

La raffinazione impasti nell'industria cartaria

Jacobucci Gabriele
(Burgo Avezzano)

Relazione finale
6° Corso di Tecnologia per tecnici cartari
1998 / 99



**Scuola Interregionale
di tecnologia
per tecnici Cartari**

Via Don G. Minzoni, 50
37138 Verona

Indice

1. Introduzione	pag. 1
2. Le fibre vegetali utilizzate per la fabbricazione della carta	pag. 2
2.1 Caratteristiche chimiche del legno	
2.2 La cellulosa	
2.3 Le emicellulose	
2.4 La lignina	
2.5 Struttura delle fibre	
2.6 Importanza delle dimensioni delle fibre nella raffinazione	
3. Azione della raffinazione	pag. 7
3.1 Rapporto fibre-acqua	
3.2 Legame idrogeno	
3.3 Modificazione delle fibre per raffinazione	
3.4 Effetti della raffinazione sulle caratteristiche della carta	
4. Controllo della raffinazione	pag. 16
4.1 La raffinazione in laboratorio	
4.2 Determinazione della Scolantezza-Schopper-Riegler	
4.3 Determinazione della scolantezza Canadian Standard	
4.4 Schoppermetro in linea	
5. Paste fibrose per carta	pag. 23
5.1 Generalità sulle paste chimiche	
5.2 Paste al solfato	
5.3 Paste al solfito	
5.4 Paste semichimiche	
5.5 Paste chemi-meccaniche, termo-meccaniche e chemi-termo-meccaniche	
5.6 Paste meccaniche	
5.7 Imbianchimento	
6. Principali tipi di raffinatori usati in cartiera	pag. 28
6.1 Raffinatori conici	
6.2 Raffinatori a disco	
6.2.1 Raffinatori a disco singolo	
6.2.2 Raffinatori a doppio disco (flottante)	
6.3 Le lamature per i raffinatori	
6.4 Scelta del materiale usato per le guarniture dei raffinatori	

7. Relazione tra la raffinazione e gli altri parametri che intervengono nella produzione della carta	pag. 37
7.1 Idrodinamica della raffinazione	
7.2 Caratteristiche energetiche del raffinatore	
7.3 L'energia specifica di raffinazione	
7.4 Bilancio energetico del raffinatore	
7.5 La portata di un raffinatore	
7.6 La temperatura dell'impasto	
7.7 La concentrazione dell'impasto	
7.8 pH dell'impasto	
8. Conclusioni	pag. 44

1. Introduzione

I primi fogli di carta fabbricati in Cina più di 2000 anni fa erano costituiti da fibre provenienti da scorze vegetali, da lino, da canapa, da stracci bolliti a lungo, battuti e schiacciati in acqua, a mano in un mortaio di pietra con un pestone di legno per amalgamarle e trasformarle in poltiglie fibrose, omogenee, morbide, rigonfie di acqua: le prime paste fibrose per carta. Successivamente nel XIII Secolo d.C. l'arte di fabbricare la carta dopo vari sviluppi nel mondo arabo, nel Nordafrica ed in Spagna, arrivò in Italia e a Fabriano si ebbe un grosso sviluppo tecnico ed un inizio di industrializzazione. La fondamentale e primaria esigenza è stata senza dubbio la ricerca di conferire alle fibre fin da allora usate, la proprietà di legarsi, "feltrare" fra loro formando un foglio.

L'espansione economico culturale, che ha segnato il secolo scorso, provocò un notevole incremento nel consumo di carta; la crescente richiesta sviluppò gli impianti rendendo sempre più insufficiente lo straccio come materia prima per carta.

Ecco dunque la necessità di trovare altre materie prime fibrose adatte alla fabbricazione della carta; questo problema venne risolto grazie all'utilizzo di materiali fibrosi vegetali ricavando da essi la pastalegno e la cellulosa.

La prima operazione necessaria per trasformare la pastalegno e la cellulosa in carta è quella di sottoporla ad un trattamento meccanico in presenza di acqua, per mezzo di raffinatori capaci di modificarne parzialmente la struttura e renderla idonea a formare un foglio di carta avente le caratteristiche desiderate.

Se una pasta fibrosa dispersa in acqua venisse avviata alla macchina continua (MC) senza subire trattamenti meccanici di raffinazione, la produzione di carta di idonee caratteristiche sarebbe alquanto problematica.

In particolare:

1) l'acqua lascerebbe così rapidamente l'impasto sulla tela di macchina che le fibre non avrebbero il tempo per disporsi in un "nastro omogeneo"

2) le fibre troppo lunghe, poco flessibili e non fibrillate darebbero carte deboli, voluminose, poco legate con problemi di frequenti rotture del foglio umido in MC e di ridotta qualità.

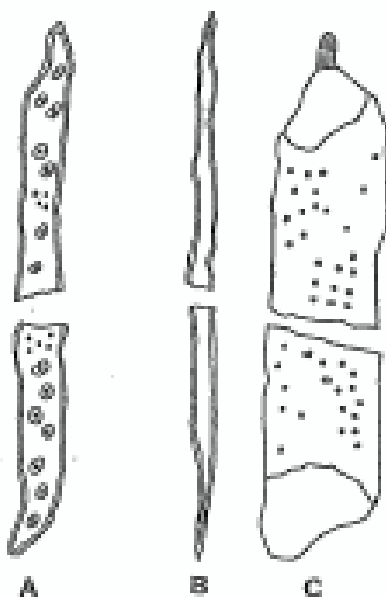
La raffinazione, anche se molto costosa in termini energetici, è un'operazione irrinunciabile nel ciclo di fabbricazione della carta.

2. Le fibre vegetali utilizzate per la fabbricazione della carta

Il termine cellulosa deriva da cellula: ovvero nel caso specifico, elemento anatomico fondamentale dei tessuti vegetali.

Com'è noto le fibre cellulosiche che costituiscono la materia prima essenziale per la fabbricazione della carta, sono presenti in tutti i vegetali dove sono aggregate come cellule elementari a formarne il tessuto.

Teoricamente quindi, tutti i vegetali sarebbero idonei a fornire materia fibrosa per l'utilizzazione industriale, ma solo pochi, ed in particolare le piante arboree, per il contenuto di cellulosa e la sua facilità di estrazione, soddisfano i requisiti richiesti dai cartai. Le specie arboree, idonee alla fabbricazione della carta, si suddividono in due grandi classi: le **gimnosperme** o **conifere** e le **angiosperme** o **latifoglie**. Esistono numerose differenze tra le due famiglie. La primaria risiede nel fatto che nelle conifere l'elemento cellulare chiamato **tracheide** o **fibra** adempie sia alle funzioni di sostegno meccanico sia a quello di conduzione della linfa; nelle latifoglie invece le funzioni di sostegno meccanico vengono svolte dalle fibre mentre quelle di trasporto da cellule chiamate **vasi**. Un'ulteriore differenza di notevole importanza è rappresentata dalla loro lunghezza: la lunghezza media delle fibre di conifera varia da 2 a 5 mm. Mentre quella delle fibre di latifoglia si attesta attorno ai 1,5 mm; come è facilmente intuibile queste differenze conferiscono al prodotto finito, la carta, caratteristiche fisiche e dinamiche molto diverse.



Rappresentazione
schematica di:
A. fibra di conifera
B. fibra di latifoglia
C. elemento vasale

2.1 Caratteristiche chimiche del legno

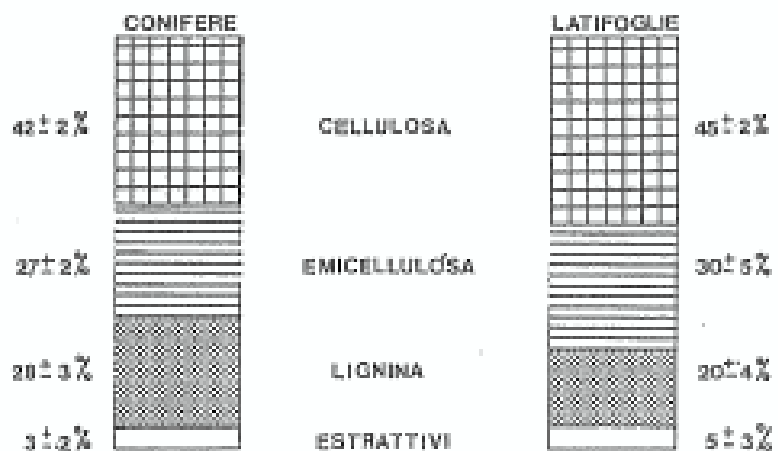
Dal punto di vista chimico il legno è un materiale composito costituito da vari polimeri organici presenti in percentuali che variano non solo da una specie all'altra, ma anche per una stessa essenza in funzione della parte della pianta (tronco, rami, radici), della posizione geografica, delle condizioni del clima e del suolo.

I principali costituenti chimici del legno sono: la cellulosa, le emicellulose e la lignina; la loro presenza percentuale varia a seconda della specie vegetale e del luogo di crescita. In genere i legni di latifoglia presentano, rispetto ai legni di conifera, un contenuto più basso di lignina e più elevato di emicellulose. Sono presenti infine come costituenti accessori, in quantità più o meno importanti, oli volatili, acidi resinici, grassi, coloranti, tannini, gomme, ecc.

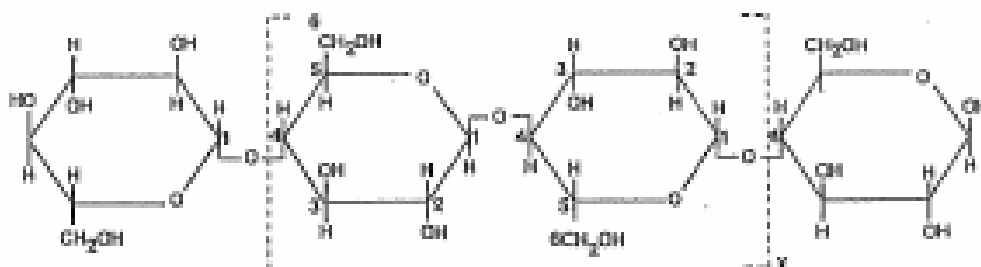
2.2 La cellulosa

La cellulosa, cioè la materia prima fibrosa estratta dal legno con procedimenti chimici, è senza dubbio la più importante materia prima impiegata nell'industria cartaria.

La cellulosa è un carboidrato complesso costituito da una catena molecolare molto lunga formata da numerose unità di glucosio che si legano mediante legame β - glucosidico 1.4. In tali condizioni il carbonio in posizione 1 di un atomo di β - glucosio si lega con il carbonio in posizione 4 del radicale β - glucosidico successivo generando una rotazione di 180° di ciascuna unità di β - glucosio rispetto alla precedente. Il dimero che così si origina prende il nome di **cellobiosio**.



- Valori medi dei componenti chimici delle conifere e delle latifoglie.



Formula di struttura della cellulosa.

Le macromolecole di cellulosa sono incorporate nella parete delle fibre in forma associata a costituire dei fasci di molecole.

Le catene filiformi della cellulosa tendono a riunirsi tra loro per costituire le cosiddette **micelle** che a loro volta formano le **microfibrille** che danno origine alle **macrofibrille**.

Queste catene molecolari sono disposte in alcune zone in modo orientato chiamate **zone amorphe** (zone più accessibili all'acqua dove avvengono le reazioni chimico - fisiche).

La formula bruta della cellulosa è $(C_6 H_{10} O_5)_n$ dove n rappresenta il grado di polimerizzazione cioè indica il numero di unità glucosidiche che compongono la molecola di cellulosa e che ne determinano quindi la lunghezza.

2.3 Le emicellulose

Contrariamente alla cellulosa, la cui molecola è formata da solo glucosio, le emicellulose sono formate da più molecole di zuccheri diversi e non hanno struttura fibrosa. Per idrolisi danno un miscuglio di zuccheri, i **pentosi** e gli **esosi**.

Essi sono combinati in maniera diversa ed in percentuali molto ampie per formare composti polimeri, a catena anche ramificata. Le emicellulose sono incorporate allo stato amorfo nella parete cellulare più esterna delle fibre e sono associate alla cellulosa dalla quale possono essere separate, non completamente, per azione delle basi e degli acidi. La caratteristica principale di questo gruppo di polisaccaridi è la loro facile idratabilità.

2.4 La lignina

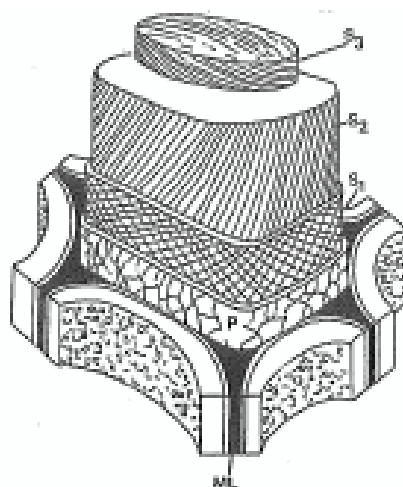
La lignina è un polimero amorfo la cui molecola, molto complessa ed a struttura reticolare, è essenzialmente formata da numerosi nuclei del **fenil-propano**.

La sua funzione principale nel legno è quella di legare e cementare le varie fibre per conferirgli compattezza e resistenza. La sua caratterizzazione presenta

grandissime difficoltà trattandosi appunto di un polimero reticolato, esso è molto resistente all'azione dei solventi e la sua solubilizzazione è possibile solamente dopo averne modificato la struttura con azioni chimiche.

Questa modificazione può ottenersi ricorrendo all'azione dei solfiti o di soluzioni alcaline ad alte temperature, che determinano nella struttura chimica della lignina trasformazioni tali da renderla solubile nel mezzo di cottura.

2.5 Struttura delle fibre



Struttura della parete della fibra:

- ML: lamella mediana;
- P: parete primaria;
- S1: strato esterno della parete secondaria;
- S2: strato intermedio della parete secondaria;
- S3: strato interno della parete secondaria o parete terziaria.

