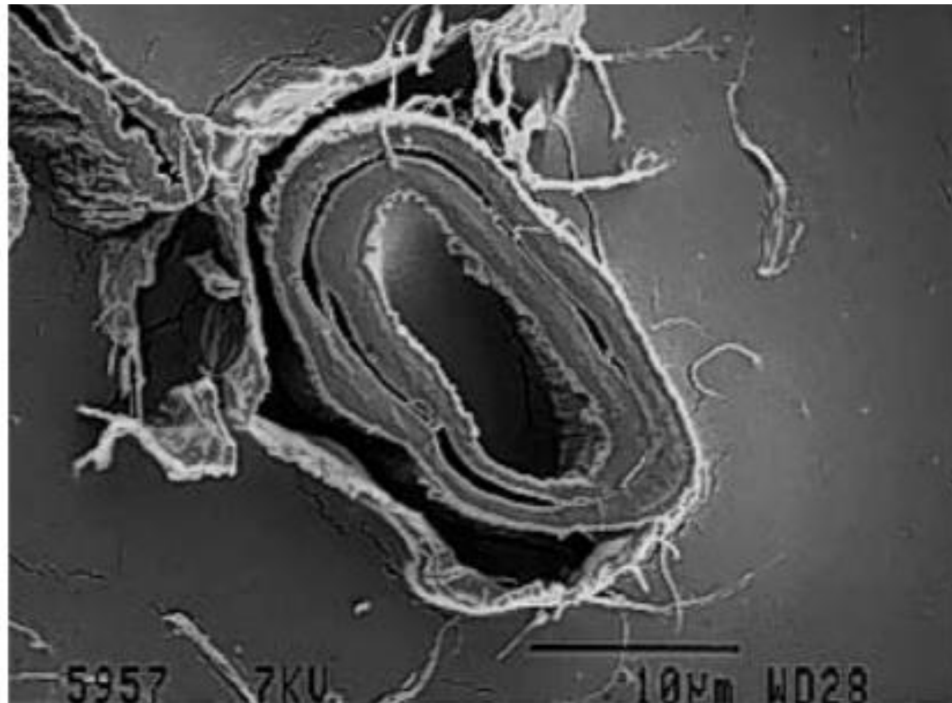
Le fibre di cellulosa, allo stato iniziale, si presentano come strutture tubolari rigide e relativamente lisce. Senza un adeguato trattamento, non sarebbero in grado di formare un foglio di carta con proprietà meccaniche soddisfacenti.

La raffinazione ha quindi diversi obiettivi fondamentali:

- **Idratazione (rigonfiamento):** l'acqua penetra nella parete cellulare, rendendo la fibra più flessibile e lavorabile.
- **Fibrillazione interna:** si verifica una parziale rottura dei legami interni alla parete cellulare, aumentando la capacità della fibra di deformarsi.
- **Fibrillazione esterna:** si sviluppano microfibrille sulla superficie della fibra, aumentando l'area di contatto e favorendo i legami idrogeno tra le fibre.



- **Sviluppo delle proprietà meccaniche:** si incrementano resistenza a trazione e scoppio, spesso a discapito di proprietà come bulk e resistenza allo strappo.
- **Accorciamento controllato:** in alcuni casi, una moderata riduzione della lunghezza della fibra può migliorare la formazione del foglio.



3. MORFOLOGIA DELLE FIBRE E COMPORTAMENTO ALLA RAFFINAZIONE

Le diverse tipologie di fibra reagiscono in modo differente all'azione meccanica del raffinatore. Questa variabilità è alla base del concetto di raffinazione separata.

3.1 Fibra lunga (Softwood)

Proveniente da conifere come pino e abete, presenta una lunghezza compresa tra 2,5 e 4 mm. Costituisce lo "scheletro" della carta, garantendo resistenza meccanica, in particolare allo strappo.

Richiede un apporto energetico elevato per ottenere una sufficiente fibrillazione, ma è fondamentale preservarne la lunghezza per mantenere le proprietà meccaniche.

3.2 Fibra corta (Hardwood)

Derivata da latifoglie come betulla o faggio, ha una lunghezza media di circa 1 mm. Contribuisce principalmente alla formazione del foglio, alla stampabilità e all'opacità. È più sensibile alla raffinazione: un eccesso di energia porta alla produzione di fini e al peggioramento della drenabilità.

