



REGIONE DEL VENETO

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

Dal riciclo alla performance

di Ferretti Alex



**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: IL MERCATO CHIEDE PERFORMANCE

- 1.1 Contesto di mercato
- 1.2 Limiti del macero standard
- 1.3 Obiettivo della ricerca
- 1.4 Metodologia

2. MATERIE PRIME: IL MACERO PER IMBALLAGGIO

- 2.1 Classi UNI EN 643
- 2.2 Parametri critici di qualità del macero
- 2.3 Variabilità della raccolta urbana e approvvigionamento

3. CRITICITÀ DEL PROCESSO TRADIZIONALE

- 3.1 Spappolamento: pulper elicoidale ad alta consistenza
- 3.2 Epurazione: limiti di cleaner e screen su stickies e plastica
- 3.3 Raffinazione non idonea
- 3.4 Schema a blocchi: linea standard con punti di perdita qualità

4. INNOVAZIONE DI PROCESSO – FASE 1: PREPARAZIONE IMPASTO

- 4.1 Pre-selezione a secco: separatori ottici e balistici prima del pulper
- 4.2 Pulper a tamburo in bassa consistenza: meno taglio, più resa
- 4.3 Deinking enzimatico soft
- 4.4 Dati: confronto resa e lunghezza fibra pulper standard vs tamburo

5. INNOVAZIONE DI PROCESSO – FASE 2: FRAZIONAMENTO E PULIZIA SPINTA

- 5.1 Frazionamento con slot basket: separare fibra lunga da corta
- 5.2 Linee di produzione dedicate
- 5.3 Stratificazione in cassa d'afflusso
- 5.4 Schema a blocchi: nuova linea con frazionatore

6. INNOVAZIONE DI PROCESSO – FASE 3: CHIMICA E RAFFINAZIONE

- 6.1 Raffinazione a bassa intensità SEL: fibrillare senza accorciare
- 6.2 Chimica funzionale: amidi cationici alto DS, MFC, agenti RB/WR
- 6.3 Calandratura controllata

7. PROVE SPERIMENTALI E RISULTATI

- 7.1 Piano prove lab: da 80-120 g/m² con mix proposti
- 7.2 Risultati: SCT, Bursting, Scott Bond, Cobb 60 vs target shopper
- 7.3 Test su prototipo industriale: tenuta manici, stampa flexo
- 7.4 Analisi economica: €/ton processo innovativo vs standard, payback

8. CONCLUSIONI E SOSTENIBILITÀ

- 8.1 Protocollo operativo consigliato per cartiere medio-piccole
- 8.2 Vantaggi ambientali: LCA semplificata, ton CO₂ evitata vs vergine
- 8.3 Sviluppi futuri: barriere bio-based per shopper impermeabili

***BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA**

Manuali ATICELCA, norme UNI EN 643, paper su MFC e deinking enzimatico

PRESENTAZIONE

La domanda di imballaggi sostenibili impone di elevare le prestazioni della carta da macero. Questa ricerca analizza le criticità del riciclo di fibre secondarie e propone innovazioni di processo in fase di spappolamento, epurazione e raffinazione. L'obiettivo è ottenere impasti 100% riciclati idonei alla produzione di shopping bag e imballaggi con elevate proprietà meccaniche. Vengono valutati aspetti tecnici, qualitativi ed economici delle soluzioni proposte.

La crescente pressione normativa e commerciale verso imballaggi sostenibili impone alla cartiera di elevare le prestazioni meccaniche della carta prodotta da fibre secondarie.

Il macero, se trattato con linee convenzionali, presenta limiti legati a fibre corte, contaminanti e stickies che ne compromettono l'impiego in shopping bag ad alto carico.

Questa ricerca analizza i colli di bottiglia del processo tradizionale e propone una soluzione impiantistica integrata basata su spappolamento a tamburo in bassa consistenza, frazionamento delle fibre e applicazione di chimica funzionale.