Osservando la figura è possibile capire come la parete cellulare della fibra sia composta da quattro differenti strati immersi in un contesto di lignina e emicellulosa; essi sono:

- ML o **Lamella mediana**: è uno strato intermedio intercellulare, completamente amorfo, che separa due fibre contigue, è costituito per la maggior parte da lignina, oltre che di emicellulose e sostanze pectiche, e ha la funzione di “cementante” delle fibre.
- P o **parete primaria**: rappresenta lo strato più esterno ed è molto sottile (< 0,5 micron), ma influenza in modo preponderante le caratteristiche superficiali della fibra. Le fibrille di cellulosa costituenti questa parete sono disposte in modo disordinato e nelle cellulose ben delignificate conferiscono una certa cristallinità alla struttura.
- S o **parete secondaria**: è distinta in tre strati S1, S2, S3.
- S1 o **strato esterno**: strato molto sottile dove le fibrille cellulosiche sono disposte quasi ortogonalmente tra di loro e dove il contenuto di lignina è più alto.
- S2 o **strato intermedio**: strato con spessore che può variare da 1 a 5 micron e

- consiste in una serie di lamine coassiali disposte parallelamente
- S3 o **strato interno**: prossimo al lume, è molto sottile. In questo strato vi è un alto contenuto di cellulosa e le fibrille sono orientate con notevole angolo rispetto all'asse della fibra.
 - L o **lume**: è una cavità derivata dall'invecchiamento della cellula. Nel caso dei tracheidi assolve al passaggio della linfa.

2.6 Importanza delle dimensioni delle fibre nella raffinazione

Per valutare il comportamento di una fibra e quindi stabilire l'idoneità alla fabbricazione cartaria ed in particolare alla raffinazione è necessario introdurre due parametri molto importanti:

- *Indice di feltrabilità*: esprime il rapporto tra lunghezza e larghezza della fibra; più è alto questo valore più una fibra sarà idonea a creare un feltro fibroso migliorando nel contempo la resistenza alla lacerazione e alle doppie pieghe.
- *Indice di flessibilità o di Runkel*: correla lo spessore della parete cellulare con la larghezza del lume della fibra. Esprime la capacità delle fibre a legarsi tra di loro ed è quindi direttamente legato con la facilità di raffinazione.

3. Azione della raffinazione

Il processo di raffinazione rappresenta un momento importante e delicato dell'interno processo cartario in quanto modifica le proprietà fisiche delle fibre al fine di adattarle alle numerose esigenze cartarie.

In pratica la raffinazione consiste in trasferimento energetico ad una sospensione fibrosa attraverso le guarniture di un raffinatori.

In realtà, l'energia non è trasferita alle fibre individualmente, ma ad insiemi di fiocchi (fiocchi risultanti dal fenomeno della flocculazione in seguito al trasporto delle fibre in mezzo acquoso).

Talvolta questi fiocchi possono raggiungere dimensioni varianti da 1 a 5 mm superando così gli inserimenti dei dischi o la potenza di chiusura. In tali situazioni avremo fibre trattate in modo ottimale, altre non trattate o danneggiate. Una buona raffinazione consiste dunque nel dosare oculatamente il trasferimento energetico nel pieno rispetto dell'essenza fibrosa.

Come già detto nell'introduzione, le fibre delle paste, prima di aver subito il processo di raffinazione, si presentano all'osservazione microscopica come una struttura tubolare più o meno schiacciata che le rendono quindi non idonee per la fabbricazione di un foglio di carta accettabile.

Un foglio con queste caratteristiche risulterebbe insufficiente di resistenze meccaniche e proprietà fisiche, inoltre sarebbe caratterizzato da una elevata volumosità, da superficie molto irregolare, da struttura aperta e da spera o nuvolosità disomogenea. Tutti questi aspetti sono inaccettabili ed è proprio attraverso il processo di raffinazione che questi inconvenienti vengono eliminati. La raffinazione consiste nell'assoggettare le fibre ad un'azione meccanica facendole passare attraverso i raffinatori ove il moto relativo di due organi (**rotore** e **statore**), muniti di lame in metallo, a forma di barre con sezione quadrangolare, obbliga l'impasto a passare attraverso gli spazi esistenti tra le lame opposte.

In questo passaggio tra le lame le fibre vengono sottoposte ad elevate sollecitazioni di compressione, frizione e taglio, che determinano importanti modifiche alla loro struttura fisica.



Fibra prima della raffinazione.



Fibra raffinata.

3.1 Rapporto fibre – acqua

La quantità di acqua assorbita dalla fibra esposta all'aria cresce con l'aumentare dell'umidità relativa e la fissazione dell'acqua su di essa si ottiene attraverso legami di tipo polare. Si è potuto verificare che con umidità relativa al 20-25% la fibra assorbe fino ad un 6% di acqua, chiamata **acqua colloidale**; con i valori di umidità oscillanti dal 30% al 70% abbiamo un ulteriore assorbimento che varia dal 6% a 28% e questa acqua viene chiamata **acqua di inibizione**.

Se mettiamo poi le fibre nell'acqua noteremo che questa penetrerà nel lume dando origine al fenomeno dell'**assorbimento capillare**.

In sostanza si può dire che la cellulosa è avida di acqua e questa è una caratteristica molto importante perché trasferisce alle fibre un aumento di dimensioni valutabile nell'ordinare del 20% ed inoltre la rende plastica e quindi più idonea alla raffinazione. Queste proprietà fisiche di assorbimento o desorbimento procedono sino al raggiungimento di un certo equilibrio che è diverso a seconda che la cellulosa parta da una condizione di umidità maggiore o minore rispetto dell'ambiente. In sostanza accade che l'umidità di equilibrio della cellulosa è più alta quando l'umidità di partenza è superiore e più bassa quando è inferiore; praticamente sarà veloce ad assorbire acqua e molto lenta nel cederla.

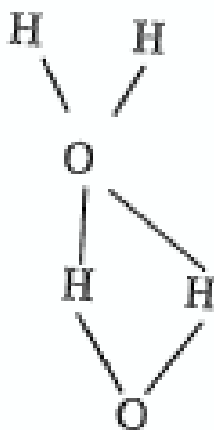
3.2 Legame idrogeno

Gli effetti della raffinazione sono rappresentati (ne parleremo meglio più avanti) dallo sfibrillamento della pasta chimica al passare tra i dischi o tra i conigli. I legami che si formano tra le fibre sono facilitati da quest'azione di apertura della struttura molecolare delle stesse. C'è da rilevare, però, come le fibre possedendo dei gruppi ossidrilici polarizzati (negativi) non riescano ad attaccarsi ponendo una problematica alla loro diretta coesione. Tale effetto può essere limitato dal cosiddetto **legame idrogeno** che si forma con le molecole di acqua. L'acqua nella sua parte più piccola definibile ancora come tale (molecola), possiede una struttura dipolare: la zona adiacente gli idrogeni è **positiva** mentre quella prossima all'ossigeno è **negativa**. Una volta penetrata all'interno della fibra attraverso le zone amorfe (zone ove lo strato superficiale della fibra non è continuo, ma spezzato da interruzioni della struttura) la stessa si lega chimicamente con gli ossidrilici. È pertanto evidente che molte molecole di acqua legate tra di loro, e saldate l'una con l'altra a due fibre possano formare un legame tra le due particelle di cellulosa.

Durante la fase di asciugamento parte di queste molecole evaporano avvicinando sempre di più le due fibre. A tutti gli effetti il prodotto che esce dal pope deve mantenere l'umidità residua sufficiente perché tra le due particelle di pasta chimica non venga a mancare quel ponte idrogeno che permette loro di rimanere

coese.

Potremo definire dunque il legame idrogeno come l'attrazione elettrostatica che si stabilisce fra un atomo di idrogeno di una molecole d'acqua o di un gruppo ossidrilico della fibra (con un eccesso di carica positiva) con l'atomo di ossigeno di un'altra molecola d'acqua (caricata negativamente).



3.3 Modificazione delle fibre per raffinazione

La raffinazione provoca sulle fibre delle modifiche di natura fisica che possono verificarsi in misura più o meno intensa in dipendenza delle condizioni adottate nel trattamento:

a) Rigonfiamento e idratazione

Non sono sinonimi; il primo è una conseguenza dell'idratazione. Il sistema cellulosa-acqua può essere considerato un gel. Quindi come per il gel il suo grado di rigonfiamento sarà proporzionale al rapporto gr di acqua/gr di materiale secco sotto specifiche condizioni; per il sistema cellulosa-acqua. Questo valore è il punto di saturazione delle fibre, cioè il peso di acqua che, satura le pareti lasciando liberi i capillari e che può essere eliminato solo per essiccamento a caldo, non per drenaggio o aspirazione.

b) Aumento della plasticità e flessibilità

L'acqua che è entrata nelle fibre sia per tensione superficiale che per effetto dei legami chimico-fisici in un certo qual modo dilata la struttura della fibra amorfa, minandone la resistenza tra le varie molecole ed in più esercita una specie di lubrificazione che permette lo scorrimento tra fibrilla e fibrilla. Questo scorrimento dà alle fibre quella necessaria flessibilità e plasticità adatta a

farle sostenere il processo della raffinazione e, successivamente, la formazione del foglio in macchina.

c) Fibrillazione esterna

Il trattamento di fibrillazione, condotto meccanicamente durante l'operazione di raffinazione, ha lo scopo di incrementare i legami tra le fibre e quindi la resistenza del materiale cartario. Generalmente la parete primaria della fibra è resa quasi cristallina durante le operazioni chimiche di estrazione o più ancora durante le operazioni di imbianchimento. L'efficacia della raffinazione sarà più sensibile e significativa se una grande quantità di fibre verrà privata della parete primaria; in caso contrario esse si idrateranno e si sfibrilleranno con molta difficoltà impedendo la formazione di legami interfibra. Un secondo effetto determinato dall'azione meccanica è la formazione dei cosiddetti **“palloni”**. L'acqua penetra nello strato S2 e forma dei gel con i materiali cellulosici a più basso peso molecolare (emicellulose).

Questi ultimi rigonfiano e la membrana S2 fuoriesce dagli spazi in precedenza lasciati dalla S1 che, essendo la meno elastica delle tre membrane, forma delle specie di rigidi collari che strozzano la crescita della S2 e determinano la formazione di rigonfiamenti.

Questi palloni sono punti di debolezza delle fibre che possono portare allo sfaldamento completo e alla sua rottura. Durante queste fasi le microfibrille escono dal contesto fibroso conferendogli un aspetto **“peloso”** (teorie del baco peloso o del maccherone bollito) ed inoltre le interazioni fibra-acqua così come pure le interazioni fibra-fibra si rafforzano aumentando in modo importante la superficie specifica.

d) Fibrillazione interna

Si tratta dell'effetto più importante che la raffinazione provoca sulla fibra: esso comprende tutte quelle modifiche che avvengono nell'interno della parete fibrosa determinando l'allentamento, l'apertura e lo snervamento della sua struttura fisica. Quando la fibra in sospensione acquosa viene sottoposta all'azione del raffinatore, essa subisce una serie ripetuta di sollecitazioni meccaniche di flessione e di schiacciamento che si ripercuotono sulla struttura fisica della parete fibrosa. Si verifica così una rottura dei legami idrogeno esistenti nell'interno della parete fibrosa che vengono sostituiti con legami idrogeno tra fibra e acqua. Questo significa che avviene una separazione tra le microfibrille, tra le fibrille e tra gli strati lamellari in cui è strutturata la parete della fibra.

Il risultato è un allentamento e un'apertura della struttura che consente alla fibra di rigonfiare per l'aumentata capacità di imbibirsi d'acqua: la fibra perde quindi la sua rigidità originaria, diventa più flessibile, plastica e conformabile creando i presupposti per la formazione di aree molto ampie su cui possono

stabilirsi legami tra fibra e fibra.

È indubbio che questo è l'effetto più importante della raffinazione perché è quello dal quale dipende principalmente l'ottenimento di un foglio compatto e robusto.

e) Taglio e accorciamento delle fibre

La raffinazione essendo un trattamento meccanico, che per sua natura non è selettivo nelle sue modalità di azione sulla fibra, determina inevitabilmente accorciamenti più o meno spinti delle fibre. Se si prescinde da alcuni aspetti favorevoli connessi col miglioramento della speratura del foglio, questi effetti devono considerarsi complessivamente negativi nei riguardi delle proprietà meccaniche del foglio. Quindi è da considerarsi una pratica infruttifera in quanto sarebbe meglio riformulare gli impasti immettendo cellulose a fibre corte ed eliminando così il costo derivante dall'azione di taglio, che assorbe una notevole quantità di energie e comporta un consumo più elevato del mezzo raffinante.

Quando la raffinazione dell'impasto viene condotta in modo da avere un minimo di taglio ed un massimo di sfibrillatura, si dice che la pasta è grassa. (il nome deriva dalla sensazione di scivolosità che si prova immergendo la mano nella pasta così raffinata, sensazione dovuta alla presenza delle fibrille sulla superficie delle fibre).

Al contrario una pasta poco raffinata o raffinata con prevalente azione di taglio, sarà detta magra. La proprietà caratteristica di una pasta grassa è quella di lasciar scolare l'acqua con difficoltà poiché le fibrille hanno la tendenza a trattenere l'acqua o ad ostruire le maglie della tela rendendone difficile il drenaggio.

f) formazione di parti fini

In qualunque modo venga condotta la raffinazione porta alla formazione di una certa aliquota di frammenti (**parti fini**) che si liberano dalle fibre. Questi sono costituiti principalmente da frammenti della parete primaria e di strato esterno della parete secondaria della fibra che vengono strappate dall'azione di sfregamento delle barre del raffinatori, oltre che da frammenti fibrosi che si formano con l'accorciamento delle fibre. Questi fini sono i responsabili di quasi tutti gli inconvenienti classici della continua: doppio viso, difficoltà di drenaggio, imbrattamento tele, feltri, sezioni aspiranti ecc. Tuttavia con una corretta gestione dell'azione di ritenzione, si può notare come alcune caratteristiche fisiche della carta quali scoppio ed opacità, vengono modificate positivamente dalla loro presenza.