3.3 Eucalipto

Pur appartenendo alle hardwood, l'eucalipto presenta caratteristiche peculiari: elevata densità di fibre per unità di massa e grande capacità di rigonfiamento.

Permette di ottenere un buon equilibrio tra resistenza e bulk, ma richiede una raffinazione molto delicata, con bassa intensità di carico.

3.4 BCTMP (Bleached Chemi-Thermomechanical Pulp)

La **BCTMP** è una pasta ad alta resa caratterizzata dalla presenza significativa di lignina, che conferisce alle fibre una struttura più rigida e meno collassabile rispetto alle paste chimiche tradizionali.

A differenza delle fibre vergini lunghe o corte, la BCTMP **non richiede un vero processo di raffinazione**. Questo perché le sue caratteristiche intrinseche non traggono beneficio da

un'ulteriore azione meccanica intensa. Al contrario, un apporto energetico elevato risulterebbe controproducente per diversi motivi:

- **Formazione di fini indesiderati:** la raffinazione tenderebbe a frammentare le fibre, generando una quantità eccessiva di particelle fini che peggiorano la drenabilità e le prestazioni in macchina continua.
- **Perdita di bulk:** uno dei principali vantaggi della BCTMP è il volume che conferisce al foglio; una raffinazione eccessiva porterebbe al collasso delle fibre, riducendo lo spessore.
- **Scarso sviluppo delle proprietà di legame:** a causa della presenza di lignina, la capacità di fibrillazione è limitata, quindi l'energia applicata non si traduce in un reale miglioramento delle proprietà meccaniche.
- **Inefficienza energetica:** l'energia introdotta nel sistema non produce benefici proporzionati, risultando di fatto **energia sprecata** dal punto di vista sia tecnico che economico.

Per questi motivi, nel caso della BCTMP si preferisce evitare la raffinazione oppure applicare, solo se necessario, un trattamento estremamente blando, finalizzato più a una leggera “spazzolatura” superficiale che a una vera fibrillazione.

4. RAFFINAZIONE SEPARATA VS RAFFINAZIONE MISTA

4.1 Limiti della raffinazione mista

Tradizionalmente, per semplicità impiantistica, le diverse tipologie di fibra venivano raffinate insieme. Tuttavia, questo approccio presenta importanti criticità:

- **Sovraraffinazione delle fibre corte**, che tendono a rompersi eccessivamente.
- **Sottoraffinazione delle fibre lunghe**, che non sviluppano appieno il loro potenziale di resistenza.
- **Inefficienza energetica**, dovuta all'utilizzo di parametri medi non ottimali per nessuna tipologia.

4.2 Principi della raffinazione separata

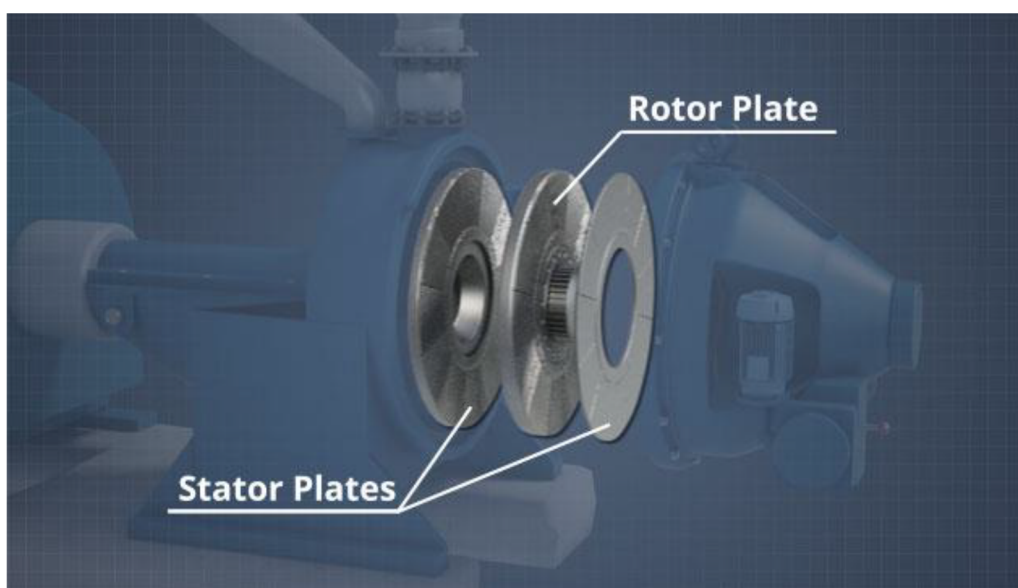
La raffinazione separata prevede linee dedicate per ciascun tipo di fibra, consentendo di applicare condizioni operative specifiche.