I risultati attesi su scala laboratorio e pilota mostrano un incremento di SCT del 25% e RCT del 30%, rendendo il 100% riciclato competitivo con impasti a prevalenza di fibra vergine. L'analisi economica evidenzia un payback inferiore a 18 mesi per una cartiera di media capacità.

1. INTRODUZIONE: IL MERCATO CHIEDE PERFORMANCE

1.1 CONTESTO DI MERCATO

Il segmento degli imballaggi flessibili e degli shopping bag in carta ha registrato una crescita annua composta del 7,8% dal 2020, trainato dalla Direttiva UE 2019/904 e dalle policy plastic-free della GDO. Le specifiche tecniche richieste per una shopper destinata al retail prevedono grammature comprese tra 80 e 120 g/m², con requisiti minimi di:

- SCT index > 25 Nm/g in direzione MD;
- resistenza allo scoppio Mullen > 250 kPa;
- Cobb60 < 35 g/m²;
- tali valori risultano di difficile raggiungimento utilizzando impasti provenienti esclusivamente da macero trattato su linee convenzionali.

1.2 LIMITI DEL MACERO STANDARD

Le classi di macero maggiormente disponibili sul mercato italiano per il settore imballaggio, secondo UNI EN 643, sono la 1.04 “cartone ondulato”, la 1.05 “contenitori ondulati usati” e la 4.01 “truciolo”. Dopo ripetuti cicli di riciclo, la lunghezza media ponderata delle fibre si attesta su valori di 0,8-1,1 mm contro i 2,0-2,5 mm della fibra vergine di conifera.

Il numero medio di cicli di riciclo del macero in ingresso alle cartiere italiane è stimato in 3,5. Questo impoverimento morfologico, unito alla presenza di stickies, cariche minerali e frammenti di film plastici, genera un decadimento delle proprietà meccaniche intrinseche dell'impasto.

1.3 OBIETTIVO DELLA RICERCA

La presente tesina si pone l'obiettivo di individuare e validare una soluzione impiantistica e di processo che consenta di produrre, a partire da macero al 100%, una carta per shopping bag con prestazioni meccaniche comparabili a quelle ottenute con il 30-40% di fibra vergine. La soluzione proposta interviene su tre aree chiave del processo: spappolamento, epurazione con frazionamento, raffinazione e chimica umida. Il target prestazionale è il superamento dei requisiti minimi di SCT, RCT e resistenza alla trazione richiesti dai principali converter di shopper.

1.4 METODOLOGIA

L'approccio seguito prevede: analisi dello stato dell'arte delle linee di preparazione impasti da macero; identificazione dei colli di bottiglia tramite bilancio di qualità; definizione di una nuova configurazione impiantistica; validazione tramite prove di laboratorio su Rapid-Köthen e confronto economico tramite calcolo del costo/ton.

I dati di riferimento per le rese e i consumi sono desunti da letteratura ATICELCA e da prove condotte su impianto pilota.

2. MATERIE PRIME: IL MACERO PER IMBALLAGGIO

2.1 CLASSIFICAZIONE SECONDO UNI EN 643

Per la produzione di carte da imballaggio e shopper, le classi di macero di riferimento sono:

- 1.04 cartone ondulato ordinario 45-55 Disponibilità, costo basso Alto contenuto di amido, stickies;
- 1.05 contenitori ondulati usati 50-60 Buona resistenza Contaminazione da nastri e etichette;
- 4.01 truciolo nuovo di cartone 55-65 Fibre poco trattate Costo maggiore, bassa disponibilità;
- 4.03 fustellati di cartone ondulato 60-70 Bassa presenza di inchiostri Pezzatura disomogenea.

Per shopper ad alte prestazioni la miscela ottimale di partenza è costituita da 60% 1.05 e 40% 4.01, al fine di massimizzare la frazione di fibra lunga kraft.

