

Misure con gli ultrasuoni applicate alle carte per ondulatori

Bianchini Luca
(Cardella)

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. Misure con gli ultrasuoni	pag. 3
2.1 Principi fisici	
2.1.1 Il modulo di Young	
2.1.2 Gli ultrasuoni	
2.2 Lo strumento di misura	
2.3 Le modalità di misura	
2.4 L'angolo TSO	
2.5 L'indice del modulo di elasticità TSI	
2.5.1 Il TSI in direzione macchina	
2.5.2 Il TSI in direzione trasversale	
2.5.3 Il rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD}	
3. Caratteristiche della carta per il cartone ondulato	pag. 20
3.1 Il cartone ondulato	
3.1.1 Introduzione	
3.1.2 Conformazione del cartone ondulato	
3.1.3 Le copertine	
3.1.4 Le ondulazioni	
3.1.5 Tipi di onda	
3.2 La resistenza alla compressione	
3.2.1 Influenze dalle dimensioni relative della struttura	
3.2.2 L'equazione generale del modulo di elasticità	
3.2.3 Modalità di cedimento della struttura fibrosa	
3.3 Prove di compressione sulla carta	
3.3.1 La prova RCT	
3.3.2 La prova CCT	
3.3.3 La prova CMT	
3.3.4 La prova di SCT	
3.4 Le prove di compressione della carta e le proprietà del cartone ondulato	
4. Risultati delle prove eseguite	pag. 36
4.1 La produzione di carta per onda presso la Cartiera Cardella di Lucca	
4.2 Breve descrizione degli impianti della cartiera	
4.3 Analisi dei risultati ottenuti con lo strumento ad ultrasuoni	
4.4 TSO, TSI_{MD} , TSI_{CD} e TSI_{MD}/TSI_{CD} in funzione del bias	
4.4.1 L'angolo TSO	
4.4.2 Il TSI_{MD}	
4.4.3 Il TSI_{CD}	

- 4.4.4 Il TSI_{MD}/TSI_{CD}
- 4.5 La resistenza alla compressione in funzione del bias
 - 4.5.1 L'indice di CMT
 - 4.5.2 L'indice di CCT
 - 4.5.3 L'indice di SCT in direzione macchina
 - 4.5.4 L'indice di SCT in direzione trasversale
 - 4.5.5 Il rapporto SCT_{MD}/SCT_{CD}
- 4.6 Correlazioni fra modulo di elasticità e caratteristiche meccaniche

1. Introduzione

Il processo di fabbricazione della carta è molto complesso, dato l'elevato numero di variabili che influenzano tanto la materia prima, quanto gli impianti di produzione (preparazione impasti e macchina continua). Per tenerlo sotto controllo, assicurando che la carta prodotta abbia i requisiti richiesti, si ricorre alla misura di tutta una serie di grandezze significative: alcune di queste misure vengono effettuate in linea sul nastro di carta in formazione (quali lo spessore, la grammatura, il contenuto di umidità), altre in laboratorio su campioni prelevati dalle bobine prodotte (quali il grado di anisotropia, le resistenze alla trazione, alla compressione, allo scoppio, alla lacerazione, la permeabilità all'aria e ai liquidi, il grado di liscio, il grado di bianco, ecc.). Fra tutte queste grandezze se ne possono identificare alcune che rivestono importanza per tutti i tipi di carta e che per questo possono essere definite primarie, ed altre che sono significative solo per alcuni tipi. Certamente la grammatura, l'umidità, il grado di anisotropia della carta sono esempi di grandezze primarie, mentre il grado di liscio e il grado di bianco, fondamentali nella produzione di carta da stampa, non hanno alcun interesse nella produzione di carta per ondulatore.

Gli strumenti ad ultrasuoni, introdotti negli ultimi anni, rappresentano certamente qualcosa di più che semplici nuovi strumenti di misura a disposizione dei cartai, in quanto permettono la misura di due importanti grandezze primarie: l'indice del modulo di elasticità del foglio (in seguito indicato anche come TSI, che sta per Tensile Stiffness Index) e l'orientamento dell'elasticità (in seguito indicata anche come TSO, che sta per Tensile Stiffness Orientation). A detta dei produttori di questi strumenti, basandosi sui risultati ottenuti in cartiere che li hanno utilizzati, queste due grandezze possono rivelarsi di grande aiuto nell'ottimizzazione e nel controllo della macchina continua e, allo stesso tempo, possono fornire informazioni importanti sulla qualità della carta prodotta.

Il processo di misura è relativamente semplice e rapido e permette di ottenere l'andamento, lungo i profili trasversale e longitudinale, dei valori dell'angolo TSO (il quale è legato all'orientamento delle fibre e può perciò fornire informazioni sul grado di uniformità del getto che esce dalla cassa d'afflusso), del TSI in direzione macchina e in direzione trasversale (i quali possono fornire informazioni sulle caratteristiche di resistenza della carta e sulla tendenza della stessa all'imbarcamento), del rapporto fra il TSI in direzione macchina e quello in direzione trasversale (che fornisce informazioni sul grado di anisotropia della carta).

Tali strumenti di misura sono detti ad ultrasuoni in quanto quello che in realtà misurano è la velocità di propagazione attraverso la carta, sul piano della stessa ed in differenti direzioni, di impulsi di onde sonore ultrasoniche. Poiché la velocità di questi impulsi è correlata al modulo di elasticità della carta, dalla sua misura è possibile ricavare il valore del TSI lungo le varie direzioni di propagazio-

ne. La direzione lungo la quale la velocità, e quindi il TSI, sono massimi determina l'angolo TSO.

Questo lavoro di tesi ha lo scopo di presentare i risultati ottenuti nell'utilizzo di uno strumento ad ultrasuoni presso le Cartiere Cardella di Lucca. Nel primo capitolo verranno descritti i principi fisici su cui si basa il processo di misura, le modalità di funzionamento dello strumento, le modalità di esecuzione delle misurazioni e verranno analizzate più in dettaglio, rispetto a questa introduzione, le grandezze misurate e la loro influenza sulle qualità della carta. Nel secondo capitolo verrà descritto il cartone ondulato e verranno analizzate le caratteristiche che devono essere possedute dalla carta che ne costituisce la struttura, con particolare riguardo alla carta per onda; verranno inoltre descritte tutte le prove classiche effettuate su tali carte per misurare la loro resistenza alla compressione. Nel terzo capitolo verrà presentato il processo produttivo della cartiera Cardella: materie prime, impianti e tipi di carta prodotta. Verranno infine presentati e discussi i risultati ottenuti con lo strumento ad ultrasuoni.