Un parametro fondamentale è l'**intensità di carico (SEL – Specific Edge Load)**:

In generale:

- **Fibra lunga** → necessita di **SEL medio-alto (2.0 – 3.0 J/m)**
- **Fibra corta ed eucalipto** → richiedono **SEL basso (0.5 – 1.2 J/m)**
- **BCTMP** → richiede **SEL molto basso**, privilegiando l'azione di spazzolatura

4.3 Analisi delle Guarniture per Fibra Lunga e Fibra Corta



Geometria delle Guarniture: Differenze Strutturali

La scelta della guarnitura (dischi o coni) deve adattarsi alla morfologia della fibra. La fibra lunga e la fibra corta rispondono in modo differente agli sforzi meccanici.

Guarniture per Fibra Lunga

Le fibre di aghifoglie sono lunghe (2-4 mm) e robuste

Spessore delle lame: elevato, tipicamente tra 4.0 e 6.0 mm.

- **Larghezza dei varchi:** canali ampi per gestire l'alto volume delle fibre lunghe.
- **Effetto:** una lama più larga distribuisce la forza su un'area maggiore, favorendo l'azione di "schiacciamento" (bruising) che ammorbidisce la fibra.

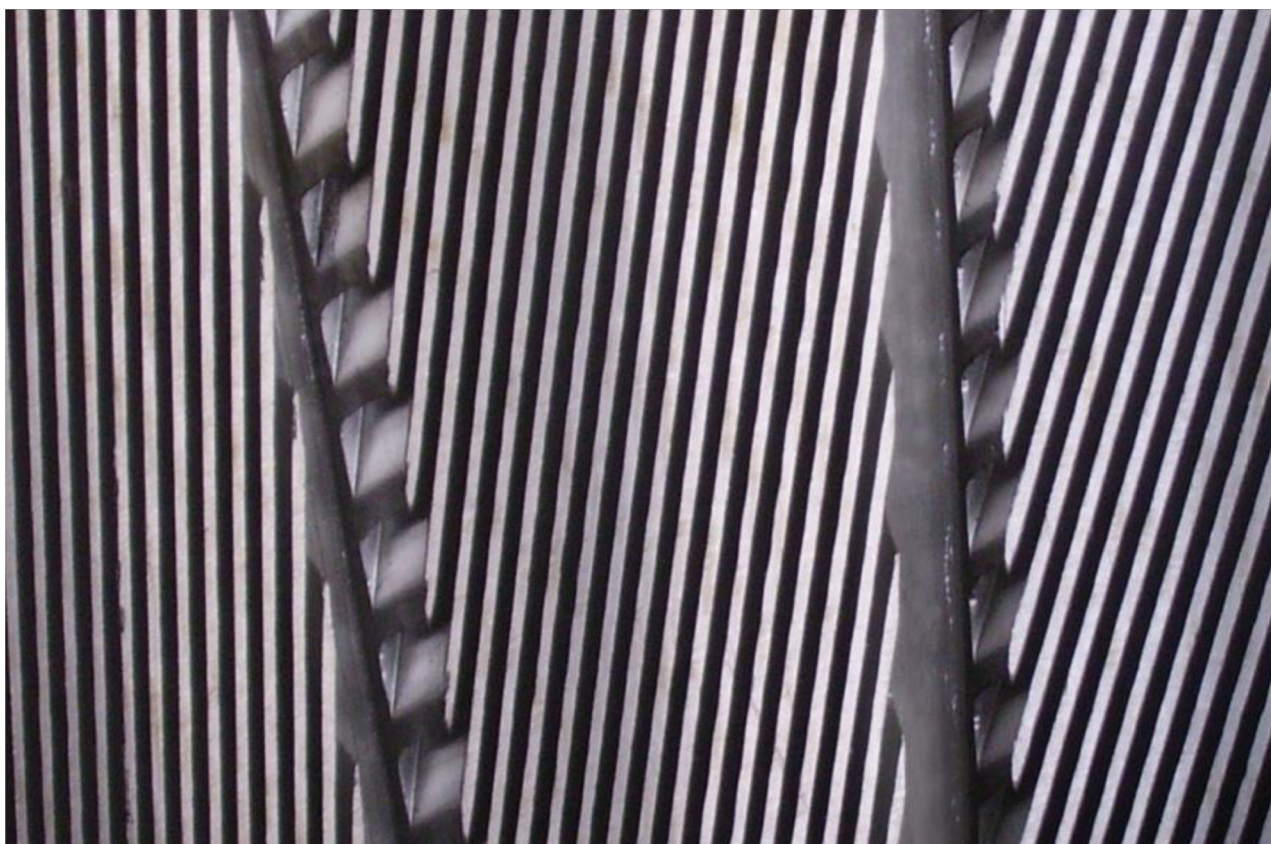
Guarniture per Fibra Corta (Hardwood)