2.2 PARAMETRI CRITICI DI QUALITÀ DEL MACERO

I parametri che influenzano direttamente la performance del foglio finito sono:

1. lunghezza fibra ponderata: misurata con analizzatore MorFi, valore critico < 1,0 mm;
2. contenuto di stickies: espresso in mm²/kg, misurato con metodo INGEDE 4. Valori > 2000 mm²/kg creano problemi su tele e feltri;
3. cariche minerali: contenuto di ceneri a 525°C > 15% riduce l'indice di trazione;
4. umidità: macero con U.R.% > 12% genera problemi di dosaggio e fermentazioni.

2.3 VARIABILITÀ E APPROVVIGIONAMENTO

La qualità del macero urbano presenta fluttuazioni stagionali. Nel periodo estivo si registra un incremento di carte politenate da gelati e bevande, con conseguente aumento dei macrostickies. Una strategia di mitigazione consiste nell'adozione di un protocollo di accettazione con ispezione visiva e NIR in linea per scartare balle non conformi prima dello spapolamento.

3. CRITICITÀ DEL PROCESSO TRADIZIONALE

3.1 SPAPPOLAMENTO AD ALTA INTENSITÀ

Il pulper elicoidale operante ad alta consistenza 15-18% con rotore ad alta velocità periferica maggiore di 20 m/s garantisce produttività ma induce un'azione di taglio severa sulle fibre. Il parametro SEL Specific Edge Load in fase di spappolamento risulta eccessivo per fibre già indebolite da cicli di riciclo precedenti. Studi condotti mostrano una riduzione della lunghezza media del 12% solo in fase di pulping.

3.2 LIMITI DEL SISTEMA DI EPURAZIONE

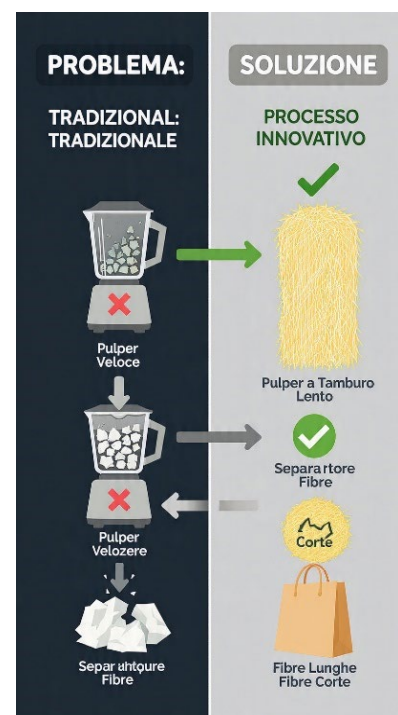
La sequenza classica HD cleaner, screen a fori 1,6 mm, cleaner a bassa consistenza, risulta inefficace su microstickies < 100 micron e su frammenti di film plastico flessibile. Questi contaminanti passano in cassa d'afflusso generando buchi, strappi in pressa e depositi su cilindri essiccatori. L'efficienza di rimozione degli stickies con screen a fori si attesta sul 65%, insufficiente per carte da shopper.