2. Misure con gli ultrasuoni

2.1 Principi fisici

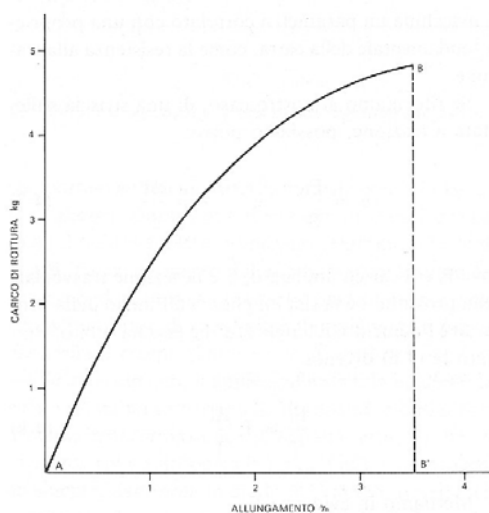
Prima di descrivere in modo più approfondito le modalità di misura degli strumenti ad ultrasuoni, è opportuno fare alcune considerazioni sui principi fisici che ne stanno alla base.

2.1.1 Il modulo di Young

Il modulo Young è un coefficiente caratteristico di un materiale che esprime la rigidità specifica dello stesso. Maggiore è questo valore, minore è l'allungamento a parità di forza di trazione.

Se una striscia di carta è sottoposta ad una forza di trazione crescente, orientata parallelamente al lato lungo della striscia e giacente sul piano di questa, essa si deforma aumentando la propria lunghezza, fino al momento in cui avviene la rottura. La relazione fra il carico F applicato alla striscia (espresso in Kg peso) e la deformazione $\Delta l/l$ (allungamento relativo, riferito alla lunghezza iniziale l della provetta) è rappresentato dalla curva visualizzata nella figura seguente:

Fig. 1



4-14 Prova di trazione - Diagramma carico-allungamento

Nel primo tratto, breve, della curva, la carta si comporta come un solido elastico, intendendo come tale un solido che, una volta annullato lo sforzo ad esso applicato, riprende le sue dimensioni iniziali; la sollecitazione a cui è sottoposta la provetta è quindi governata dalla legge di Hooke, espressa dalla $\sigma = E \cdot \varepsilon$ dove σ rappresenta lo sforzo unitario (calcolato come il rapporto fra il carico F a cui è sottoposta la striscia e la sezione trasversale S della stessa: $\sigma = F/S$), ε la deformazione unitaria (calcolata come il rapporto fra l'allungamento Δl subito dalla striscia e la lunghezza iniziale l della stessa: $\varepsilon = \Delta l/l$) ed E una costante del materiale (nel nostro caso, la carta) che ne caratterizza il comportamento e prende il nome di modulo di elasticità o di modulo di Young. In particolare è stato dimostrato che esiste una correlazione molto stretta fra il modulo di Young e la resistenza alla trazione della carta, nel senso che tanto più elevato è il valore del modulo di Young, maggiore è la resistenza alla trazione della provetta.

Finora ci siamo riferiti al modulo di Young come se questo fosse una grandezza scalare, cioè esprimibile con un semplice numero; in realtà ciò è vero soltanto per corpi formati da materiali isotropi (cioè aventi proprietà indipendenti dalla direzione) e la carta non è, in generale, un materiale isotropo. Da un punto di vista fisico, il modulo di Young è un tensore del secondo ordine (indicato con $\vec{\vec{E}}$), identificato da nove numeri (componenti) i quali formano una matrice quadrata di dimensioni 3×3 : la relazione più generale che esprime la legge di Hooke è data dalla $\vec{\sigma} = \vec{\vec{E}} \cdot \vec{\varepsilon}$ nella quale lo sforzo unitario $\vec{\sigma}$ e l'allungamento relativo $\vec{\varepsilon}$ sono dei vettori. Più semplicemente, tutto ciò significa che, in un materiale non isotropo, il modulo di Young assume valori differenti a seconda della direzione considerata; in particolare, per un foglio di carta, trascurando la direzione "z" (cioè quella lungo lo spessore), si possono in generale identificare due direzioni, mutuamente perpendicolari, lungo le quali il modulo di Young assume rispettivamente valore massimo e valore minimo: lungo qualsiasi altra direzione fra esse compresa, il valore del modulo di Young sarà a sua volta compreso fra questi due valori estremi.

2.1.2 Gli ultrasuoni

Le onde sonore sono onde meccaniche longitudinali che possono propagarsi nei solidi, nei liquidi e nei gas. Il termine longitudinale si riferisce al fatto che la direzione delle oscillazioni coincide con quella di propagazione dell'onda (mentre invece nel caso di una corda vibrante, come quella di una chitarra, le oscillazioni avvengono in direzione perpendicolare a quella di propagazione, nel qual caso si parla di onde trasversali).

Vi è un vasto campo di frequenze in cui possono essere generate onde meccaniche longitudinali; però il cervello e l'orecchio umano sono in grado di essere stimolati da esse solo se la loro frequenza è compresa fra i 20 e i 20.000 Hz (campo di udibilità). Un'onda meccanica longitudinale con frequenza inferiore al campo di udibilità è chiamata infrasuono, mentre una di frequenza maggiore è detta ultrasuono. Le onde sismiche sono un esempio di sorgenti di infrasuoni mentre gli ultrasuoni possono essere prodotti dalle vibrazioni elastiche di un cristallo di quarzo, indotte per risonanza da un campo elettrico alternato (effetto piezoelettrico).

Le sorgenti di onde sonore (udibili e non) provocano nel mezzo in cui agiscono, una serie di compressioni e rarefazioni che, grazie alle proprietà elastiche del mezzo, sono in grado di propagarsi all'interno dello stesso. Si può dimostrare che la velocità V di propagazione di un'onda sonora in un solido elastico è data

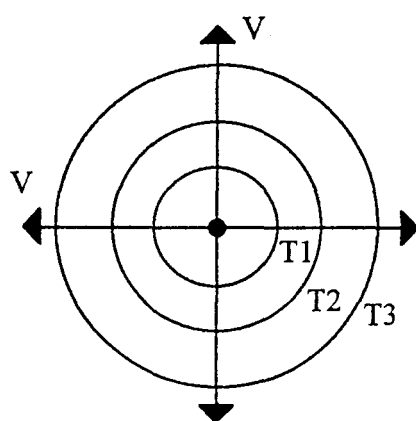
dalla $V = K\sqrt{\frac{E}{d}}$ dove E e d sono rispettivamente il modulo di Young e la densità

del materiale di cui è composto il solido mentre K è un coefficiente, caratteristico del materiale, che per la carta vale circa 1: si può osservare come tale velocità sia determinata sia dalle proprietà elastiche (E) che da quelle inerziali (d) del corpo.

