



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

Dalla morfologia della fibra al processo industriale: analisi delle cellulose e implicazioni operative nella produzione della carta

di Hanelli Franko



**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.

- 1.1 Il settore cartario e il ruolo delle materie prime fibrose
- 1.2 Contesto dello stabilimento e principali produzioni
- 1.3 Obiettivo della tesina

2 - LA CELLULOSA: STRUTTURA, TIPOLOGIE E CARATTERISTICHE

2.1 Cos'è la cellulosa e da cosa è composta

- *Struttura chimica*
- *Parete cellulare*
- *Componenti del legno*

2.2 Morfologia delle fibre

- *Fibra lunga*
- *Fibra corta*
- *Fibrillazione*
- *Contenuti di fini*
- *Confronto tra fibre*

2.3 Processi di lavorazione

- *Pasta meccanica*
- *Pasta chemi-termomeccanica (CTMP)*
- *Pasta chimica*
- *Confronto tra processi*

3 - ANALISI SPERIMENTALE DELLE CELLULOSE UTILIZZATE IN STABILIMENTO

3.1 Procedura di controllo delle cellulose in ingresso

- *Scheda tecnica e parametri principali*
- *Esecuzione delle analisi*
- *Analisi meccaniche e ottiche*

- *Fiber Test*
- 3.2 Risultati sperimentali delle cellulose analizzate
 - *Fibra lunga*
 - *Fibra corta A*
 - *Fibra corta B*
- 3.3 Analisi comparativa e interpretazione dei risultati
 - *Confronto fibra lunga e fibra corta*
 - *Confronto tra fibre corte*

4 - CONCLUSIONI

- 4.1 Implicazioni sul processo industriale
- 4.2 Considerazioni sull'importanza del controllo delle materie prime fibrose

5 - BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUZIONE

1.1 IL SETTORE CARTARIO E IL RUOLO DELLE MATERIE PRIME FIBROSE

Il settore cartario rappresenta una realtà industriale complessa e articolata, nella quale la qualità del prodotto finale dipende dall'interazione tra materie prime, parametri di processo e tecnologie impiegate. In particolare, nel comparto delle carte speciali, come quelle prodotte presso lo stabilimento Fedrigoni di Verona, le caratteristiche del foglio devono rispondere a requisiti tecnici ed estetici elevati, rendendo necessario un controllo accurato di tutte le variabili coinvolte nel processo produttivo.

Alla base della produzione cartaria vi è la trasformazione di una sospensione fibrosa in un foglio continuo attraverso le fasi di formazione, pressatura ed essiccazione. Questo processo, apparentemente semplice, è in realtà il risultato di un equilibrio tra fenomeni fisici e meccanici che devono essere gestiti con precisione. In questo contesto, la materia prima fibrosa assume un ruolo centrale, in quanto costituisce la struttura del foglio e ne determina in larga parte le proprietà finali, quali resistenza meccanica, formazione, opacità e stampabilità.

Le fibre utilizzate possono essere di diversa natura, tra cui cellulosa vergine a fibra corta o fibra lunga, pasta chemi-termomeccanica (CTMP) e/o pasta legno. Ciascuna caratterizzata da specifiche proprietà morfologiche e comportamenti differenti durante il processo. La scelta e la combinazione di queste tipologie di fibra permettono di modulare le caratteristiche del prodotto finale in funzione delle specifiche richieste.

Tali caratteristiche, come la lunghezza della fibra, il contenuto di fini e il grado di fibrillazione, non influenzano soltanto il prodotto finale, ma incidono direttamente anche sullo svolgimento del processo produttivo. In particolare, esse determinano l'efficienza della raffinazione, la drenabilità della sospensione e la ritenzione delle particelle, contribuendo quindi al corretto funzionamento dell'impianto. Ne consegue che la scelta della cellulosa non è soltanto una scelta qualitativa, ma rappresenta anche una leva tecnica che può influenzare in modo significativo l'andamento del processo e la sua stabilità.

Un ulteriore aspetto da considerare è che le caratteristiche delle fibre non sono statiche, ma evolvono durante il processo produttivo, soprattutto nella fase di raffinazione. Durante questa fase, la fibra subisce modifiche strutturali che ne alterano la superficie, la flessibilità e la capacità di legame, influenzando quindi in modo diretto le prestazioni della sospensione fibrosa. Questo rende ancora più importante una corretta conoscenza e valutazione delle materie prime in ingresso.

1.2 CONTESTO DELLO STABILIMENTO E PRINCIPALI PRODUZIONI

Lo stabilimento di Verona presenta una produzione annua di circa 65.000 tonnellate di carta, con un portafoglio prodotti ampio e diversificato – circa 25.000 prodotti in totale nel gruppo Fedrigoni – tipico del settore delle carte speciali. La produzione è caratterizzata da frequenti cambi di lavorazione e da una grande varietà di grammature e tipologie di carta, che richiedono un'elevata flessibilità operativa e un attento controllo delle materie prime utilizzate.

Tra le diverse produzioni, cinque tipologie principali rappresentano oltre il 50% del volume complessivo annuo, costituendo quindi il riferimento principale per l'analisi svolta. Queste produzioni, pur differenziandosi per caratteristiche e destinazione d'uso, condividono una base comune rappresentata dal mix fibroso impiegato nelle ricette.

Dall'analisi delle ricette emerge che il mix fibroso utilizzato è composto prevalentemente da cellulosa di fibra corta, che rappresenta circa il 74% del totale, seguita da una quota di fibre lunghe e miste (circa il 16%) e da paste chemi-termomeccaniche (circa il 10%). In particolare, due fornitori di fibra corta risultano predominanti, con un'incidenza complessiva superiore al 70% del fabbisogno fibroso.

Questa distribuzione evidenzia come la fibra corta rappresenti la componente principale del sistema produttivo, pur in presenza di contributi significativi da parte delle altre tipologie di fibra. La fibra lunga contribuisce in modo determinante alle proprietà meccaniche del foglio, mentre la BCTMP influisce su parametri come bulk e opacità, rendendo necessario un corretto bilanciamento tra le diverse componenti.

Il comportamento complessivo del processo produttivo è quindi il risultato dell'interazione tra queste diverse tipologie di fibra, e ogni variazione nella loro qualità o nelle loro caratteristiche può riflettersi sia sulle prestazioni del processo che sulle proprietà del prodotto finale.

1.3 OBIETTIVO DELLA TESINA

L'obiettivo della presente tesina è quello di analizzare il comportamento delle principali materie prime fibrose utilizzate nello stabilimento, con particolare riferimento alle cellulose vergini, attraverso un approccio sperimentale basato su prove di raffinazione e analisi morfologica.

In particolare, lo studio si concentra sulla risposta delle fibre al processo di raffinazione, mediante la costruzione di curve di raffinazione e l'analisi dei parametri ottenuti tramite Fiber Test, quali lunghezza media, contenuto di fini e grado di fibrillazione. Tali parametri

permettono di descrivere in modo dettagliato le modifiche strutturali subite dalla fibra e di comprenderne il comportamento durante il processo.

Un ulteriore aspetto centrale dell'elaborato è il confronto tra i dati dichiarati nelle schede tecniche dei fornitori e i risultati sperimentali ottenuti, con particolare attenzione alle differenze nel contenuto di fini. L'obiettivo è quello di evidenziare eventuali scostamenti tra le caratteristiche nominali della cellulosa e il suo comportamento reale, mettendo in luce possibili criticità o aspetti migliorabili nella valutazione delle materie prime.

La tesina si propone inoltre di mettere in relazione i risultati ottenuti con il contesto industriale dello stabilimento, considerando il mix fibroso utilizzato nelle principali produzioni. In questo modo, l'analisi non si limita ad un approccio teorico o di laboratorio, ma si inserisce in una visione più ampia legata al processo produttivo reale.

Infine, l'elaborato ha lo scopo di evidenziare come variazioni anche limitate delle caratteristiche morfologiche delle fibre, in particolare del contenuto di fini, possano influenzare lo svolgersi del processo, contribuendo a una maggiore consapevolezza dell'importanza del controllo delle materie prime fibrose in ingresso e del loro monitoraggio nel tempo.

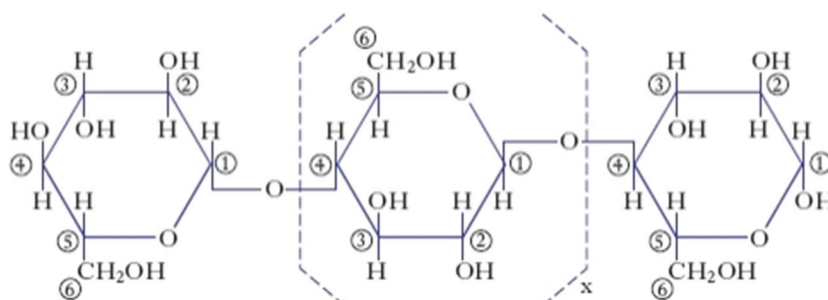
2. LA CELLULOSA: STRUTTURA, TIPOLOGIE E CARATTERISTICHE

2.1 COS'È LA CELLULOSA E DA COSA È COMPOSTA

Struttura chimica

La cellulosa rappresenta il principale costituente delle fibre vegetali ed è la materia prima fondamentale per la produzione della carta, oltre ad essere il più abbondante biopolimero sulla Terra. Dal punto di vista chimico, si tratta di un polisaccaride naturale costituito da lunghe catene lineari di unità di D-glucosio, legate tra loro mediante legami β -1,4-glicosidici. Questa particolare configurazione molecolare conferisce alla cellulosa una struttura rigida e altamente ordinata, che è alla base delle proprietà meccaniche della fibra.

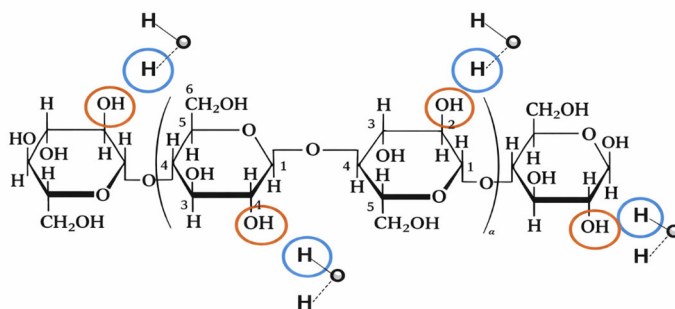
La formula chimica generale di questo polisaccaride è: $(C_6H_{10}O_5)_n$.



Questo polimero quindi, è una macromolecola costituita da lunghe catene di unità monosaccaridiche ripetute, detti monomeri. Nel caso della cellulosa, l'unità base è il D-glucosio, uno zucchero semplice a sei atomi di carbonio. I monomeri sono legati tra loro mediante legami β -1,4-glicosidici. Questo tipo di legame si forma tra il carbonio 1 di una molecola di glucosio e il carbonio 4 della molecola successiva, con una configurazione β che comporta una disposizione alternata delle unità lungo la catena. In pratica, ogni unità di glucosio è ruotata di 180° rispetto alla precedente, dando origine a una catena lineare e non ramificata. La configurazione β è un elemento fondamentale che distingue la cellulosa da altri

polisaccaridi, come l'amido. Nell'amido, infatti, i legami sono di tipo α -1,4-glicosidico, che determinano una struttura elicoidale e più compatta. Questa differenza strutturale ha conseguenze molto importanti: mentre l'amido è facilmente digeribile e solubile, la cellulosa è altamente resistente e insolubile in acqua, proprio a causa della sua struttura lineare e dell'elevata stabilità dei legami intermolecolari.

Le lunghe catene lineari di cellulosa tendono ad aggregarsi tra loro grazie alla formazione di legami a idrogeno. Questi legami si instaurano tra i gruppi ossidrilici (-OH) presenti lungo le catene e rappresentano una delle principali forze responsabili della coesione della struttura. Si distinguono legami a idrogeno intramolecolari, che si formano all'interno della stessa catena, e legami intermolecolari, che si formano tra catene diverse. Le regioni cristalline sono caratterizzate da una disposizione molto regolare delle catene e da un'elevata densità di legami a idrogeno, che conferiscono grande resistenza meccanica e rigidità. Le regioni amorfe, invece, presentano una struttura meno compatta e sono più accessibili all'acqua e agli agenti chimici. Questa differenza è particolarmente importante nel processo cartario, in quanto le zone amorfe sono quelle che partecipano maggiormente ai fenomeni di rigonfiamento e fibrillazione durante la raffinazione. La presenza di gruppi ossidrilici lungo le catene di cellulosa rende la fibra fortemente idrofila, ovvero capace di interagire con l'acqua. Quando la cellulosa viene immersa in acqua, si verifica un assorbimento che porta al rigonfiamento della struttura, facilitando la mobilità delle microfibrille e aumentando la flessibilità della fibra. Questo fenomeno è fondamentale per lo sviluppo dei legami interfibra durante la formazione del foglio.



È importante evidenziare che, durante il processo cartario, la struttura chimica della cellulosa rimane sostanzialmente invariata: i legami glicosidici non vengono rotti in condizioni normali di lavorazione. Tuttavia, l'energia meccanica applicata durante la raffinazione può modificare la disposizione delle microfibrille e aumentare l'accessibilità delle regioni amorfe, influenzando in modo significativo il comportamento della fibra. Un'eventuale degradazione chimica della cellulosa, ad esempio dovuta a trattamenti troppo aggressivi, può portare alla

rottura delle catene polimeriche e alla riduzione del grado di polimerizzazione. Questo fenomeno comporta una diminuzione della resistenza meccanica della fibra e può influenzare negativamente le proprietà del foglio. Inoltre, una degradazione eccessiva può favorire la formazione di frammenti di dimensioni ridotte, contribuendo all'aumento del contenuto di fini.

Parete cellulare

Dal punto di vista morfologico, la fibra di cellulosa è costituita da una struttura complessa e stratificata chiamata parete cellulare, che rappresenta l'elemento fondamentale per comprendere il comportamento della fibra nel processo cartario. La parete cellulare non è uniforme, ma è composta da diversi strati concentrici, ognuno dei quali presenta caratteristiche specifiche in termini di composizione chimica, spessore e orientamento delle fibrille.

Partendo dall'esterno verso l'interno, si distinguono: la lamella mediana (M), la parete primaria (P) e la parete secondaria, suddivisa negli strati S1, S2 e S3. All'interno della fibra è presente il lume, ovvero la cavità centrale.

La lamella mediana (M) rappresenta lo strato più esterno ed è costituita principalmente da lignina (circa il 90%), con una quantità molto ridotta di cellulosa. Lo spessore varia tra 1-2 μm , non è presente nessuna fibrilla e la sua funzione è quella di "cementare" tra loro le fibre nel tessuto vegetale. Dal punto di vista del processo cartario, questo strato è particolarmente importante perché, durante i processi chimici, deve essere in gran parte rimosso per permettere la separazione delle fibre. La sua natura amorfa e l'elevato contenuto di lignina la rendono poco reattiva alla raffinazione.

Subito al di sotto si trova la parete primaria (P), caratterizzata da uno spessore molto ridotto (circa 0,03–0,10 μm) e da una struttura reticolare. In questo strato, le fibrille sono disposte in modo disordinato, senza un orientamento preciso. La composizione chimica è ancora ricca di lignina (circa 70%), con una presenza relativamente bassa di cellulosa (circa 10%) e una quota significativa di emicellulose (circa 20%). Questa struttura rende la parete primaria relativamente amorfa e facilmente accessibile all'acqua.

La parte principale della fibra è rappresentata dalla parete secondaria, che costituisce la maggior parte dello spessore totale ed è suddivisa in tre strati: S1, S2 e S3.

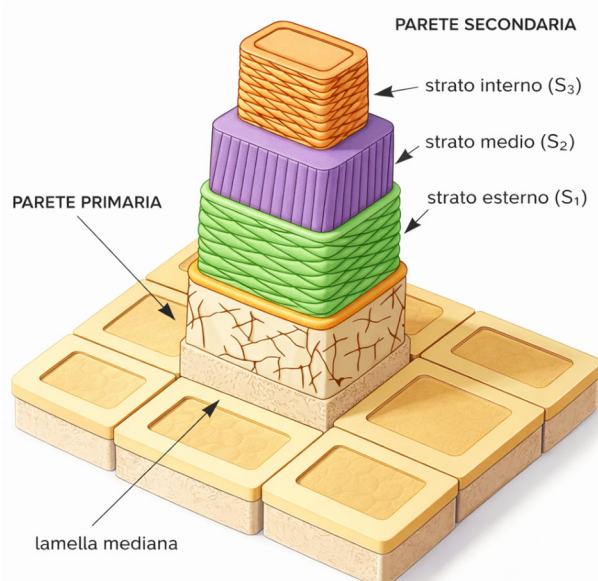
Lo strato S1 è il più esterno della parete secondaria e ha uno spessore ridotto (circa 0,10–0,20 μm). In questo strato, le fibrille sono disposte in modo incrociato, con un angolo elevato rispetto all'asse longitudinale della fibra. La composizione chimica presenta una percentuale

maggiore di cellulosa rispetto agli strati più esterni (circa 35%), ma è ancora presente una quota significativa di lignina (circa 40%). Questo strato contribuisce alla resistenza strutturale della fibra, ma in misura limitata rispetto allo strato successivo.

Lo strato S2 è il più importante e rappresenta la parte predominante della parete cellulare, con uno spessore che può variare da circa 0,5 fino a 8 μm . In questo strato, le fibrille sono orientate quasi parallelamente all'asse longitudinale della fibra, con un angolo microfibrillare ridotto. La composizione è caratterizzata da un'elevata percentuale di cellulosa (circa 55%) e da un contenuto ridotto di lignina (circa 15%). Questa configurazione rende lo strato S2 responsabile della maggior parte delle proprietà meccaniche della fibra, in particolare della resistenza alla trazione e della rigidità. Dal punto di vista del processo cartario, lo strato S2 è quello che viene maggiormente coinvolto durante la raffinazione: è qui che si sviluppano i fenomeni di fibrillazione interna e di apertura della struttura.

Lo strato S3, infine, è lo strato più interno della parete cellulare, a contatto con il lume, ed è molto sottile (circa 0,07–0,10 μm). In questo strato, le fibrille sono disposte con un orientamento obliquo rispetto all'asse della fibra. La composizione presenta una percentuale elevata di cellulosa e una quantità molto ridotta di lignina. Nonostante il suo spessore limitato, lo strato S3 può influenzare il comportamento della fibra in termini di permeabilità e interazione con l'acqua.

Nel complesso, la struttura multilayer della parete cellulare determina il comportamento della fibra durante il processo cartario. In particolare, l'orientamento delle fibrille e la composizione chimica dei diversi strati influenzano la risposta della fibra alla raffinazione. Durante questo processo, l'energia meccanica applicata agisce principalmente sulla parete secondaria, in particolare sullo strato S2. Si verificano fenomeni di rigonfiamento dovuti all'assorbimento di acqua, seguiti da fibrillazione interna, che comporta una parziale separazione delle fibrille all'interno della struttura. Con l'aumentare dell'intensità della raffinazione, può verificarsi anche fibrillazione esterna, con distacco di microfibrille dalla superficie della fibra. Se il processo è troppo spinto, la struttura della parete cellulare può degradarsi, portando alla formazione di particelle fini. Questo fenomeno è strettamente legato alla struttura degli strati e alla loro resistenza meccanica.



In sintesi, la parete cellulare è una struttura altamente organizzata e differenziata, nella quale ogni strato contribuisce in modo specifico alle proprietà della fibra. La conoscenza dettagliata della sua struttura è fondamentale per comprendere il comportamento delle fibre durante la lavorazione e per interpretare correttamente i risultati delle analisi morfologiche.

Componenti del legno

Il legno, materia prima di partenza per la produzione della cellulosa, è costituito da una struttura complessa composta principalmente da cellulosa, emicellulose, pectine e lignina, a cui si aggiungono in quantità minori estrattivi e sostanze minerali (ceneri). La composizione di questi componenti varia in funzione della specie legnosa, distinguendo in particolare tra conifere e latifoglie.

Indicativamente, nelle conifere la cellulosa è presente in percentuali comprese tra il 45% e il 55%, le emicellulose tra il 15% e il 22% e la lignina tra il 26% e il 30%. Nelle latifoglie, invece, la cellulosa varia tra il 40% e il 52%, le emicellulose tra il 21% e il 27% e la lignina tra il 18% e il 23%. Le ceneri e gli estrattivi rappresentano una frazione minoritaria, generalmente inferiore al 2–6%, ma con un ruolo non trascurabile nel processo.

La cellulosa costituisce il componente principale della fibra ed è responsabile della resistenza meccanica del materiale. Dal punto di vista chimico, è relativamente stabile e resistente ai trattamenti chimici (motivo per cui rappresenta la frazione che viene mantenuta nei processi di produzione della pasta). La sua struttura lineare e altamente organizzata permette di conferire alla fibra rigidità e capacità di trasferire gli sforzi meccanici.

Le emicellulose sono polisaccaridi a struttura amorfa, caratterizzati da un grado di polimerizzazione inferiore rispetto alla cellulosa e da una struttura più ramificata. Questa configurazione le rende più facilmente accessibili all'acqua e più reattive durante il processo. Dal punto di vista cartario, le emicellulose svolgono un ruolo fondamentale nel favorire il rigonfiamento della fibra e la formazione dei legami interfibra. Una maggiore presenza di emicellulose è generalmente associata a una migliore lavorabilità e a una maggiore capacità di legame, influenzando positivamente le proprietà meccaniche della carta.

Le pectine sono polisaccaridi a struttura amorfa e altamente idrofila, localizzati principalmente nella parete primaria e nella lamella mediana. Essi possono essere acidi o neutri, con catene più o meno ramificate, che formano gel idratati che conferiscono plasticità e flessibilità alla parete cellulare (rappresentano il 2-35% di essa).

La lignina è una sostanza polimerica complessa di natura aromatica che svolge la funzione di "cemento" tra le fibre, tenendole unite nella struttura del legno. È responsabile della rigidità e della resistenza alla compressione del materiale vegetale. A differenza della cellulosa e delle emicellulose, la lignina è idrofoba e meno reattiva all'acqua. Nei processi chimici di

produzione della cellulosa, la lignina viene in gran parte rimossa per consentire la separazione delle fibre. Tuttavia, nelle paste meccaniche e chemi-termomeccaniche, una parte significativa di lignina rimane nella fibra, rendendola più rigida, meno collassabile e meno reattiva alla raffinazione.