3.4 Effetti della raffinazione sulle caratteristiche della carta

Il foglio ottenuto da fibre non raffinate si presenta con proprietà meccaniche scadenti, soffice, con superficie molto aperta e irregolare e con speratura che lascia a desiderare. La raffinazione migliora nel contesto fibroso le proprietà meccaniche: lunghezza di rottura, resistenza allo scoppio, diminuisce la porosità conferendo una struttura più serrata alle fibre, migliora la speratura, la ritenzione delle cariche, la resa dei coloranti e dei collanti.

Naturalmente la raffinazione deve essere effettuata e condotta in funzione all'impiego a cui è destinata la carta; infatti un abbassamento di opacità non è desiderato in una carta da stampa, oppure una struttura serrata non è adatta per carte da filtro o carte assorbenti. La raffinazione spesso distrugge più o meno la struttura delle fibre, abbassa la stabilità della carta e il suo spessore. Da ciò deriva che la raffinazione deve essere ben controllata per non superare il punto desiderato; si dice infatti che è meglio raffinare un pò meno che troppo. La formazione di parti fini e la conformabilità delle fibre tra loro, fanno sì che gli spazi interfibra siano sempre in minor numero, per cui il foglio acquista compattezza e quindi densità apparente più elevata. In teoria quindi, modificando le procedure di raffinazione, è possibile produrre carte simili a partire da cellulose che hanno caratteristiche iniziali abbastanza diverse.

a) Resistenza alla lacerazione

L'ottenimento di un foglio più omogeneo e più legato, come conseguenza della raffinazione, porta a una diminuzione della sua resistenza alla lacerazione poiché la fibrillazione interna determina una migliore e più diffusa formazione di legame tra le fibre e le parti fini favorisce una maggior compattezza del foglio. Le sollecitazioni applicate nella prova di lacerazione sono distribuite su di un'area più piccola, in ragione della diminuzione dello spessore del foglio, per cui il carico specifico assume valori più elevati e la concentrazione della sollecitazione porta ad un cedimento localizzato sui carichi minori. Inoltre occorre tener conto dell'accorciamento subito dalle fibre che provoca una riduzione della resistenza alla lacerazione. Questi aspetti possono variare di entità da una pasta all'altra, e tra pasta a fibra lunga e pasta a fibra corta. Nel caso delle prime, all'aumentare della raffinazione, si osserva un continuo ed immediato calo di resistenza, mentre nelle seconde si verificano all'inizio della raffinazione anche aumenti gradualmente fino a pervenire ad un massimo oltre al quale la resistenza torna a scendere.

b) Resistenza alla piegatura

Questa caratteristica della carta aumenta col progredire della raffinazione fino a pervenire a un massimo nel caso di raffinazioni molto spinte. La maggior omogeneità del foglio, che si consegue con la raffinazione, ha effetti positivi

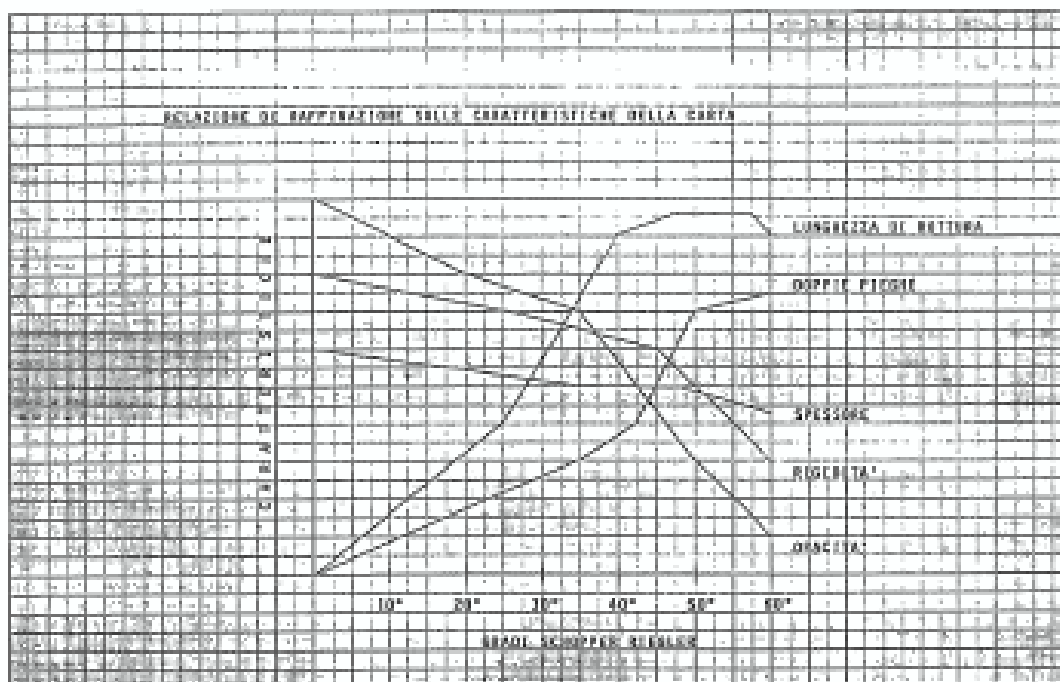
sulla resistenza alla piegatura, al contrario di quanto avviene per la lacerazione. La fibrillazione interna ed esterna è senza dubbio la causa di tali effetti sul prodotto finito che viene modificato anche dalla presenza di fini e da una basazione di taglio del raffinatore.

c) Opacità

L'opacità di un materiale solido e omogeneo è determinata dalla sua capacità di assorbire la luce incidente su di esso. La carta deve la sua opacità al grande numero di aree di contatto tra materiale fibroso ed aria che, avendo indici di rifrazione diversi, provocano una notevole diffusione della luce incidente. La forma e le dimensioni delle fibre, rappresentano gli elementi principali che influenzano l'opacità del foglio di carta. È noto che, rispetto alle paste a fibra lunga, quelle a fibra corta danno carte più opache in ragione del numero molto maggiore di superfici per unità di massa che sono capaci di rinfrangere la luce. L'opacità con l'aumentare della raffinazione diminuisce; essendo l'opacità determinata dalla quantità di superfici rifrattive e di particelle rifrattive e di particelle che diffondono la luce all'interno, la raffinazione con l'adattamento delle fibre e la diminuzione delle superfici otticamente rifrattive, rende il foglio più compatto e meno opaco. Questo fenomeno è meno sensibile nella raffinazione di paste meccaniche che talune volte, addirittura, aumentano con la raffinazione la propria capacità di assorbimento della luce, in quanto prima della raffinazione presentano fibre ancora lignificate e scarse aree di contatto ottico.

d) Stabilità dimensionale

Un foglio di carta è per sua natura dimensionalmente instabile, in quanto si espande o si contrae all'aumentare o al diminuire del suo contenuto di umidità, che a sua volta dipende dall'umidità dell'ambiente circostante. Al progredire della raffinazione diminuisce nettamente la proprietà di un foglio alla stabilità. Le variazioni dimensionali del foglio sono dovute al contrarsi o all'espandersi delle fibre singole, poiché, con l'umidità, la fibra rigonfia assai più di quanto non si allunghi. Il fenomeno della stabilità dimensionale risulta molto più evidente nella direzione trasversale del foglio in ragione dell'orientamento preferenziale delle fibre in direzione longitudinale all'atto della sua formazione sulla macchina continua. Un altro aspetto di grande importanza per la stabilità dimensionale del foglio è rappresentato dalla struttura della fibra e in particolare da una caratteristica morfologica così importante come lo spessore della parete cellulare. Fibre con parete cellulare sottile daranno fogli densi e quindi meno stabili; fibre con parete cellulare spessa, non assumeranno un aspetto nastroforme e quindi daranno fogli meno densi e molto sensibili alle umidità ambientali.



4. Controllo della raffinazione

Per il controllo della raffinazione si è spesso fatto ricorso a prove basate sull'esperienza o sul giudizio soggettivo dell'operatore. Un sistema molto diffuso consisteva nella valutazione della "idratazione" o "ingrassamento" della pasta raffinata che veniva effettuata prendendone una manciata e spremendola con la mano, giudicandone la "untuosità" e la facilità di perdere acqua. Un'altra prova a cui si ricorreva, consisteva nell'esaminare al microscopio le fibre raffinate valutandone, in base all'esperienza, fibrillazione e taglio. Le esigenze sempre più stringenti di una produzione idonea ad ottenere carta caratterizzata nel tempo da un'accettabile costanza qualitativa, impongono che il controllo della raffinazione non possa basarsi su valutazioni soggettive e perciò mutevoli da un operatore all'altro, ma debba essere affidato a valutazioni oggettive. Ancora oggi in mancanza di alternative valide ci si affida a vecchi sistemi come: **"Schopper Riegler" (SR)** in Europa e **"Canadian Standard Freenes" (CSF)** in America del nord. I due sistemi sono concettualmente analoghi basati su drenaggio (determinazione della scolantezza) di una sospensione fibrosa diluita. Questi metodi sono fondamentalmente inadeguati perché il fattore principalmente responsabile della misura è rappresentato dalla quantità di parti fini presenti, mentre vengono sottovalutati gli altri e ben più importanti effetti che la raffinazione provoca sulla fibra. Quindi possiamo dire che sulle paste raffinate, in laboratorio si determina sempre la scolantezza; infatti nel caso di paste raffinate, si potrebbe parlare anche di "grado di raffinazione" ma si deve tener presente che gli apparecchi usati per questa determinazione, sono utilizzati anche per l'esame di paste non raffinabili, come le paste meccaniche, per cui non si può parlare di grado di raffinazione, ma solo di scolantezza.

4.1 La raffinazione in laboratorio

La raffinazione in laboratorio cerca di riprodurre le condizioni industriali ed è quindi un dato di estremo interesse per il cartaio ed il fabbricante di cellulosa. Consta di varie fasi quali:

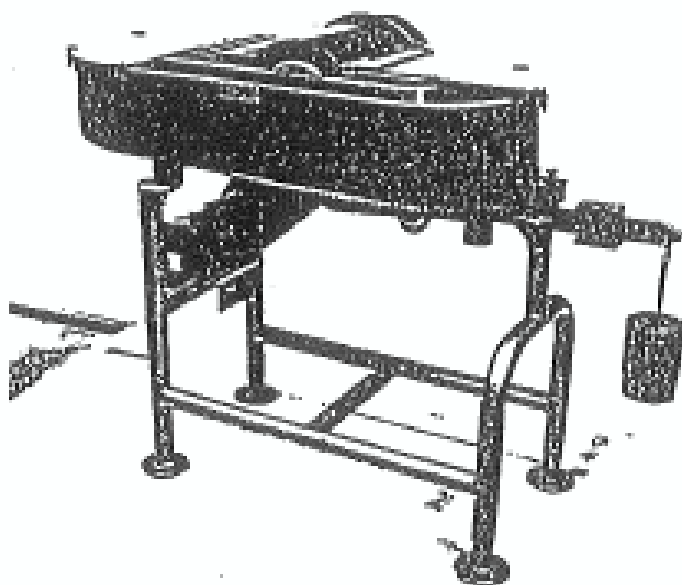
- **lo spappolamento:** l'impiego della spappolatura si fonda sul principio che il suo trattamento si limiti a separare le fibre le une dalle altre in modo completo, senza effettuare su di esse un lavoro di raffinazione.

Lo spappolatore è costituito da un recipiente munito internamente di quattro deflettori a spirale, aventi lo scopo di favorire il rimescolamento della sospensione fibrosa. Lo spappolamento è prodotto da un'elica munita di tre pale che girano a velocità costante (3000 giri al minuto). L'apparecchio è munito di un contatore

che permette di determinare il numero di giri. Terminata questa fase si passa alla raffinazione vera e propria che può essere effettuata con diversi tipi di raffinatori da laboratorio. I più importanti sono:

- OLANDESE VALLEY: riproduce in piccolo il tipo classico dell'olandese industriale e consta di una vasca avente le capacità di 300-500 grammi di pasta, di un cilindro raffinatori e di una platina. La raffinazione ha inizio quando si sblocca la platina e si applica il peso alla leva.

Senza interrompere la lavorazione si prelevano 750 ml di pasta ad intervalli regolari e precisamente dopo 10, 20, 30, ecc. minuti. Normalmente si raffina ad una concentrazione dell'1,50-2 % allo scopo di sottoporre la fibra ad un trattamento più drastico per avvicinarsi maggiormente alle condizioni operative delle olandesi industriali, dove le pressioni esistenti sono enormemente più elevate.



Olandese Valley

- MULINO PFI: il mulino PFI, consiste essenzialmente di un cilindro munito di lame (33), di un recipiente entro il quale ruota il cilindro e di un dispositivo per l'applicazione della pressione di raffinazione. Durante il funzionamento, il cilindro esercita una pressione prestabilita contro la parete del recipiente, ottenuta per mezzo di una leva alla quale è applicato un carico. L'apparecchio presenta ripetibilità e riproducibilità più che buone, migliori certo di altri raffinatori di laboratorio; esso è molto versatile perché consente di operare con una vasta gamma di concentrazioni, fino al 30%.

- **MULINO LAMPEN**: esso è costituito di una carcassa contenente una cavità sferoidale, nella quale si trova una sfera del diametro di 132 mm e della massa di 10 kg. Quando la carcassa ruota fa girare la sfera che comprime ripetutamente le fibre facendogli subire un trattamento di raffinazione. Dato che la raffinazione avviene per schiacciamento tra due superfici, si ottengono foglietti con caratteristiche di resistenza molto elevate.