Le fibre di latifoglie sono più corte (0.5-1.5 mm) e sottili. Qui l'obiettivo è lo sviluppo della superficie specifica e del volume (bulk) mantenendo l'integrità della fibra.

Spessore delle lame: sottile, tra 2.0 e 3.0 mm.

Densità delle lame: molto alta per aumentare i punti di contatto.

Effetto: la lama sottile permette un trattamento delicato, essenziale per non produrre eccessivi "fini" che rallenterebbero il drenaggio in macchina continua.



Lunghezza di Taglio al Secondo (Ls)

Rappresenta la capacità potenziale della guarnitura di intercettare le fibre nell'unità di tempo.

Formula: $L_s = z_r \times z_s \times l \times n$

Dove: z_r = numero lame rotore; z_s = numero lame statore; l = lunghezza radiale (m); n = velocità (s-1).

Carico Specifico del Bordo (Specific Edge Load - SEL)

Il SEL definisce l'intensità dell'impatto di ogni singola lama sulla fibra (J/m). È il parametro critico per distinguere i due trattamenti.

Formula: $SEL = (P_{tot} - P_{no_load}) / L_s$

5. VANTAGGI TECNICI ED ECONOMICI

L'adozione della raffinazione separata comporta numerosi benefici:

- **Riduzione dei consumi energetici specifici (kWh/t)** grazie a un uso più efficiente dell'energia.
- **Miglioramento delle proprietà meccaniche**, in particolare un miglior equilibrio tra trazione e strappo.
- **Ottimizzazione della drenabilità**, con minore produzione di fini indesiderati.
- **Aumento della produttività della macchina continua**, grazie a una migliore gestione dell'acqua.
- **Maggiore flessibilità operativa**, permettendo di modificare le ricette di impasto senza compromettere la qualità finale.

6. TABELLA RIASSUNTIVA DELLE FIBRE E CONDIZIONI IDEALI DI RAFFINAZIONE

Tipo di fibra	Lunghezza tipica	Caratteristiche principali	Obiettivo della raffinazione	Intensità di carico (SEL) indicativa	Approccio di raffinazione
Fibra lunga (Softwood)	2.5 – 4 mm	Elevata resistenza, parete spessa	Fibrillazione interna + esterna mantenendo la lunghezza	2.0 – 3.0 J/m	Azione più intensa, sviluppo resistenza
Fibra corta (Hardwood)	~1 mm	Buona formazione, opacità	Fibrillazione superficiale controllata	0.5 – 1.2 J/m	Raffinazione delicata, evitare taglio
Eucalipto	~0.7 – 1 mm	Alta densità, ottimo rigonfiamento	Massimizzare legami senza perdita di bulk	0.5 – 1.0 J/m	Raffinazione molto dolce
BCTMP	Variabile	Fibre rigide con lignina, alto bulk	Spazzolatura superficiale, preservare volume	< 0.5 J/m	Azione blanda, evitare fibrillazione intensa

7. PROVA SPERIMENTALE: RAFFINAZIONE MISTA, SEPARATA CON E SENZA ENZIMI

Al fine di valutare l'efficacia della raffinazione separata e l'impatto dell'utilizzo di enzimi, è stata condotta una prova sperimentale su un impasto costituito da:

- **50% fibra corta (hardwood)**
- **50% fibra lunga (softwood)**

Le prove sono state eseguite utilizzando un **raffinatore olandese da laboratorio**, che consente di simulare il processo di raffinazione e analizzare lo sviluppo delle proprietà delle fibre in funzione del tempo di trattamento.