Gli estrattivi comprendono una serie di composti organici presenti nel legno, tra cui resine, cere, tannini, acidi grassi e sostanze coloranti. Sebbene presenti in quantità limitate, questi componenti possono influenzare il processo cartario, causando ad esempio problemi di deposito sugli impianti o interferendo con l'efficacia degli additivi chimici utilizzati nel processo.

Le ceneri rappresentano la frazione minerale del legno e includono elementi inorganici come calcio, potassio, silice e altri sali minerali. Anche se presenti in quantità ridotte, possono avere effetti sul processo, in particolare aumentando l'abrasività e contribuendo alla formazione di incrostazioni o depositi negli impianti.

In sintesi, la composizione chimica del legno influenza in modo diretto il comportamento delle fibre nel processo cartario. La cellulosa fornisce la struttura e la resistenza, le emicellulose favoriscono la flessibilità e la formazione dei legami interfibra, mentre la lignina contribuisce alla rigidità ma riduce la reattività della fibra. Estrattivi e ceneri, pur essendo presenti in quantità minori, possono influenzare il processo produttivo e devono essere considerati nella valutazione complessiva della materia prima.

2.2 MORFOLOGIA DELLE FIBRE

La morfologia delle fibre rappresenta uno degli aspetti più rilevanti nella valutazione delle materie prime fibrose nel processo cartario, in quanto determina in modo diretto sia il comportamento della sospensione durante la lavorazione sia le proprietà finali del foglio di carta. Con il termine morfologia si intendono tutte le caratteristiche fisiche e dimensionali della fibra, tra cui lunghezza, larghezza, forma, contenuto di fini e grado di fibrillazione.

A differenza della composizione chimica, che rimane sostanzialmente invariata durante il processo, la morfologia delle fibre è fortemente influenzata dai trattamenti meccanici, in particolare dalla raffinazione, ovvero l'unica fase del processo di produzione della carta dove viene modificata la morfologia delle fibre. Per questo motivo, lo studio della morfologia non è solo descrittivo, ma ha un ruolo fondamentale nel controllo del processo e nell'interpretazione dei risultati sperimentali.

Le caratteristiche morfologiche delle fibre dipendono in primo luogo dalla specie legnosa di origine, che si distingue principalmente in conifere (softwood) e latifoglie (hardwood). Queste

due categorie presentano differenze significative in termini di dimensioni, struttura e comportamento nel processo cartario.

Oltre ai parametri dimensionali di base, come lunghezza e larghezza, esistono alcuni indici morfologici che permettono di descrivere in modo più completo il comportamento della fibra durante la formazione del foglio. Tra questi, i più significativi sono l'indice di feltrabilità (L/S) e l'indice di Runkel (2P/C).

L'indice di feltrabilità è definito come il rapporto tra la lunghezza della fibra (L) e il suo spessore (S):

$$L/S$$

Questo indice rappresenta la capacità della fibra di intrecciarsi con le altre e di contribuire alla formazione della struttura fibrosa del foglio. Valori elevati di L/S indicano fibre lunghe e sottili, che presentano una maggiore capacità di formare una rete resistente. Al contrario, valori più bassi indicano fibre più corte o più spesse, con minore capacità di intreccio.

Dal punto di vista pratico, un elevato indice di feltrabilità è associato a migliori proprietà meccaniche del foglio, in particolare alla resistenza alla trazione e allo strappo. Tuttavia, fibre con L/S elevato possono dare luogo a una formazione meno uniforme.

L'indice di Runkel è invece definito come:

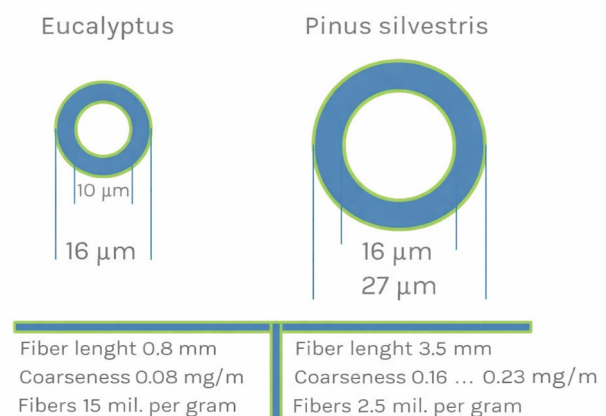
$$R = \frac{2P}{C}$$

P rappresenta lo spessore della parete cellulare e C il diametro del lume. Questo indice descrive la capacità della fibra di collassare durante il processo di formazione del foglio.

Quando il valore dell'indice di Runkel è inferiore a 1, la fibra è in grado di collassare facilmente, passando da una struttura tubolare a una struttura più appiattita. Questo comportamento favorisce l'aumento

dell'area di contatto tra le fibre e quindi la formazione dei legami interfibra. Al contrario, valori superiori a 1 indicano fibre rigide, con pareti spesse e lume ridotto, che tendono a mantenere la loro forma cilindrica, limitando la capacità di legame.

Questi indici permettono quindi di interpretare in modo più completo il comportamento delle fibre e rappresentano un collegamento diretto tra morfologia e proprietà del foglio.

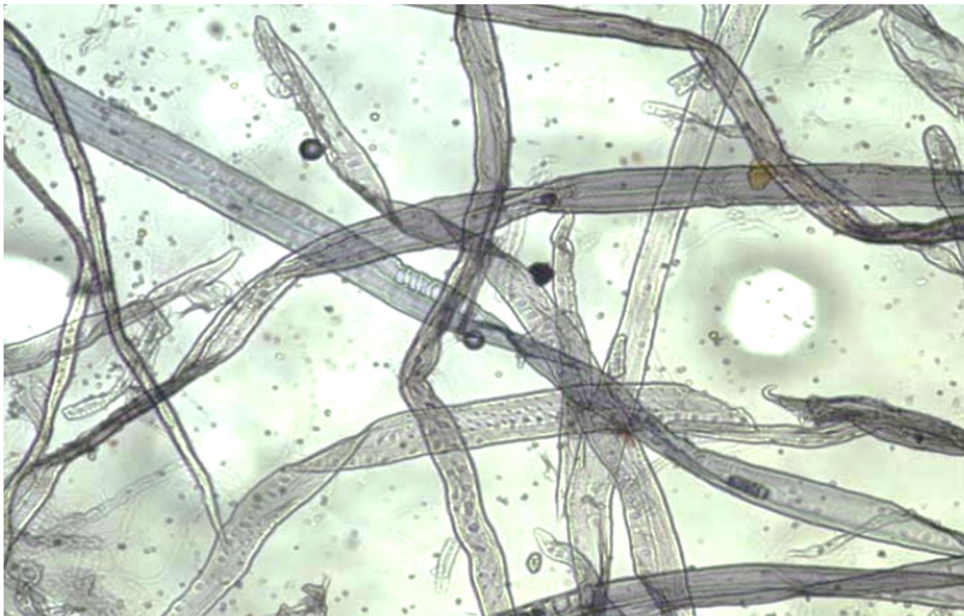


Fibra lunga

Le fibre lunghe derivano principalmente da legni di conifera, come pino, abete e larice, e sono costituite prevalentemente da tracheidi, cellule allungate che svolgono sia funzione meccanica sia di trasporto della linfa nella pianta. La lunghezza di queste fibre è generalmente compresa tra 2 e 4 mm, ma può variare in funzione della specie, delle condizioni di crescita e del processo di produzione della pasta.

Dal punto di vista morfologico, uno degli aspetti più rilevanti delle fibre lunghe è l'elevato rapporto lunghezza/diametro, che si traduce in un alto indice di feltrabilità (L/S). Questo parametro rappresenta la capacità delle fibre di intrecciarsi tra loro e di formare una rete fibrosa resistente. Fibre con elevato L/S tendono a sovrapporsi su distanze maggiori, creando una struttura più continua e capace di distribuire meglio gli sforzi meccanici. Questa caratteristica rende le fibre lunghe fondamentali per conferire resistenza alla carta, in particolare per quanto riguarda la resistenza allo strappo (tear index), la resistenza alla trazione e, in generale, l'integrità strutturale del foglio. In un sistema fibroso, le fibre lunghe possono essere considerate come l'ossatura principale della rete, mentre le fibre corte svolgono un ruolo più di riempimento.

Dal punto di vista della formazione del foglio, tuttavia, la presenza di fibre lunghe può comportare una distribuzione meno uniforme. A causa della loro dimensione, tendono a orientarsi preferenzialmente nel senso di macchina e a creare una struttura meno omogenea, con possibili variazioni locali di densità.



Questo può influenzare negativamente alcune proprietà, come la uniformità e la stampabilità. Dal punto di vista della raffinazione, le fibre lunghe presentano una maggiore resistenza iniziale alla lavorazione. La loro parete cellulare, in particolare lo strato S2, è più sviluppata e richiede un apporto energetico maggiore per essere modificata. Durante la raffinazione, si sviluppano progressivamente fenomeni di fibrillazione interna ed esterna, che aumentano l'area specifica e la capacità di legame.

È importante sottolineare che, per le fibre lunghe, il processo di raffinazione deve essere attentamente controllato. Un'azione insufficiente porta a fibre rigide e poco leganti, mentre un'eccessiva raffinazione può provocare accorciamento delle fibre (cutting), riducendo il loro contributo alla resistenza meccanica. Questo rappresenta uno degli aspetti critici nella gestione del processo.

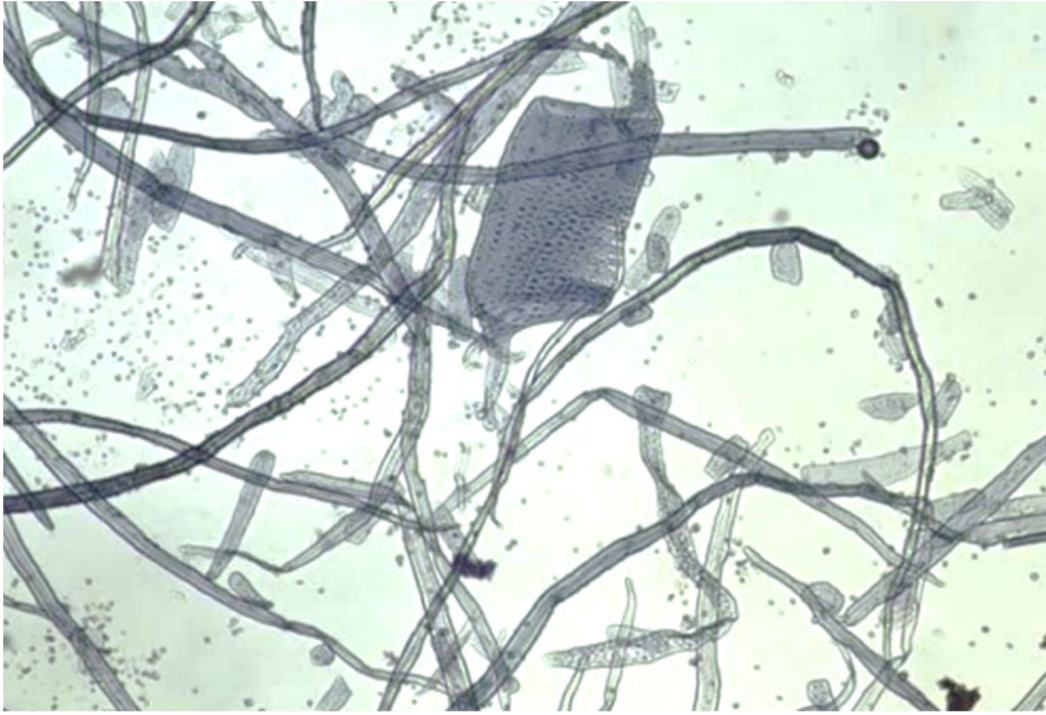
Per quanto riguarda l'indice di Runkel, come già evidenziato, esso dipende dalla struttura della fibra e non dalla sua lunghezza. Tuttavia, nelle fibre lunghe è particolarmente importante che la struttura della parete cellulare consenta una certa capacità di collasso ($R < 1$), in quanto questo aumenta la superficie di contatto tra le fibre e favorisce la formazione dei legami interfibra.

Dal punto di vista applicativo, le fibre lunghe vengono utilizzate per conferire robustezza e resistenza al prodotto finale. Il loro comportamento deve essere ottimizzato in modo da massimizzare la formazione di legami senza compromettere la lunghezza della fibra, che rappresenta il principale fattore di resistenza.

Fibra corta

Le fibre corte derivano principalmente da legni di latifoglia, come eucalipto, betulla, faggio e pioppo. A differenza delle conifere, le latifoglie presentano una struttura cellulare più complessa, caratterizzata dalla presenza di diversi tipi di cellule, tra cui fibre libriiformi e vasi. Le fibre utilizzate nel processo cartario sono generalmente più corte, con una lunghezza media compresa tra 0,6 e 1,2 mm.

Dal punto di vista morfologico, le fibre corte presentano un rapporto lunghezza/diametro inferiore rispetto alle fibre lunghe, e quindi un indice di feltrabilità (L/S) più basso. Questo comporta una minore capacità di intreccio, ma allo stesso tempo una maggiore uniformità nella distribuzione all'interno della sospensione fibrosa. Questa caratteristica è fondamentale per la formazione del foglio. Le fibre corte tendono infatti a distribuirsi in modo più omogeneo, riempiendo gli spazi tra le fibre lunghe e contribuendo a creare una struttura più compatta e uniforme. Questo si traduce in un miglioramento della formazione, dell'opacità e delle proprietà superficiali della carta.



Dal punto di vista del processo, le fibre corte risultano più facilmente raffinabili. La loro struttura più sottile e meno rigida consente un più rapido sviluppo della fibrillazione, con un aumento dell'area specifica disponibile per i legami interfibra. Questo rende le fibre corte particolarmente efficaci nel migliorare la qualità superficiale del foglio. Tuttavia, questa maggiore reattività alla raffinazione rappresenta anche un limite. Le fibre corte sono infatti più sensibili alla degradazione e tendono a generare una quantità significativa di fini durante la lavorazione. Questo fenomeno può diventare critico se non controllato, in quanto un eccesso di fini influisce negativamente sulla drenabilità e sulla ritenzione.

Dal punto di vista dell'indice di Runkel, anche per le fibre corte vale il principio che questo parametro dipende dalla struttura della fibra e non dalla sua lunghezza.

Fibre con valori di $R < 1$ risultano più facilmente collassabili e favoriscono la formazione di una struttura più compatta, mentre valori superiori indicano fibre più rigide, che tendono a mantenere la loro forma tubolare. Nel caso delle fibre corte, la maggiore collassabilità, quando presente, contribuisce a migliorare la formazione del foglio e la qualità superficiale, mentre una struttura più rigida può portare a un aumento del bulk e a una minore capacità di legame. Nei legni di latifoglie come l'eucalipto, cade subito all'occhio la presenza di vasi di diametro evidente, oltre ad essere più frammentate e meno filamentose rispetto alle fibre lunghe.

Fibrillazione

La fibrillazione rappresenta uno dei principali meccanismi attraverso cui la raffinazione modifica le proprietà delle fibre. Essa consiste nella separazione e nello sviluppo delle microfibrille che compongono la parete cellulare, con un conseguente aumento dell'area specifica e della capacità di legame. Dal punto di vista strutturale, la fibrillazione può essere suddivisa in due componenti principali: interna ed esterna.

La fibrillazione interna è legata alla penetrazione dell'acqua nella parete cellulare e al conseguente rigonfiamento delle regioni amorfe.

Questo porta a una separazione parziale delle microfibrille all'interno dello strato S₂, aumentando la flessibilità della fibra e la sua capacità di deformarsi. Una fibra più flessibile è in grado di adattarsi meglio durante la formazione del foglio, aumentando il numero di punti di contatto e migliorando i legami intrafibra.

La fibrillazione esterna, invece, riguarda la superficie della fibra e comporta la formazione di microfibrille che si distaccano parzialmente dalla parete cellulare. Queste microfibrille aumentano l'area di contatto e contribuiscono in modo significativo alla formazione dei legami interfibra, ovvero con le altre fibre. Tuttavia, un'eccessiva fibrillazione esterna può portare al distacco completo delle microfibrille, generando fini secondari.

Questo fenomeno rappresenta un limite importante del processo, in quanto un eccesso di fini può compromettere la drenabilità e l'efficienza del sistema. Il grado di fibrillazione dipende da diversi fattori, tra cui l'energia di raffinazione, il tipo di fibra e la sua struttura. Fibre corte, ad esempio, tendono a fibrillarsi più rapidamente rispetto alle fibre lunghe, ma sono anche più soggette a degradazione. Dal punto di vista industriale, il controllo della fibrillazione è fondamentale per ottimizzare il processo. È necessario trovare un equilibrio tra sviluppo della superficie specifica e mantenimento dell'integrità della fibra, al fine di ottenere le proprietà desiderate senza compromettere la lavorabilità del sistema.

Contenuto di fini

I fini rappresentano una componente fondamentale della sospensione fibrosa e sono costituiti da particelle di piccole dimensioni, generalmente inferiori a 0,2 mm. Essi possono derivare sia dalla struttura originaria della fibra (fini primari) sia dalla sua degradazione durante la raffinazione (fini secondari).

Dal punto di vista del processo, i fini influenzano in modo significativo numerosi parametri operativi. Essi contribuiscono alla chiusura della struttura del foglio, migliorando la formazione e aumentando l'opacità. Tuttavia, un eccesso di fini comporta diversi effetti negativi. In particolare, i fini riducono la drenabilità della sospensione, rallentando il deflusso dell'acqua durante la formazione del foglio. Questo può avere un impatto diretto sulla velocità

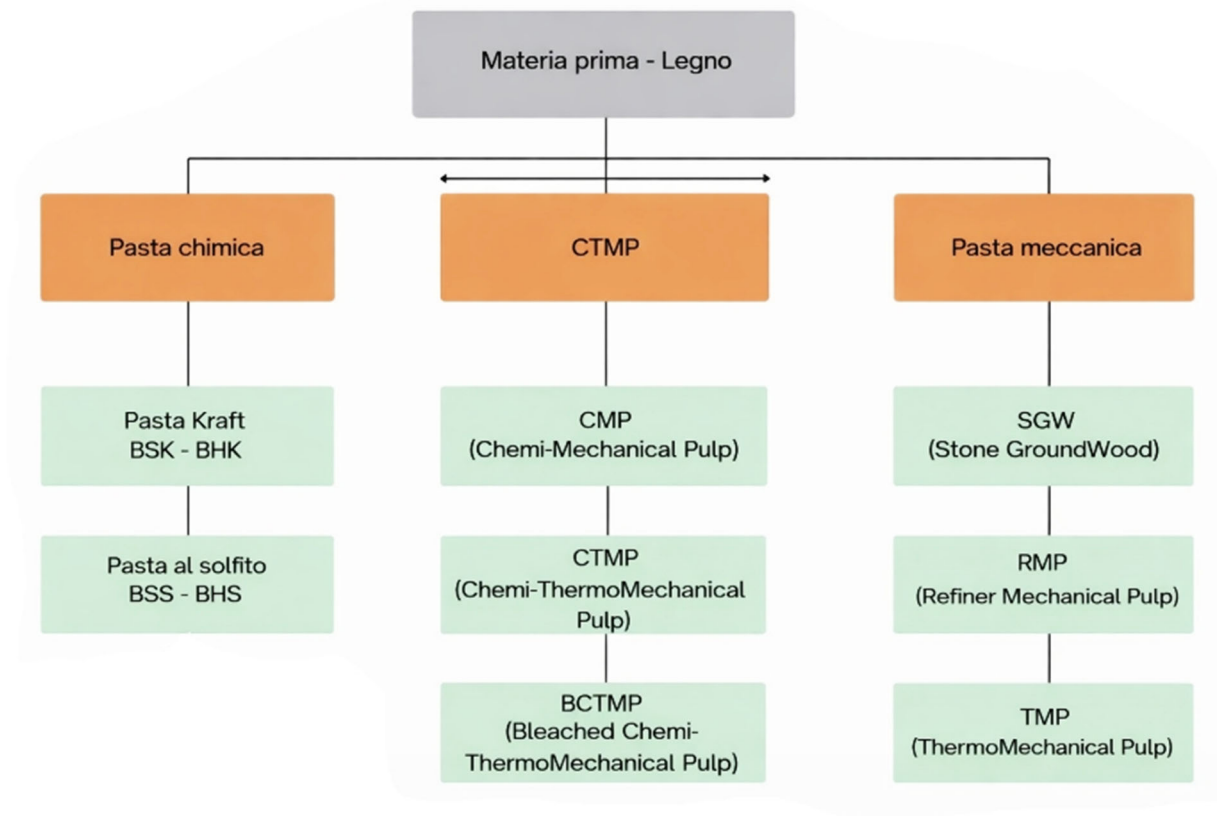
di macchina e sull'efficienza produttiva. Inoltre, i fini sono più difficili da trattenere rispetto alle fibre, aumentando il carico sul sistema di ritenzione e la quantità di materiale disperso nelle acque di processo. Questo comporta una perdita di materia prima e un aumento del carico sul sistema di depurazione. Dal punto di vista economico, questo aspetto è particolarmente rilevante, in quanto un aumento del contenuto di fini può tradursi in maggiori costi legati all'utilizzo di additivi chimici e allo smaltimento dei fanghi. Il contenuto di fini è fortemente influenzato dal grado di raffinazione e dalla tipologia di fibra. Le fibre corte tendono a generare una quantità maggiore di fini rispetto alle fibre lunghe, soprattutto in condizioni di lavorazione intensa. Dal punto di vista analitico, i fini possono essere espressi in termini di lunghezza (length weighted) o di massa (mass weighted). Questa distinzione è fondamentale per interpretare correttamente i risultati delle analisi e per confrontare dati provenienti da strumenti diversi, come nel caso del fiber test. Il controllo del contenuto di fini rappresenta quindi un elemento chiave per l'ottimizzazione del processo, in quanto influisce direttamente sia sulla qualità del prodotto sia sull'efficienza operativa.