4.2 Determinazione della Scolantezza-Schopper-Riegler

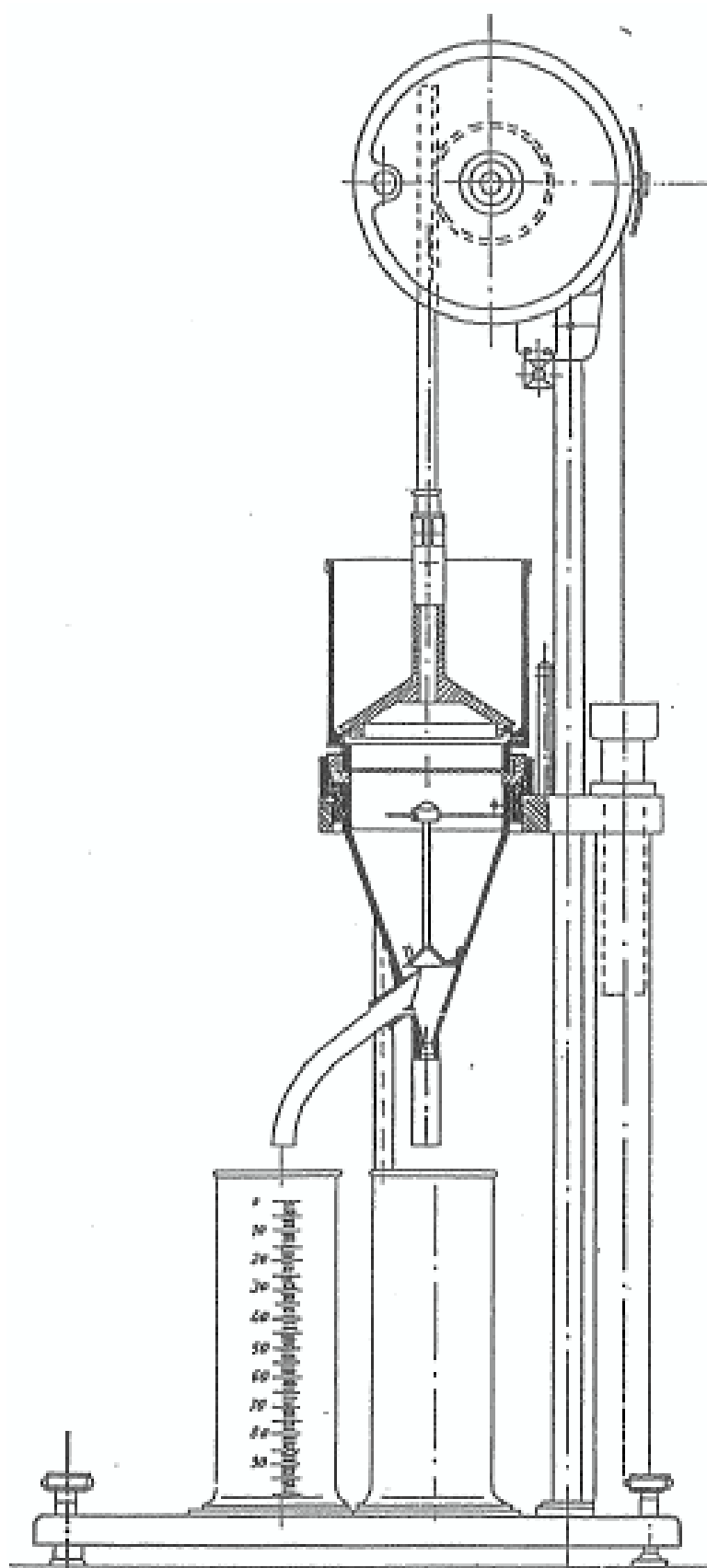
Questo metodo è stato studiato dal prof. Riegler e l'apparecchiatura necessaria fu costruita dalla casa Schopper. Il cosiddetto **grado Schopper - Riegler** è in funzione sia della lunghezza delle fibre, sia delle loro condizioni superficiali. Per eseguire la prova con questo apparecchio si prende una sospensione omogenea di 2,0 g di materia fibrosa in 1000 ml. di acqua a $20^{\circ}\text{C} \pm 5$. La sospensione fibrosa così ottenuta si invia su una tela metallica di bronzo fosforoso che ha la superficie di 100 cm^2 . L'acqua filtra attraverso la tela metallica con una velocità che è tanto maggiore quanto è minore il grado di raffinazione, mentre le fibre rimangono depositate sulla tela. L'acqua filtrata va in un sottostante imbuto e qui si divide in due flussi: uno, costante, esce dall'ugello sul fondo dell'imbuto; l'altro, che esce dal tubo laterale, è massimo all'inizio, ma diminuisce costantemente, fino a cessare quando la quantità di acqua raccolta diventa uguale o minore di quella che esce dall'ugello.

Con paste molto magre, l'acqua passa per la maggior parte nel tubo laterale, mentre con paste grasse, dalle quali l'acqua si separa con molta difficoltà, essa passa prevalentemente attraverso il tubo verticale. Il recipiente che ha raccolto l'acqua è graduato e la gradazione va da 0 a 100 partendo dal basso per i cm^3 e dall'alto verso il basso per i gradi $^{\circ}\text{SR}$.

Un grado $^{\circ}\text{SR}$ si ottiene applicando la formula:

$$\frac{1000 - \text{cm}^3 \text{ di acqua raccolta}}{10}$$

per concludere più una pasta è raffinata e più sale il valore espresso in $^{\circ}\text{SR}$ e viceversa.



Raffinometro Schopper-Riegler - schema.

4.3 Determinazione della Scolantezza Canadian Standard

Il Canadian Standard Freeners Tester (apparecchio canadese per la scolantezza, espressa in °CSF) è basato sullo stesso principio dell'apparecchio Schopper-Riegler; le differenze essenziali sono le seguenti:

- l'apparecchio CSF usa come elemento filtrante una piastra di ottone;
- la quantità di pasta è di 3 g in 1000 ml di acqua;
- l'acqua che affluisce dal tubo laterale è raccolta in un comune cilindro graduato di laboratorio ed è misurata direttamente in mm.

Si può per tanto concludere che le scolantezza SR e CSF sono validi metodi di controllo quando sono usati su impasti uguali o molto simili; si deve invece agire con cautela quando in sede di laboratorio, si voglia usarli come parametri ci confronto.

4.4 Schopperimetro in linea

Nell'introduzione di questo capitolo si è parlato delle difficoltà che si sono avute (nonostante gli studiosi non abbiano lesinato sforzi di ricerca), nel ricercare ed elaborare una prova di drenaggio, utilizzabile durante il processo produttivo, che sia in grado di dare una valutazione affidabile ed in continuo durante il processo di raffinazione.

Dopo ulteriori ricerche, si è diffusa negli ultimi anni la misura della raffinazione sulla linea di produzione, prendendo come nome tecnico **“analizzatore in linea del grado di raffinazione per il controllo dei raffinatori”**. L'analizzatore del grado di raffinazione è stato progettato per un'analisi automatica ed in linea della permeabilità e scolantezza di un impasto raffinato. L'analizzatore è un'unità di campionamento progettata per una massima flessibilità, infatti è adatto a tutti i tipi di impasto. L'analizzatore del grado di raffinazione viene montato, generalmente, sulla linea di processo con un tronchetto a saldare; in una posizione comoda per la manutenzione e per fare le pulizie di routine. L'apparecchio è composto da: pistone pneumatico, bicchiere di misura, retino, camera di miscelazione, elettrodi di misura e naturalmente da tubi di ingresso ed uscita acqua ed aria. Tutte le parti a contatto con il fluido sono in acciaio inossidabile ed il pistone di campionamento è in bronzo allo stagno, trattato superficialmente.

Vediamo ora il principio di funzionamento che è suddiviso in diverse fasi:

- Campionamento

Il campionamento inizia quando il pistone pneumatico guida il pistone di campionamento dentro la tubazione del processo. Automaticamente viene estratto un campione rappresentativo dell'impasto che viene miscelato con l'acqua. Il getto

d'acqua a pressione controllata garantisce la miscelazione dell'impasto. A miscelazione completata, quando il livello nella camera di miscelazione raggiunge il retino, il campione viene diluito ad una consistenza di circa 0,3 - 0,5% onde prevenire la flocculazione. La diluizione e la miscelazione garantiscono che la formazione sul retino sia uguale misura dopo misura.

- *Formazione*

Nella fase di formazione sul retino, inizia la formazione della sospensione, con l'aiuto della pressione controllata dell'acqua. Durante questa fase, la quantità di acqua evacuata attraverso il retino diminuisce ed il livello aumenta fino a raggiungere lo scarico di acqua in eccesso, garantendo così la formazione uniforme del pane di fibre. Il tempo di formazione scelto deve essere abbastanza lungo da garantire un flusso di acqua costante attraverso il pane di fibre, circa 40s.

- *Misura*

Nella fase di misura l'acqua che passa attraverso il pane di fibre viene inviata al bicchiere di misura. Viene misurato sia il tempo richiesto dal livello dell'acqua per aumentare dall'elettrodo inferiore fino all'elettrodo superiore, sia la temperatura dell'acqua. Questo tempo (rilevato in condizioni controllate e ad un pane di fibre preformato) è in funzione della raffinazione. I tempi di sequenza e di misura dipendono dal tipo di impasto e devono essere programmati dall'unità elettrica. Il risultato della misura e la temperatura vengono visualizzati sull'indicatore dell'unità elettronica.

È possibile collegare il sistema a un computer per intervenire automaticamente sulla raffinazione; spesso l'operatore preferisce interpretare i dati forniti dal sistema e intervenire manualmente.

- *Lavaggio*

La fase di lavaggio inizia quando l'acqua di drenaggio raggiunge l'elettrodo di misura superiore. L'acqua e l'aria compressa puliscono tutto l'apparecchio e non appena il lavaggio è completato inizia un nuovo ciclo di misura. Quindi possiamo dire che i vantaggi di avere in linea un analizzatore del grado di raffinazione sono di avere sotto controllo tutte le variabili dell'impasto e l'operatore può fare le correzioni dovute, avendo sempre una buona qualità in riferimento agli standard desiderati ed in caso di fermate aiuta a raggiungere più velocemente il valore di "target".

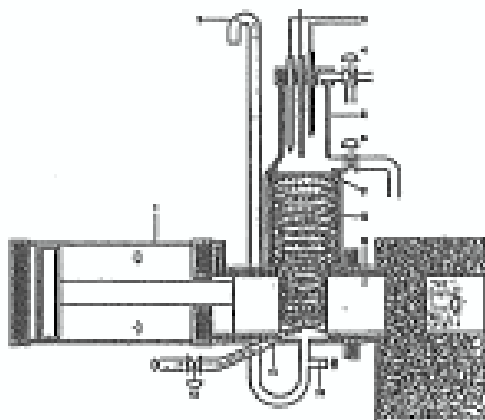


Fig. 2 Fase di campionamento, dissoluzione e miscelazione

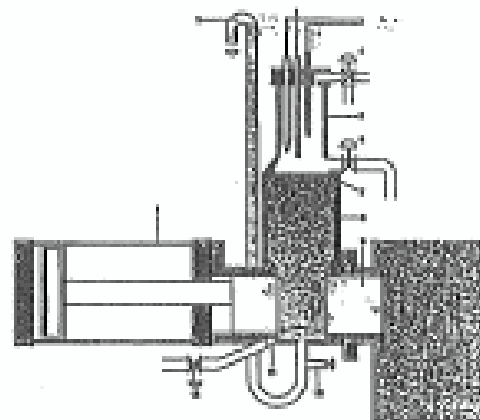


Fig. 3 Fase di formazione

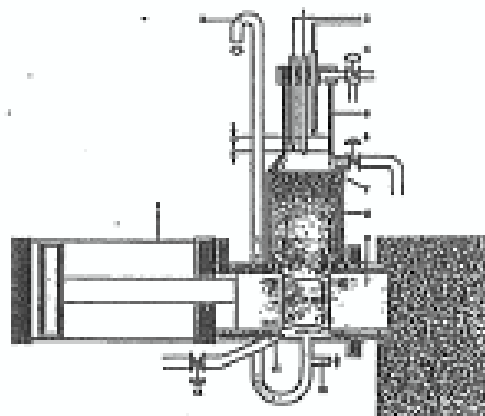


Fig. 4 Fase di miscela

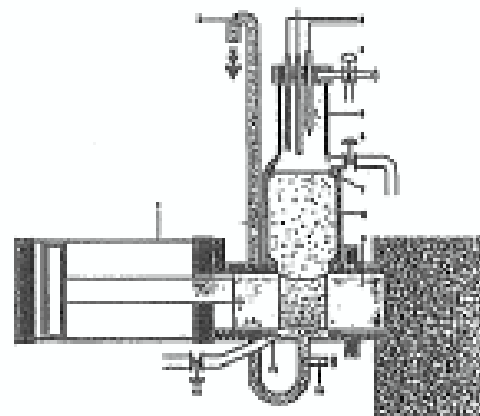


Fig. 5 Fase di gelata

5. Paste fibrose per carta

Per meglio comprendere il comportamento delle cellulose e delle paste meccaniche, è utile introdurre e dare una breve spiegazione sui vari processi di **estrazione fibrosa** e di **imbianchimento** e, in funzione di questi, capire le ripercussioni sul grado di raffinabilità.

Il fine dei vari processi di cottura è quello di favorire la separazione delle fibre. Il risultato può essere ottenuto fornendo energia al sistema legno per vincere la resistenza della **lignina**, la quale, modificata o asportata parzialmente o totalmente, non può più esplicare la sua funzione naturale di coesione tra le fibre. Per realizzare questi obiettivi occorre spendere una certa quantità di energia. L'energia utilizzata a questi fini è essenzialmente di tipo **meccanico** oppure **chimico**. Il terzo tipo di energia, quella **termica**, che è sempre presente in questi processi, ha in genere una funzione sussidiaria nel senso che, a differenza delle energie meccanica e chimica, non è da sola sufficiente a realizzare l'operazione desiderata.