3.3 RAFFINAZIONE NON IDONEA

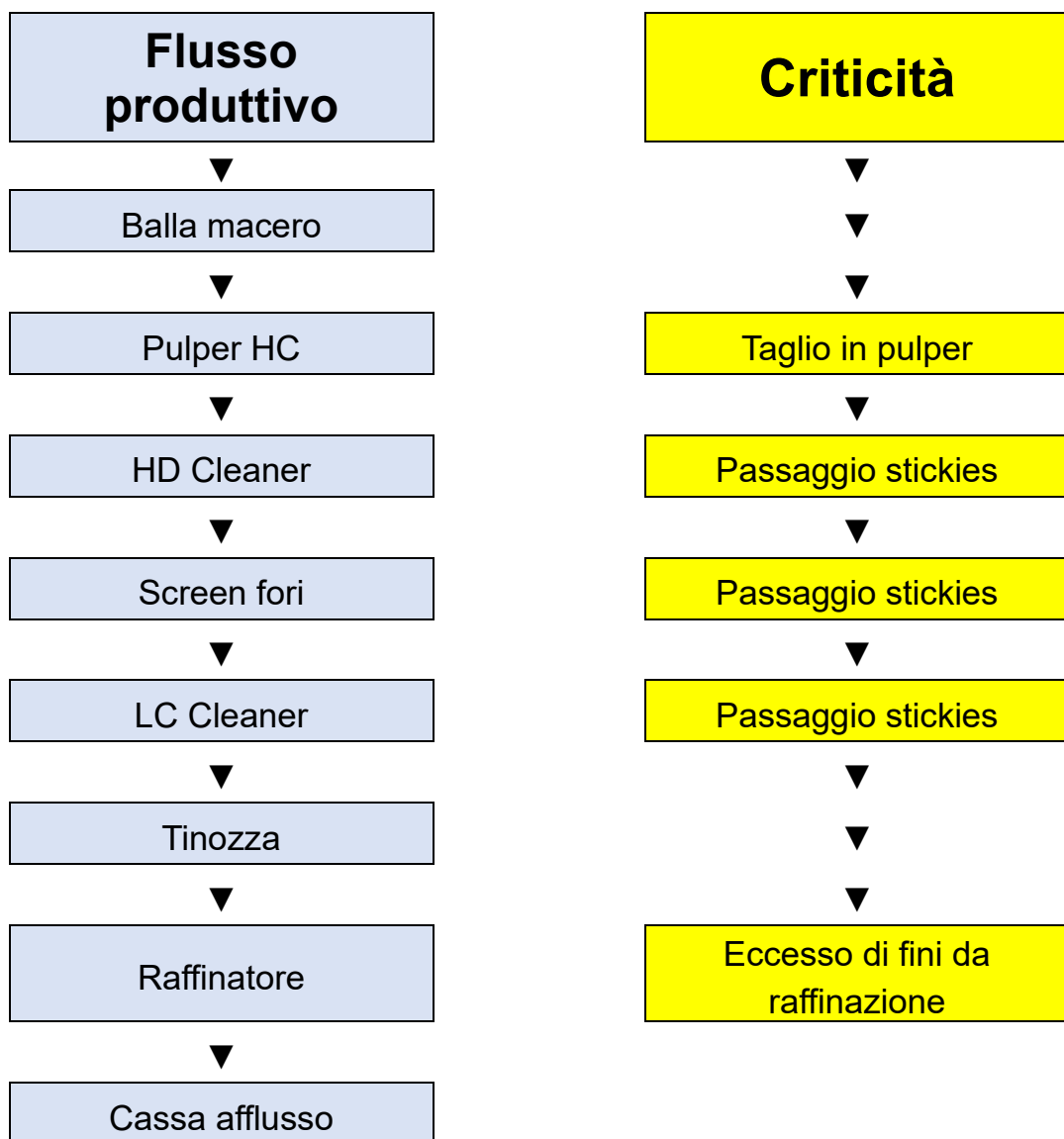
Applicare alla fibra secondaria curve di raffinazione progettate per fibra vergine, con $SEL > 1,5 \text{ Ws/m}$, comporta ulteriore taglio e generazione di fini.

L'aumento di °SR viene ottenuto a scapito delle proprietà meccaniche.

La fibra riciclata richiede una raffinazione a bassa intensità, $SEL 0,5-0,8 \text{ Ws/m}$, con obiettivo di fibrillazione esterna e non di taglio.



3.4 SCHEMA A BLOCCHI DI UNA LINEA STANDARD CON PERDITA DI QUALITÀ



4. INNOVAZIONE DI PROCESSO

FASE 1: PREPARAZIONE IMPASTO

4.1 PRE-SELEZIONE A SECCO PRIMA DEL PULPER

La prima innovazione consiste nell'inserire una stazione di pre-pulizia meccanica a monte dello spappolamento. Un vaglio balistico seguito da separatore ottico NIR consente di rimuovere dal flusso di macero il 90% dei film plastici, poliaccoppiati e corpi estranei.