Confronto tra fibre

PARAMETRO	FIBRE CORTE	FIBRE LUNGHE
Categoria botanica	Latifoglie	Conifere
Lunghezza fibra	~ 0,6 – 1,2 mm	~ 2 – 4 mm
Forma	Tozza e rigida	Affusolata e flessibile
Presenza di vasi	Si	No
Resistenza meccanica	Bassa	Elevata
Bulk	Elevato	Inferiore
Capacità di legame	Inferiore	Elevato
Opacità	Elevata	Inferiore
Formazione della carta	Migliore	Peggiora
Mano	Elevata	Inferiore
Porosità	Bassa	Elevata
Stampabilità	Migliore	Peggiora
Fini generati	Elevati	Inferiori
Energia di raffinazione	Inferiore	Elevata

2.3 PROCESSI DI LAVORAZIONE

La trasformazione del legno in pasta per carta rappresenta una fase cruciale dell'intero processo cartario, in quanto determina in maniera diretta le caratteristiche morfologiche, chimiche e tecnologiche della fibra che verrà successivamente utilizzata in macchina continua. A partire da una materia prima apparentemente semplice come il legno, è possibile ottenere prodotti molto diversi tra loro, a seconda della tecnologia adottata per separare le fibre. Dal punto di vista industriale, i processi di produzione delle paste si distinguono in tre macro categorie: paste meccaniche, paste chemi-termomeccaniche e paste chimiche. Questa classificazione non è soltanto tecnologica, ma riflette il diverso approccio alla separazione delle fibre: nel primo caso si agisce esclusivamente per via fisica, nel secondo si combina un'azione chimica e meccanica, mentre nel terzo si interviene in modo selettivo sulla composizione chimica del legno, rimuovendo in gran parte la lignina.

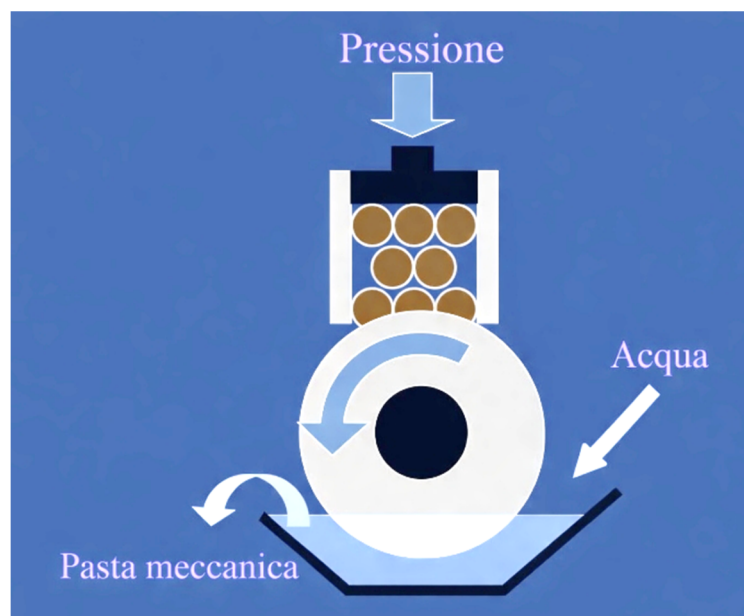


Come evidenziato anche dallo schema generale dei processi, tutte le tipologie di pasta derivano dalla stessa materia prima ma si differenziano profondamente per resa, qualità della fibra e comportamento nel processo cartario.

Pasta meccanica

Le paste meccaniche rappresentano la modalità più semplice e diretta di ottenere fibre a partire dal legno. In questo caso, la separazione delle fibre avviene mediante l'applicazione di energia meccanica, senza l'utilizzo di reagenti chimici. Il legno mantiene quindi pressoché inalterata la propria composizione originaria, inclusa la lignina, che continua a svolgere il ruolo di "collante" tra le fibre. Il processo può avvenire attraverso diverse tecnologie.

La più tradizionale è la pasta legno ottenuta tramite sfibratore a mola (SGW), in cui tronchi interi vengono pressati contro una superficie abrasiva rotante in presenza di acqua. L'azione combinata di pressione, attrito e temperatura provoca la rottura della struttura del legno e la liberazione delle fibre. Le condizioni operative, come la pressione esercitata, la temperatura e le caratteristiche della mola, influenzano fortemente la qualità della pasta prodotta.



Un'evoluzione tecnologica è rappresentata dalle paste da raffinatore, come RMP e TMP, nelle quali il legno viene preventivamente ridotto in chips e successivamente trattato in raffinatori a dischi. Nel caso del processo TMP, l'impiego di vapore ad alta temperatura consente di ammorbidire la lignina prima della raffinazione, favorendo una separazione più selettiva delle fibre e riducendo il danneggiamento della parete cellulare.

Le tipologie di legname più indicate per la pasta legno sono: il pioppo per la fibra corta e l'abete per la fibra lunga (ideale visto il suo colore bianco rispetto ad altre tipologie di legno e l'assenza di tannini; ovvero sostanze naturali che si ossidano e scuriscono il legno nel tempo).

Dal punto di vista delle caratteristiche, le paste meccaniche sono contraddistinte da una resa molto elevata, circa il 95%, poiché quasi tutto il materiale legnoso viene trasformato in pasta.

Tuttavia, questa elevata resa si accompagna a una qualità inferiore della fibra: la presenza di lignina e il forte stress meccanico portano a fibre più corte, meno flessibili e con un elevato contenuto di fini. Queste caratteristiche si riflettono direttamente sulle proprietà della carta prodotta. Le paste meccaniche conferiscono elevata opacità e bulk, ma presentano scarse proprietà meccaniche e una limitata stabilità nel tempo, a causa della tendenza della lignina a ingiallire.

Pasta chemi-termomeccanica

Le paste chemi-termomeccaniche si collocano in una posizione intermedia tra le paste meccaniche e quelle chimiche, rappresentando un compromesso tra resa, qualità della fibra e consumo energetico. In questi processi, la separazione delle fibre non avviene esclusivamente per via meccanica, ma è preceduta da un trattamento chimico che modifica parzialmente la struttura del legno.

Nel caso della pasta CMP, il processo ha inizio con l'impregnazione dei chips mediante soluzioni chimiche che agiscono sulla lignina, riducendone la rigidità e facilitando la successiva separazione delle fibre. Questo trattamento avviene generalmente a temperature moderate (circa 60°C) e consente una parziale solubilizzazione della lignina, con soda caustica; e successivamente un leggero imbianchimento con perossido di idrogeno (acqua ossigenata). Successivamente, il materiale viene sottoposto a raffinazione meccanica, durante la quale le fibre vengono separate con un minore danneggiamento rispetto alle paste meccaniche tradizionali, e infine si procede ad un eventuale ulteriore sbianca ossidante.

Nel caso delle paste CTMP, l'azione chimica è combinata con un trattamento termico mediante vapore, che contribuisce ulteriormente ad ammorbidire la lignina. La variante BCTMP prevede inoltre una fase di forte imbianchimento, finalizzata a migliorare il grado di bianco della pasta.

Le caratteristiche di queste paste riflettono la natura ibrida del processo. La resa risulta inferiore rispetto alle paste meccaniche ma significativamente superiore rispetto a quelle chimiche, collocandosi generalmente tra il 75% (CTMP) e l'85% (CMP). Le fibre risultano meno danneggiate, con una migliore integrità strutturale e un contenuto di fini più controllato. Dal punto di vista applicativo, le paste chemi-termomeccaniche offrono un buon equilibrio tra opacità, bulk e resistenza meccanica. Questo le rende particolarmente interessanti in ambito industriale, soprattutto per prodotti in cui è necessario combinare prestazioni tecniche adeguate con costi contenuti.

Pasta chimica

Le paste chimiche rappresentano il livello più avanzato dal punto di vista della qualità della fibra. In questo caso, la separazione delle fibre non avviene per azione meccanica, ma attraverso un processo chimico che rimuove selettivamente la lignina, preservando l'integrità della cellulosa.

I due principali processi utilizzati sono il processo Kraft (o al solfato) e il processo al solfito. Nel processo Kraft, una miscela di soda caustica e solfuro di sodio agisce sulla lignina a temperature elevate (circa 170°C) per tempi relativamente brevi, generalmente compresi tra una e tre ore.

I vantaggi di questo processo sono:

- resistenza meccanica delle fibre: fibre lunghe e poco danneggiate;
- varietà delle materie prime: utilizzabile con quasi tutti i tipi di legno, anche resinosi e legni difficili da trattare;
- recupero efficiente dei reagenti: processo più sostenibile ed economico su vasta scala;
- processo robusto e diffuso: meno problemi operativi rispetto al solfito in quanto la tecnologia di questo processo è affidabile e ottimizzata.

Gli svantaggi, invece, sono:

- pasta meno bianca: serve uno sbiancamento più intenso per ottenere un alto grado di bianco;
- raffinazione più difficile: le fibre sono più rigide rispetto al solfito, quindi serve più energia per lavorarle nelle fasi successive;
- processo chimico aggressivo: condizioni fortemente alcaline e ad alta temperatura.

Questo processo è oggi il più diffuso a livello industriale, grazie alla sua efficienza e alla qualità della fibra ottenuta.

Il processo al solfito, invece, avviene in ambiente acido e utilizza soluzioni di bisolfiti. I tempi di reazione sono più lunghi (circa 9 ore a 150°C) e le condizioni operative diverse, con risultati che possono variare in funzione della base utilizzata (calcio, magnesio, sodio o ammonio) per neutralizzare parzialmente l'anidride solforosa.

I vantaggi di questo processo sono:

- la flessibilità del prodotto: con lo stesso tipo di legno puoi ottenere paste con proprietà diverse cambiando pH, tipo di bisolfito e/o condizioni di cottura;
- elevato grado di bianco naturale: pasta più chiara rispetto al processo Kraft, quindi serve meno sbiancamento chimico dopo;

- facile raffinazione: le fibre sono più morbide e facilmente lavorabili, ciò significa risparmio energetico in fase di raffinazione.

Gli svantaggi, invece, sono:

- processo non adatto a legni resinosi (es: conifera): in quanto essa interferisce con il processo e ostacola le reazioni chimiche;
- problemi di smaltimento: i liquidi di scarto contengono composti solforati e sostanze organiche disciolte che sono più difficili da trattare rispetto al processo Kraft;
- basse caratteristiche meccaniche della fibra: fibre più corte/degradate.

Il risultato di questi processi è una pasta caratterizzata da una quasi completa rimozione della lignina, con fibre lunghe, flessibili e altamente resistenti. Tuttavia, questa elevata qualità si accompagna a una resa significativamente inferiore, generalmente intorno al 45%, poiché una parte consistente del materiale legnoso viene eliminata durante il processo. Le paste chimiche conferiscono alla carta elevate proprietà meccaniche, una buona capacità di legame tra le fibre e una maggiore stabilità nel tempo. Tuttavia, presentano una minore opacità e un costo più elevato rispetto alle paste ad alta resa.

Nel processo di produzione delle paste chimiche, una fase importante è rappresentata dall'imbianchimento, finalizzato a migliorare il grado di bianco e la purezza della cellulosa. I moderni processi industriali si distinguono principalmente in due categorie: ECF (Elemental Chlorine Free) e TCF (Totally Chlorine Free).

Nel processo ECF, l'imbianchimento avviene senza l'utilizzo di cloro elementare (Cl_2), sostituito da composti come il biossido di cloro (ClO_2). Questo consente di ridurre significativamente la formazione di composti organici clorurati, i quali possono dare forma anche a dei prodotti tossici e/o cancerogeni, mantenendo al tempo stesso elevate prestazioni in termini di qualità della pasta.

Nel processo TCF, invece, non vengono utilizzati composti contenenti cloro. L'imbianchimento avviene mediante agenti ossidanti come ossigeno (O), ozono (O_3) e perossido di idrogeno (H_2O_2). Questo approccio garantisce un impatto ambientale ancora più ridotto, ma può risultare più complesso dal punto di vista tecnologico e talvolta meno efficiente nel raggiungimento di elevati gradi di bianco.

Confronto tra processi

PARAMETRO	PASTE MECCANICHE	PASTE CTMP	PASTE CHIMICHE
Tipo di processo	Meccanico (100%)	Chimico-meccanico (% variabile)	Chimico (100%)
Resa	Elevata (~95%)	Media (~75-85%)	Bassa (~45-50%)
Costo	Basso	Medio	Alto
Resistenza meccanica	Bassa	Media	Elevata
Grado di bianco	Basso	Medio	Elevato
Contenuto lignina	Elevato	Parziale	Quasi assente
Integrità fibre	Bassa	Media	Alta
Lunghezza fibre	Ridotta	Media	Elevata
Contenuto di fini	Elevato	Medio	Basso
Presenza di schegge	Elevata	Media	Assente
Flessibilità fibre	Bassa	Media	Elevata
Collassabilità	Bassa	Media	Alta
Bulk	Elevato	Elevato	Medio
Opacità	Elevata	Elevata	Media
Stabilità nel tempo	Bassa	Media	Elevata
Energia di raffinazione	Assente	Assente	Elevata
BOD ₅ /COD ₅	Elevato	Medio	Basso

3. ANALISI SPERIMENTALE DELLE CELLULOSE UTILIZZATE IN STABILIMENTO

3.1 PROCEDURA DI CONTROLLO DELLE CELLULOSE IN INGRESSO

Il controllo delle materie prime fibrose in ingresso rappresenta una fase fondamentale nel processo cartario, in quanto la qualità della cellulosa utilizzata influisce direttamente non solo sulle proprietà del prodotto finito, ma anche sull'efficienza complessiva del processo produttivo. In un contesto industriale caratterizzato da elevati volumi produttivi e dalla necessità di ottimizzare i costi, la valutazione accurata delle caratteristiche delle cellulose assume un ruolo strategico.

Nel caso dello stabilimento in esame, il controllo delle cellulose viene effettuato attraverso una combinazione di analisi documentale e prove sperimentali, finalizzate a verificare la conformità del materiale rispetto alle specifiche richieste e a comprenderne il comportamento durante le fasi di lavorazione. In particolare, l'attenzione è rivolta alle proprietà morfologiche delle fibre, alla loro risposta alla raffinazione e al contenuto di fini, parametri che influenzano in modo significativo la drenabilità, la ritenzione e il consumo energetico del processo.

La procedura di controllo si articola in diverse fasi. In una prima fase, viene analizzata la scheda tecnica fornita dal produttore, che rappresenta il punto di partenza per la valutazione della cellulosa. Questa contiene informazioni relative a parametri fondamentali come il grado di bianco, il contenuto di umidità, la lunghezza media delle fibre, il contenuto di fini e altri indicatori di qualità. Tuttavia, è importante sottolineare come questi dati rappresentino valori medi dichiarati dal fornitore e non sempre riflettano in modo completo il comportamento reale della fibra all'interno del processo.

Per questo motivo, alla fase documentale viene affiancata una fase sperimentale, che consente di caratterizzare la cellulosa in modo più approfondito. Le prove vengono condotte presso l'Innovation Center, utilizzando strumentazione specifica per la simulazione delle condizioni di processo e per l'analisi morfologica delle fibre.

Una delle prove principali è rappresentata dalla determinazione della curva di raffinazione, effettuata mediante raffinatore da laboratorio (olandese). Questo strumento consente di simulare l'azione meccanica della raffinazione industriale, applicando energia alla sospensione fibrosa e monitorando l'evoluzione delle sue caratteristiche nel tempo. Durante la prova, vengono effettuati campionamenti a diversi intervalli di raffinazione, al fine di analizzare come la fibra si modifica in funzione dell'energia applicata. Parallelamente, vengono effettuate analisi morfologiche mediante Fiber Test, che rappresenta uno degli

strumenti più importanti per la caratterizzazione delle cellulose. Questo tipo di analisi consente di misurare parametri come la lunghezza media delle fibre, la larghezza, il contenuto di fini e la distribuzione dimensionale, fornendo una descrizione dettagliata della struttura della sospensione fibrosa.

Le analisi vengono eseguite su campioni prelevati in condizioni diverse. Questo approccio consente di valutare l'evoluzione della fibra durante il processo, evidenziando fenomeni come la fibrillazione, l'accorciamento delle fibre e la generazione di fini.

L'integrazione tra i dati della scheda tecnica e i dati sperimentali consente quindi di ottenere una visione più completa della cellulosa, permettendo non solo di verificarne la conformità, ma anche di valutarne l'impatto sul processo produttivo. In particolare, l'analisi della risposta alla raffinazione e della generazione di fini rappresenta un elemento chiave per comprendere i consumi energetici associati e le possibili criticità operative.

In quest'ottica, il controllo delle cellulose in ingresso non deve essere considerato esclusivamente come una verifica qualitativa, ma come uno strumento di ottimizzazione del processo. La scelta della materia prima, infatti, non determina soltanto il costo diretto della cellulosa, ma anche definisce anche una serie di costi indiretti legati all'energia di raffinazione, all'utilizzo di additivi chimici e alla gestione degli scarti.

Scheda tecnica e parametri principali

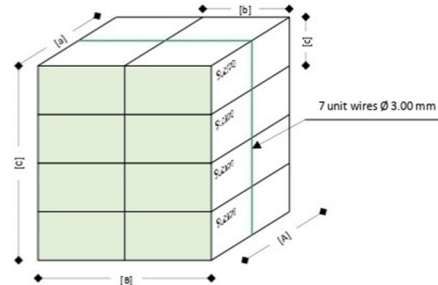
La scheda tecnica della cellulosa rappresenta il primo strumento di valutazione della materia prima fibrosa in ingresso. Essa fornisce informazioni relative all'origine del materiale, al processo produttivo e alle principali proprietà fisiche, chimiche e meccaniche della pasta. Tuttavia, tali dati devono essere interpretati criticamente, in quanto ottenuti in condizioni standardizzate di laboratorio e non sempre perfettamente rappresentativi del comportamento reale della fibra in macchina continua.

Di seguito è riportata la scheda tecnica di una tipologia di cellulosa utilizzata nello stabilimento di Verona:

Product **BEKP ECF**

is made in Brazil from 100% planted eucalyptus spp. wood. Pulp can be certified FSC® or PEFC™ upon agreement.

Dimensions	Unit	Bale	Unit
Length	cm	[a] 95±2	[A] 95±2
Width	cm	[b] 69±1	[B] 138±2
Height	cm	[c] 46±1	[C] 184±4
Gross mass**	kg	250	2'000



Specifications (1)	Unit	Min. spec.	Max. spec.	Based on
ISO Brightness	%	88.5	-	ISO 2470-1
Dirt count	mm ² /kg	-	2.5	ISO 5350-2
Viscosity	cm ³ /g	700	-	ISO 5351
pH	-	6	7	ISO 6588-1

Typical properties (2)	Unit	0	1500	3000	Based on
°SR	°SR	21	34	48	ISO 5267-1
CSF	ml	584	377	250	ISO 5267-1
Tensile index	Nm/g	23	65	86	ISO 1924-3
Burst index	kPa.m ² /g	1.0	3.9	5.5	ISO 2758
Tear index	Nm ² /kg	3.6	8.6	9.4	ISO 1974
Bulk	cm ³ /g	1.81	1.46	1.33	ISO 534
Opacity	%	78	73	71	ISO 2471
Gurley air resistance	s/100ml	1.9	8.4	38.2	ISO 5636-5
Ash content	%	0.38			ISO 1762
Extractives	%	0.08			ISO 14453
Fiber length	mm	n.a			n.a
Fiber width	micron	n.a			n.a
Coarseness	mg/100m	n.a			n.a
Moisture	%	8 - 12			ISO 638

** The total mass of a bale, a unit, comprising contents, wrappers and packaging wires of individual bales (not of unit). The saleable mass (or ADMT) is the gross mass multiplied by the absolute yield by the theoretical commercial dryness (usually 90%). Please check General Trade Rules for Woodpulp for more information.

(2) values below are annual average of analysis performed by our mill. They are not guaranteed for the lots being delivered and are given just as additional information. Mechanical properties are obtained using a PFI mill refiner (gap: 0mm), based on ISO 5264-2. Laboratory sheet preparation based on ISO 5269-1. Standard atmosphere for conditioning and testing pulp according to ISO 187 (23°C/50%RH).

Analizziamo nel dettaglio il significato di questi parametri partendo dall'alto verso il basso: La sigla **BEKP** (Bleached Eucalyptus Kraft Pulp) indica una pasta chimica ottenuta da 100% legno di eucalipto mediante processo Kraft e successivamente sbiancata, mentre la dicitura **ECF** (Elemental Chlorine Free) indica un processo di imbianchimento privo di cloro elementare, quindi con minore impatto ambientale.

Questa cellulosa è prodotta in Brasile e può essere certificata sia **FSC** (Forest Stewardship Council) che **PEFC** (Programme for the Endorsement of Forest Certification). Entrambe le

sigle indicano che il prodotto proviene da una filiera tracciata e controllata, da foreste gestite in modo responsabile e sostenibile, rispettando la biodiversità, i diritti dei lavoratori e le comunità locali. Lo standard FSC è più uniforme a livello globale e ritenuto più severo e rigido; mentre il PEFC è un sistema più flessibile e accessibile, ma comunque sostenibile, molto più diffuso in Europa rispetto al resto del mondo.

- Parametri dimensionali:

- **Length** (*lunghezza*), **Width** (*larghezza*), **Height** (*altezza*): rappresentano le dimensioni geometriche della balla di cellulosa. Non hanno impatto diretto sulle proprietà della fibra, ma sono importanti per logistica, stoccaggio e movimentazione.
- **Gross mass (kg)** / *massa lorda*: peso della balla comprensivo di imballaggio (fibra, acqua e fili di ferro). Da notare i due asterischi che riportano alle osservazioni in fondo alla pagina, dove viene chiarito meglio questo concetto. Ovvero: la massa vendibile (ADMT) è la massa lorda moltiplicata per il contenuto secco reale e divisa per il contenuto secco commerciale teorico (standard internazionale che assume di solito il 90%).
$$ADMT = \frac{\text{massa lorda} \times \text{secco reale}}{0.90}$$

Esempio: umidità al 12% (quindi secco reale → 88%).

$$ADMT = 250 \times 0.88 / 0.90 = 244 \text{ kg}$$

Questo significa che stai pagando 250 kg, ma hai solo 244 kg di fibra reale.

6kg “persi” per balla

Il concetto di ADMT (Air Dry Metric Ton) consente di correggere il peso della cellulosa in funzione del contenuto reale di umidità. Questo aspetto è particolarmente rilevante dal punto di vista economico, in quanto differenze anche limitate di umidità possono tradursi in una quantità significativa di fibra effettivamente disponibile per il processo.

- Specifiche garantite:

- **ISO Brightness (%)** / *grado di bianco*: indica la capacità della cellulosa di riflettere la luce ed è espresso in percentuale secondo la norma ISO. Valori elevati indicano una pasta più bianca, ottenuta generalmente tramite processi di imbianchimento più spinti. Dal punto di vista industriale, questo parametro è fondamentale per prodotti grafici e carte di alta qualità. Tuttavia, un maggiore grado di bianco può essere associato a

trattamenti chimici più intensi, che possono influenzare leggermente la struttura della fibra e i costi di produzione.