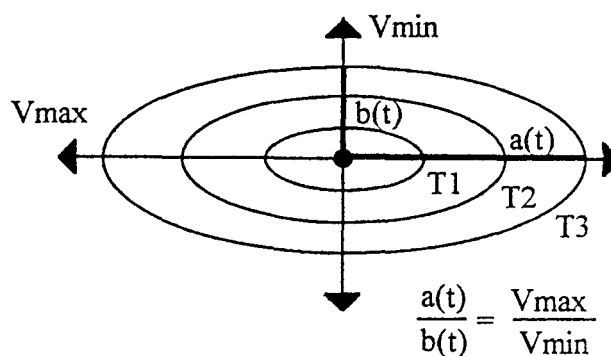
Le onde sonore prodotte da un sorgente, si propagano attraverso un foglio di carta lungo tutte le direzioni giacenti sul piano dello stesso, in maniera analoga alle onde che si generano in uno specchio d'acqua quando in esso viene gettato un sasso; come abbiamo visto in precedenza, se la carta fosse un materiale isotropo, il suo modulo di Young, e quindi la velocità di propagazione del suono al suo interno, sarebbero indipendenti dalla direzione per cui i fronti d'onda assumerebbero la forma di circonferenze di raggio crescente con il tempo; in realtà, in genere la carta possiede proprietà direzionali per cui, in base a quanto detto nel paragrafo precedente, si può affermare che esiste una direzione lungo la quale la velocità di propagazione è massima, mentre lungo la direzione perpendicolare a questa, tale velocità risulta minima: la forma che assumono i fronti d'onda ad un certo istante diviene allora, all'incirca, quella di un'ellisse, i cui semiassi crescono con il tempo, mantenendo però costante il loro rapporto, pari a quello fra la velocità di propagazione massima e quella minima.

Fig. 2

Onde che si propagano in un mezzo isotropo: velocità costante in tutte le direzioni.



Onde che si propagano nella carta: velocità differente nelle varie direzioni con V_{max} e V_{min} che giacciono su direzioni fra loro perpendicolari



LEGENDA:

T1, T2 e T3 rappresentano gli istanti di tempo a cui sono disegnati i fronti d'onda con $T3 > T2 > T1$

$a(t)$ e $b(t)$ sono, rispettivamente, il semiasse maggiore e quello minore, entrambi funzioni del tempo

V , V_{max} e V_{min} sono le velocità di propagazione nelle varie direzioni

2.2 Lo strumento di misura

Lo strumento descritto nel seguito, è prodotto dalla AB Lorentzen & Wettre, azienda svedese. Per effettuare la misura, esso utilizza gli ultrasuoni: la testa di misura, circolare, è formata da otto coppie di trasmettitori e ricevitori, posti in posizione dia-

metralmente opposta, l'uno dall'altro ad una distanza $D = 100$ mm e uniformemente spaziatati lungo la circonferenza, di modo che l'angolo fra due coppie successive risulta di 22.5° .

Fig. 3

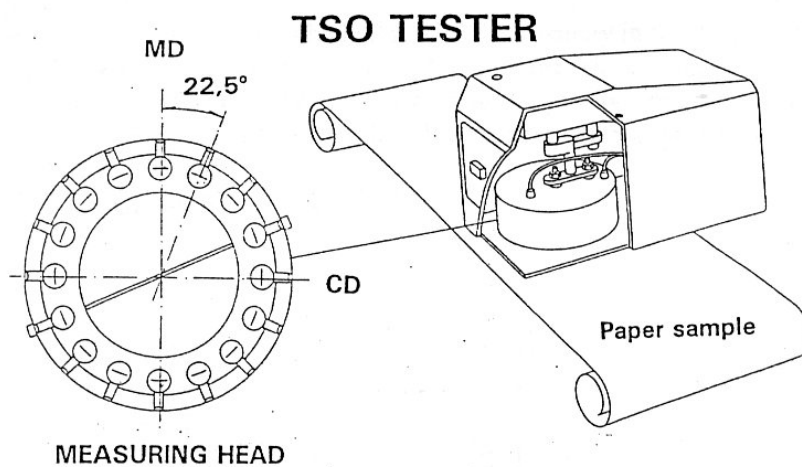


Figure 1. The multi-sensor head makes it possible to measure in all directions in the plane of the paper sheet

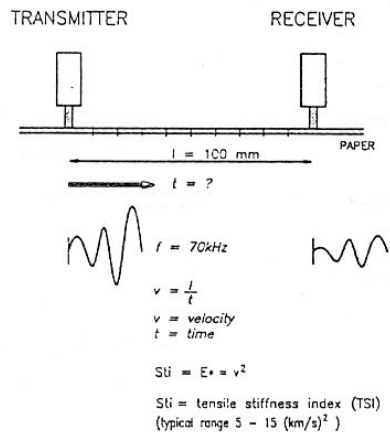


Figure 2. The transmitter sends an ultrasonic pulse to the receiver, that propagates through the paper and the velocity is calculated and expressed as TSI.

Una volta che la testa si è appoggiata sulla carta, a turno, ciascun trasmettitore emette un impulso di onde sonore longitudinali a frequenza ultrasonica ($f = 70$ kHz), il quale si propaga attraverso il foglio, sul piano dello stesso, fino ad essere raccolto dal corrispondente ricevitore: dalla misura del tempo T impiegato dall'impulso per percorrere la distanza D , lo strumento è in grado di ricavare la velocità di propagazione $V = D/T$ lungo la direzione identificata dalla coppia trasmettitore - ricevitore; è importante ribadire che i trasmettitori non emettono gli impulsi contemporaneamente, perché altrimenti insorgerebbero problemi determinati da fenomeni di interferenza e, peggio ancora, su ciascun ricevitore giungerebbero, ad istanti differenti, gli impulsi emessi dai vari trasmettitori, rendendo di fatto impossibile l'identificazione dell'impulso partito da quello corrispondente: in altre parole, durante il processo di misura, diviene attiva una sola coppia per volta.