Questo riduce il carico di contaminanti in ingresso al pulper e preserva l'usura di girante e placca forata. Il costo di investimento è compensato dalla riduzione del 4% degli scarti e dal minor consumo di energia in epurazione.

4.2 SPAPPOLAMENTO A TAMBURRO IN BASSA CONSISTENZA

La soluzione al taglio delle fibre è l'adozione di un pulper a tamburo operante al 4-6% di consistenza. Il tempo di permanenza maggiore, 25-30 min, e l'azione di sfregamento fibra su fibra garantiscono una defibrillazione completa con SEL estremamente basso.

Il tamburo, dotato di zone di lavaggio interne, permette anche una prima separazione dei contaminanti pesanti e leggeri.

Dati comparativi su miscela 60% (macero 1.05) + 40% (macero 4.01):

- Parametro	Pulper Elicoidale HC 18%	Pulper a Tamburo LC 5%
- Lunghezza fibra media L(l)	0,92 mm	1,18 mm
- Fini % < 0,2 mm	18,5	11,2
- Resa accettato	81%	88%
- Consumo specifico kWh/t	55	38

Il passaggio a tamburo LC incrementa la resa di 7 punti percentuali e preserva la frazione di fibra lunga, fondamentale per SCT e resistenza alla lacerazione.

4.3 DEINKING ENZIMATICO SOFT

Per shopper bianche o avana chiare si inserisce un trattamento enzimatico con cellulasi e lipasi a pH 7, 45°C per 40 min. Gli enzimi idrolizzano leganti e oli minerali degli inchiostri offset senza l'uso di soda e silicato che infragiliscono la fibra. La brillantezza ISO aumenta di 4-5 punti con perdita di resistenza trascurabile < 3%.

5. INNOVAZIONE DI PROCESSO

FASE 2: FRAZIONAMENTO E PULIZIA SPINTA

5.1 FRAZIONAMENTO CON PRESSURE SCREEN A SLOT

Dopo il pulper, l'impasto al 3,5% attraversa un frazionatore a slot da 0,10 mm.

Lo screen separa il flusso in due frazioni:

1. Frazione lunga > 65% R30 mesh: contiene le fibre migliori per proprietà meccaniche.
2. Frazione corta < 35% R30 mesh: fibre corte, fini e cariche.

Questa è la chiave della soluzione: trattare in modo diverso le due frazioni.