- **Dirt count (mm²/kg) / *conteggio delle impurità***: rappresenta la quantità di impurità solide presenti nella pasta, come particelle non fibrose o residui di lavorazione. Un valore elevato può causare difetti visivi nel foglio finito (puntature, imperfezioni) e problemi qualitativi. Dal punto di vista del processo, un basso contenuto di “dirt count” è indice di una buona qualità della materia prima.
- **Viscosity (cm³/g) / *viscosità***: è un parametro indirettamente legato al grado di polimerizzazione della cellulosa, ovvero alla lunghezza delle catene molecolari. Valori elevati indicano una cellulosa meno degradata e quindi con fibre più resistenti. Dal punto di vista pratico, una maggiore viscosità è generalmente associata a migliori proprietà meccaniche della carta.
- **pH**: indica il suo stato acido (<7) o alcalino (>7). Questo parametro è importante per la compatibilità con gli additivi chimici utilizzati nel processo cartario e per la stabilità della sospensione fibrosa. Valori compresi tra 6 e 7 indicano una pasta neutra, generalmente ideale per la maggior parte delle applicazioni.

● Proprietà tipiche e comportamento alla raffinazione (valori non garantiti):

// N.B.: i valori di questi parametri sono basati sui diversi livelli di raffinazione (0-1500-3000 sono il numero di rivoluzioni del rotore) ottenuti mediante raffinatore PFI secondo la norma ISO 5264-2 e rappresentano una simulazione standardizzata dell'effetto della raffinazione sulla fibra. Tuttavia, tali condizioni differiscono dalla raffinazione industriale, rendendo necessario un confronto con dati sperimentali ottenuti in condizioni reali. //

- **°SR (Schopper-Riegler)**: Il grado Schopper-Riegler è un indice di drenabilità della pasta, ovvero della velocità con cui l'acqua viene rilasciata dalla sospensione fibrosa. Valori bassi indicano una pasta poco raffinata e con elevata drenabilità, mentre valori elevati indicano una maggiore raffinazione, una maggiore fibrillazione e una minore drenabilità. Questo parametro è fondamentale perché rappresenta uno dei principali indicatori del comportamento della fibra durante la raffinazione e la formazione del foglio.

- **CSF (Canadian Standard Freeness, ml)**: è un altro indice di drenabilità, espresso in millilitri, inversamente correlato al °SR.
 CSF alto → drenaggio veloce → fibra poco raffinata
 CSF basso → drenaggio lento → fibra raffinata
 La presenza di entrambi i parametri nella scheda tecnica consente una valutazione più completa della lavorabilità della pasta.
- **Tensile index (Nm/g) / indice di trazione**: descrive la resistenza alla trazione della carta in rapporto al suo peso.
 Questo parametro è direttamente legato alla capacità delle fibre di formare legami interfibra. Fibre più flessibili e ben raffinate tendono a sviluppare valori più elevati.
- **Burst index (kPa·m²/g) / indice di scoppio**: rappresenta la resistenza della carta alla rottura per pressione in rapporto alla sua grammatura.
 È un indicatore della coesione del foglio, riflette la qualità della rete fibrosa e dei legami tra fibre (più sono ben legate, maggiore è la resistenza allo scoppio).
- **Tear index (mN·m²/g) / indice di strappo**: misura la resistenza della carta alla propagazione dello strappo in rapporto alla sua grammatura.
 È fortemente influenzato dalla lunghezza delle fibre: fibre lunghe contribuiscono maggiormente a questo parametro, mentre fibre corte tendono a ridurlo.
- **Bulk (cm³/g) / volume specifico**: indica quanto volume occupa il foglio di carta in relazione al suo peso, ovvero: quanto è “spessa” una carta a parità di grammatura.
 Bulk alto → carta più spessa, voluminosa e porosa
 Bulk basso → carta più compatta, densa e chiusa
 Valore importante perché influenza rigidità, mano, spessore, opacità e stampabilità.
- **Opacity (%) / opacità**: indica la capacità della carta di impedire il passaggio della luce. Essa aumenta con: maggiore grammatura, presenza di cariche minerali e maggiore bulk (più aria → più diffusione della luce).
 Anche fibre corte e fini tendono ad aumentare l’opacità, migliorando la stampabilità.
- **Gurley air resistance (s/100 ml) / indice di porosità**: indica la resistenza della carta al passaggio dell’aria, in pratica misura i secondi necessari affinché 100ml di aria attraversino il foglio di carta (area di 1 pollice quadrato = 6,45 cm²) sotto una pressione costante. Concetto direttamente correlato alla struttura dei pori.

Valore alto (molti secondi) → aria passa lentamente → carta poco porosa, compatta
Valore basso (pochi secondi) → aria passa facilmente → carta porosa, più aperta

- **Ash content (%)** / *ceneri*: rappresenta la percentuale di residuo solido inorganico rimanente dopo aver bruciato il campione a 575 °C, ovvero le cariche minerali come caolino, carbonato di calcio (CaCO₃) e biossido di titanio (TiO₂).
Questi materiali vengono aggiunti per migliorare opacità, grado di bianco, stampabilità e soprattutto i costi di produzione (riduce la quantità di fibra utilizzata); tuttavia un uso eccessivo può ridurre la resistenza meccanica (troppi filler indeboliscono la struttura fibrosa).
- **Extractives (%)** / *estrattivi*: sono la percentuale di sostanze organiche presenti nella carta che possono essere rimosse con solventi (es: etanolo, acetone o miscele).
Comprendono sostanze come resine, cere, grassi, oli e/o lignina residua.
Sostanze non desiderate, possono causare problemi di deposito negli impianti e interferire con gli additivi chimici.
- **Fiber length (mm) & width (µm)**: indicano la lunghezza e la larghezza delle fibre.
- **Coarseness (mg/100m)** / *massa lineare*: rappresenta la massa della fibra per unità di lunghezza ed è espressa in milligrammi per 100 metri (mg/100 m).
È un parametro fondamentale che funge da indice di “collasso” della fibra. Fibre con elevata coarseness presentano pareti più spesse e risultano meno flessibili e più difficili da raffinare, mentre fibre con bassa coarseness sono più facilmente fibrillabili e favoriscono lo sviluppo dei legami interfibra, influenzando direttamente sia le proprietà meccaniche del foglio sia i consumi energetici del processo.
- **Moisture (%)** / *umidità*: indica la percentuale di acqua presente nella cellulosa.
Si ricava pesando un campione (massa iniziale), si essicca in forno a circa 105 °C fino a peso costante e si pesa di nuovo (massa secca). Facendo la differenza tra le due masse si ottiene la quantità di acqua evaporata.

Altri parametri che possono essere riportati in schede tecniche più complete includono:

- **Fines (%)** / *contenuto di fini*: rappresenta la frazione di particelle fibrose di piccole dimensioni (<0,2 mm) presenti nella sospensione.
Esso può essere espresso in due diverse modalità:

- *length weighted*: rappresenta la percentuale di fini calcolata in base alla lunghezza delle particelle. Questo tipo di misura tende a dare maggiore peso alle particelle più numerose, anche se molto piccole.

- *mass weighted*: rappresenta la percentuale di fini calcolata in base alla massa.

In questo caso, le particelle più grandi e pesanti contribuiscono maggiormente al valore finale.

Dal punto di vista di processo, entrambi gli approcci sono utili ma forniscono informazioni differenti: il valore *length weighted* è più indicativo del comportamento della sospensione in termini di formazione e distribuzione, mentre il valore *mass weighted* è più direttamente correlato agli effetti sulla ritenzione e sul carico del sistema di depurazione.

Un aspetto rilevante è che il contenuto di fini non è sempre esplicitamente dichiarato nelle schede tecniche dei fornitori, questo perché essendo un parametro che può influenzare in modo significativo le prestazioni industriali, viene lasciato al cliente la necessità di effettuare verifiche sperimentali.

- **Curl** (– o %) / indice di curvatura: espresso come parametro adimensionale o in percentuale, descrive il grado di curvatura della fibra rispetto a una forma ideale rettilinea.

Esso rappresenta una caratteristica morfologica che può derivare sia dalla crescita naturale della fibra sia dai trattamenti meccanici subiti durante la lavorazione.

Un elevato curl comporta una minore efficienza nei legami interfibra, in quanto la superficie di contatto tra le fibre risulta ridotta. Tuttavia, fibre più curve tendono a creare una struttura del foglio più aperta, aumentando il bulk e l'opacità. Al contrario, fibre più rettilinee favoriscono una migliore compattazione e lo sviluppo delle proprietà meccaniche.

Curl basso → carta più resistente

Curl alto → carta più soffice e volumosa

- **Kink** (– o n/mm) / indice di piegatura: rappresenta la presenza di piegature brusche e localizzate (una sorta di “gomito”) lungo la fibra ed è generalmente espresso come numero di piegature per unità di lunghezza (n/mm) oppure come indice adimensionale. Non è una curva dolce come il curl, ma una deformazione angolare notevole, spesso causata da stress meccanici (raffinazione, essiccamento, etc.)

Dal punto di vista funzionale, la presenza di kink riduce la resistenza meccanica della fibra, in quanto rappresenta un punto di debolezza strutturale. Inoltre, le fibre con elevato contenuto di kink presentano una minore capacità di trasferire carichi e di

sviluppare legami efficaci, influenzando negativamente le proprietà del foglio. Tuttavia può aumentare leggermente il bulk e migliorare la flessibilità locale.

- **WRV (Water Retention Value, %)** / *valore di ritenzione idrica*: espressa in percentuale, misura la quantità di acqua che resta intrappolata nella struttura della fibra (non quella libera tra le fibre) dopo centrifugazione. È quindi un indicatore diretto della capacità di rigonfiamento delle fibre di cellulosa. Questo parametro è fortemente influenzato dalla struttura interna della fibra e dal livello di raffinazione. Fibre con elevato WRV presentano una maggiore apertura della struttura e una maggiore capacità di assorbire acqua, risultando più flessibili e più reattive alla raffinazione. Tuttavia, un WRV elevato comporta anche una riduzione della drenabilità, con impatto negativo sulla velocità di macchina e sui consumi energetici.

Esecuzione delle analisi

In primo luogo viene effettuata un'ispezione visiva preliminare del lotto di cellulosa che si vuole analizzare. È necessario verificare attentamente che le balle di cellulosa non presentino difetti evidenti, eccessiva contaminazione o tracce di muffa. Tali problematiche possono derivare dalle fasi di trasporto, ad esempio via nave o treno, soprattutto nel caso in cui i mezzi siano stati precedentemente utilizzati per il trasporto di materiali potenzialmente contaminanti, come prodotti alimentari, grassi, ruggine, plastiche o umidità residua, tutti fattori che possono compromettere la qualità del materiale. Va inoltre considerato che possibili contaminazioni possono verificarsi anche nell'area di stoccaggio delle materie prime dello stabilimento, a causa di agenti esterni come il vento o durante le operazioni di movimentazione con carrelli elevatori.

L'ispezione visiva interessa anche i fogli che compongono le balle, 5 fogli per balla di cellulosa è un buon compromesso. Tuttavia, i primi e gli ultimi fogli non vengono presi in considerazione in quanto maggiormente esposti allo sporco. L'osservazione, effettuata anche in trasparenza, consente di individuare eventuali impurità come particelle di plastica o schegge di legno, elementi particolarmente critici perché possono danneggiare gli impianti e generare difetti nel prodotto finito.

Già a seguito di questa prima verifica, il materiale può essere rifiutato qualora il livello di contaminazione risulti superiore ai limiti accettabili o non conforme alle specifiche dichiarate. A questo punto si procede con la campionatura destinata alle prove di laboratorio. Il prelievo deve essere effettuato selezionando due o tre fogli da una balla (almeno 1kg), evitando sempre i primi cinque e gli ultimi cinque fogli.

Per l'esecuzione delle prove è indispensabile attenersi a procedure standardizzate che riproducono, in modo controllato e ripetibile, le fasi di raffinazione e formazione del foglio. Tali prove devono essere condotte secondo metodi normati (ISO/TAPPI), al fine di garantire risultati coerenti e confrontabili tra fornitore e utilizzatore.

Curva di raffinazione e °SR

La curva di raffinazione rappresenta uno degli strumenti più importanti per la caratterizzazione del comportamento della cellulosa durante il processo cartario. Essa descrive l'evoluzione delle proprietà della sospensione fibrosa in funzione dell'energia meccanica applicata, consentendo di valutare la risposta della fibra alla raffinazione e di prevederne il comportamento in condizioni operative.

La curva di raffinazione viene ottenuta utilizzando un raffinatore da laboratorio, comunemente denominato olandese Valley, applicando energia alla sospensione fibrosa e monitorando la variazione di parametri significativi, in particolare la drenabilità espressa in gradi Schopper-Riegler (°SR). Questo strumento è progettato per riprodurre, in modo controllato e ripetibile, l'azione meccanica esercitata sulle fibre durante la raffinazione industriale. Il funzionamento dell'olandese si basa sulla circolazione continua della sospensione fibrosa all'interno di una vasca, in cui un organo rotante esercita un'azione combinata di taglio, compressione e sfibramento sulle fibre. Durante il processo, la fibra viene progressivamente raffinata e i 5 principali effetti sulla fibra sono: rimozione della parete primaria, fibrillazione interna (S3) ed esterna (S1), effetto di taglio (cutting/shortening) e infine si genera una certa quantità di fini.

Procedere in questo modo: pesare 600gr di cellulosa e lasciarla in ammollo in 4 litri di acqua per 10-15 minuti. Trasferire il campione nell'olandese aggiungendo 20 litri di acqua per ottenere una consistenza del 2,5%. Avviare la macchina senza peso laterale per 2-3 minuti, quindi applicare il peso di 8,7kg per iniziare la raffinazione. Effettuare prelievi e misurazioni del grado di raffinazione (Schopper Riegler) a intervalli standardizzati: 0' – 20' – 40' – 60' – 80' – 100' – 140' – 180' – 220'; interrompendo prima la prova se si raggiungessero i 75 °SR. I valori ottenuti rappresentano il parametro principale utilizzato per costruire la curva di raffinazione. In questo modo, è possibile correlare il tempo (o l'energia) di raffinazione con il grado di lavorazione della fibra.

Dopo circa 180 minuti, a causa dei numerosi prelievi, l'impasto risulta essere insufficiente per la lavorazione e richiede l'aggiunta di acqua. Tale aggiunta modifica la consistenza, pertanto le successive letture di °SR devono essere correlate al contenuto secco effettivo dell'impasto.

La curva risultante ha generalmente un andamento crescente: all'aumentare del tempo di raffinazione, il valore di °SR aumenta, indicando una progressiva diminuzione della drenabilità della sospensione.

Il grado Schopper-Riegler (°SR) è un indice empirico utilizzato per valutare la scolantezza (o drenabilità) della sospensione fibrosa, ovvero la velocità con cui l'acqua viene separata dalle fibre.



Esso rappresenta indirettamente il grado di raffinazione della cellulosa: valori bassi indicano una fibra poco lavorata e facilmente drenante, mentre valori elevati indicano una fibra più raffinata, con maggiore capacità di trattenere acqua. La determinazione del °SR avviene mediante l'utilizzo dell'apposito strumento Schopper-Riegler, costituito da un recipiente graduato dotato di un sistema di drenaggio calibrato. Prima di tutto, è necessario eseguire la taratura dello strumento per verificare che l'ugello sia calibrato in modo corretto: versare 1 lt di acqua distillata a 20 °C nell'apposito imbuto e tappare il foro di scarico laterale che converge nel cilindro graduato, il volume d'acqua dovrebbe scolare in 149 secondi \pm 1; nel caso in cui il tempo di drenaggio fosse superiore a 150 secondi, l'ugello non funziona bene e quindi bisogna sostituirlo; nel caso contrario, significa che qualche componente è probabilmente ostruito e quindi bisogna smontare i vari componenti dello strumento (in particolare la retina metallica calibrata) e procedere con i lavaggi. La taratura dello strumento è consigliata eseguirla almeno 1 volta a settimana.

Per l'esecuzione della prova è necessario prelevare 2 gr di fibra al secco (\pm 0,2 gr) elementarizzata, ovvero senza la presenza di punte, fiocchi, pastiglie, etc.; e diluirla con acqua distillata a 20 °C (\pm 2 °C) in un Becher graduato fino al raggiungimento di 1000 ml. In seguito, si abbassa il cappelletto di tenuta dentro la camera di scolamento e si versa al suo interno la sospensione fibrosa. Infine, si rialza il cappelletto di tenuta e si attende che l'acqua sia completamente scolata dall'imbuto. All'inizio l'acqua scola attraverso la tela con flusso massimo e poi gradualmente il flusso diminuisce man mano che la sospensione forma una specie di "pannello fibroso" sulla tela. La quantità d'acqua effluita dallo scarico laterale nel cilindro graduato determina la capacità delle fibre a opporre resistenza al passaggio dell'acqua. Attenzione però, ad interpretare in modo corretto i risultati, perché °SR alti non significa

necessariamente un impasto “migliore”. Il valore °SR non misura direttamente la qualità della fibra, ma ne sintetizza il comportamento idrodinamico. Inoltre, ci sono molti fattori che influenzano il risultato: primo su tutti, la morfologia delle fibre (le fibre lunghe drenano meglio, mentre le fibre corte trattengono più acqua); il grado di fibrillazione, aumenta la superficie specifica → aumenta °SR; il contenuto di fini, rallenta il drenaggio → aumenta °SR; tipo di materia prima, conifere e latifoglie danno risultati diversi anche a pari raffinazione.

Analisi meccaniche e ottiche

Il formafogli (detto anche sheet former) è uno strumento da laboratorio usato per produrre fogli standardizzati a partire da una sospensione fibrosa. Su questi fogli si eseguono poi le analisi meccaniche e ottiche per valutare la qualità della pasta e prevedere il comportamento in macchina. La procedura è la seguente: preparare un nuovo impasto di cellulosa alla consistenza del 2,5% e portarlo a un grado di raffinazione di $25 \text{ °SR} \pm 3$. Si procede come nella fase precedente, pesando 600 gr di cellulosa e lasciandola in ammollo in 4 lt di acqua per 10-15 minuti, quindi trasferendo il campione nell'olandese con l'aggiunta di ulteriori 20 lt di acqua per ottenere la consistenza desiderata. Avviare il raffinatore senza peso laterale per 2-3 minuti, poi applicare il peso di 8,7 kg per la lavorazione della fibra. Proseguire la raffinazione per il tempo stimato nella prova precedente (curva di raffinazione), verificando il raggiungimento del valore di $25 \text{ °SR} \pm 3$. Una volta ottenuto il grado di raffinazione, prelevare 400ml di impasto, in modo tale da realizzare con il formafogli campioni di grammatura 100 g/m^2 . Una volta realizzato e fatto asciugare il foglio, si può procedere con le varie analisi. Per valutare le resistenze meccaniche del foglio si eseguono prove come il carico di rottura e la lunghezza di rottura, la resistenza alla lacerazione, la porosità, la resistenza allo scoppio e le doppie pieghe. Mentre, per valutarne l'aspetto e la stampabilità si eseguono prove ottiche come il grado di bianco, l'opacità, la tinta L,a,b e la formazione del foglio.

Fiber Test

Il Fiber Test è uno strumento avanzato usato per analizzare le caratteristiche morfologiche delle fibre in sospensione, cioè la loro reale struttura. Esso è un analizzatore automatico in grado di osservare e classificare migliaia di fibre in pochi minuti. L'analisi viene eseguita in 3 punti rappresentativi della curva di raffinazione: all'inizio, al momento della creazione dei foglietti (25 °SR) e a fine lavorazione. La procedura è identica per tutti e tre i prelievi: si prepara un campione di impasto alla consistenza del 2,5%, lo si trasferisce in un becher da

300 ml e lo diluisce abbondantemente fino a ottenere una leggera torbidità, con fibre distribuite in modo uniforme nella sospensione.

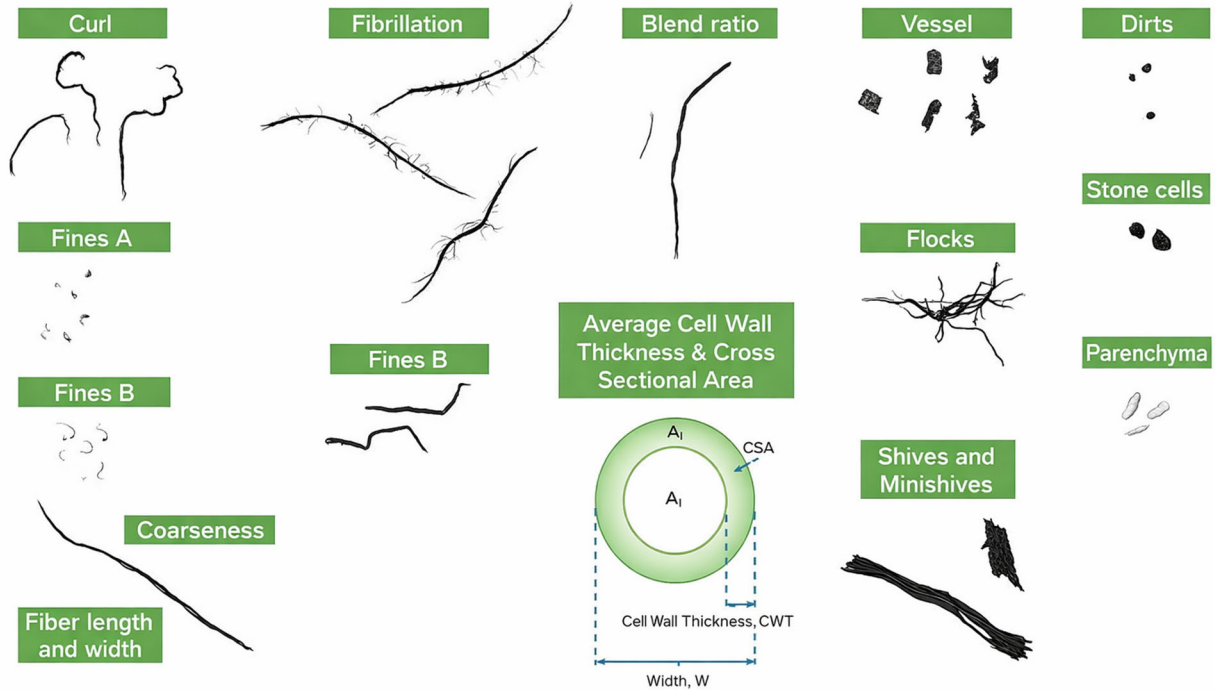
Una volta preparati i campioni, appoggiare i becher nella piastra rotante del Fiber Test e lo strumento procederà in modo automatico all'analisi della sospensione.