Il processo di misura dura circa cinque secondi, durante i quali le velocità di propagazione nelle varie direzioni vengono misurate più volte, in modo da poter disporre di un valore medio affidabile, con una dispersione compresa fra il 2% e il 4%. A questo punto lo strumento effettua un processo di interpolazione fra i valori misurati nelle otto direzioni, per mezzo del quale ricava la curva di distribuzione della velocità in funzione della direzione. Dal valore della velocità di propagazione lungo una certa direzione, lo strumento è in grado di calcolare direttamente quello dell'indice del modulo di Young E' corrispondente, per mezzo della relazione $E' = V^2$ (assumendo la costante $K = 1$) dove $E' = \frac{E}{d}$.

I valori del TSI forniti dallo strumento sono quattro: il TSI_{MD} , il TSI_{CD} , il TSI_{MAX} e il TSI_{MIN} che rappresentano, rispettivamente, l'indice del modulo di Young lungo la direzione macchina, quello lungo la direzione trasversale, quello massimo e quello minimo. Naturalmente, affinché i primi due valori rappresentino effettivamente quelli lungo la direzione longitudinale e trasversale, bisogna avere l'accortezza, come preciseremo fra poco, di preparare e disporre il campione di carta sullo strumento nella maniera corretta.

L'altra importante grandezza misurata dallo strumento è l'orientamento dell'elasticità TSO, che si può considerare coincidente con la direzione lungo la quale sono in prevalenza disposte le fibre; tale direzione è quella lungo cui lo strumento ha rilevato la massima velocità di propagazione degli ultrasuoni e viene rappresentata per mezzo dell'angolo che essa forma con la direzione di macchina.

2.3 Le modalità di misura

Una caratteristica importante dello strumento è la semplicità delle operazioni necessarie per effettuare la misura: in pratica, l'operatore non deve fare altro che

prelevare dalla bobina un campione sotto forma di una striscia di carta, della larghezza di circa 30 cm, lunga tutto quanto il formato in caso di profilo trasversale (la lunghezza nel caso di profilo longitudinale non è definita, anche se in genere si ritiene sufficiente un valore pari alla lunghezza della tela di formazione), ed inserirla nello strumento, il quale provvede poi automaticamente, una volta effettuata la misura in una zona, a fare avanzare la striscia fino alla zona di misura successiva.

Il numero di misure che lo strumento deve effettuare lungo la striscia, ovvero la distanza fra le zone campionate, può essere impostato a piacere dall'operatore; considerando un formato di 3 m ed una distanza fra un campionamento e l'altro di 20 cm, il numero di misure da effettuare risulta pari a 15: poiché il processo di misura su ogni zona richiede circa 5 secondi, l'intera striscia sarà campionata in non più di due minuti, un tempo decisamente breve. Lo strumento è corredato di un personal computer, nel quale vengono continuamente inviati ed elaborati tutti i dati rilevati, di modo che risulta possibile analizzare immediatamente l'andamento dei valori delle varie grandezze.

In queste operazioni, di per sé semplici, si nascondono però due fonti di errori sistematici, potenzialmente notevoli. Per capire la natura di questi errori è necessario prima precisare come lo strumento identifichi la direzione di macchina, relativamente alla quale calcola il TSI_{MD} , il TSI_{CD} e il TSO. Il piano dove viene riposta la striscia campione è dotato di un bordo rialzato lungo il quale si deve fare poggiare uno dei bordi "lunghi" della striscia stessa; la direzione perpendicolare a quella del bordo rialzato, sulla quale è situata una delle coppie ricevitore – trasmettitore, è quella che lo strumento considera convenzionalmente come direzione macchina; perciò, se i bordi "lunghi" e quelli "corti" del campione sono fra loro perpendicolari, la direzione di macchina vera e propria e quella di riferimento dello strumento vengono a coincidere.

Invece, nel caso l'operatore abbia tagliato i bordi "lunghi" del campione in modo non perfettamente perpendicolare a quelli "corti" (che delimitano il formato), lo strumento valuterà in modo errato la direzione macchina e tutte le grandezze ad essa relative elencate in precedenza. Le conseguenze peggiori si hanno comunque sulla misura dell'angolo TSO più che su quelle del modulo di elasticità; infatti, tipicamente il valore medio lungo il profilo trasversale di tale angolo è attorno a 0° , per cui anche un errore di pochi gradi nella direzione di taglio può falsare completamente la misura.

L'altra fonte di errore è della stessa natura della precedente, ed è determinata dal fatto che non esiste alcun dispositivo che mantenga il bordo del campione aderente a quello rialzato dello strumento, per cui talvolta capita che, in una zona, venga effettuata la misura mentre la striscia è disallineata di diversi gradi.

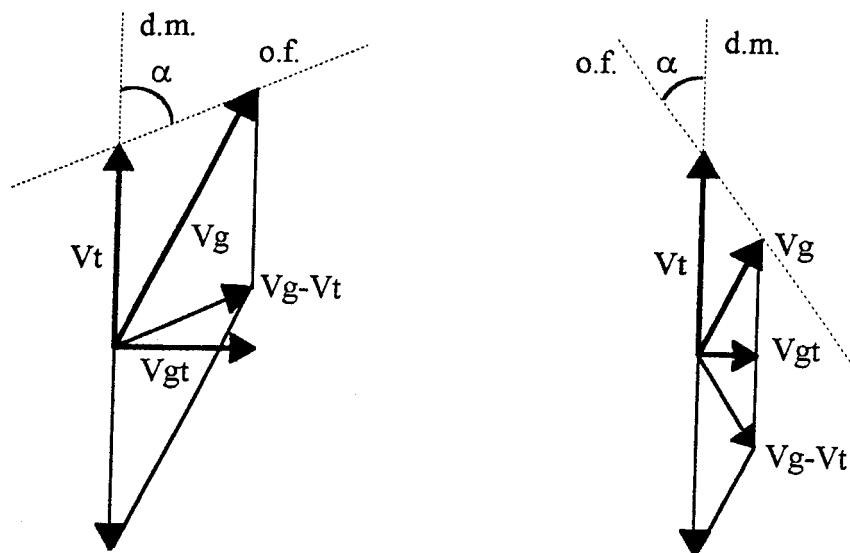
Nei prossimi paragrafi verranno descritte, in modo più approfondito, le informazioni che si possono ricavare dalle grandezze misurate dallo strumento.