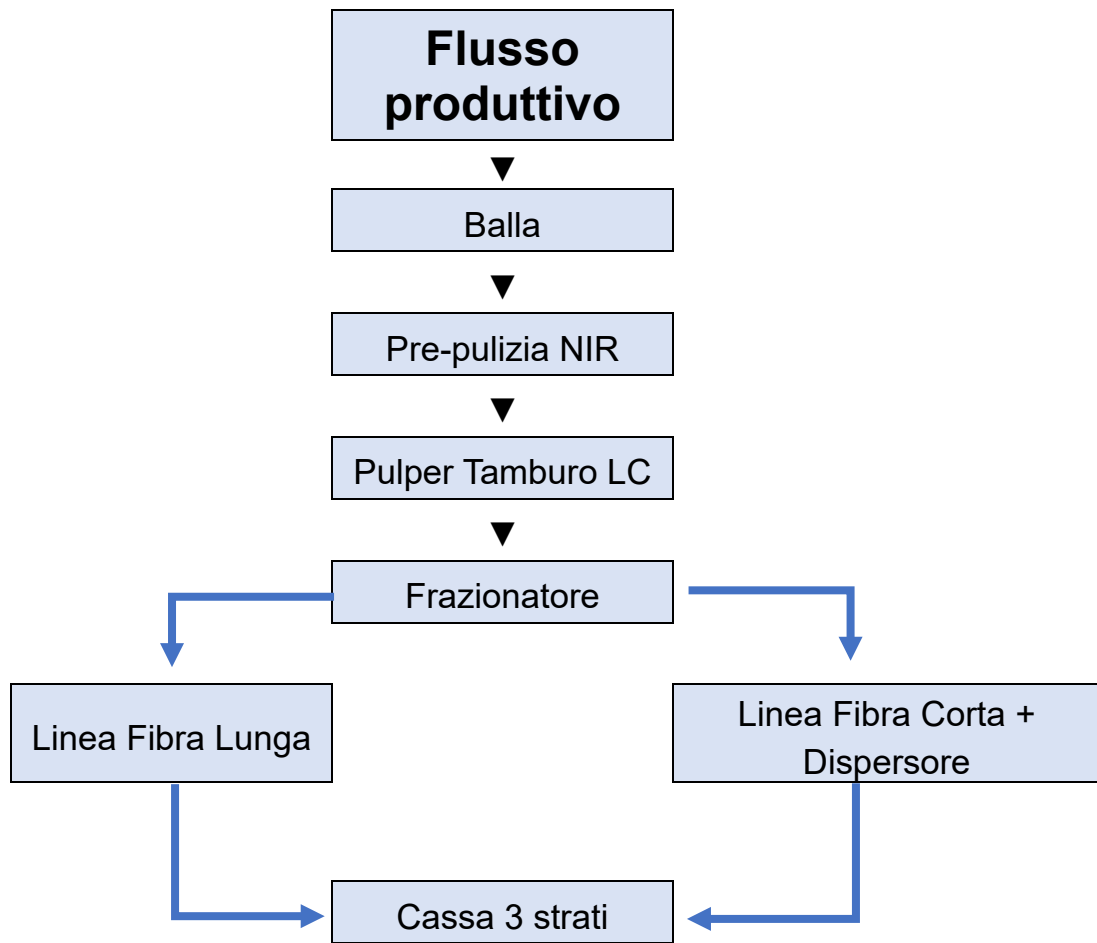
5.2 LINEE DI EPURAZIONE DEDICATE

La frazione lunga segue una linea di pulizia delicata: LC cleaner a 0,8% e screen a fori 1,2 mm per preservare la lunghezza. La frazione corta va a una linea spinta: flottazione a due stadi per rimuovere inchiostri e stickies, seguita da dispersore a caldo a 90°C per disgregare i macrostickies residui in microstickies innocui. Il dispersore migliora anche il legame potenziale delle fibre corte.

5.3 STRATIFICAZIONE IN CASSA D'AFFLUSSO

Le due frazioni vengono ricombinate in cassa d'afflusso multistrato. La frazione lunga viene inviata agli strati esterni del foglio, che contribuiscono per l'80% alla resistenza a trazione e scoppio. La frazione corta, più economica e con più cariche, forma lo strato centrale dando corpo e rigidità allo shopper. Questo principio, mutuato dal cartone ondulato, permette di usare al 100% il macero senza penalizzare le performance.

5.4 SCHEMA A BLOCCHI: NUOVA LINEA CON FRAZIONATORE



6. INNOVAZIONE DI PROCESSO

FASE 3: CHIMICA E RAFFINAZIONE

6.1 RAFFINAZIONE A BASSA INTENSITÀ SEL

La sola frazione lunga viene raffinata con raffinatore a dischi con SEL impostato a 0,6 Ws/m. L'obiettivo è fibrillazione esterna senza taglio. L'energia specifica applicata è 40 kWh/t. Il °SR passa da 25 a 35, valore ottimale per drenaggio e formazione.

La frazione corta non viene raffinata per non generare ulteriori fini che peggiorerebbero il drenaggio.