Il principio di funzionamento si basa su un'analisi ottica in flusso. La sospensione fibrosa viene diluita fino a ottenere una concentrazione molto bassa, così che le fibre risultino ben separate tra loro. Questa sospensione scorre poi all'interno di una cella di misura molto sottile, dove un sistema di illuminazione e una telecamera ad alta risoluzione acquisiscono immagini delle fibre in movimento. Il software elabora automaticamente queste immagini, riconoscendo i contorni delle fibre e



calcolando una serie di parametri geometrici e morfologici. In pochi minuti è possibile analizzare migliaia di fibre, ottenendo non solo valori medi, ma vere e proprie distribuzioni statistiche. Le informazioni che si ricavano sono estremamente ricche: la lunghezza e la larghezza delle fibre, il loro grado di arricciamento (curl), la presenza di pieghe o difetti (kink) e soprattutto il contenuto di fini. Questi parametri sono determinanti perché influenzano direttamente il comportamento della pasta sia durante il drenaggio sia nella formazione del foglio e nelle sue proprietà finali.

L'importanza del Fiber Test deriva proprio da questa capacità di spiegare il “perché” dietro i risultati osservati con altri metodi. Due paste possono avere lo stesso valore di °SR, quindi apparentemente la stessa drenabilità, ma comportarsi in modo molto diverso in macchina continua o dare origine a carte con proprietà meccaniche differenti. Il Fiber Test permette di capire se ciò è dovuto, ad esempio, a fibre più corte, a una maggiore quantità di fini o a un diverso grado di fibrillazione. In questo senso, lo strumento non sostituisce gli altri test, ma li completa: mentre il °SR descrive il comportamento idraulico e il formafogli consente di valutare le proprietà del foglio finito, il Fiber Test fornisce il collegamento tra struttura della fibra e prestazioni.



3.2 RISULTATI SPERIMENTALI DELLE CELLULOSE ANALIZZATE

Fibra lunga

La cellulosa analizzata è una pasta chimica kraft di conifera sbiancata proveniente da regioni settentrionali europee, composta principalmente da diverse varietà di abete rosso e pino.

Curva di raffinazione



Dai dati raccolti, il valore iniziale di drenabilità risulta pari a 8 °SR, indicando una sospensione inizialmente molto scolante. Con l'aumentare del tempo di raffinazione si osserva un incremento graduale dei °SR fino a raggiungere valori pari a 25 °SR a 100 minuti e successivamente un aumento più marcato, fino a circa 69 °SR a 220 minuti.

Analisi meccaniche e ottiche

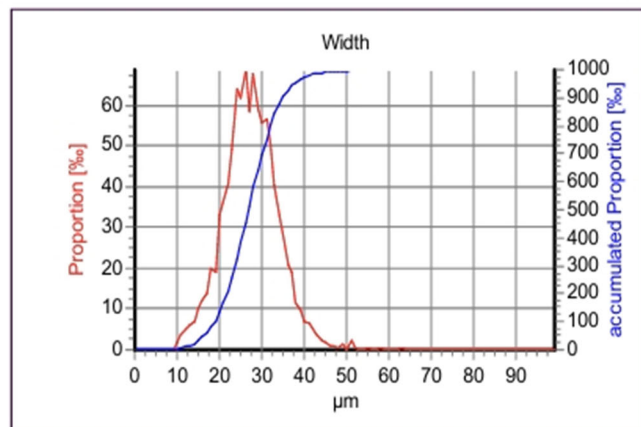
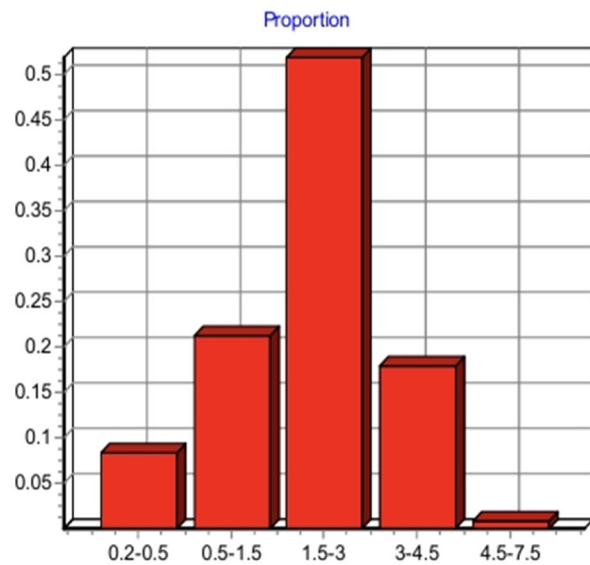
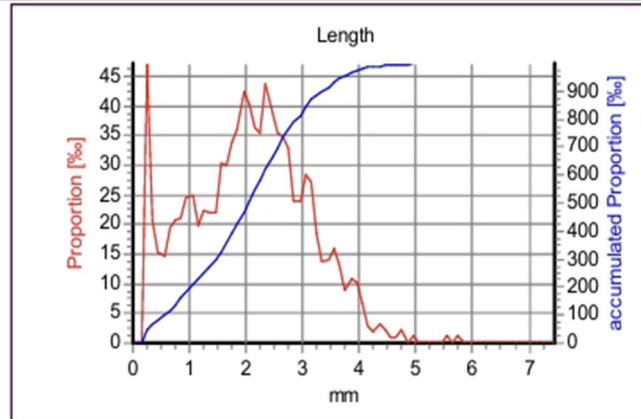
ANALISI	UNITÀ DI MISURA	RISULTATO
Grammatura	g/m ²	92
Spessore	micron	150,4
V.S.A.	cm ³ /g	1,63
Porosità Gurley	secondi	116
Resistenza alla trazione	kg/f	12,1
Allungamento alla trazione	mm	3,13
Resistenza alla delaminazione	ft/lb	202,5
Resistenza allo scoppio	kg/cm ²	7,6
Grado di bianco (diretto)	%	86,6
Grado di bianco (laboratorio)	%	79,7
Opacità	%	79,56

Fiber Test

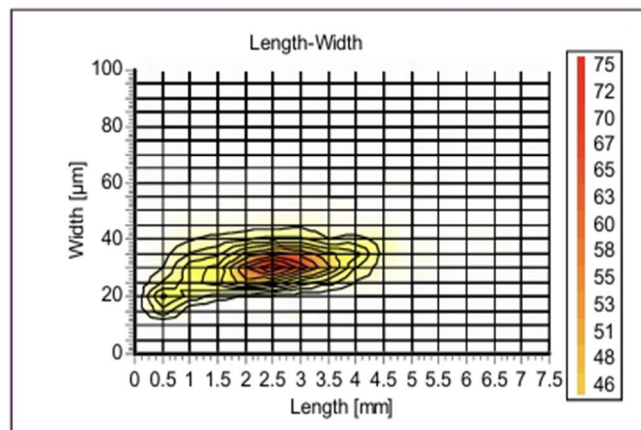
0 min - 8 °SR

Length weighted (ISO)

Variable	Value	Difference
Mean length	2.059 mm	0.055 mm
Mean width	27.9 μm	0.1 μm
Mean shape	81.3 %	-0.4 %
Mean fibril area	0.9 %	-0.1 %
Mean fibril perimeter	2.7 %	-0.3 %
Mean fines	18.1 %	



Variable	Weighting	Value
Fines	Length	18.1 %
Number of fibers		3397 (25105)
Number of images		8973
Temperature		24.1 °C
Fiber Wall Thickness		- μm

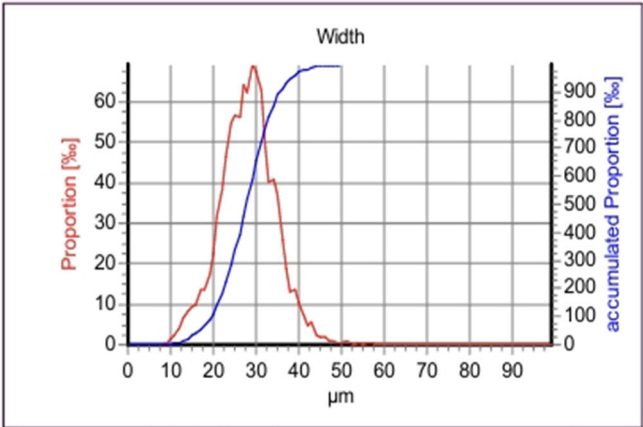
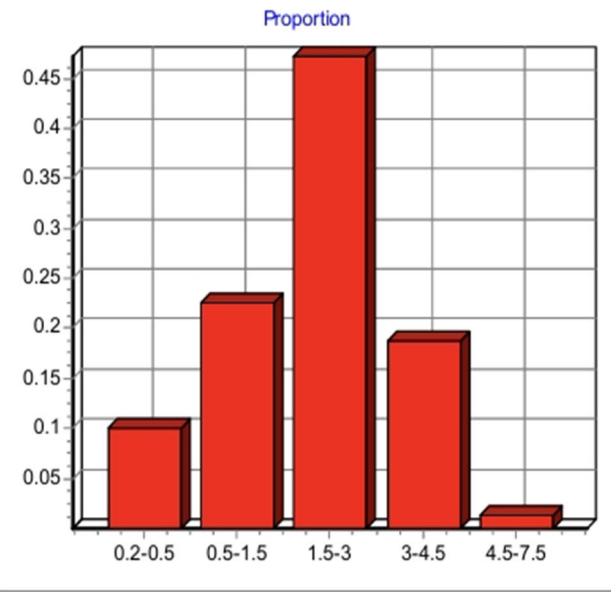
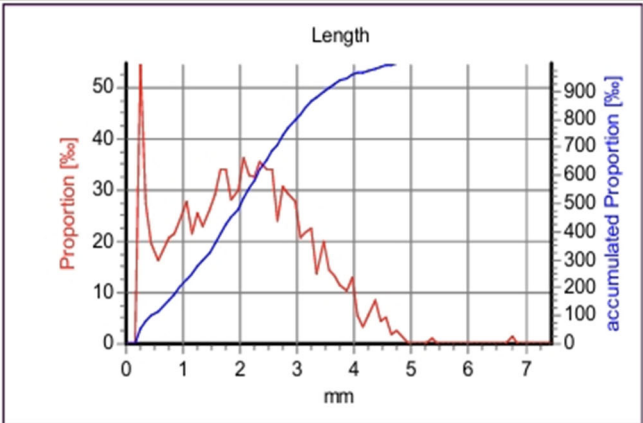


Nel campione prelevato a tempo 0, la lunghezza media delle fibre è pari a 2,06 mm, con una larghezza media di circa 28 μm e un contenuto di fini pari a 18,1%.

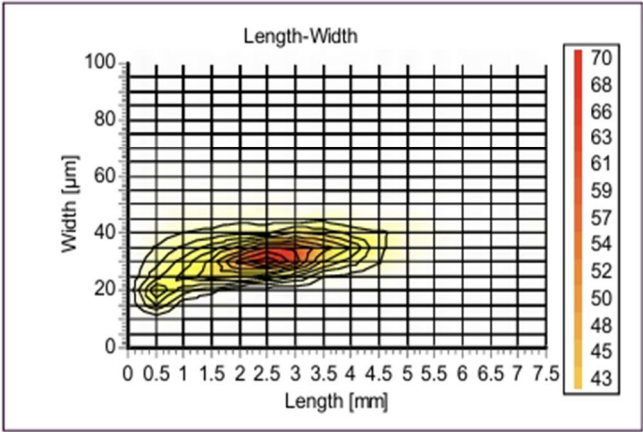
100 min - 25 °SR

Length weighted (ISO)

Variable	Value	Difference
Mean length	2.054 mm	0.026 mm
Mean width	28.6 μm	0.3 μm
Mean shape	88.6 %	0.3 %
Mean fibril area	4.8 %	-0.1 %
Mean fibril perimeter	16.8 %	0.3 %
Mean fines	22.5 %	



Variable	Weighting	Value
Fines	Length	22.5 %
Number of fibers		4483 (53979)
Number of images		8989
Temperature		22.4 °C
Fiber Wall Thickness		- μm

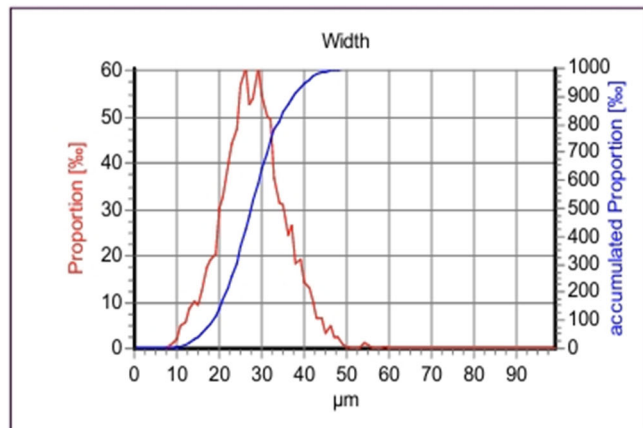
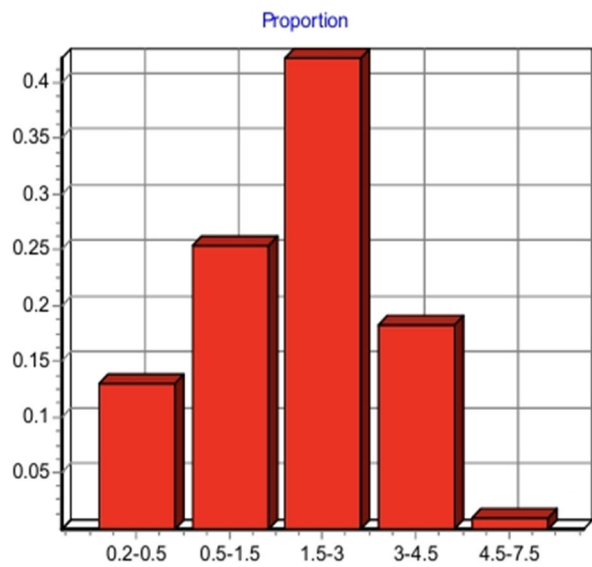
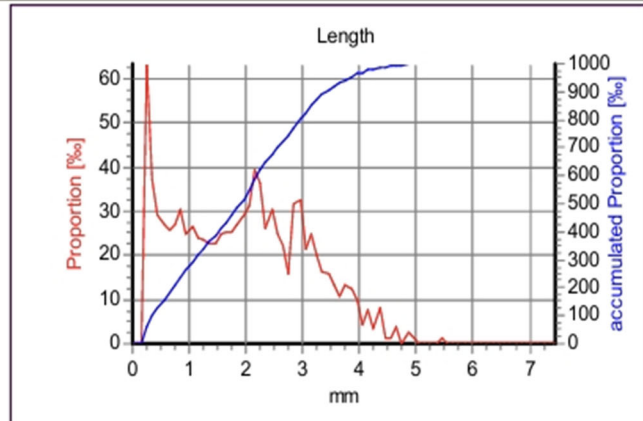


All'aumentare del grado di raffinazione (25 °SR) si osserva una sostanziale stabilità della lunghezza media (circa 2,05 mm), accompagnata da un incremento del contenuto di fini fino al 22,5%.

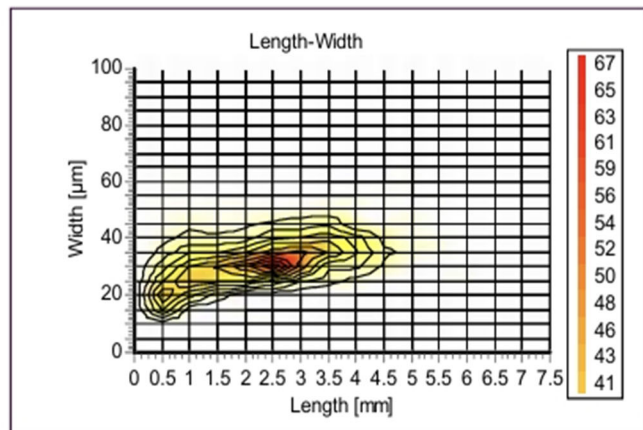
220 min - 69 °SR

Length weighted (ISO)

Variable	Value	Difference
Mean length	1.939 mm	-0.003 mm
Mean width	28.6 μm	0.1 μm
Mean shape	87.0 %	-0.1 %
Mean fibril area	10.6 %	0.0 %
Mean fibril perimeter	31.6 %	1.0 %
Mean fines	29.0 %	

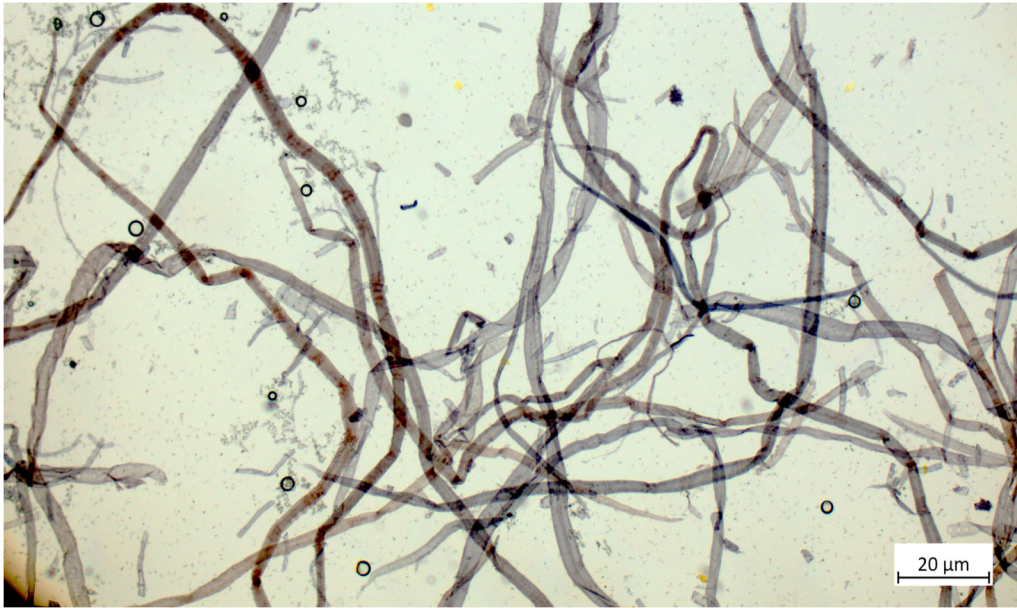


Variable	Weighting	Value
Fines	Length	29.0 %
Number of fibers		3588 (59446)
Number of images		9021
Temperature		21.8 °C
Fiber Wall Thickness		- μm



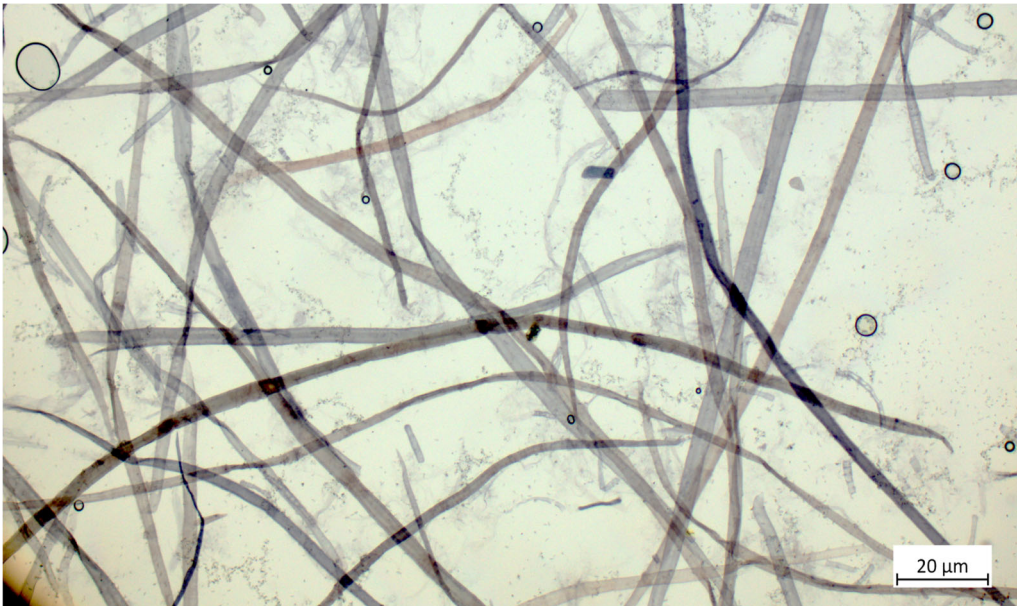
Nel campione maggiormente raffinato (69 °SR), la lunghezza media si riduce leggermente fino a circa 1,94 mm, mentre il contenuto di fini aumenta ulteriormente fino al 29,0% .
 Parallelamante, si osserva un incremento dei parametri legati alla fibrillazione superficiale, quali area e perimetro fibrillare, che risultano progressivamente più elevati all'aumentare del grado di raffinazione.

Osservazioni microscopiche



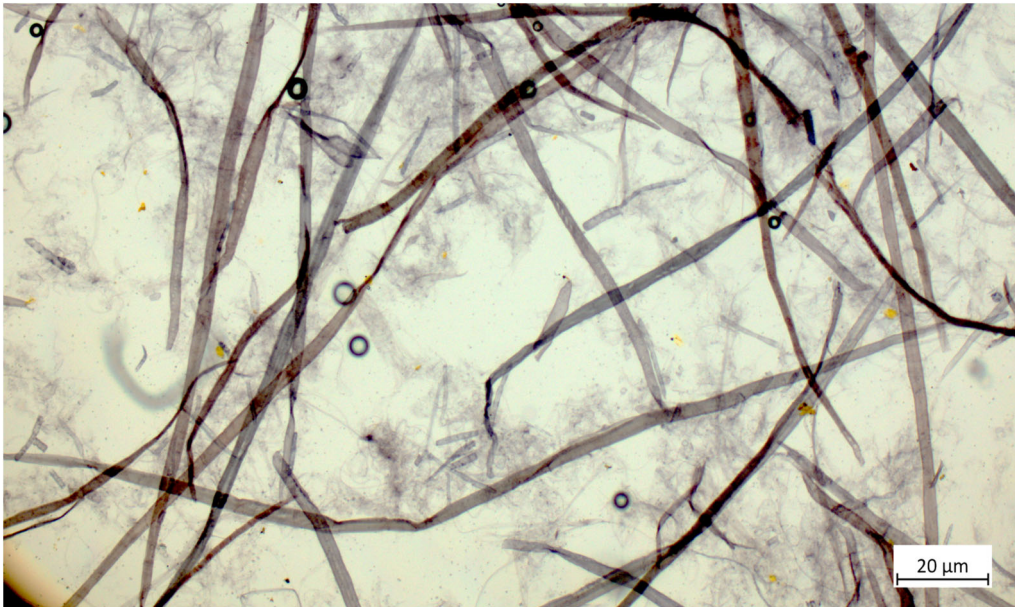
0 min – 8 °SR

Le fibre appaiono prevalentemente integre, con superficie relativamente liscia e limitata presenza di fibrillazione.