Con la sola energia meccanica si ottengono le cosiddette paste legno; in questo caso le fibre subiscono uno scollamento in maniera violenta, che provoca la loro separazione in modo imperfetto e produce una pasta ricca di frammenti di fibre, di schegge e di fino. In questo caso la lignina mantiene ancora rigidi i frammenti di fibra e le schegge generate non permettono loro di intrecciarsi e legarsi; la pasta che ne deriva possiede una resa elevata, circa il 95% ma scarse caratteristiche meccaniche.

Se invece viene fornita energia chimica contemporaneamente a quella termica, l'allontanamento della lignina è pressoché totale; le fibre separate le une dalle altre, elementarizzate e sicuramente integre, possono fornire buone caratteristiche meccaniche, tipiche di una pasta chimica (impropriamente cellulosa). La resa in pasta greggia oscilla tra il 45 e il 60%. Vediamo ora in dettaglio i diversi tipi di paste che si ricavano a seconda del metodo estrattivo e di imbianchimento.

5.1 Generalità sulle paste chimiche

Sono comunemente dette cellulose e sono ottenute dai legni come è stato già detto, mediante attacco chimico e dissoluzione pressoché totale della lignina. La loro produzione può avvenire con reattivi **acidi ed alcalini**. A seconda della drasticità delle condizioni di cottura e del tipo di reattivo prescelto, le rese in pasta greggia si abbassano fino ad arrivare tra il 45% ed il 60% poiché subiscono l'attacco chimico, oltre alla lignina, anche i polisaccaridi e, specialmente le emicellulose. Esistono due famiglie di paste chimiche: le paste al solfato e le paste al solfito.

5.2 Paste al solfato

La denominazione “solfato” deriva dal fatto che nel processo di recupero dei liscivi viene introdotto del solfato di sodio per rigenerare soda e solfuro. Sono dette anche paste **kraft** per indicare la loro principale caratteristica di resistenza in quanto kraft, in tedesco, significa forte, resistente.

È il processo più importante per la produzione di paste chimiche che ha soppiantato o ridimensionato gli altri processi. I reattivi di natura basica sono costituiti da idrossido di sodio e da solfuro di sodio in quantità variabili che si esprimono come “**alcali attivo**” e “**solfidita**”: il primo rappresenta la somma delle quantità di soda e di solfuro e il secondo un rapporto tra la quantità di solfuro e l’alcali attivo. Il processo kraft si può considerare derivato da quello alla soda: infatti nei confronti di questo, l’aggiunta di solfuro di sodio si è dimostrato determinante poiché si sono abbreviati i tempi di delignificazione e quindi attenuati i danni alla cellulosa, derivanti da un prolungato contatto con la soda. Le temperature di cottura, di norma, sono di 170 C° per tempi che vanno dall’uno alle tre ore. Le paste ottenute con cotture blande sono dure e scure, hanno una maggiore resa 50 - 60%, ottime resistenze meccaniche, sono difficili da raffinare e vengono impiegate per lo più per carta kraft per sacchi, per carte e cartone da imballo, cartoncini, ecc.

Le paste ottenute invece con cotture drastiche sono tenere e facilmente imbiancabili, hanno una resa inferiore (al di sotto del 50%), sono più disincrostate, meno dure poiché contengono meno lignina delle precedenti. Questi tipi di cellulosa (tenere) vengono invece adoperate per carte che oltre alla resistenza meccanica, devono possedere buona pulizia, un colore più chiaro, una notevole sofficità, una speratura uniforme, (es. carte da stampa, carta per buste, supporti da patinare, ecc.). Per tali impieghi sono indicati in maniera particolare i legni di latifolia; in generale si può dire che le latifoglie sono di gran lunga avvantaggiate rispetto alle conifere nella produzione di paste al solfato per diversi motivi: alta densità del loro legno; contenuto inferiore di lignina che riduce i tempi di cottura; loro abbondanza e diffusione in natura e loro velocità di crescita.

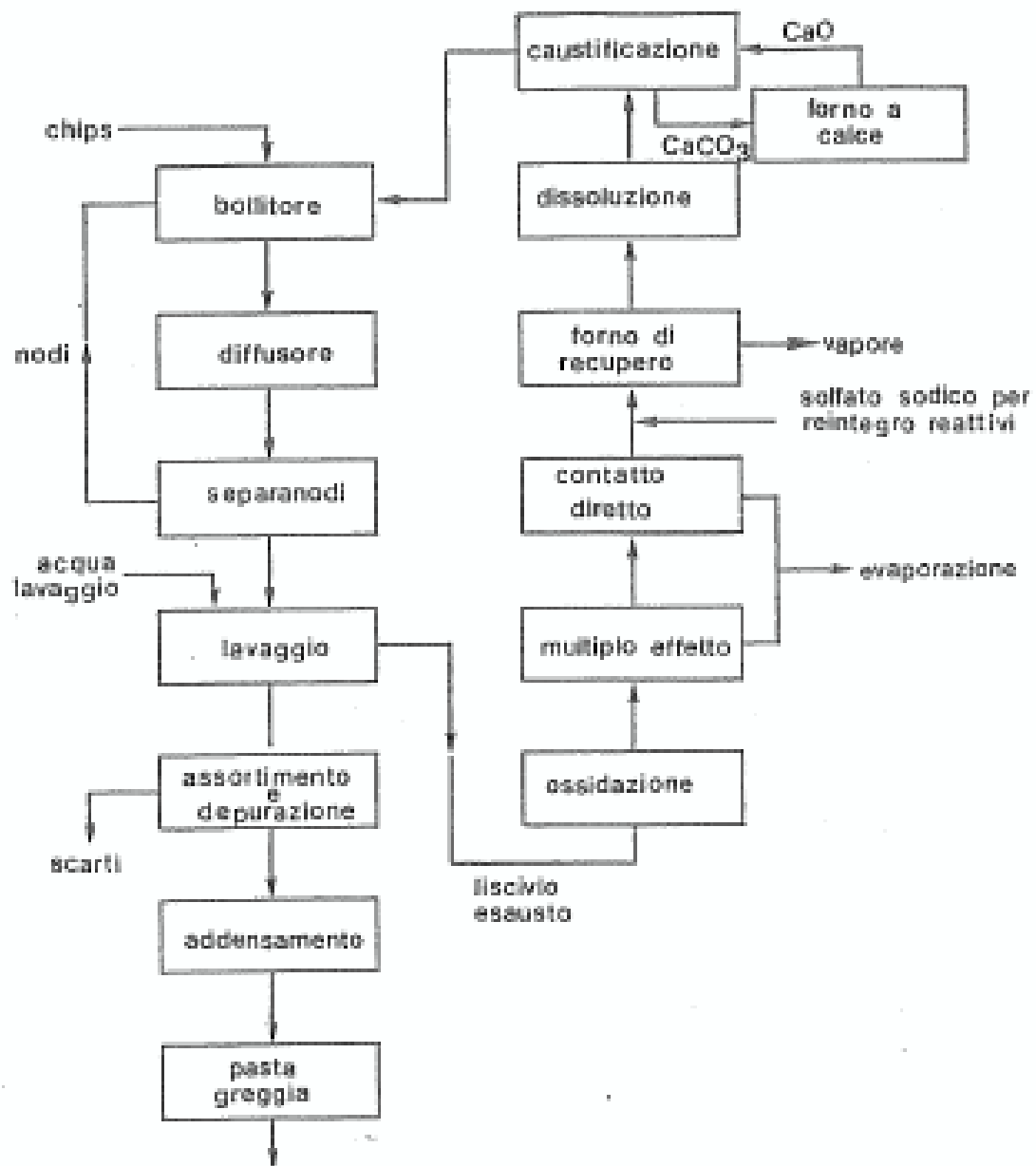


Fig. 2.14. - Schema produttivo del processo kraft.

5.3 Paste al solfito

I termini di “cellulosa al solfito” e di “processo al solfito” pur essendo di uso generale sono impropri, poiché il reattivo impiegato è un bisolfito. I reattivi utilizzati sono: soda, calce, magnesio o ammoniaca miscelati opportunamente ad anidride solforosa in maniera da avere soluzioni con diverso grado di acidità. La condizione della cottura presenta aspetti piuttosto critici per cui inizialmente si ricorreva a temperature relativamente basse (125 - 135 C°) con tempi molto lunghi (fino a 20 ore) che furono successivamente ridotti innalzando la temperatura fino a 150 – 160 C°.

Le paste al solfito si ricavano sia dai legni di conifera che da quelli di latifolia. Hanno caratteristiche meccaniche inferiori a quelle al solfato, ma sono in genere facili da raffinare, più chiare e facilmente imbiancabili, più soffici ma meno opache di quelle al solfato. Hanno una resa più alta e richiedono reattivi poco costosi nel processo di cottura. A questi aspetti favorevoli si contrappongono svantaggi notevoli come la non idoneità a molti tipi di legno (grandi difficoltà con legni resinosi), difficoltà nel recupero dei reattivi, cicli di cottura piuttosto lunghi. Di conseguenza il processo, che fino agli anni venti era stato il più importante per la produzione di paste chimiche, ha dovuto cedere il passo al processo al solfato.

5.4 Paste semichimiche

Sono paste di caratteristiche intermedie tra le cellulose e le paste meccaniche. Si preparano con un blando processo di cottura, seguito da trattamento meccanico con raffinatori a disco. Le rese ottenibili vanno dal 65 al 85%, il livello della resa dipende esclusivamente dall'entità del trattamento chimico cui è stato sottoposto il legno. Le paste così ottenute contengono ancora della lignina ed emicellulose che favoriscono la raffinazione e poiché queste sostanze non sono passate nel liscivio andando perse, rimangono nelle paste aumentandone la resa. Attualmente l'unico processo che le produce è quello detto NSSC (Neutral Sulphite Semi-Chemical) che impiega solfito sodico. I tempi di cottura sono estremamente variabili come pure la temperatura: da 30 minuti a 3-4 ore e 165-190 C°.

5.5 Paste chemi-meccaniche, termo-meccaniche e chemi-termo-meccaniche

Sono paste ad altissima resa (spesso oltre il 90%) vicine come caratteristiche alle paste semichimiche. Vengono prodotte per sfibratura del legno sminuzzato impregnato con vapor d'acqua o con blandi liscivi. Esse stanno ottenendo in questi anni un discreto successo per la loro resa elevata, le loro caratteristiche di resi-

stenza superiori a quelle delle paste meccaniche e di morbidezza ed opacità migliori delle paste semichimiche.

I tecnici, hanno riservato a questi tipi di paste un notevole interesse, quali sostituiti parziali o totali delle più costose paste chimiche in molte applicazioni cartarie.

5.6 Paste meccaniche

Questa categoria di paste vergini riguarda quelle prodotte con impiego esclusivo di energia meccanica e sono chiamate paste meccaniche oppure paste legno. In questo caso le rese sono le massime ottenibili, assai prossime al 100%, in quanto l'energia non ha nessun effetto sulla dissoluzione dei componenti chimici del legno. L'energia meccanica esplica la sua azione indiscriminatamente su tutte le zone del materiale legnoso determinando rotture a caso su tutti gli strati e in tutte le posizioni della parete fibrosa. Quindi si avranno fibre che hanno perduto la loro integrità fisica e una notevole presenza di frammenti fibrosi di dimensioni molto piccole (parti fini). Le paste legno hanno buone doti di opacità, sofficità, stabilità dimensionale e regolarità di assorbimento degli inchiostri.

5.7 Imbianchimento

La maggior parte delle cellulose e delle paste impiegate nell'industria cartaria vengono usate bianchite, motivo per cui ai processi appena accennati si fa seguire un processo di sbianca per ottenere paste che possono raggiungere anche il 90% di bianco. I procedimenti di sbianca sono stati fino a poco tempo fa basati sull'impiego di cloro, sia come cloro gassoso per la prima clorurazione della pasta e trasformazione della lignina presente in clorolignina, sia come ipoclorito per l'eliminazione delle sostanze coloranti nella fibra. Tali processi poi vengono esauriti in alcuni stadi ripetuti fino ad ottenere risultati di pulizia e di bianco veramente eccezionali.

La presenza di sostanze organiche clorate nelle acque di scarico delle fabbriche di cellulosa si sono poste all'attenzione dell'opinione pubblica alcuni anni fa con la scoperta che esse potevano contenere anche minime quantità di diossine. Esiste quindi, da parte del mercato la richiesta di materie prime **“chlorin free”** cioè completamente esenti da cloro, in modo da eliminare l'**aiox** dalle acque di scarico. Per **aiox** si intende il contenuto in kg alogeni organici assorbibili in carbone attivo nelle acque di scarico. Per ovviare a questi problemi si è ricorso alla sbianca per opera di biossido di cloro o acqua ossigenata. Si è potuto verificare che l'imbianchimento gioca un ruolo fondamentale nel processo di raffinazione poiché diminuisce il tasso di lignina, senza però distruggere le emicellulose; inoltre favorisce il rigonfiamento e l'idratazione della fibra.

6. Principali tipi di raffinatori usati in cartiera

Le macchine raffinatrici sono state per molto tempo le olandesi; l'evolversi della tecnologia industriale e le richieste sempre più elevate di carta hanno fatto realizzare macchinari più adatti alle crescenti esigenze di questa fase operativa. Le esigenze sono: produzione di quantità elevata di pasta raffinata (ton/h), produzione in continuo, massima azione di ingrassamento e minima di taglio, consumi energetici ridotti (kwatt/kilocarta), durata degli organi di raffinazione e facilità di manutenzione. Con l'avvento di macchinari ad alte potenzialità, la raffinazione in discontinuo e l'olandese non hanno più avuto ragione di esistere quindi si passò all'utilizzo di raffinatori che permettono l'alimentazione in continuo.