2.4 L'angolo TSO

Come detto precedentemente, il TSO rappresenta l'angolo formato dalla direzione di macchina e da quella lungo la quale lo strumento ha misurato il massimo valore del modulo di elasticità. Secondo la convenzione adottata, partendo dalla direzione macchina, si hanno valori positivi andando in senso orario, valori negativi andando in senso antiorario; si avrà comunque un valore del TSO compreso fra -90° e $+90^\circ$.

In genere, il profilo trasversale dell'angolo TSO, andando dal lato comandi a quello servizi, si presenta piuttosto irregolare, anche se la tendenza è quella di un andamento monotono, crescente o decrescente. Essendo collegato alla direzione lungo la quale sono in prevalenza disposte le fibre, il TSO è influenzato dagli stessi fattori che la determinano, ed in particolare dalla differenza di velocità fra il getto e la tela e dalla componente trasversale della velocità del getto, come mostrato nella Fig.4, in cui la direzione di orientamento delle fibre è stata valutata considerando un sistema di riferimento solidale con la tela: in tale sistema la tela è ferma e l'impasto vi arriva sopra con una velocità $\vec{V}_g - \vec{V}_t$, per cui le fibre tenderanno ad essere orientate secondo la direzione di tale velocità relativa.

Fig. 4



LEGENDA

V_g : velocità del getto

V_t : velocità della tela

V_{gt} : componente trasversale della velocità del getto

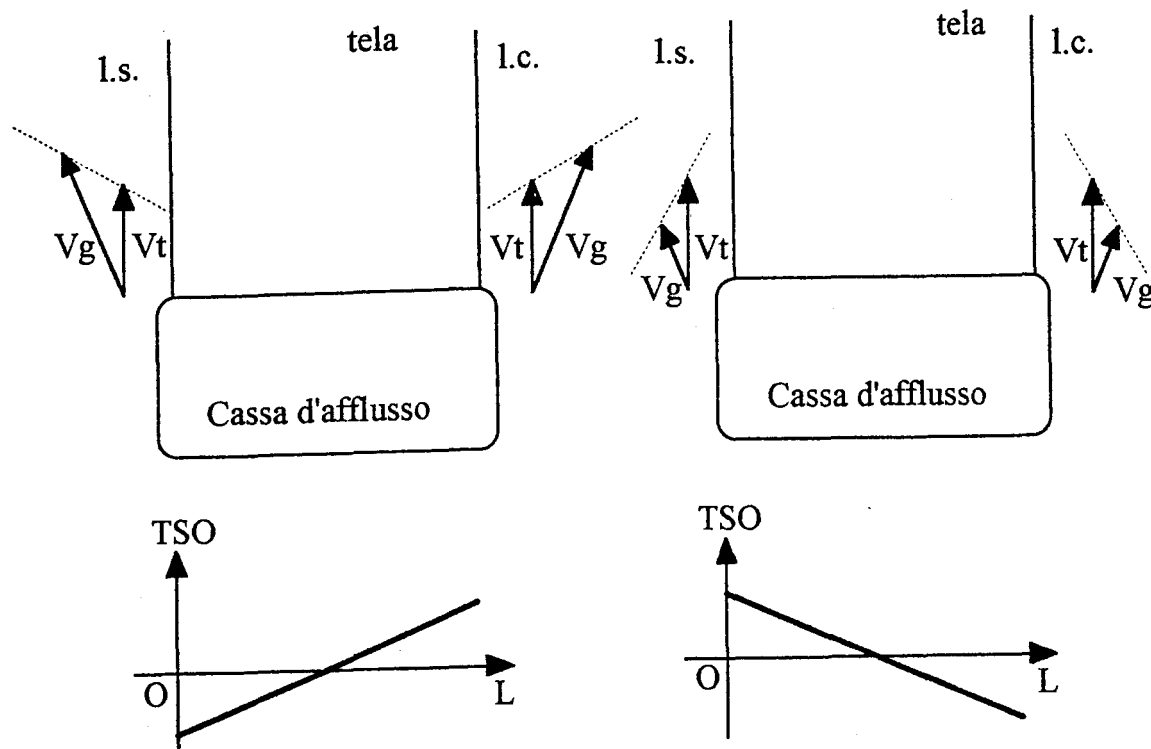
o.f.: direzione di orientamento delle fibre

d.m.: direzione macchina

Nella Fig. 5 è illustrato l'andamento del TSO nel caso in cui il getto presenti una componente di velocità trasversale nulla al centro e crescente verso i bordi, diretta verso l'esterno. Si può vedere che, in condizioni in cui la velocità del getto è maggiore di quella della tela, l'andamento del TSO risulta crescente andando dal lato servizi a quello comandi, passando da valori negativi a valori positivi (ricordare la convenzione sul valore del TSO); viceversa, in condizioni in cui la velocità del getto è inferiore a quella della tela, tale andamento tende a divenire decrescente.

Le irregolarità nel profilo del TSO risultano generate da un profilo non uniforme della velocità del getto, determinato da fattori quali la forma del collettore che immette l'impasto nella cassa d'afflusso, i "baffi" laterali che compensano l'attrito ai bordi della stessa e il sistema di regolazione del profilo trasversale della grammatura.

Fig. 5



Per assicurare una pressione costante, il collettore che immette l'impasto nella cassa d'afflusso ha una sezione decrescente in modo lineare dall'entrata all'uscita poiché la sua portata deve diminuire a mano, a mano che una frazione sempre maggiore di impasto è già entrata nella cassa d'afflusso stessa. Però, per compensare le perdite di carico dovute all'attrito, l'andamento della sezione del collettore in funzione della distanza dalla bocca di entrata dovrebbe essere più complesso di un semplice andamento lineare ed ottenere la forma necessaria non è costruttivamente facile. Inoltre, tale forma risulterebbe adatta solo per una determinata portata: cambiando portata, si dovrebbe dare al collettore una forma differente. In altre parole, tutto quello che si può ottenere è un compromesso che non assicura all'impasto una pressione e quindi una velocità di uscita costante su tutto il formato.

I "baffi" laterali (due spillamenti dell'impasto posti in prossimità del labbro, uno per lato) sono spesso presenti nelle casse d'afflusso allo scopo di compensare la diminuzione della grammatura ai bordi determinata dall'attrito con le pareti laterali della cassa d'afflusso stessa; tale correzione è ottenuta richiamando impasto dalle zone centrali verso i bordi, inducendo però nell'impasto stesso delle componenti trasversali di velocità dirette verso l'esterno.