100 min – 25 °SR

Si osserva un aumento della fibrillazione superficiale e una maggiore apertura della struttura fibrosa.



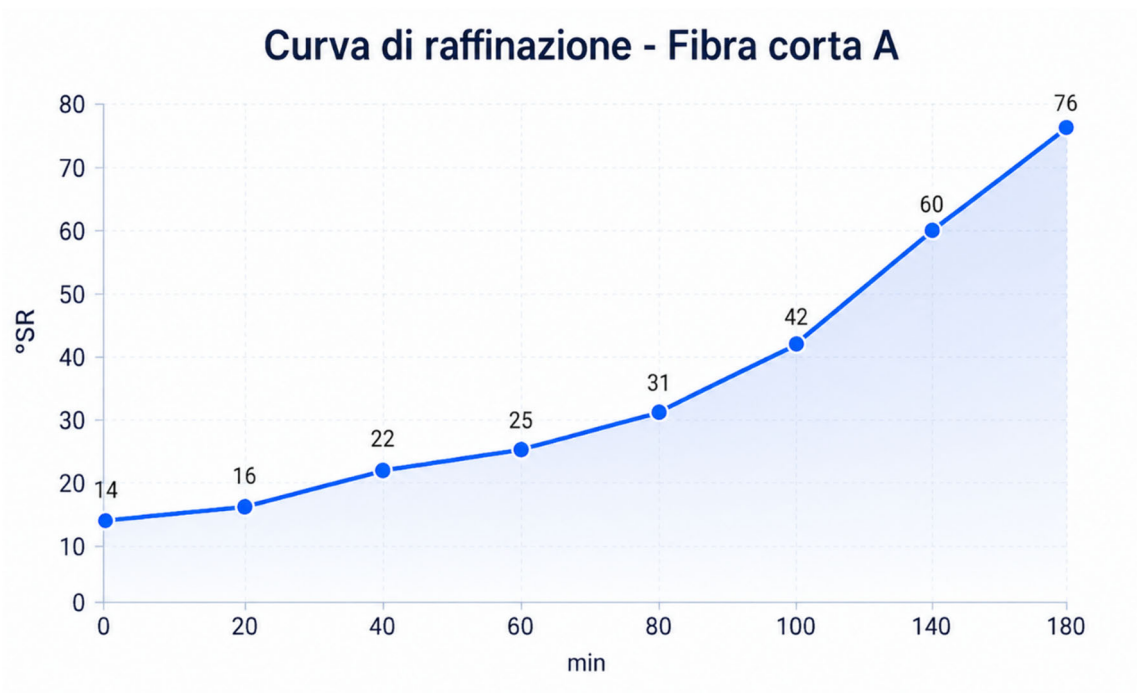
220 min – 69 °SR

Le fibre risultano maggiormente fibrillate e parzialmente collassate, con una maggiore presenza di materiale fine.

Fibra corta A

La cellulosa analizzata è una pasta chimica kraft di latifolia sbiancata proveniente dal Brasile, composta al 100% da fibra di eucalipto.

Curva di raffinazione



Il valore iniziale risulta pari a circa 14 °SR, indicando una sospensione poco scolante come punto di partenza. Con l'aumentare del tempo di raffinazione si osserva un incremento graduale fino a 25 °SR a 60 minuti. Successivamente, la curva mostra un aumento più marcato, raggiungendo valori pari a 42 °SR a 100 minuti e fino a 76 °SR a 180 minuti.

Analisi meccaniche e ottiche

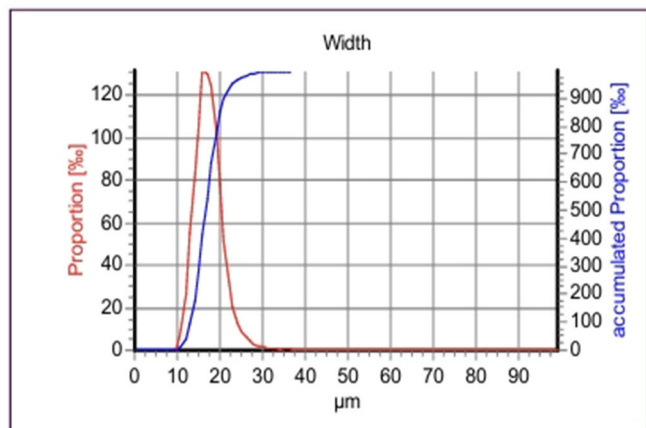
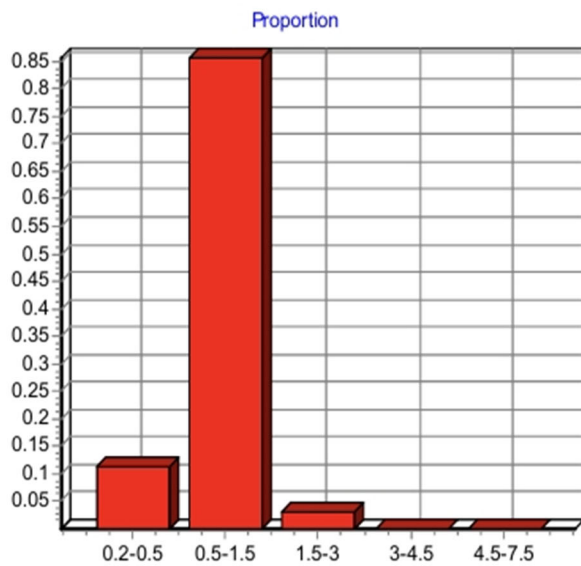
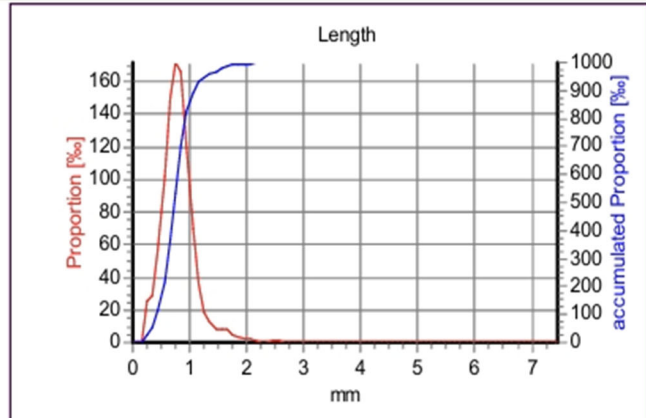
ANALISI	UNITÀ DI MISURA	RISULTATO
Grammatura	g/m ²	91
Spessore	micron	159,6
V.S.A.	cm ³ /g	1,75
Porosità Gurley	secondi	12
Resistenza alla trazione	kg/f	8,47
Allungamento alla trazione	mm	2,62
Resistenza alla delaminazione	ft/lb	142,5
Resistenza allo scoppio	kg/cm ²	4,4
Grado di bianco (diretto)	%	87,1
Grado di bianco (laboratorio)	%	83,35
Opacità	%	87,33

Fiber Test

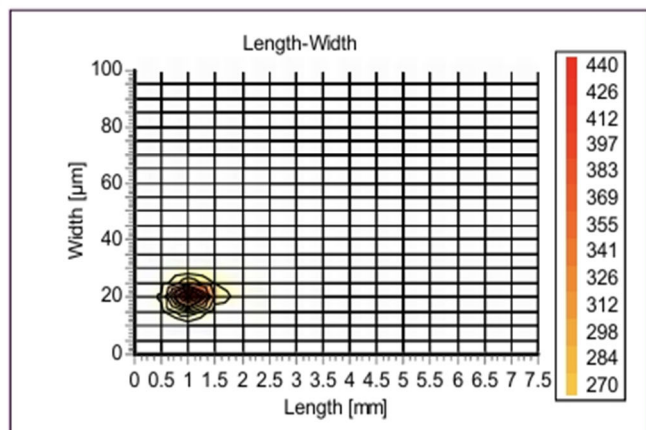
0 min - 14 °SR

Length weighted (ISO)

Variable	Value	Difference
Mean length	0.804 mm	0.003 mm
Mean width	18.1 μm	0.0 μm
Mean shape	86.9 %	0.0 %
Mean fibril area	1.0 %	0.0 %
Mean fibril perimeter	2.6 %	-0.1 %
Mean fines	18.6 %	



Variable	Weighting	Value
Fines	Length	18.6 %
Number of fibers		20141 (95926)
Number of images		2237
Temperature		23.1 °C
Fiber Wall Thickness		- μm

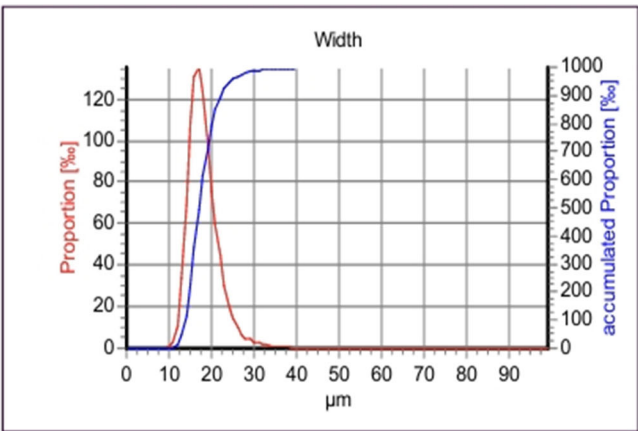
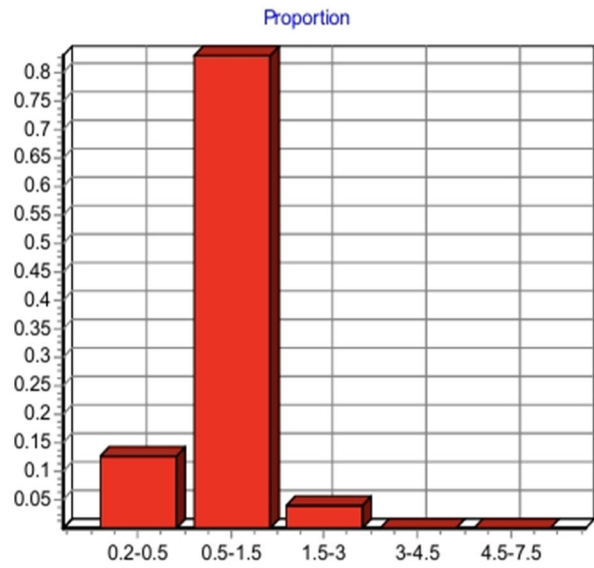
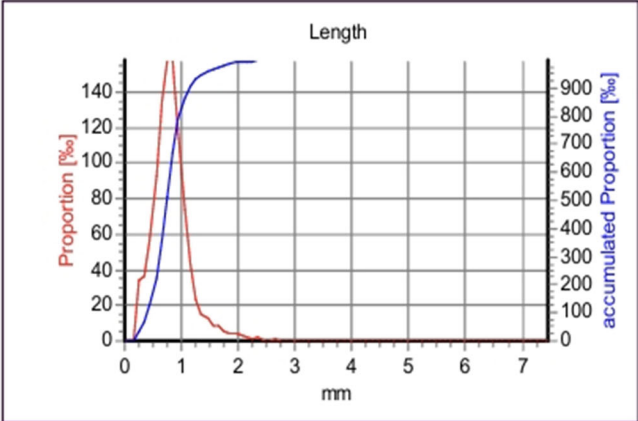


Nel campione a tempo 0, la lunghezza media delle fibre risulta pari a 0,80 mm, con una larghezza media di 18,1 μm e un contenuto di fini pari al 18,6%.

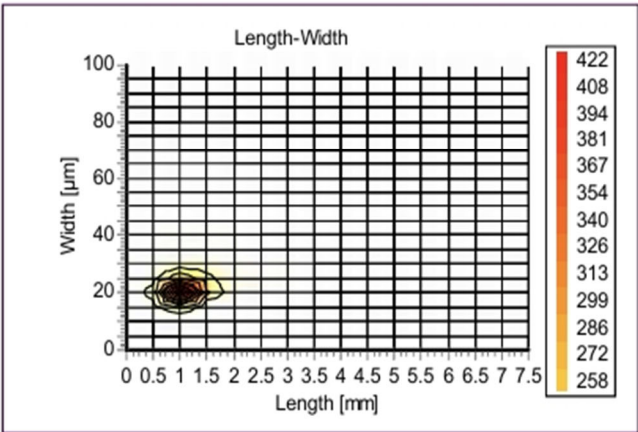
60 min - 25 °SR

Length weighted (ISO)

Variable	Value	Difference
Mean length	0.823 mm	0.010 mm
Mean width	18.8 μm	0.0 μm
Mean shape	87.9 %	-0.3 %
Mean fibril area	3.1 %	0.0 %
Mean fibril perimeter	10.0 %	0.0 %
Mean fines	22.0 %	



Variable	Weighting	Value
Fines	Length	22.0 %
Number of fibers		20128 (139870)
Number of images		1890
Temperature		23.1 °C
Fiber Wall Thickness		- μm

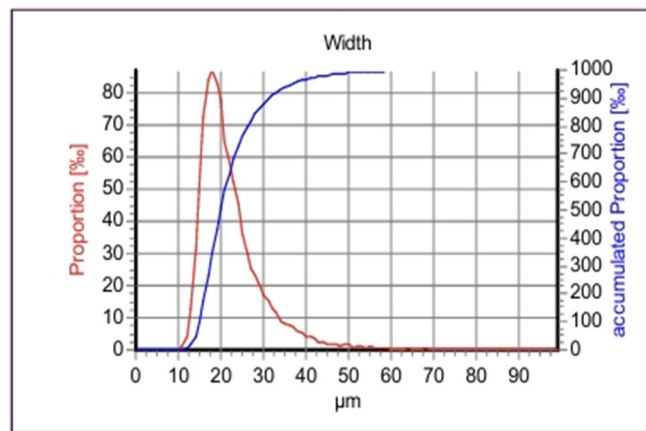
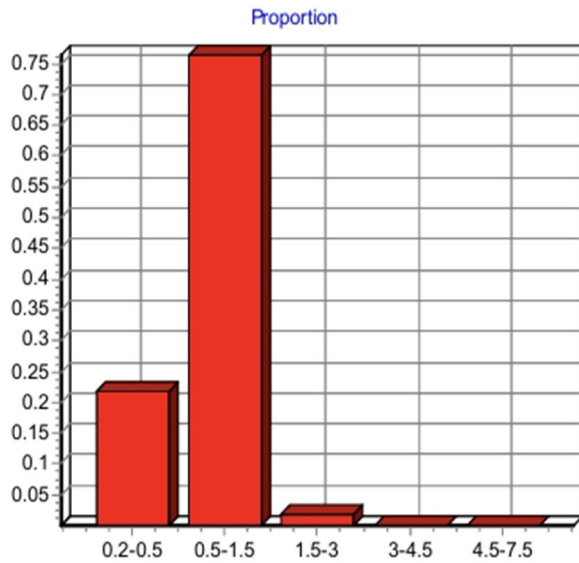
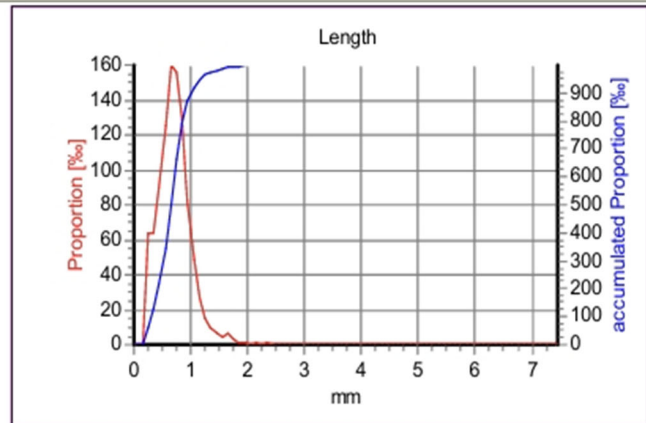


Nel grado intermedio di raffinazione (25 °SR), la lunghezza media si mantiene pressoché costante (circa 0,82 mm), mentre il contenuto di fini aumenta fino a circa 22,0%. Il perimetro medio fibrillato passa dal 2,6% al 10%.

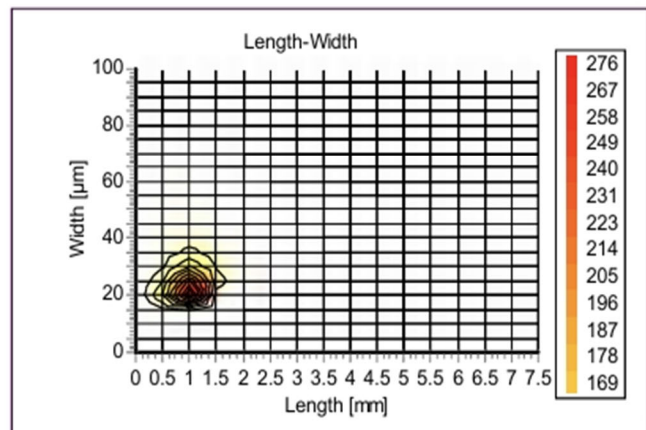
180 min - 76 °SR

Length weighted (ISO)

Variable	Value	Difference
Mean length	0.718 mm	-0.007 mm
Mean width	22.9 μm	0.1 μm
Mean shape	83.9 %	0.1 %
Mean fibril area	8.3 %	-0.1 %
Mean fibril perimeter	28.7 %	-0.3 %
Mean fines	32.4 %	

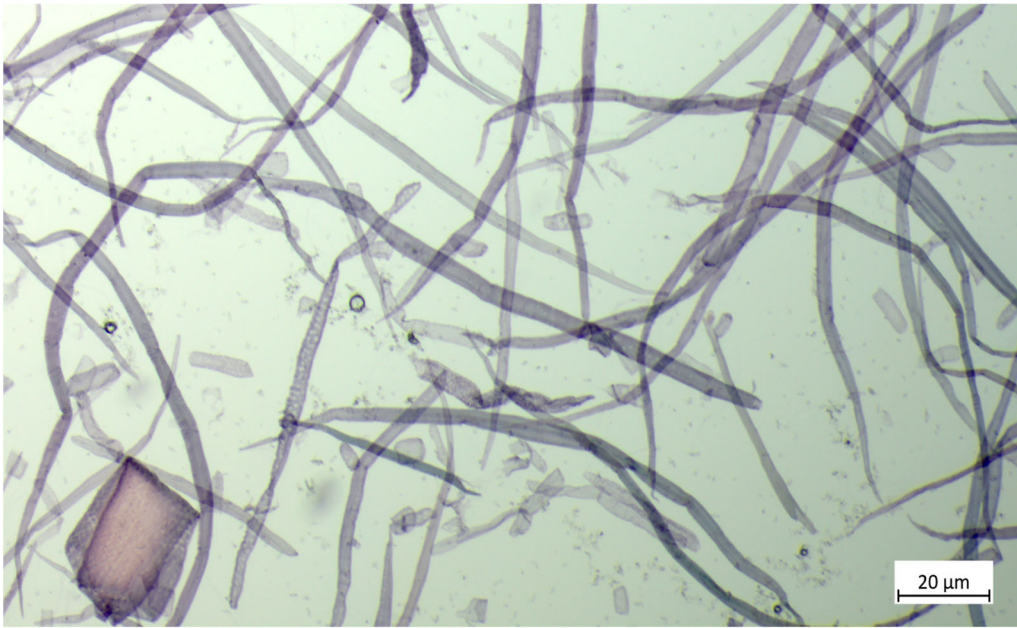


Variable	Weighting	Value
Fines	Length	32.4 %
Number of fibers		20097 (256568)
Number of images		2725
Temperature		22.8 °C
Fiber Wall Thickness		- μm



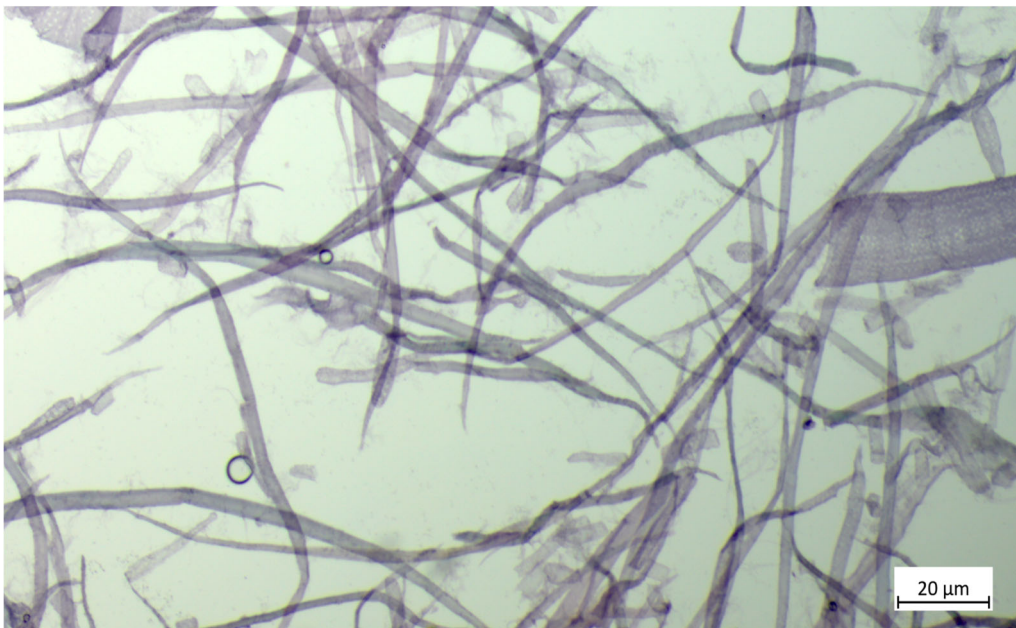
Nel campione maggiormente raffinato, il contenuto di fini cresce ulteriormente fino a circa 32,4%, mentre la lunghezza media si riduce leggermente fino a circa 0,72 mm. La media del perimetro fibrillato arriva al 28,7%.