I raffinatori per fibra, comunemente usati in cartiera sono:

- raffinatori conici
- raffinatori a dischi

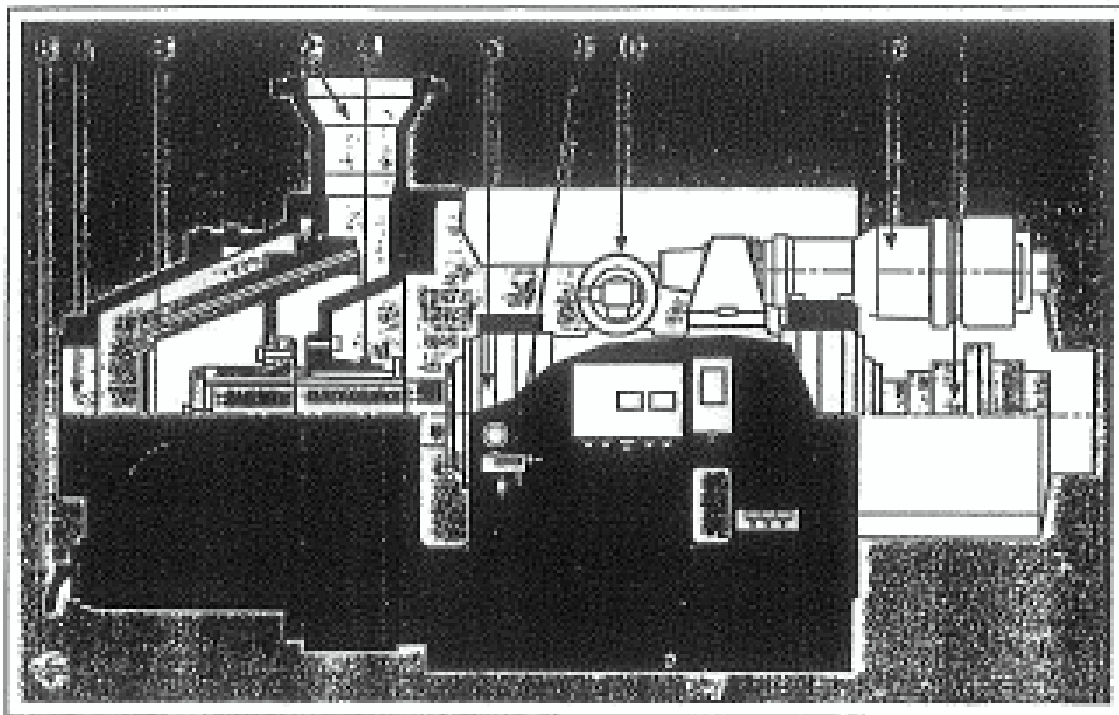
6.1 Raffinatori conici

I raffinatori conici vennero realizzati per primi in America dopo la metà del 1800 con il nome di Jordan; essi, all'inizio furono impiegati per completare il lavoro dei sempre più insufficienti raffinatori olandesi. Questo raffinatore è composto essenzialmente da due parti: una carcassa conica o "statore" e un corpo conico rotante o "rotore".

Sulla parete interna della carcassa, sporgono delle lame disposte lungo l'asse della struttura; anche il rotore è rivestito di lame disposte lungo la generatrice del cono. Il rotore gira all'interno della carcassa e può essere avvicinato fino a sfiorare le lame dello statore. In questo raffinatore l'impasto entra nella parte di minor diametro del cono; per effetto della velocità di rotazione del cono, del grado di inclinazione delle lame e della forza centrifuga, la pasta è costretta a passare tra le lame del rotore e dello statore del raffinatore conico subendo l'operazione di raffinazione e fuoriesce dalla parte opposta. Regolando una valvola inserita lungo la tubazione di scarico si può frenare l'afflusso della pasta, assoggettandola a un tempo di passaggio più lungo e quindi a un'azione rafficante più intensa, a scapito della portata. Analogamente "serrando" maggiormente il raffinatore, cioè avvicinando il rotore allo statore, aumenta l'effetto della lavorazione, con parallelo aumento del consumo di energia. La misura dell'energia applicata dà un'idea dell'intensità di raffinazione e viene espressa in kwh/t. Da notare la grande importanza che riveste l'angolo di inclinazione del cono. Infatti, i raffinatori conici sono classificati in: conico a piccolo angolo (quando l'angolo dello statore è minore di 60°), e conico a grande angolo (quando l'angolo dello statore è maggiore

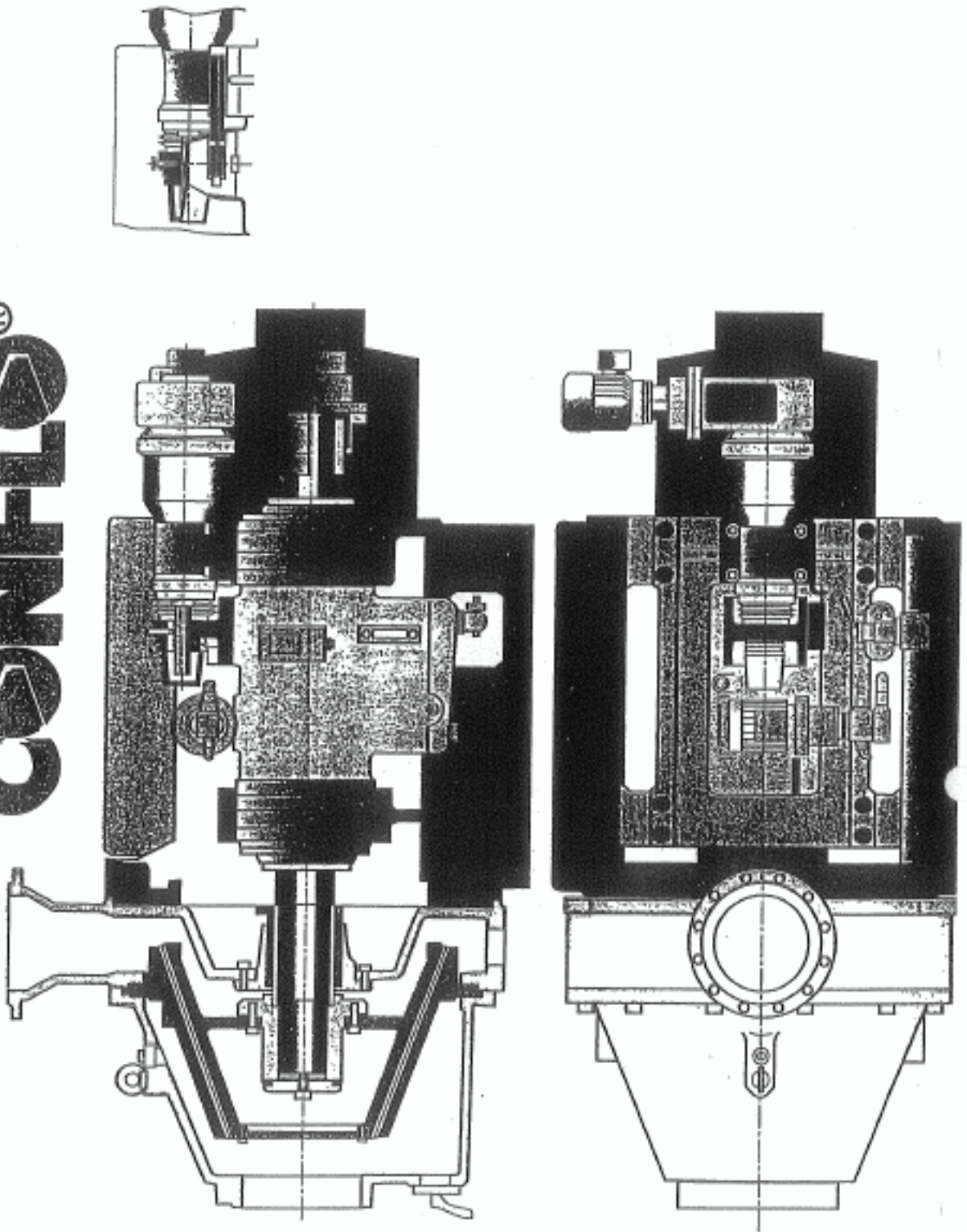
di 60°). La differenza sostanziale sta nel fatto che in un conico a grande angolo, c'è una maggiore velocità periferica e quindi più fibrillazione, meno taglio e minor danneggiamento delle fibre.

Descrizione tecnica



1) Ingresso pasta da raffinare; 2) Uscita pasta raffinata; 3) Guarnitura; 4) Tenuta dell'albero; 5) Supporto/alloggiamento cuscinetti; 6) Dispositivo di carica; 7) Giunto a denti; 8) Ispezione trappola; 9) Flusso stato per l'acqua di tenuta; 10) Centralino per la lubrificazione

CONFLO[®]



6.2 Raffinatori a disco

Sono basati sullo stesso principio dei conici; ma le superfici che portano le lame in movimento relativo sono piane. I raffinatori a disco sono di due tipi fondamentali:

- a disco singolo
- a doppio disco (flottante)

6.2.1 Raffinatore a disco singolo

È una macchina avente un disco fisso e uno ruotante. La pasta entra sotto pressione attraverso il centro del disco fisso, transita attraverso le superfici dei dischi provvisti di lame e fuoriesce dalla periferia degli stessi. Generalmente anche in questi passaggi il flusso della pasta è controllato dalla valvola sulla tubazione di scarico ed il grado di raffinazione è determinato dalla pressione di alimentazione, dalla consistenza, dalla geometria delle guarniture e dal DP entrata-uscita. La distanza tra i dischi può essere regolata manualmente o automaticamente in funzione dell'intensità di corrente o della potenza; la maggiore o minore distanza determina maggiore o minore grado di raffinazione tenendo costanti gli altri parametri. Comparato con un raffinatoro conico, risulta che il principale vantaggio del raffinatoro a disco è costituito dal minor costo di gestione; infatti il cambio dei dischi è molto rapido ed il consumo di energia per pasta raffinata è inferiore. Dal punto di vista tecnico le differenze tra il disco ed il conico stanno nel fatto che il primo taglia molto meno la fibra, tuttavia anche nel raffinatoro a disco si può avere maggiore efficienza di taglio con particolari accorgimenti quali: disegno e spessore delle lame e consistenza della pasta. I dischi sono in genere formati da settori ed il modello e la sistemazione delle scanalature e delle parti in rilievo variano considerevolmente in funzione della pasta da trattare.

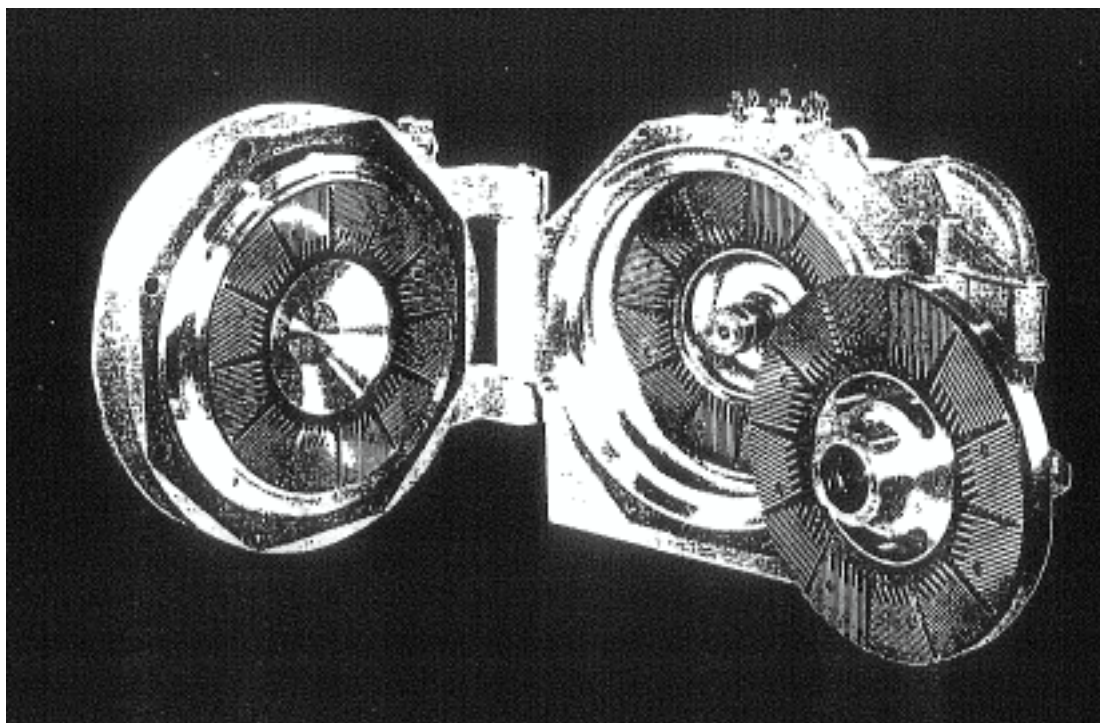
6.2.2 Raffinatore a doppio disco (flottante)

Esso è costituito da un disco munito di lame su ambedue le superfici, flottante sul suo asse, cioè in grado di spostarsi parallelamente a se stesso, rotante fra due dischi fissi, uno dei quali si sposta assialmente nei suoi supporti per determinare il serraggio dell'insieme. Esistono due versioni dei raffinatori a doppio disco:

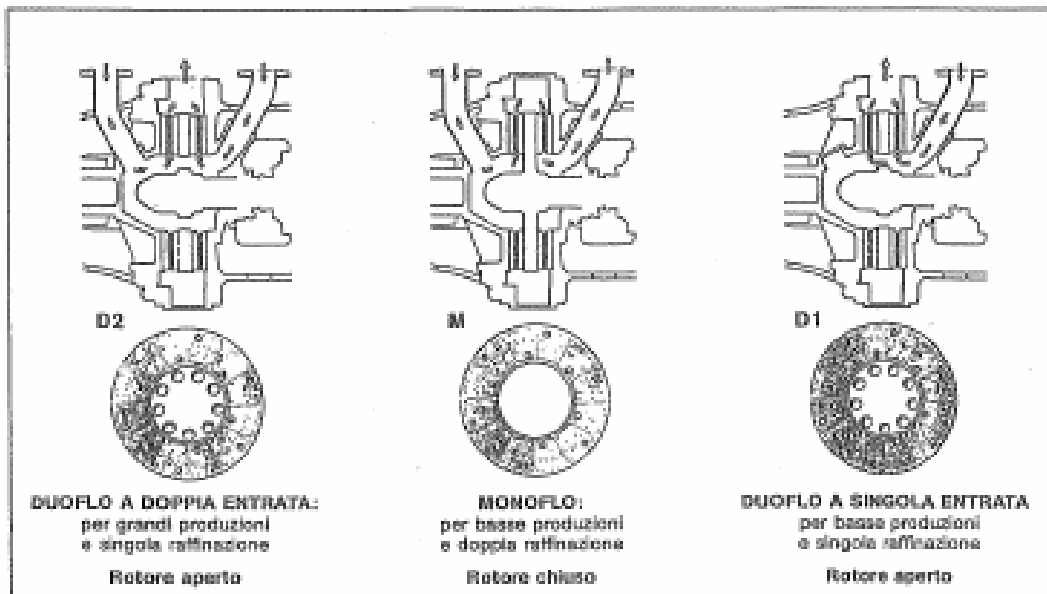
- 1) **(mono-flo)** due passaggi in serie, con entrata della pasta al centro fra le due superfici attive, uscita alla periferia ed entrata ancora dalla periferia nel secondo passaggio e scarico finale al centro.
- 2) **(duo-flo)** passaggi in parallelo con doppia entrata della pasta nella parte centrale e scarico in periferia. Nello scompartimento laterale del raffinatoro, si

trova un pressostato collegato al trasmettitore di pressione, della tubazione di entrata pasta che ritrae i dischi dalla posizione di raffinazione nel caso in cui manchi pasta.