La regolazione del profilo trasversale della grammatura è generalmente ottenuta variando localmente l'apertura del labbro: queste differenze di apertura fra zone contigue determinano però variazioni locali nella velocità del getto, nonché la formazione di correnti e, quindi, di componenti di velocità trasversali. In altre parole, la ricerca di un profilo di grammatura costante finisce col provocare una notevole mancanza di uniformità nella direzione di orientamento delle fibre, e quindi nelle proprietà elastiche locali del foglio, con conseguenze negative sulla planarità dello stesso.

I problemi descritti in precedenza, sono stati recentemente risolti con l'introduzione della nuova generazione di casse d'afflusso: le casse d'afflusso a diluizione. Innanzi tutto esse non prevedono un collettore: l'impasto è inviato alla cassa d'afflusso per mezzo di una serie di tubazioni gemelle; inoltre, la regolazione del profilo trasversale di grammatura è ottenuta tramite diluizione dell'impasto, senza variazioni nella sezione della bocca di uscita. Con queste casse d'afflusso è possibile ottenere un profilo del TSO molto più uniforme rispetto alle casse d'afflusso idrauliche e a cuscino d'aria.

Un foglio di carta le cui superfici abbiano proprietà tra loro differenti (soggetto quindi al fenomeno del doppio viso) presenta, in generale, una tendenza all'imbarcamento; inoltre, se la direzione di massima elasticità non coincide con quella di macchina, oltre all'imbarcamento, il foglio presenta pure la tendenza ad attorcigliarsi: lo strumento ad ultrasuoni può fornire preziose informazioni riguardo a questi comportamenti dannosi per la macchinabilità, in particolare permettendo di controllare che il TSO della carta rimanga sempre all'interno di un intervallo di accettabilità. A questo proposito, si può dire che tutti i tipi di carta,

eccetto probabilmente quella per sacchi, dovrebbero avere un profilo del TSO con valori compresi fra -5° e $+5^\circ$ e con valore medio pari a 0° (l'elasticità massima si ha in direzione macchina); un valore medio diverso da 0° (con una tolleranza di 0.5°) indica infatti che la cassa d'afflusso non è correttamente bilanciata. Il TSO della carta per fotocopiatrici e stampanti laser dovrebbe rimanere entro un intervallo ancora più ristretto ($\pm 2.5^\circ - 3^\circ$).

Anche la stabilità dimensionale della carta, in particolare la sua proprietà di espandersi o ritirarsi in seguito a variazioni nel contenuto di umidità, è legata al TSO: diverse prove sperimentali hanno mostrato infatti come la direzione in cui l'espansione o la contrazione è massima, sia perpendicolare a quella della massima elasticità; del resto questo comportamento è prevedibile anche da un punto di vista teorico: infatti, la capacità di rigonfiamento della parete delle fibre in seguito all'assorbimento di acqua è notevolmente superiore in direzione trasversale rispetto a quella longitudinale, anche di un fattore 20; poiché la direzione di massima elasticità praticamente coincide con quella lungo la quale è orientata la maggioranza delle fibre, è naturale aspettarsi lungo di essa la massima stabilità dimensionale ed in direzione contraria quella minima.

È infine importante precisare che l'angolo TSO e l'orientamento delle fibre non sono proprio la stessa cosa. L'orientamento dell'elasticità è, infatti, una proprietà composita, della quale l'orientamento delle fibre rappresenta una componente, essendo le altre determinate dalle tensioni e dalle deformazioni elastiche interne al foglio, prodotte sia nella sezione presse, che in seccheria. Comunque, in una carta che, dopo il processo di produzione, è stata riumidificata e poi lasciata asciugare liberamente, l'orientamento delle fibre e l'angolo TSO coincidono (fatto che non accade, ad esempio, nella carta patinata).

2.5 L'indice del modulo di elasticità TSI

Il significato del modulo di elasticità, o modulo di Young, è già stato descritto in modo approfondito in precedenza: sostanzialmente si tratta di un coefficiente caratteristico del materiale che esprime la rigidità specifica dello stesso, cioè la resistenza che riesce ad opporre ad una forza di trazione; tanto maggiore è il modulo di elasticità, tanto minore è l'allungamento a parità di forza di trazione.

È opportuno sottolineare che lo strumento ad ultrasuoni descritto in questa tesi, non misura direttamente il modulo di elasticità; un modo per effettuare la misura diretta del TSI è quello di costruire il diagramma allungamento relativo – sforzo di una provetta di carta per mezzo di un dinamometro, strumento tipicamente utilizzato per effettuare la misura della resistenza alla trazione della carta e della sua lunghezza di rottura: il modulo di elasticità coincide con il coefficiente angolare del tratto lineare iniziale della curva ottenuta. Nei due grafici seguenti sono rappresentati i risultati ottenuti con uno strumento ad ultrasuoni in funzione

di quelli ricavati, sullo stesso campione, tramite il metodo diretto descritto in precedenza.

Fig. 6

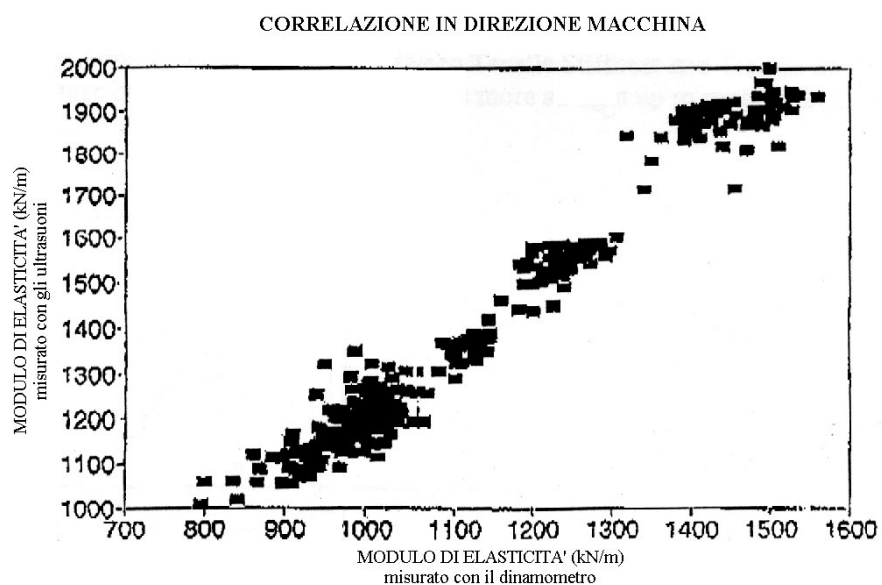
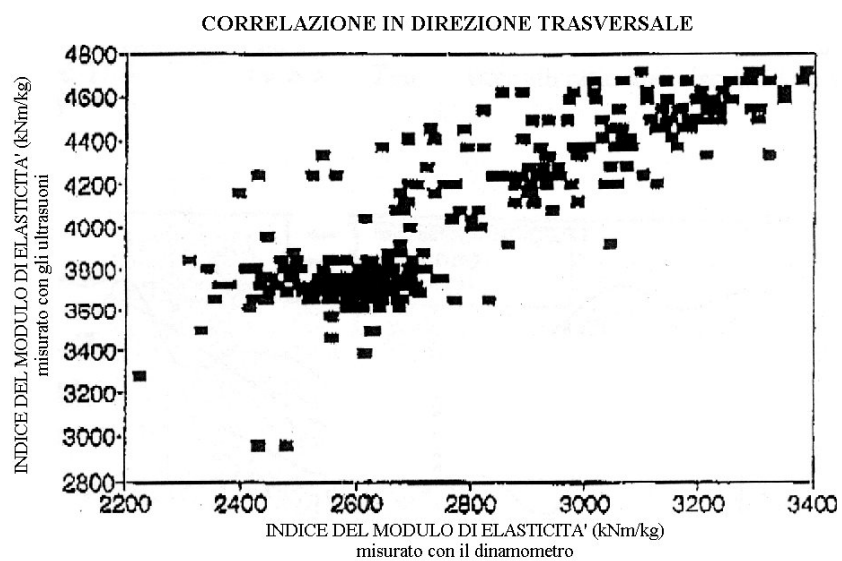