Osservazioni microscopiche



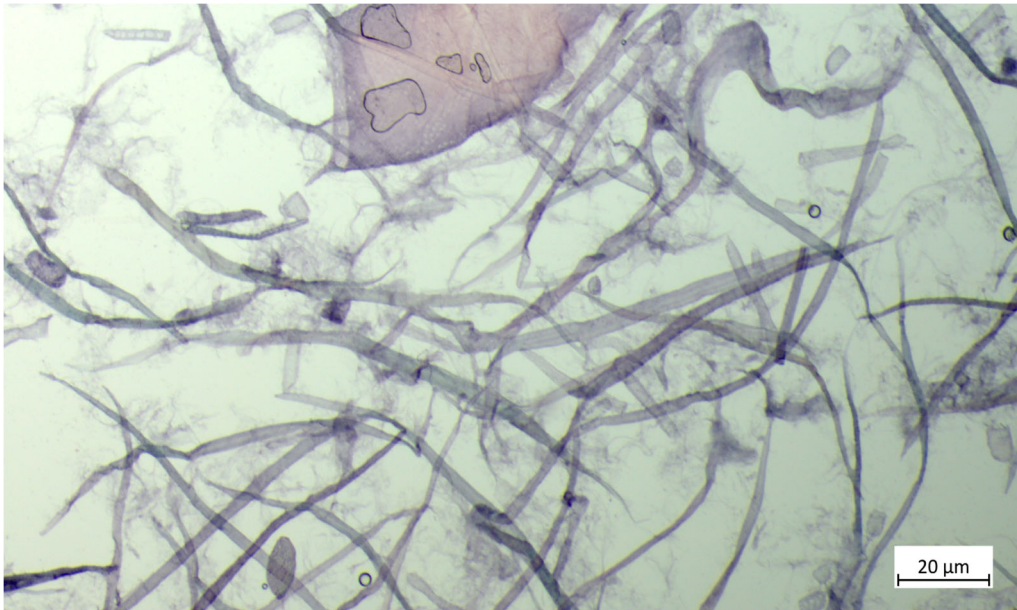
0 min – 14 °SR

Le fibre appaiono relativamente rigide e con superficie liscia, con limitata presenza di fibrillazione e con una notevole presenza di fini. La forma che somiglia a un quadrato in basso a sinistra è un vaso di eucalipto.



60 min – 25 °SR

Si osserva un aumento della fibrillazione superficiale e una maggiore apertura della struttura fibrosa. La forma che somiglia ad un rettangolo in alto a destra è un altro vaso di eucalipto.



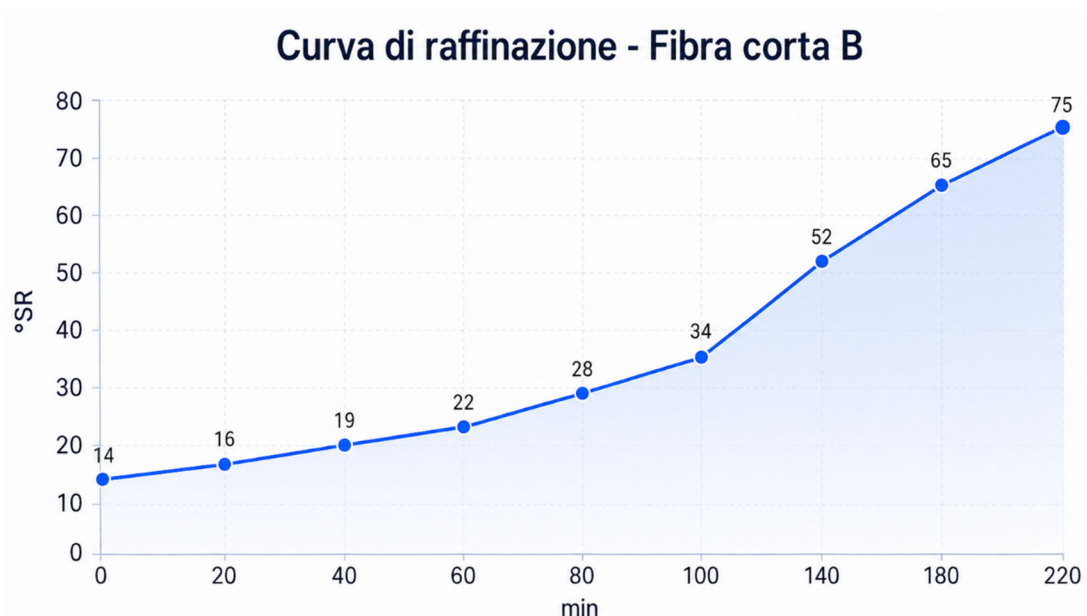
180 min – 76 °SR

Le fibre risultano più disgregate, con evidente incremento dei fini e della superficie specifica. In alto in centro troviamo un altro vaso di eucalipto.

Fibra corta B

Anche questa cellulosa è una pasta chimica kraft di latifolia sbiancata proveniente dal sud del Brasile, composta al 100% da fibra di eucalipto.

Curva di raffinazione



Il valore a tempo 0 risulta essere pari a 14 °SR. Nella fase iniziale l'incremento dei °SR è abbastanza graduale, superati i 60 minuti, l'incremento è più marcato. Con valori pari a circa 34 °SR a 100 minuti, fino a raggiungere circa 75 °SR a 220 minuti.

Analisi meccaniche e ottiche

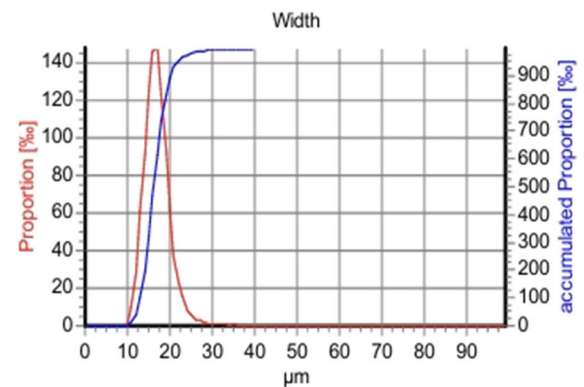
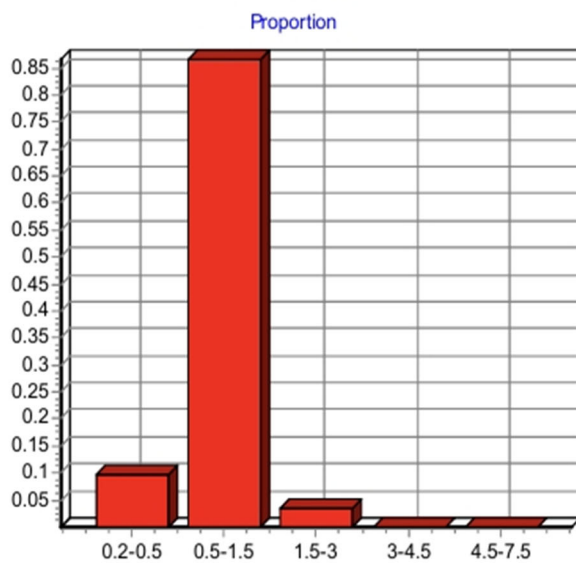
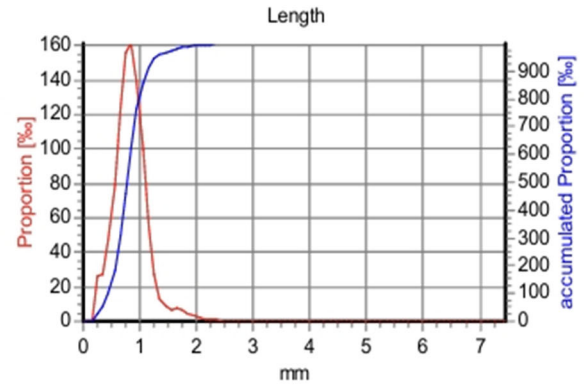
ANALISI	UNITÀ DI MISURA	RISULTATO
Grammatura	g/m ²	96
Spessore	micron	165,3
V.S.A.	cm ³ /g	1,72
Porosità Gurley	secondi	10
Resistenza alla trazione	kg/f	9,61
Allungamento alla trazione	mm	2,81
Resistenza alla delaminazione	ft/lb	155
Resistenza allo scoppio	kg/cm ²	4,4
Grado di bianco (diretto)	%	86,6
Grado di bianco (laboratorio)	%	83,8
Opacità	%	89,68

Fiber Test

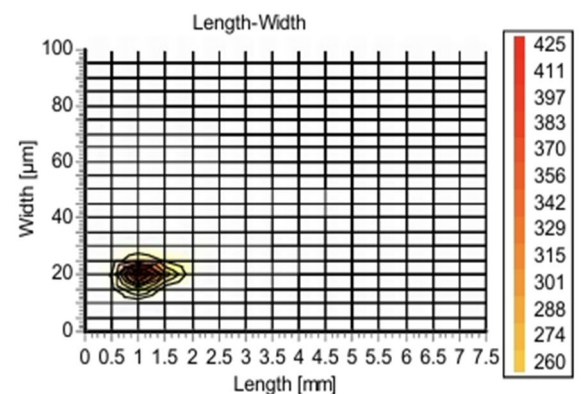
0 min - 14 °SR

Length weighted (ISO)

Variable	Value	Difference
Mean length	0.848 mm	-0.001 mm
Mean width	17.6 μm	0.0 μm
Mean shape	86.5 %	0.0 %
Mean fibril area	1.0 %	0.0 %
Mean fibril perimeter	2.4 %	0.0 %
Mean fines	19.0 %	



Variable	Weighting	Value
Fines	Length	19.0 %
Number of fibers		20106 (97379)
Number of images		2657
Temperature		23.3 °C
Fiber Wall Thickness		- μm

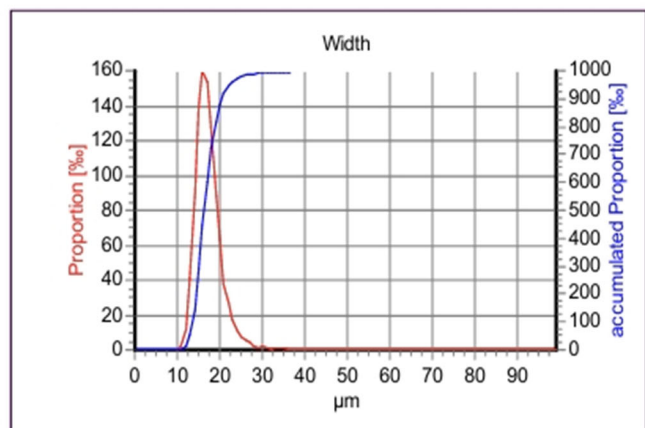
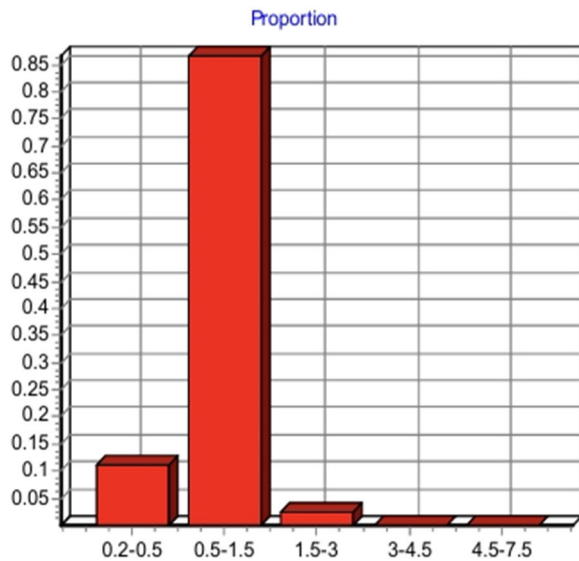
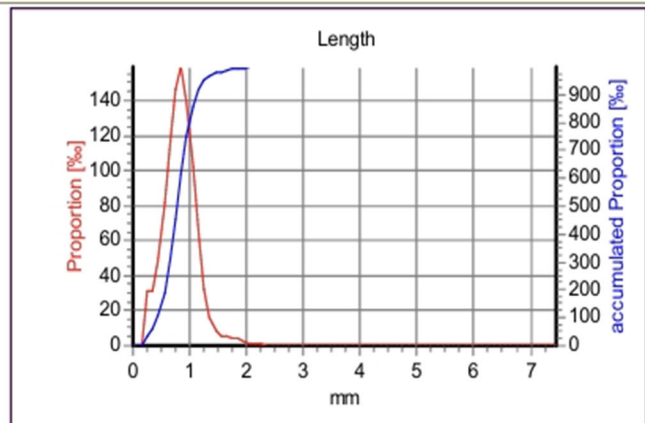


Nel campione iniziale, la lunghezza media delle fibre risulta pari a circa 0,85 mm, con una larghezza media di circa 17,6 μm e un contenuto di fini pari al 19,0%.

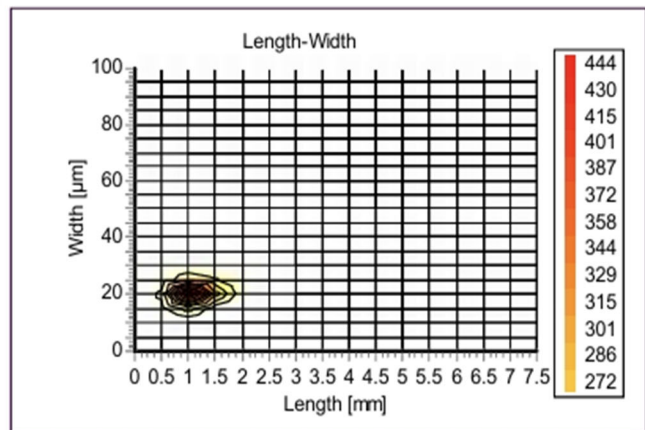
60 min - 22 °SR

Length weighted (ISO)

Variable	Value	Difference
Mean length	0.836 mm	-0.003 mm
Mean width	17.9 μm	0.0 μm
Mean shape	89.7 %	0.1 %
Mean fibril area	2.4 %	-0.1 %
Mean fibril perimeter	6.9 %	-0.1 %
Mean fines	21.2 %	



Variable	Weighting	Value
Fines	Length	21.2 %
Number of fibers		20030 (132308)
Number of images		4579
Temperature		22.4 °C
Fiber Wall Thickness		- μm

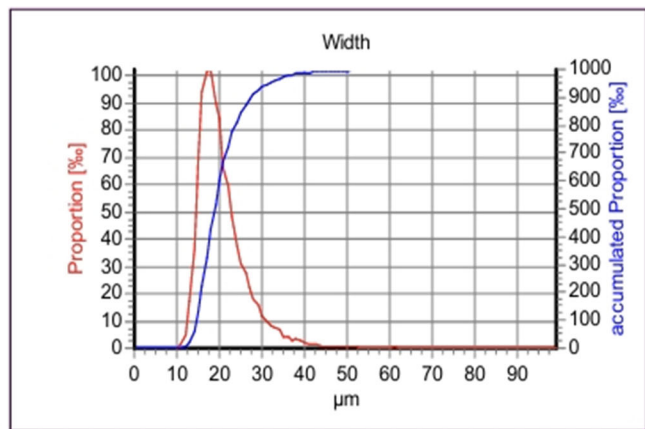
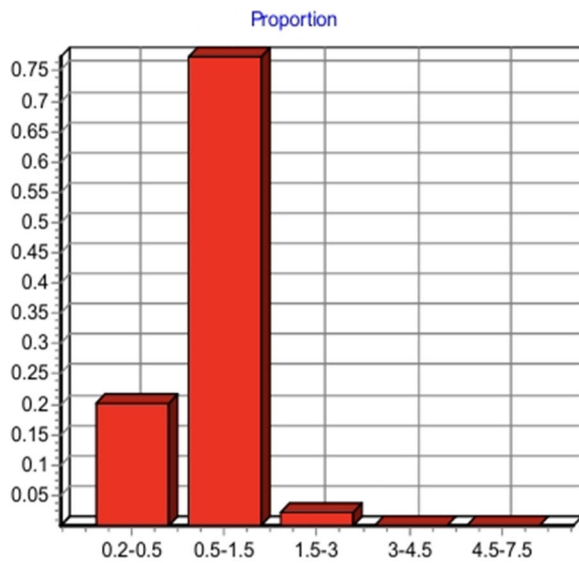
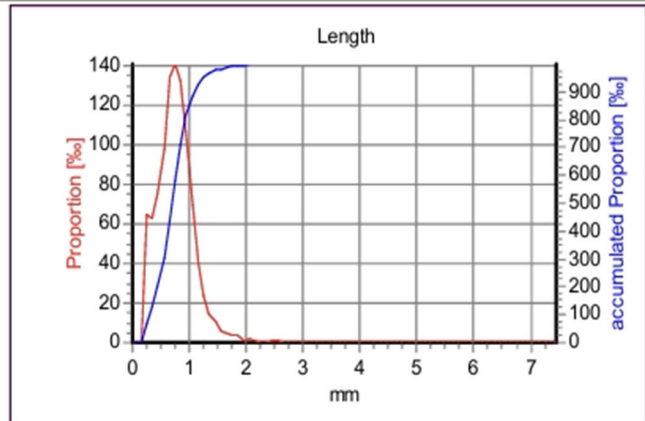


A un grado intermedio di raffinazione (22 °SR), la lunghezza media si mantiene pressoché costante (circa 0,84 mm), mentre il contenuto di fini aumenta fino a circa 21,2% .

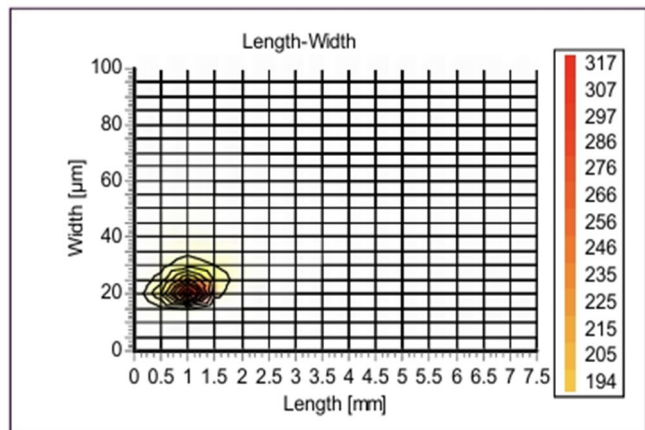
220 min - 75 °SR

Length weighted (ISO)

Variable	Value	Difference
Mean length	0.761 mm	-0.001 mm
Mean width	21.2 μm	0.1 μm
Mean shape	85.3 %	-0.1 %
Mean fibril area	8.5 %	-0.1 %
Mean fibril perimeter	27.9 %	0.0 %
Mean fines	32.9 %	

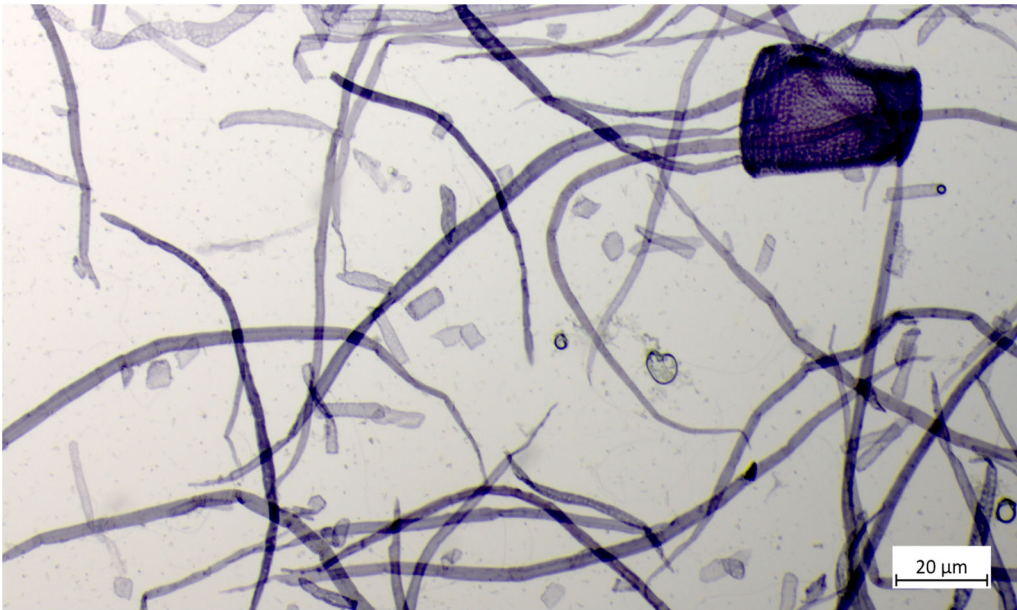


Variable	Weighting	Value
Fines	Length	32.9 %
Number of fibers		20029 (251841)
Number of images		3192
Temperature		22.1 °C
Fiber Wall Thickness		- μm



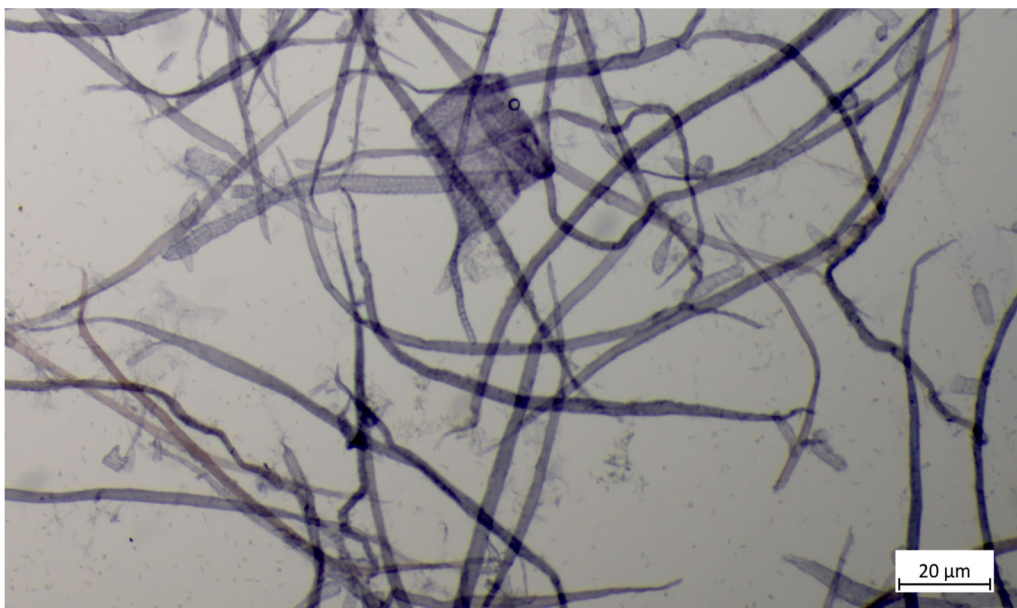
Nel campione maggiormente raffinato, la lunghezza media si riduce leggermente fino a circa 0,76 mm, mentre il contenuto di fini aumenta ulteriormente fino a circa 32,9%.