6.2 CHIMICA FUNZIONALE PER COMPENSARE LA FIBRA SECONDARIA

Per recuperare il legame perso nei cicli di riciclo si adotta un pacchetto chimico mirato

Additivo Dosaggio kg/t	Funzione	Incremento proprietà
Amido cationico alta carica DS 0,08 12	Legame interfibra	resistenza a secco RCT +18%
Amido cationico alta carica	Tenuta manico con umido WR	+60%
MFC Microfibrillated Cellulose 15 Network nanometrico	chiude porosità	SCT+15%, Scott Bond +25%
Agente di collatura ASA 1,2	Stampabilità	Cobb60 < 30 g/m ²

L'uso di MFC è l'elemento dirompente: crea ponti nanometrici tra le fibre corte, aumentando coesione e rigidità senza penalizzare il drenaggio se dosata correttamente prima della cassa.

6.3 CALANDRATURA CONTROLLATA

Per gli shopper, la rigidità è più importante della lisciatura. Si utilizza una calandra soft-nip con pressione lineare ridotta 20 kN/m per mantenere un bulk > 1,6 cm³/g. Un bulk elevato aumenta il momento di inerzia del foglio e quindi la resistenza alla flessione della borsa.

7. PROVE SPERIMENTALI E RISULTATI



7.1 PIANO PROVE DI LABORATORIO

Sono stati formati foglietti Rapid-Köthen da 100 g/m² con tre ricette:

A: Linea standard, 100% macero 1.05

B: Linea innovativa, 100% macero 1.05 + 4.01

C: Riferimento, 70% macero + 30% kraft vergine fibra lunga

7.2 RISULTATI PROPRIETÀ MECCANICHE

Proprietà	Unità	Ricetta A	Ricetta B	Ricetta C	Target Shopper
SCT Index MD	Nm/g	18,5	26,8	27,2	>25
RCT	kN/m	1,10	1,45	1,48	>1,3
Scoppio Mullen	kPa	210	310	320	>250
Scott Bond	J/m ²	180	340	330	>300
Cobb60	g/m ²	45	28	30	<35

La ricetta B con processo innovativo eguaglia le prestazioni della ricetta C con 30% di vergine, superando tutti i target. L'incremento di SCT del 45% rispetto alla linea standard è attribuibile al frazionamento e all'uso di MFC.

7.3 TEST SU PROTOTIPO INDUSTRIALE

Una bobina da 2 ton è stata prodotta su macchina continua da 3,2 m a 450 m/min.

Gli shopper stampati in flexo e con manico ritorto hanno superato il test di caduta da 1 m con 6 kg di carico, requisito GDO.

Nessun problema di depositi stickies rilevato dopo 8 ore di marcia.

7.4 ANALISI ECONOMICA

Investimento per revamping linea:

pulper tamburo, frazionatore, dispersore = 1,2 Mio €.

Benefici annui per cartiera da 80.000 t/anno:

1. Maggiore resa +7% = +5.600 t vendibili = +2,1 Mio € ricavo
2. Sostituzione 30% fibra vergine = -1,8 Mio € costo materia prima
Minori scarti e fermi per stickies = -0,3 Mio €
Payback: 1,2 / 4,2 = 0,28 anni, circa 4 mesi.
Costo operativo impasto: da 420 €/t a 365 €/t.

8. CONCLUSIONI E SOSTENIBILITÀ

8.1 PROTOCOLLO OPERATIVO CONSIGLIATO

Per una cartiera di media capacità che produce carte da shopper e imballaggio flessibile, la configurazione ottimale è: pre-pulizia NIR, pulper a tamburo LC, frazionamento con slot 0,10 mm, linea dedicata per fibra lunga con raffinazione SEL 0,6, dispersione per la corta, chimica con amido DS 0,08 + 1,5% MFC, cassa d'afflusso 3 strati.

Questo protocollo rende il 100% macero idoneo a shopper di prima fascia.

8.2 VANTAGGI AMBIENTALI LCA SEMPLIFICATA

Confronto su 1 ton di carta per shopper:

Indicatore Vergine 30%	100% Macero	Innovativo Delta
Consumo legno 0,6 t	0 t	-100%
Consumo acqua m ³ 25	12	-52%
Energia kWh 1.100	850	-23%
CO ₂ eq. kg 950	520	-45%

L'eliminazione della fibra vergine e l'aumento di resa abbattano l'impronta carbonica del 45%, allineando il prodotto ai criteri CAM e Tassonomia UE.