Fig.



Si può osservare come la correlazione sia ottima lungo la direzione macchina e buona lungo la direzione trasversale; dalle curve di correlazione si può ricavare che il coefficiente K nella $E' = K \cdot V^2$, la relazione che lega il TSI alla velocità di propagazione degli ultrasuoni, vale all'incirca 1.2 in direzione macchina e 1.5 in direzione trasversale.

Detto che i valori del TSI_{MAX} e del TSI_{MIN} sono quelli che meglio rappresentano le proprietà elastiche intrinseche della carta in quanto non sono legati a nessuna direzione particolare e che comunque si discostano, in generale, molto poco rispettivamente dai valori del TSI_{MD} e del TSI_{CD} , si può passare a descrivere in modo più approfondito le informazioni che si possono trarre da queste ultime due grandezze, certamente più significative.

2.5.1 Il TSI in direzione macchina

Varie prove effettuate in diverse cartiere hanno mostrato una correlazione fra l'indice di elasticità lungo la direzione macchina (TSI_{MD}) ed alcune caratteristiche meccaniche della carta, quali la resistenza alla compressione in piano (descritta nel prossimo capitolo) e la resistenza allo scoppio, anche se tali correlazioni sono state spesso messe in discussione a causa della dispersione dei risultati nei metodi di misura classici; tali caratteristiche sono essenziali per la carta utilizzata per la costruzione del cartone ondulato, per cui appare probabile che il TSI_{MD} possa fornire importanti informazioni riguardo al comportamento finale delle scatole di cartone finite.

Inoltre, il TSI_{MD} è una proprietà che può essere direttamente collegata a molti dei problemi di macchinabilità che oggi si manifestano nelle macchine da carta e nei successivi processi di trasformazione. L'andamento dei valori del TSI_{MD} lungo il profilo trasversale deve essere il più costante possibile, per assicurare proprietà di elasticità uniformi alla carta: da prove effettuate, si è visto che a seconda del tipo di carta, sono ammesse variazioni comprese fra un 5% e un 10%. In particolare, una carta fortemente direzionale come quella dei quotidiani, non può presentare variazioni più grandi del 5%, in modo da evitare bordi lunghi, formazione di grinze, increspature e quindi rotture in macchina continua o in macchina da stampa.

I fattori che influenzano l'indice di elasticità in direzione macchina sono:

- **La raffinazione:** in generale, aumentando il grado di raffinazione, aumenta la capacità di legame delle fibre (fibrillazione della parete cellulare) e la flessibilità delle stesse; di conseguenza risultano aumentate quasi tutte le caratteristiche meccaniche del foglio (resistenza alla trazione, allo scoppio, alle pieghe) eccettuata la resistenza alla lacerazione;
- **Le condizioni della zona presse** (pressione nel nip, andamento del drenaggio,

salute dei feltri, tiro fra le varie presse, ecc.): la pressatura ad umido della carta, assieme alla disidratazione del foglio, ne realizza il compattamento; aumentando la pressione che si sviluppa nel nip, si favorisce la distensione delle fibre, il loro allineamento ed avvicinamento, determinando una maggiore area di legame, con influenze positive sulle caratteristiche meccaniche; una pressione idraulica nel foglio troppo elevata genera però un flusso di acqua intenso che danneggia la formazione e indebolisce la struttura fibrosa, fino anche a provocare dei franamenti (rottture). Un feltro intasato e mal condizionato ha una capacità di drenaggio decisamente inferiore al normale: di conseguenza, a parità di pressione nel nip, si sviluppano nel foglio degli sforzi più intensi, che ne provocano il danneggiamento e una diminuzione delle caratteristiche meccaniche.

Una volta uscito dal nip, il foglio riacquista una parte dello spessore perduto dato che le fibre tendono a riacquistare le dimensioni iniziali; l'entità di questo rilassamento della struttura, che ha influenza sul drenaggio di acqua nell'eventuale successivo nip ed, in ogni caso, sulle proprietà finali del foglio, è condizionato, oltre che dalla configurazione della zona presse, anche dal tiro fra le varie sezioni, che agisce come un impedimento al rilassamento in direzione longitudinale.

- **Le condizioni delle casse a vuoto:** il valore di vuoto determina la quantità di acqua drenata dal foglio, nonché la pressione che agisce sul foglio dall'esterno; alcune prove hanno mostrato un leggero aumento nella resistenza allo scoppio utilizzando valori di vuoto più elevati;
- **Il rapporto di velocità getto – tela:** tale rapporto influenza la direzione lungo la quale si dispongono prevalentemente le fibre e la direzionalità (grado di anisotropia) della carta; è naturale aspettarsi valori del TSI_{MD} e delle caratteristiche meccaniche misurate lungo la direzione di macchina tanto più elevati, quanto maggiore è la percentuale di fibre che si dispongono lungo la stessa.