Questi raffinatori possiedono le stesse caratteristiche tecniche del disco singolo ma hanno bisogno di meno energia per quintale di pasta raffinata ed hanno maggiore capacità di raffinazione.



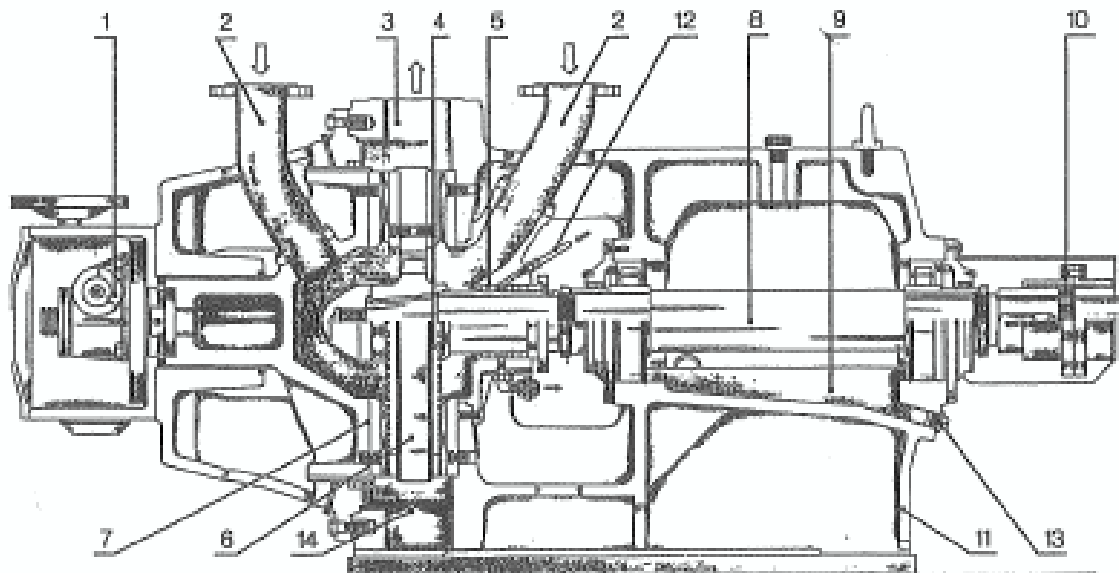
TRE CONFIGURAZIONI



1. Dispositivo di carico dischi
2. Entrata impasto
3. Uscita impasto
4. Settori di raffinazione
5. Tenute

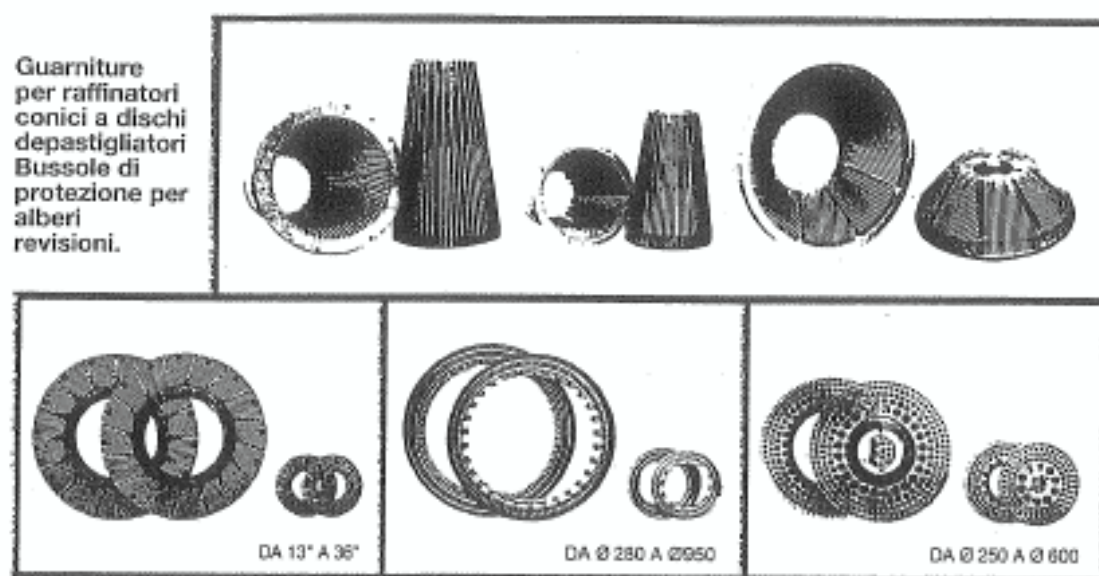
6. Rotore
7. Disco mobile
8. Albero flottante
9. Serbatoio olio lubrificante
10. Giunto scorrevole

11. Basamento
12. Linea acqua lubrificazione tenuta
13. Scarico olio
14. Cavità di raffinazione



6.3 Le lamature per i raffinatori

Le piastre per i raffinatori consistono in una varietà di lame, fuse o saldate o ricavate per lavorazione meccanica, su di una piastra base. Durante il processo di raffinazione le lame sono come travi soggette a flessione, le resistenze meccaniche inducono a non superare in altezza il doppio dello spessore. La configurazione della lamatura è un elemento importante per ottenere specifici effetti di raffinazione.



Nomenclatura

Spigolo della lama: è il punto di lavoro della lama per l'effetto di taglio o eliminazione della fibra. La lunghezza delle lame ed il loro numero determinano la lunghezza di taglio della piastra.

Larghezza della lama: minore è la larghezza della lama, maggiore è il numero delle lame sulla piastra. Aumentando il numero delle lame aumenta la frequenza degli incroci delle lame ottenendo, il linea di massima, una diminuzione dell'azione di taglio.

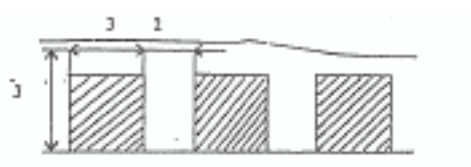
Larghezza e profondità delle cave: diminuendo la larghezza e la profondità della cava si costringe la fibra a passare sotto gli spigoli delle lame e si diminuisce la capacità idraulica. Un aumento della larghezza e profondità delle cave aumenta il passaggio lungo le solcature riducendo quello delle fibre attraverso gli spigoli, aumentano la capacità di pompaggio e le perdite idrauliche del raffinatori.

Angolo delle lame: aumentando l'angolo si ha una tendenza alla diminuzione dell'azione di taglio; aumentano la capacità di pompaggio ed il salto di pressione attraverso il raffinatori con una diminuzione dell'efficienza di raffinazione.

Barre trasversali: sono ostruzioni piazzate sulle cave per costringere le fibre a passare attraverso gli spigoli delle lame con riduzione anche della capacità idraulica. Sono poche adoperate per la raffinazione a bassa densità.

Lame ed alveoli: vi sono molti profili ma oggi si utilizzano soprattutto tre tipi:

3 - 2 - 3
2 - 4 - 3
3 - 3 - 3



La prima cifra indica la larghezza delle lame, la seconda cifra indica la larghezza degli alveoli e la terza indica la profondità degli alveoli. L'unità è 1/16 di pollice ossia 1,59 mm. Impiego dei tre tipi di profili:

- 3 - 2 - 3 favorisce l'ingrassamento (le lame sono molto vicine)
- 2 - 4 - 3 favorisce il taglio (poche lame e sottili)
- 3 - 3 - 3 è un compromesso fra i due tipi di profilo ed è quello più utilizzato.

6.4 Scelta del materiale usato per le guarniture dei raffinatori

La scelta del materiale usato per i dischi dei raffinatori è sempre un compromesso. Non è possibile avere contemporaneamente alta resistenza all'usura ed alta resistenza alla rottura dei denti. Sfortunatamente nessuna cartiera opera nelle condizioni ideali ed ottimali e quindi i soliti problemi originati da imperfezioni del processo produttivo, pezzi di ferro o sassi nell'impasto ed il contatto metallico tra i dischi possono causare la rottura dei denti. Individuiamo quali sono le cause principali che determinano l'usura di una guarnitura e quali sono le leghe specifiche per ovviare a queste difettosità. Una guarnitura può usurarsi per:

- a) **abrasione:** causata dalla flottazione dei dischi rotanti; è conveniente utilizzare leghe dure e resistenti all'usura (alto contenuto di carbonio). In tali situazioni possono essere utilizzate con buoni risultati anche leghe alla lava di basalto.
- b) **rottura:** causata da agenti estranei presenti nell'impasto derivanti da cattiva epurazione; questo fenomeno può essere parzialmente eliminato utilizzando leghe costituite prevalentemente da acciaio inossidabile a basso contenuto di carbonio.
- c) **corrosione:** causata dall'acidità dell'impasto e dagli additivi o dal riscaldamento derivante dall'idrodinamica del raffinatori. Questo problema può essere in parte eliminato utilizzando leghe di acciaio inossidabile.

- d) **cavitazione:** causata dalle elevatissime oscillazioni e turbolenze presenti in un raffinatore; ovviamente bisogna considerare che questi problemi non possono essere eliminati totalmente ma possono essere monitorizzati, tenendo conto dei parametri che concorrono alla buona riuscita di una lega nel momento della sua formulazione e fusione.

7. Relazione tra la raffinazione e gli altri parametri che intervengono nella produzione della carta

Come abbiamo già accennato nei capitoli precedenti, sono molto importanti le condizioni in cui viene eseguita la raffinazione. Se vengono influenzate costanti o vengono variati fattori riguardanti la natura della materia prima, o le variabili di processo (temperatura, pH) o ancora il tipo di “macchine” impiegate (raffinatori a dischi o conici), l’effetto della raffinazione cambia e, di conseguenza, mutano le caratteristiche finali del foglio; cerchiamo quindi di individuarne i parametri più importanti.

7.1 Idrodinamica della raffinazione

La circolazione dell’impasto all’interno di un raffinatore è stata studiata grazie all’utilizzo di una telecamera ad altissima velocità, posizionata su carter della macchina realizzata in plexiglass trasparente. Si è potuto così verificare l’idrodinamica della raffinazione ed il flusso della pasta all’interno del raffinatore. Distinguiamo tre tipi di flussi:

- a) **flusso primario:** rappresenta il passaggio principale del flusso della pasta nei canali delle guarniture. Si tratta di un flusso radiale, ovvero la pasta circola dal centro verso la periferia nei canali rotorici e dalla periferia verso il centro nei canali statorici.
- b) **flusso secondario:** è un moto vorticoso generato dal movimento relativo delle lame del rotore e dello statore.
- c) la composizione di questi moti origina un movimento elicoidale ed un gradiente di pressione chiamato **flusso terziario**. Il flusso terziario è quello che determina la raffinazione propriamente detta ed è influenzato dalla natura e dalla geometria delle guarniture e che determinano un gradiente di pressione. Se aumentiamo la larghezza dei canali la velocità del flusso aumenta. Questi tre parametri sono molto importanti nel processo della raffinazione perché se non esistesse il flusso terziario il raffinatore diverrebbe una grande pompa; inoltre il verificarsi di questi flussi simultanei garantisce una certa omogeneità di lavorazione.

7.2 Caratteristiche energetiche del raffinatore

Si definisce intensità di raffinazione o carico specifico il rapporto tra la potenza effettiva del raffinatore e la lunghezza delle lame colpite per secondo (area di contatto).

La funzione che mette in relazione questo rapporto è la seguente:

$$IR = \frac{P_{\text{tot}} - P_o}{L_s} \quad \frac{W_s}{m}$$

dove:

P_{tot} = **Potenza totale** in Watt (realmente misurata dal wattometro)

P_o = **Potenza a vuoto**, cioè la potenza misurata dal wattometro quando si fa circolare dell'acqua nel raffinatore con guarniture completamente aperte

L_s = **Area di contatto** o lunghezza totale delle lame colpite per secondo

Nel caso di una geometria molto classica:

$$L_s = \frac{N}{60} \quad NR \times Ns \times L$$

dove:

N = velocità di rotazione in giri al minuto

NR = numero di lame del rotore

NS = numero di lame dello statore

L = lunghezza media di una lama

Queste determinazioni del carico specifico giocano un ruolo fondamentale nel problema di quantificare il trasferimento di energia alle fibre nel corso della raffinazione. Però questa teoria non tiene conto né della forma delle lame, né della loro distribuzione sulle guarniture, né degli angoli relativi tra le lame del rotore e lame dello statore. Infatti, nuove teorie dimostrano che a stessa intensità di raffinazione ma con geometria delle guarniture diverse, le caratteristiche delle paste trattate possono differenziarsi in modo sostanziale.