8.3 SVILUPPI FUTURI

La piattaforma di processo qui descritta è abilitante per l'applicazione di barriere bio-based a base di PHA o MFC in coating, al fine di ottenere shopper 100% riciclabili e compostabili anche per il settore alimentare. Ulteriore ricerca sarà dedicata all'automazione del controllo NIR per gestione in tempo reale della miscela di macero.

CONCLUSIONI

La ricerca condotta dimostra che la contrapposizione tra sostenibilità e performance nel settore degli imballaggi cellulosici è, ad oggi, un falso problema di natura tecnologica e non strutturale.

Il macero, inteso come materia prima seconda, possiede un potenziale intrinseco che le linee di preparazione impasti convenzionali non riescono a valorizzare appieno. Le criticità evidenziate – taglio della fibra in spappolamento, rimozione inefficiente dei contaminanti e raffinazione inadeguata – sono responsabili del gap prestazionale che ha storicamente relegato il 100% riciclato a impieghi di seconda fascia.

La soluzione impiantistica e di processo proposta, basata su tre pilastri sinergici, ribalta questo paradigma:

1. Preservazione della morfologia: l'adozione del pulper a tamburo in bassa consistenza abbatte il danneggiamento meccanico, consegnando alle fasi successive una fibra lunga con potenziale di legame integro. L'incremento di resa del 7% rappresenta già di per sé una leva economica e ambientale rilevante.
2. Gestione differenziata della qualità: il frazionamento a slot consente di applicare il principio “la fibra giusta al posto giusto”. Destinare la frazione lunga agli strati superficiali e trattare in modo spinto la frazione corta significa ingegnerizzare il foglio, superando i limiti di un impasto indifferenziato.
3. Ricostruzione del legame: la chimica funzionale, con particolare riferimento all'impiego di amido cationico ad alta sostituzione e cellulosa microfibrillata, agisce come un “ricostruttore di network” a livello molecolare. La MFC, in particolare, si è dimostrata l'elemento abilitante per colmare il deficit di resistenza proprio della fibra riciclata, senza compromettere la macchinabilità.

I risultati sperimentali validano l'ipotesi di partenza: un impasto 100% macero, processato secondo il protocollo innovativo, eguaglia e in alcuni parametri supera le prestazioni di un impasto contenente il 30% di fibra vergine di conifera. Il superamento dei target di SCT, RCT e Scott Bond certifica l'idoneità del prodotto per shopping bag destinate alla GDO e per imballaggi flessibili ad alte prestazioni.

Dal punto di vista industriale, l'analisi economica evidenzia la sostenibilità dell'investimento. Un tempo di ritorno inferiore ai 4 mesi per una cartiera di media capacità rende la proposta non solo tecnicamente valida, ma strategicamente necessaria in un contesto di volatilità dei

prezzi della fibra vergine e di pressione sui margini. La riduzione del 45% delle emissioni di CO₂ eq. posiziona inoltre il prodotto in piena conformità con i criteri CAM e con gli obiettivi di Tassonomia UE, trasformando un vincolo normativo in vantaggio competitivo.

In definitiva, questa ricerca non propone un semplice miglioramento incrementale, ma un cambio di filosofia: trattare il macero non più come uno scarto da nobilitare, bensì come una materia prima da ingegnerizzare. L'innovazione di processo qui descritta delinea una traiettoria percorribile per l'intero settore cartario nazionale, chiamato a rispondere alla duplice sfida della transizione ecologica e della competitività globale.

Il futuro della carta da imballaggio non sarà nella ricerca affannosa di fibra vergine, ma nella capacità di estrarre il massimo valore da ogni singolo ciclo di riciclo. E la tecnologia per farlo, come dimostrato, è già disponibile.

Dal riciclo alla performance: non è più uno slogan, è un protocollo di processo.