7.1 Metodologia sperimentale

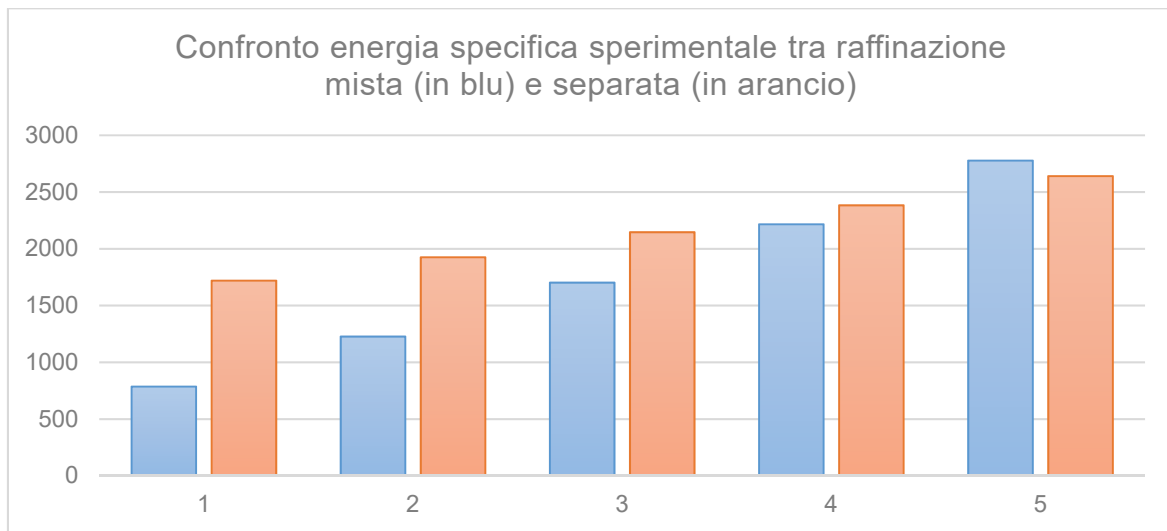
La **prima prova** è stata effettuata raffinando assieme le 2 tipologie di fibra per 60 minuti e quindi ogni 10 sono stati prelevati dei campioni per effettuare la prova di scolantezza dell'impasto e per formare dei fogli su cui effettuare successivamente le prove meccaniche.

La **seconda prova**, invece, è stata effettuata raffinando separatamente le 2 tipologie di fibra. La **fibra corta** è stata raffinata per **40 minuti**, raggiungendo circa **30 °SR (Schopper-Riegler)**, valore ritenuto ottimale per garantire una buona formazione del foglio senza generare un eccesso di fini.

La **fibra lunga** è stata invece raffinata per **90 minuti**, al fine di sviluppare adeguatamente la fibrillazione e le proprietà meccaniche, in considerazione della maggiore resistenza della sua parete cellulare.

Per equiparare l'energia specifica di raffinazione applicata dal raffinatore si è utilizzato il doppio quantitativo di fibra totale da raffinare.

Al termine del trattamento, le due frazioni sono state miscelate in rapporto **50/50** per ottenere l'impasto finale.