Tuttavia, nonostante le contraddizioni che questo parametro può generare, esso offre, conoscenze abbastanza precise circa il trasferimento energetico alla massa fibrosa.

Questo parametro caratterizza infatti la “severità” degli impatti ricevuti dalle fibre. Più elevata è la lunghezza delle lame colpite per secondo (L_s), più il numero degli impatti è elevato e di conseguenza, potenza di chiusura costante più l'energia per impatto è debole. Bisogna però tener presente che l'applicazione di potenza troppo elevata non solo non consente di raggiungere il limite massimo di

resistenza meccanica, ma anche può provocare la rottura del film di fibre che si forma sotto il rotore. La probabile spiegazione matematica è da ricercarsi sicuramente nell'area di contatto che nella sua formula non tiene conto dello spessore delle barre statoriche e rotoriche.

Si è potuto notare che al variare dello spessore delle barre l'area di contatto varia in un campo molto alto e quindi, concludendo, il parametro dell'intensità di raffinazione e dell'area di taglio non possono essere assunti come grandezze significative per misurare la capacità di raffinazione, ma bisogna correlarli alle "severità" degli impatti subiti dalla fibra. Correlazione con i diversi fenomeni che avvengono a carico della fibra.

IR. Alto = accorciamento

IR. Medio = fibrillazione

IR. Basso = idratazione

7.3 L'energia specifica di raffinazione

Quando si studia l'evoluzione delle caratteristiche fisiche della carta e della scolantezza delle paste, è necessario rapportare queste misure al consumo energetico in funzione della portata di pasta da raffinare. Si definisce pertanto:

$$\text{L'energia specifica di raff.} = \frac{\text{potenza totale} - \text{potenza a vuoto}}{\text{la portata del raffinatore espresso in t/h}}$$

$$\text{Esp} = \frac{\text{P}_{\text{tot}} - \text{P}_0}{Q} \quad \text{KWh/t}$$

Effettivamente è molto importante per il cartaio determinare il numero di KWh da fornire ad una tonnellata di pasta per ottenere determinati valori di caratteristiche fisiche della carta. Questa energia specifica è influenzata da molti fattori quali il tipo di fibra da raffinare, la concentrazione dell'impasto, la geometria delle guarniture. Sovente la corrente viene correlata e graficizzata con l'andamento dei °SR per ottimizzare il consumo energetico.

7.4 Bilancio energetico del raffinatore

Poste queste grandezze è ora possibile definire la potenza totale di un raffinatore che è caratterizzata da due fattori molto importanti: la potenza effettiva di raffinazione e la potenza a vuoto.

- a) **la potenza effettiva:** è una grandezza proporzionale alla velocità di rotazione del rotore.
- b) **potenza a vuoto:** per definizione è la potenza misurata facendo circolare dell'acqua nel raffinatore, mantenendo le guarniture aperte. In realtà, tralasciando l'acqua, la pasta circola ugualmente nel raffinatore e bisogna quindi pensare ad una certa quantità di energia che assicura questo movimento. Pertanto una piccola parte dell'energia necessaria a determinare la potenza effettiva di raffinazione viene persa nell'idraulica del movimento. Essa è descritta dalla seguente formula:

$$\text{perdita a vuoto} = k * \text{diametro dischi} * \text{velocità di rotazione}$$

dove la costante K caratterizza il tipo di raffinatore.

Per $K = 2,1$ Raffinatori conici piccolo angolo

$K = 1,05$ Raffinatori conici grand'angolo

$K = 0,65$ Raffinatori a doppio disco

Riuscire a monitorare queste grandezze può essere di grande aiuto in quanto una loro diminuzione significherebbe incrementare la potenza netta in ogni raffinatore.

Si può ora definire anche l'efficienza di un raffinatore definita dal rapporto:

$$E = \frac{P_U}{P_U + K P_O}$$

L'efficienza di un raffinatore diminuisce man mano che la velocità di rotazione aumenta, di conseguenza il rendimento è tanto più elevato quanto elevata è la potenza di chiusura. Inoltre, è importante sottolineare che l'usura delle guarniture può influire pesantemente sulle caratteristiche di efficienza di un raffinatore essendo responsabile del turbino che si determina all'interno dei canali (flusso secondario e terziario) e della portata massima. In queste condizioni, cioè adottando altezze delle lamature importanti, bisogna far attenzione a non innalzare

troppo la perdita a vuoto che innescherebbe una diminuzione del potere raffinante. Per ovviare a questo problema i costruttori hanno pensato di interporre tra i canali delle barre che consentono di aumentare le altezze delle lamature fino al raggiungimento di una soglia specifica mediata in funzione dell'idrodinamica di raffinazione del minor coefficiente di perdita a vuoto. Sulla base di queste considerazioni si può affermare che:

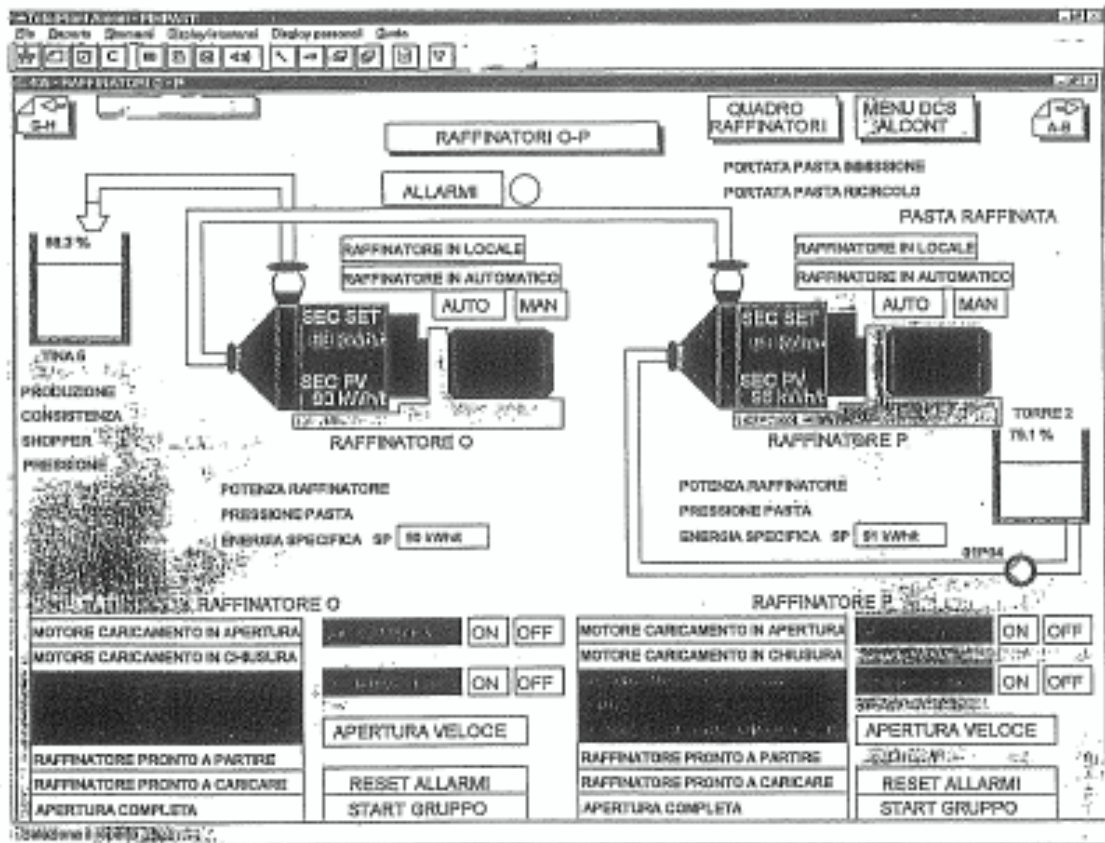
- a) è preferibile utilizzare guarniture e con lame che non superino i 6-7 mm;
 - b) utilizzare le guarniture finché l'altezza si attesti fino ad un valore di 1-2 mm.
- In queste condizioni si può correggere lo scompenso di pressione all'interno del raffinatore, agendo sulla pompa di alimentazione per evitare una riduzione di portata e rispettare le caratteristiche cartarie che si vogliono ottenere. Se le altezze si attestano al di sotto del millimetro allora il raffinatore subirà perdite di portata tali da vanificarne il proprio utilizzo.

7.5 La portata di un raffinatore

La portata di un raffinatore è in stretta correlazione con molti altri parametri quali: la pressione di entrata (la pompa di alimentazione), la geometria delle guarniture, la velocità di rotazione e la posizione della valvola di strozzo all'uscita. Per comprendere meglio possiamo fare qualche esempio:

- a) aumentando la velocità e la pressione in entrata:** in seguito all'aumento di portata e di pressione l'energia specifica diminuirà e nel contempo diminuirà anche il tempo di residenza della fibra all'interno del raffinatore; tutto ciò si tradurrà in una carenza di raffinazione poiché il numero di fibre per unità di volume sarà inferiore favorendo così l'azione di taglio.
- b) aumentando l'apertura della valvola di strozzo:** aumentando l'apertura della valvola di strozzo si otterrà un aumento della portata e si verificheranno tutte le condizioni descritte nel caso precedente. Quindi è chiaro che, anche la posizione delle valvole all'uscita di un raffinatore, rappresentano un parametro di condotta. La portata di un raffinatore dipende anche dall'altezza delle lame e dall'inclinazione delle lame, ed è stato già descritto nel precedente capitolo.

Esempio di gestione dei raffinatori tramite computer



7.6 La temperatura dell'impasto

L'energia spesa nella raffinazione viene dissipata in calore con relativo aumento della temperatura dell'impasto. Un'alta temperatura dell'impasto gioca un ruolo fondamentale nel processo della raffinazione poiché a maggiori temperature le fibre si presentano flessibili e con parete cellulare più morbida; dunque la resistenza dei fiocchi alla compressione si indebolisce. Nel trattamento a bassa densità difficilmente si sale a valori superiori ai 40-50°C; questo risulta essere l'intervallo di temperatura ideale per la raffinazione. A temperature più alte le cellulose subiscono una degradazione di bianco ed una separazione della resina con conseguenti problematiche nel processo produttivo.

7.7 La concentrazione dell'impasto

È uno dei parametri più importanti nel processo di raffinazione. La sua costanza è fondamentale per avere costanza di risultati nel processo. Per studiarne gli effetti in genere si considerano due ranges di concentrazione: bassa e alta.

Bassa consistenza: facilita il taglio della fibra poiché quelle che vanno a contatto con l'elemento tagliente sono percentualmente superiori.

Alta consistenza: determina un aumento di frizione tra fibra e fibra e si possono ottenere miglioramenti delle caratteristiche di resistenza ma si ha lo svantaggio di un notevole aumento dell'energia di raffinazione.

7.8 pH dell'impasto

Anche il pH della pasta influisce sullo sviluppo delle caratteristiche delle fibre in lavorazione. Si è potuto verificare che il pH acido favorisce il taglio della fibra, un ambiente alcalino produce invece effetti positivi sul rigonfiamento ed idratazione della fibra con migliore sviluppo delle resistenze meccaniche. Un ambiente neutro-alcalino comporta quindi una serie di vantaggi energetici nella raffinazione della pasta, nel drenaggio e nell'essiccamento della carta.

Infine la carta ottenuta a giusti valori di pH avrà una migliore resistenza complessiva all'invecchiamento.

8. Conclusioni

Osservando superficialmente il processo produttivo della carta, si può avere l'impressione che si tratti di una serie di funzioni abbastanza semplici e scontate, invece lavorare in cartiera è un'attività molto complessa e di alto contenuto tecnologico.

L'opportunità molto apprezzata che le cartiere Burgo mi hanno offerto, di poter frequentare il corso per "Tecnici Cartai" presso la scuola "San Zeno" di Verona, mi ha fatto conoscere meglio il processo produttivo della carta e mi ha permesso di apprezzare maggiormente questa complessa e vasta attività.

Grazie a questo corso ho potuto visitare molte altre cartiere ed aziende attinenti la produzione cartaria e mi sono reso conto dei grandi sforzi ed investimenti che ci vogliono per poter realizzare un foglio di carta. Tra le varie operazioni che si svolgono in cartiera e nella fabbricazione della carta, sono stato maggiormente attratto dalla raffinazione degli impasti, data la complessità ed importanza di queste operazioni.

Per questi motivi ho scelto con entusiasmo di poter svolgere una modesta relazione che potesse trattare la raffinazione degli impasti. È con semplicità, che ho cercato di illustrare un così vasto ed importante argomento, che senza dubbio, meritava maggiore professionalità nella sua stesura.

Bibliografia

- AA.VV. – “Introduzione alla fabbricazione della carta”
(*Aticelca*)
 - “Prove sulle materie fibrose, sulla carta e sul cartone”
(*Edoardo Grandis - Aticelca*)
 - “L’industria della carta”
(*Enrico Gianni*)
 - Dispense di “sunds defibrator” relazione tenuta presso il 6° Corso per Tecnici Cartari alla SIC di Verona
 - Dispense del dr. Dino Nisi: Relazione tenuta presso il 6° Corso per Tecnici Cartari alla SIC di Verona
 - G. Rallalino – “Quaderni di tecnologia cartaria”
 - “Materiale didattico Scuola Grafica Cartaria - Verona”
(*Paolo Zaninelli*)
-