Osservazioni microscopiche



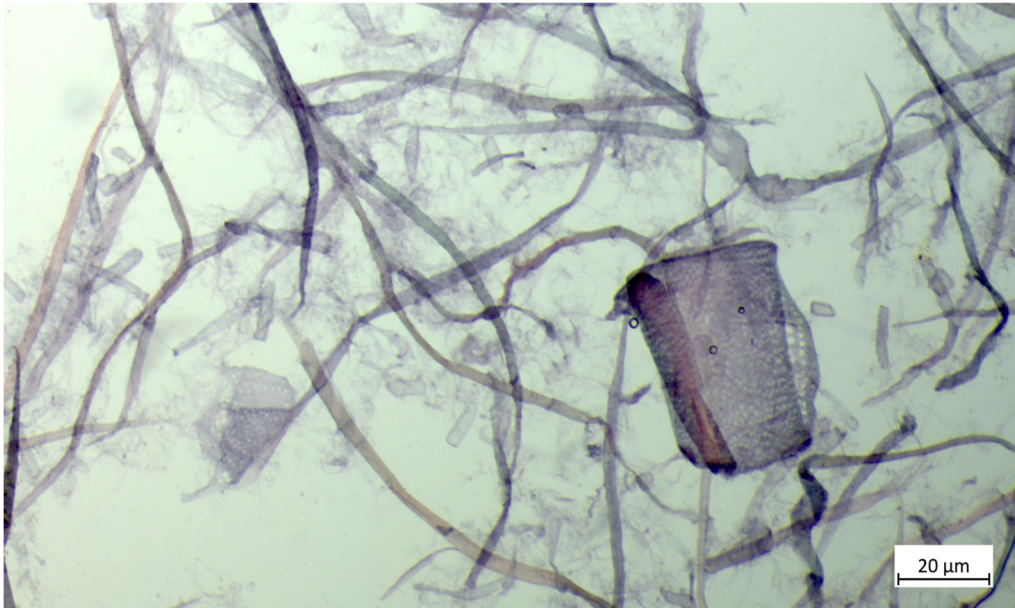
0 min – 14 °SR

Le fibre appaiono corte e compatte, con superficie poco fibrillata e una buona presenza di materiale fine. Le forme quadrate/rettangolari sono vasi di eucalipto (per esempio in alto a destra).



60 min – 22 °SR

Progressivo incremento della fibrillazione e una maggiore disgregazione della struttura fibrosa.



220 min – 75 °SR

Evidente fibrillazione e apertura della struttura fibrosa. (N.B: i vasi purtroppo non si possono eliminare, nonostante una raffinazione spinta)

3.3 ANALISI COMPARATIVA E INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

L'analisi dei risultati sperimentali consente di mettere in relazione in modo diretto le caratteristiche morfologiche delle cellulose con il loro comportamento durante la raffinazione e con le proprietà del foglio ottenuto.

A differenza del paragrafo precedente, in cui i dati sono stati presentati in forma descrittiva, in questa sezione l'obiettivo è quello di interpretarli in chiave comparativa, evidenziando come differenze anche contenute nei parametri iniziali possano tradursi in variazioni significative sia nel processo sia nelle prestazioni finali del materiale.

Confronto fibra lunga e fibra corta

Fin dalle condizioni iniziali emergono differenze significative nella drenabilità. La fibra lunga presenta un valore iniziale pari a circa 8 °SR, mentre le fibre corte si attestano su valori intorno a 14 °SR. Questa differenza di circa 6 punti Schopper, evidenzia come le fibre corte presentino fin da subito una maggiore resistenza al drenaggio. Tale comportamento può essere ricondotto alla loro minore dimensione e alla maggiore superficie specifica, che favoriscono una più elevata capacità di trattenere acqua già nelle prime fasi di lavorazione.

Questa differenza iniziale è coerente con i dati morfologici ottenuti dal Fiber Test. La fibra lunga presenta una lunghezza media iniziale pari a circa 2,06 mm, con una larghezza media

di circa 27,9 μm , mentre le fibre corte mostrano lunghezze comprese tra 0,80 e 0,85 mm e larghezze inferiori, intorno a 17–18 μm . Il rapporto lunghezza/diametro risulta quindi significativamente più elevato per la fibra lunga, favorendo la formazione di una rete inizialmente più aperta e meno compatta. Al contrario, le fibre corte, per effetto della loro minore lunghezza e maggiore densità numerica a parità di massa, tendono a occupare più efficacemente lo spazio, generando una struttura più chiusa.

L'analisi della curva di raffinazione evidenzia differenze ancora più marcate nel comportamento delle fibre. La fibra lunga raggiunge valori di circa 25 °SR dopo circa 100 minuti di trattamento, mentre le fibre corte raggiungono lo stesso livello già intorno ai 60 minuti. Questo implica che, a parità di grado di raffinazione, le fibre corte richiedono un tempo inferiore di circa il 40%, evidenziando una maggiore reattività all'azione meccanica del raffinatore. Se si considera l'intero intervallo di raffinazione, la fibra lunga passa da 8 °SR a circa 68 °SR in circa 220 minuti, mentre le fibre corte passano da circa 14 °SR a valori compresi tra 75 e 76 °SR in tempi molto inferiori (per esempio, la fibra corta A raggiunge i 76 °SR in 180 minuti). L'incremento complessivo dei °SR avviene quindi con tempi differenti; più brevi nelle fibre corte soprattutto nelle fasi iniziali e intermedie.

Questo comportamento può essere interpretato alla luce della struttura della parete cellulare. Le fibre corte, tipicamente derivanti da eucalipto, presentano una parete più sottile e una maggiore accessibilità delle microfibrille, che favorisce i fenomeni di fibrillazione superficiale e interna. La fibra lunga, invece, presenta una parete più spessa e una maggiore rigidità, che rende il processo di raffinazione più lento e richiede un maggiore apporto energetico per ottenere modificazioni strutturali significative.

Il collegamento tra andamento della raffinazione e dati morfologici risulta particolarmente evidente analizzando l'evoluzione del contenuto di fini. La fibra lunga mostra un incremento da circa 18,1% a circa 29,0%, con un aumento di circa 11 punti percentuali. Le fibre corte, invece, partono da valori analoghi (18,6% per la fibra corta A e 19,0% per la fibra corta B) ma raggiungono valori finali superiori al 32% (32,4% e 32,9% rispettivamente), con incrementi dell'ordine di 13–14 punti percentuali.

Questo maggiore sviluppo di fini nelle fibre corte è direttamente correlato all'andamento del °SR. L'aumento del contenuto di fini comporta infatti una progressiva riduzione della dimensione dei pori all'interno del tappeto fibroso, con conseguente aumento della resistenza al drenaggio.

Dal punto di vista della lunghezza media, la fibra lunga mostra una riduzione contenuta, passando da circa 2,06 mm a circa 1,94 mm, con una variazione di circa -6%. Questo dato indica che la raffinazione agisce prevalentemente attraverso fenomeni di fibrillazione superficiale piuttosto che di taglio. Le fibre corte, invece, mostrano una riduzione più marcata, fino a circa 0,72–0,76 mm, con variazioni comprese tra -8% e -10%, evidenziando una maggiore incidenza dei fenomeni di cutting.

Le differenze morfologiche si riflettono in modo diretto sulle proprietà meccaniche del foglio. La fibra lunga presenta valori medi di resistenza alla trazione pari a circa 12 kgf, resistenza allo scoppio di circa 7,6 kg/cm² e allungamento alla trazione di circa 3,1 mm prima di cedere. La resistenza alla delaminazione si attesta intorno a 200 ft/lb (piede per libbra), indicando un buon legame interno tra le fibre. Questi valori sono coerenti con la maggiore lunghezza della fibra e con la sua capacità di creare una rete fibrosa continua, in cui gli sforzi vengono distribuiti lungo le fibre.

Le fibre corte, al contrario, mostrano valori inferiori di resistenza meccanica. La minore lunghezza e la maggiore frammentazione limitano la capacità di trasferire gli sforzi, riducendo la resistenza a trazione e allo scoppio. Tuttavia, l'elevata superficie specifica e il maggiore contenuto di fini favoriscono la formazione di legami interfibra, contribuendo comunque allo sviluppo di una certa resistenza, seppur inferiore rispetto alla fibra lunga.

Le proprietà ottiche evidenziano ulteriori differenze. Le fibre corte mostrano valori di opacità elevati, prossimi al 90%, grazie alla minore diffusione della luce dovuta alla presenza di fini e alla struttura più chiusa.

Nel complesso, l'analisi evidenzia come la fibra lunga e la fibra corta svolgano ruoli complementari all'interno del foglio. La fibra lunga garantisce la resistenza meccanica grazie alla sua struttura e alla sua lunghezza, mentre la fibra corta contribuisce alla regolazione della drenabilità, alla chiusura della struttura e al miglioramento delle proprietà ottiche attraverso la generazione di fini e lo sviluppo della fibrillazione.

Confronto tra fibre corte

Il confronto tra le due fibre corte analizzate evidenzia differenze meno marcate rispetto al confronto con la fibra lunga, ma comunque rilevanti dal punto di vista del comportamento alla raffinazione e dell'evoluzione dei parametri morfologici.

Entrambe le fibre presentano condizioni iniziali molto simili, con valori di drenabilità pari a 14 °SR. Questo indica che, in assenza di raffinazione significativa, le due cellulose mostrano una resistenza al drenaggio comparabile.

Tuttavia, già nelle prime fasi del processo emergono differenze nell'evoluzione della curva di raffinazione. La fibra corta A mostra immediatamente un incremento più rapido dei °SR, raggiungendo 22 °SR dopo 40 minuti di raffinazione, mentre la fibra corta B si attesta intorno a 19 °SR nello stesso intervallo. Dopo 100 minuti la fibra A raggiunge i 42 °SR, mentre la fibra corta B arriva a 34 °SR. Questa differenza di 8 gradi Schopper evidenzia una maggiore reattività della fibra corta A, che sviluppa più rapidamente resistenza al drenaggio.

Proseguendo la raffinazione, entrambe le fibre raggiungono valori finali simili, compresi tra 75 e 76 °SR, ma la differenza sostanziale è che la fibra corta A raggiunge questi valori in 180

minuti anziché in 220 minuti. Dal punto di vista di processo, questo si traduce in un risparmio economico notevole visto il minor consumo di kWh/t per la raffinazione dell'impasto.

I dati del Fiber Test permettono di confermare questi diversi comportamenti in risposta alla raffinazione. Infatti, entrambe le fibre pur avendo valori di lunghezza, larghezza, area fibrillata, perimetro fibrillato e fini, molti simili nei prelievi fatti a inizio e a fine raffinazione differiscono nel prelievo intermedio fatto a 60 minuti dove si notano valori percentuali maggiori di area e perimetro fibrillato nella fibra corta A, rispetto alla fibra corta B. I dati confermano la maggiore capacità della prima a formare legami interfibra e contribuire alla chiusura del foglio portando a una riduzione della drenabilità.

Dal punto di vista delle proprietà meccaniche e ottiche queste differenze non si riflettono in modo evidente, anzi, condividono valori molto simili.

Nel complesso, il confronto evidenzia come differenze relativamente contenute nei parametri iniziali possano amplificarsi durante la raffinazione, portando a comportamenti distinti. In particolare, la fibra corta A risulta più reattiva e tende a sviluppare più rapidamente fini e resistenza al drenaggio, mentre la fibra corta B mostra un comportamento più graduale e una maggiore stabilità strutturale.

4 - CONCLUSIONI

4.1 IMPLICAZIONI SUL PROCESSO INDUSTRIALE

I risultati sperimentali ottenuti evidenziano come le caratteristiche morfologiche delle fibre influenzino in modo diretto non solo le proprietà del foglio, ma anche i principali parametri operativi della macchina continua. In particolare, il contenuto di fini, la lunghezza della fibra e il grado di fibrillazione determinano variazioni significative nella richiesta energetica della raffinazione, nella drenabilità della sospensione e nell'efficienza dei sistemi di ritenzione. L'interpretazione dei dati in chiave industriale consente quindi di collegare le osservazioni di laboratorio ai fenomeni fisici che governano il processo di formazione del foglio.

Considerando che un consumo di 1kW/h corrisponde a circa 1.000 €/anno, il processo di raffinazione rappresenta una delle principali voci di consumo energetico nell'industria cartaria e il suo andamento è fortemente influenzato dalla morfologia della fibra (oltre ovviamente alla scelta del tipo di raffinatore più adatto alle proprie esigenze). Dai risultati sperimentali emerge che le fibre corte raggiungono valori di drenabilità intermedi (25 °SR) in tempi significativamente inferiori rispetto alla fibra lunga (circa 60 minuti contro 100 minuti). Questo comportamento indica una maggiore "raffinabilità" delle fibre corte, dovuta alla minore rigidità della parete cellulare e alla maggiore accessibilità delle microfibrille. Tra i principali effetti del processo di raffinazione sulle fibre, abbiamo due meccanismi: la fibrillazione (sviluppo di superficie) e la frammentazione (generazione di fini).

Nel caso della fibra lunga, l'energia fornita viene utilizzata prevalentemente per la fibrillazione interna ed esterna, con un incremento della superficie specifica senza una significativa perdita di lunghezza. Questo è confermato dalla riduzione limitata della lunghezza media (circa -6%). Nel caso delle fibre corte, invece, una quota maggiore dell'energia viene dissipata in fenomeni di taglio e disgregazione, come evidenziato dall'aumento più marcato del contenuto di fini (fino a oltre il 32%) e dalla maggiore riduzione della lunghezza (fino a circa -10%). Questo implica che, sebbene il tempo di raffinazione sia inferiore, una parte dell'energia non contribuisce allo sviluppo di proprietà utili, ma alla produzione di materiale fine. In un contesto industriale, la scelta del livello di raffinazione non può essere basata esclusivamente sul raggiungimento di un determinato valore di °SR, ma deve tenere conto del bilancio tra consumo energetico e sviluppo delle proprietà desiderate. Un altro dei parametri critici nella gestione della macchina continua è la drenabilità della sospensione, in quanto influenza direttamente la velocità di produzione e la stabilità del processo. Dal punto di vista fisico, il drenaggio può essere descritto come un fenomeno di

filtrazione attraverso una struttura porosa. Le fibre lunghe, grazie alla loro maggiore dimensione, formano una rete con pori più ampi, che consente un rapido passaggio dell'acqua. I fini, invece, si comportano come particelle colloidali e tendono a depositarsi all'interno dei pori, riducendone la dimensione e aumentando la resistenza al flusso.

Questo effetto è particolarmente evidente nelle fasi iniziali della formazione del foglio, dove la presenza di fini può determinare una rapida chiusura della struttura superficiale, ostacolando il drenaggio degli strati sottostanti. Di conseguenza, un aumento del contenuto di fini si traduce in una riduzione della velocità di drenaggio e, quindi, in una possibile limitazione della velocità macchina.

Un ulteriore aspetto riguarda la ritenzione dei fini. A differenza delle fibre lunghe, che vengono trattenute principalmente per effetto meccanico, i fini risultano difficili da trattenere a causa della loro dimensione ridotta, della bassa massa e della carica superficiale negativa. In assenza di adeguati sistemi di ritenzione, una quota significativa dei fini segue il flusso dell'acqua e viene persa nel circuito delle acque. In condizioni industriali, la ritenzione complessiva della macchina può essere dell'ordine del 85–90%, ma la ritenzione dei fini è significativamente inferiore e può variare tra il 50% e il 70%. Questo significa che una parte rilevante del materiale fine generato durante la raffinazione non contribuisce alla formazione del foglio.

Dal punto di vista operativo, ciò comporta una maggiore dipendenza dai sistemi di ritenzione chimica, quali polimeri cationici e sistemi microparticellari, che consentono di aggregare i fini in “fiocchi” di dimensioni sufficienti per essere trattenuti. Tuttavia, l'utilizzo di questi sistemi comporta costi aggiuntivi e richiede un controllo accurato delle condizioni chimiche della sospensione.

4.2 CONSIDERAZIONI SULL'IMPORTANZA DEL CONTROLLO DELLE MATERIE PRIME FIBROSE

Le differenze emerse tra le cellulose analizzate assumono un significato particolarmente rilevante quando vengono portate dal contesto di laboratorio a quello industriale, dove anche variazioni apparentemente contenute nei parametri della materia prima possono tradursi in impatti significativi sul funzionamento della macchina continua e sui costi di produzione. In particolare, il contenuto di fini emerge come uno dei parametri più critici e allo stesso tempo più sottovalutati.

A titolo esemplificativo, prendiamo in esame lo stabilimento presso il quale lavoro: Fedrigoni Verona.

Prendendo in considerazione le 5 principali produzioni dello stabilimento nel 2025, nelle loro svariate grammature, possiamo affermare che il mix fibroso è composto in media da un 80% di fibra corta e un restante 20% di fibra lunga. Ciò significa che eventuali variazioni sulla qualità della fibra corta hanno un impatto predominante sull'intero sistema.

Variazioni che abbiamo effettivamente riscontrato in laboratorio grazie al Fiber Test. Infatti, a tempo 0 la fibra corta A presenta un contenuto di fini pari a 18,6% (length weighted), mentre il valore dichiarato dal fornitore è pari a 14,9%. Questo scostamento di circa 4 punti percentuali rappresenta un incremento significativo, soprattutto se rapportato ai volumi industriali e alla composizione tipica della ricetta.

Considerando che nel 2025 lo stabilimento ha prodotto circa 65.000 tonnellate di carta, con una ritenzione media delle due macchine continue del 88%, questo significa che il consumo annuo di cellulosa è stato più o meno di 74.000 tonnellate. Visto che stiamo analizzando il contenuto di fini della fibra corta, ciò significa che bisogna prendere in considerazione solo l'80% delle tonnellate totali, che corrisponde a circa 60.000 tonnellate di fibra corta.

Un delta del 4% su un totale di 60.000, sono circa 2.400 tonnellate di materiale fine aggiuntivo introdotto nel processo.

Come evidenziato nelle analisi precedenti, i fini presentano caratteristiche fisiche e chimiche che li rendono difficili da trattenere durante la fase di drenaggio sulla tela di formazione. In condizioni operative tipiche, la ritenzione globale della macchina continua può attestarsi intorno al 80-90%, ma la ritenzione specifica dei fini risulta significativamente inferiore, con valori compresi tra il 50% e il 70%. Assumendo in modo cautelativo condizioni di ritenzione particolarmente favorevoli, è comunque inevitabile che una quota dei fini presenti nella sospensione non venga incorporata nel foglio e venga persa nel circuito delle acque.

Nello scenario migliore dove la ritenzione dei fini è pari al 70%, ciò significa che delle 2.400 tonnellate di fini riusciamo a trattenerne solo 1.680 tonnellate, perdendo invece 700 tonnellate di materia prima acquistata che non contribuisce alla produzione di carta, ma viene dispersa nel processo. Infine, considerando il prezzo della cellulosa di circa 500 €/ton (per essere cauti), questa perdita rappresenta un costo diretto di circa 350.000 €/anno, in quanto si tratta di cellulosa acquistata ma non trasformata in prodotto finito.

A questo si aggiungono costi indiretti. L'aumento del contenuto di fini comporta infatti un incremento del carico solido nelle acque prime e seconde, con conseguente maggiore richiesta di trattamento nel sistema di depurazione, e un ulteriore aumento dei costi legati allo smaltimento dei fanghi attivi. Inoltre, per compensare la minore ritenzione, è necessario aumentare l'efficacia dei sistemi chimici, con un maggiore utilizzo di polimeri di ritenzione e additivi, che incidono ulteriormente sui costi OPEX.

Infine, è importante considerare l'effetto scala. Il ragionamento sviluppato si riferisce a un singolo stabilimento, ma assume un significato ancora più rilevante se esteso a un contesto industriale più ampio. In un gruppo caratterizzato da più stabilimenti produttivi, anche

variazioni apparentemente limitate nella qualità della materia prima possono generare un impatto economico complessivo molto elevato, moltiplicando gli effetti osservati a livello locale.

Nel complesso, l'analisi evidenzia come il contenuto di fini rappresenti un parametro chiave non solo dal punto di vista tecnico, ma anche economico. Il controllo accurato delle materie prime fibrose e la verifica dei parametri reali rispetto a quelli dichiarati dai fornitori diventano quindi strumenti fondamentali per garantire l'efficienza del processo, ridurre le perdite e ottimizzare i costi di produzione.

Alla luce di queste considerazioni, risulta evidente come il controllo delle materie prime fibrose non possa limitarsi alla verifica dei parametri dichiarati dal fornitore, ma debba basarsi su un'analisi sperimentale interna, in grado di caratterizzare in modo accurato le proprietà della cellulosa in ingresso.

In conclusione, il controllo accurato delle materie prime fibrose rappresenta uno strumento strategico per l'ottimizzazione del processo industriale. La conoscenza dettagliata delle caratteristiche della cellulosa consente infatti di:

- adattare le condizioni di raffinazione in funzione della fibra
- ottimizzare il bilancio tra drenabilità e proprietà meccaniche
- migliorare l'efficienza dei sistemi di ritenzione
- ridurre le perdite di materiale e i costi operativi

In questo senso, l'approccio adottato nel presente lavoro, basato sull'integrazione tra analisi sperimentale e interpretazione dei risultati in chiave di processo, rappresenta un modello efficace per la gestione consapevole delle materie prime e per il miglioramento continuo delle prestazioni industriali.

5 – BIBLIOGRAFIA

- “Appunti di Tecnologia Cartaria” di Paolo Zaninelli – Scuola Interregionale di Tecnologia per Tecnici Cartari – Edizione 2025/26
- “Prove sulle materie fibrose sulla carta e sul cartone” – Aticelca
- “La colorazione della carta e il candeggio ottico” – Bruno Perini
- “L&W manuale 04” – Lorentzen & Wettre