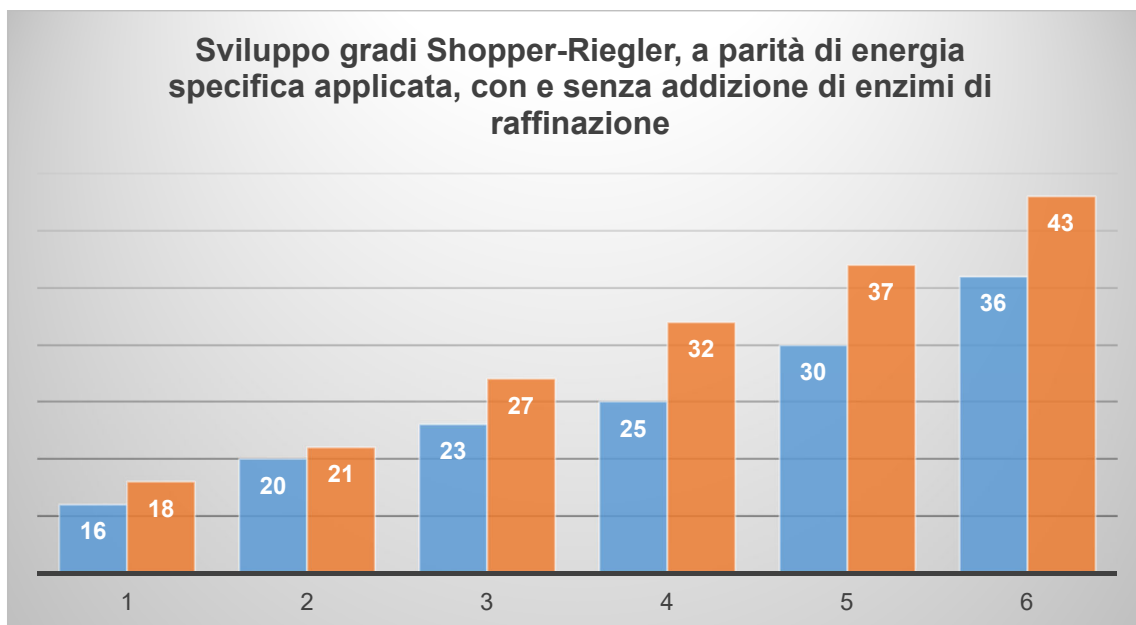
Nella **terza prova**, la **fibra lunga** è stata sottoposta a un trattamento enzimatico prima della raffinazione.

Completato lo spappolamento della fibra lunga, sono stati aggiunti 600ppm di enzima cellulasi [PETROZYM STR 4 di PETROFER] e sono stati fatti agire per 20 minuti come indicato dal fornitore.

Il resto del procedimento ha seguito passo passo la stessa metodologia della seconda prova. Gli **enzimi** (cellulasi ed emicellulasi) agiscono modificando la struttura della parete cellulare, favorendo:

- maggiore rigonfiamento della fibra
- parziale apertura della struttura interna
- maggiore facilità di fibrillazione

7.2 Confronto grado di scolantezza degli impasti con raffinazione separata con e senza enzimi



In azzurro raffinazione separata tradizionale

In arancio raffinazione separata enzimata

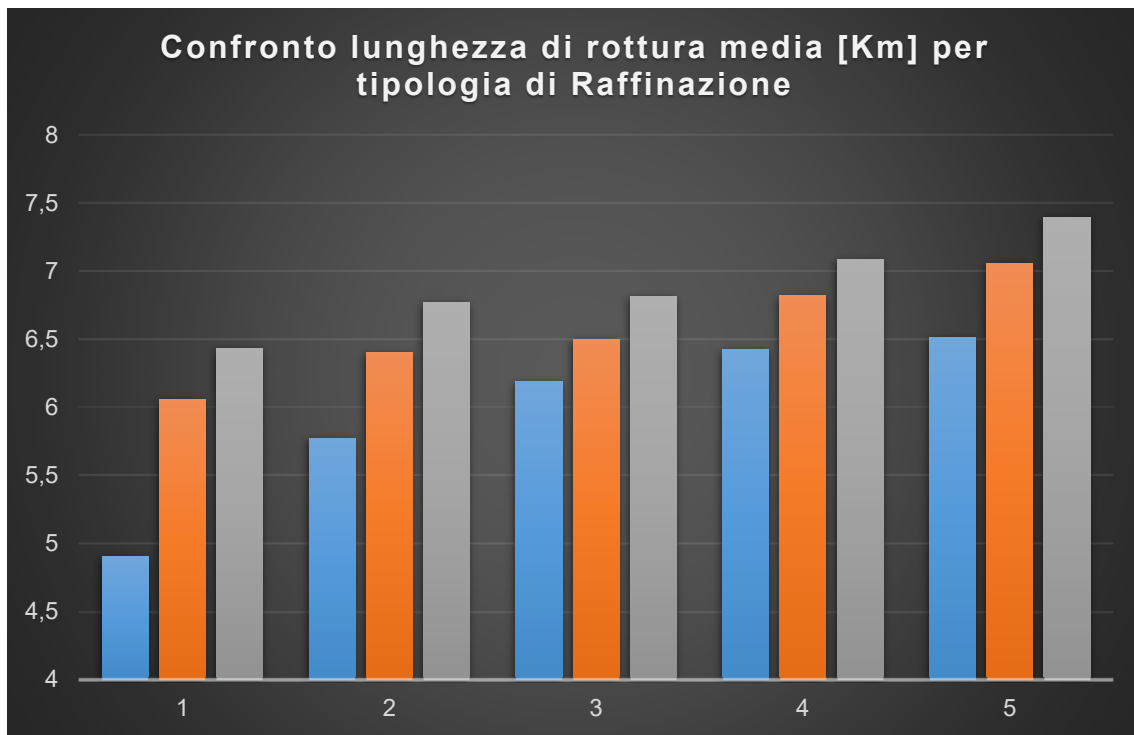
Il confronto tra le due condizioni mostra che, a parità di tempo di raffinazione:

- la **fibra lunga trattata con enzimi** raggiunge un **maggiore sviluppo delle proprietà meccaniche**
- si osserva una **maggiore efficienza della raffinazione**
- la fibra risulta più fibrillata a parità di energia applicata

Questo significa che gli enzimi permettono di ottenere **un livello di raffinazione più elevato senza aumentare il consumo energetico.**

7.3 Confronto lunghezza di rottura dei campioni sperimentali

Nella prova effettuata in laboratorio i campioni formati nel forma foglio sono stati sottoposti a prova sul dinamometro per comparare la lunghezza di rottura che le stesse energie di raffinazione sviluppano a differenza del metodo di raffinazione usato: mista, separata e separata con trattamento enzimatico sulla fibra lunga.



In azzurro raffinazione mista
In arancio raffinazione separata
In grigio raffinazione separata enzimata

7.4 Conclusioni della prova

- **a parità di energia applicata nelle prove 4 e 5**, si ottiene un maggiore sviluppo delle proprietà meccaniche con una minore energia specifica applicata nella **raffinazione separata** rispetto a quella **mista**.
- la curva **con enzimi** è sempre superiore rispetto a quella senza enzimi
- per raggiungere lo stesso valore di lunghezza di rottura del caso enzimatico, il sistema tradizionale separato richiederebbe più energia
- in condizioni industriali, ciò si tradurrebbe nella possibilità di **ridurre l'energia specifica mantenendo invariata la qualità del prodotto**
- si migliora il controllo del processo riducendo lo stress meccanico necessario

In termini pratici, questo significa che il trattamento enzimatico rende la raffinazione **più efficiente**, aumentando lo sviluppo delle proprietà a parità di consumo energetico.

L'integrazione tra raffinazione separata e trattamento enzimatico rappresenta quindi una soluzione efficace per ottimizzare sia le prestazioni tecniche sia i consumi energetici del processo cartario.

8. CONCLUSIONI

La raffinazione separata rappresenta oggi una scelta strategica fondamentale negli impianti cartari moderni. La possibilità di trattare in modo differenziato le diverse tipologie di fibra consente non solo di migliorare le prestazioni tecniche del prodotto finito, ma anche di ottimizzare i consumi energetici e aumentare la flessibilità produttiva.

In conclusione, l'integrazione del trattamento enzimatico nel processo di raffinazione si è dimostrata una strategia estremamente efficace per migliorare l'efficienza energetica e le proprietà meccaniche della carta. L'azione delle cellulasi e delle emicellulasi permette di ottenere una fibra più rigonfia e facilmente lavorabile, raggiungendo lunghezze di rottura superiori a parità di energia specifica applicata rispetto ai metodi tradizionali.

Tuttavia, nonostante l'evidente potenziale tecnico, il passaggio dalla scala di laboratorio a quella industriale presenta una criticità fondamentale: la **difficoltà nella disattivazione degli enzimi**.

A differenza dei test controllati in laboratorio, in un impianto a ciclo continuo la gestione dell'attività enzimatica residua è complessa per diversi motivi.

Pertanto, l'adozione di questa tecnologia richiede non solo un dosaggio accurato basato sulle caratteristiche della fibra lunga, ma anche un rigido protocollo di monitoraggio e controllo dei parametri di macchina per evitare che i benefici energetici vengano annullati da problemi di instabilità del processo produttivo.

9.BIBLIOGRAFIA

- Materiale didattico 31° corso di tecnologia per tecnici cartari **Paolo Zaninelli**
Materiale didattico ed Immagini **Officine Airaghi**