2.5.2 Il TSI in direzione trasversale

L'indice di elasticità in direzione trasversale (TSI_{CD}) può essere collegato alle proprietà di resistenza della carta lungo la direzione trasversale, nonché alle sue proprietà di espansione e ritiro in seguito a variazioni di umidità. In particolare, è stata trovata una buona correlazione con la resistenza alla compressione trasversale a breve distanza.

Un tipico profilo del TSI_{CD} presenta valori ai bordi sensibilmente più bassi di quelli al centro: in genere si ha una differenza fra valore massimo e valore minimo dell'ordine del 20%, mentre gli altri parametri, grammatura, spessore e contenuto di umidità, sono mantenuti costanti entro un intervallo di $\pm 1\% - 2\%$. Variazioni maggiori si possono osservare nelle carte per quotidiani, mentre le carte per il retro delle etichette, notevolmente raffinate e con una bassa permeabilità

all'aria, presentano un profilo del TSI_{CD} piatto.

Le cause che determinano un tale profilo vanno essenzialmente ricercate nel processo di essiccamento in seccheria. L'asciugamento della carta con il calore può essere suddiviso in due fasi, entrambe caratterizzate da un restringimento del foglio, indotto però da differenti meccanismi; nella prima fase, viene eliminata l'acqua libera che è ancora presente fra le fibre dopo la pressatura ad umido: la tensione superficiale determina un'attrazione reciproca fra le fibre, che scorrono le une sulle altre, si avvicinano, provocando un primo restringimento del foglio, e cominciano a formare i primi legami; nella seconda fase, inizia ad evaporare l'acqua contenuta nelle fibre, che ne aveva causato il rigonfiamento: di conseguenza, le fibre si contraggono e provocano un ulteriore restringimento del foglio. La contrazione delle fibre in seguito all'essiccamento non è un fatto positivo in quanto essa è accompagnata anche da un'inflessione delle stesse, che ne diminuisce le possibilità di legame: come vedremo meglio nel prossimo capitolo, l'ideale sarebbe avere un supporto costituito da fibre tutte quante ben distese, in quanto le inflessioni nella pareti, oltre ad aumentare la distanza tra le fibre, impediscono di utilizzare appieno la loro resistenza intrinseca.

In seccheria, il restringimento del foglio in senso macchina e in senso trasversale è regolato rispettivamente dal tiro longitudinale, ottenuto impostando velocità differenti fra le batterie di cilindri essiccatori, e dalla pressione delle tele essiccatrici, che premono sul foglio, mantenendolo aderente alle superfici dei cilindri; però, mentre il vincolo longitudinale è continuo, quello trasversale è intermittente, in quanto nel passaggio da un cilindro essiccatore all'altro, il foglio è libero di restringersi trasversalmente.

In generale, minore è il restringimento permesso durante l'asciugamento, minori sono le variazioni dimensionali della carta per cambiamento di umidità mentre maggiore è la resistenza alla trazione. Da sottolineare che un tiro molto elevato, se da una parte riduce il restringimento longitudinale, dall'altra aumenta quello trasversale; analogamente, tele essiccatrici molto tirate, contribuiscono a ridurre il ritiro trasversale ma sembrano avere riflessi negativi su quello in direzione macchina.

A causa della maggiore ventilazione, i bordi del nastro di carta che attraversa la seccheria si asciugano prima delle regioni centrali: perciò essi si restringono in senso trasversale per primi, venendo così ad esercitare una tensione sulla zona centrale più umida; quando tale zona si asciuga, subisce allora un minor restringimento, rimanendo soggetta ad una tensione maggiore; in altre parole, la tensione trasversale ai bordi risulta minore di quella al centro, determinando una andamento sul TSI_{CD} analogo a quello osservato; infatti, una minore tensione lungo una certa direzione significa anche un minore modulo di elasticità; a questo proposito, basti pensare al caso di una corda da chitarra tenuta tesa alle estremità: maggiore è la tensione a cui è mantenuta la corda, minore è il suo spostamento dalla posizione di equilibrio, a parità di forza agente sulla stessa.

Dato che ai bordi le fibre dirette in senso trasversale hanno potuto ritirarsi

maggiormente, la loro capacità di legame risulterà diminuita, il che contribuisce a rendere meno importanti gli effetti dovuti alla presenza di una maggiore frazione di fibre orientate in senso trasversale.

Infine, poiché il tiro longitudinale è costante su tutto il formato, sui bordi, i quali si sono asciugati per primi, si ha uno stress maggiore che provoca effetti di snervamento e di indebolimento della struttura, con ripercussioni negative sia sul TSI_{MD} che su TSI_{CD} .

Altri fattori che influenzano direttamente il TSI_{CD} sono la raffinazione e il rapporto di velocità getto – tela, per le stesse ragioni descritte nel paragrafo precedente.

Concludendo, è opportuno ribadire che l'utilità della conoscenza del profilo del TSI_{MD} e del TSI_{CD} consiste non solo nella valutazione delle caratteristiche meccaniche della carta, ma anche nella rilevazione di una distribuzione non uniforme delle tensioni elastiche sul foglio e quindi nella previsione di difetti quali l'imbarcamento e l'increspamento, i quali non si manifestano immediatamente, ma solo dopo variazioni di umidità (infatti, come è stato detto in precedenza, le zone che si sono asciugate per prime e sulle quali le tensioni sono minori, si sono ritirate maggiormente rispetto a quelle adiacenti, per cui manifestano una minore stabilità dimensionale all'assorbimento di acqua).

2.5.3 Il rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD}

Il rapporto fra l'indice di elasticità lungo la direzione macchina e quello lungo la direzione longitudinale indica il grado di anisotropia della carta, cioè la differenza nelle sue proprietà elastiche, e quindi meccaniche, lungo le varie direzioni, il quale determina il comportamento della stessa. Tale grandezza è influenzata soprattutto dalla differenza fra la velocità del getto V_g e quella della tela V_t : la regola generalmente accettata recita che se $V_g > V_t$ ($V_g/V_t > 1$) si ottiene una carta più quadrata, cioè più isotropa, per cui il rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD} è vicino all'unità; se invece $V_t > V_g$ (e quindi $V_g/V_t < 1$), si ottiene una carta meno quadrata, con spiccate proprietà direzionali, per cui il rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD} è sensibilmente maggiore dell'unità. In realtà, l'andamento del rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD} in funzione del rapporto V_g/V_t non è rappresentato da una curva monotona, come sembrerebbe suggerire tale regola, bensì da una curva dotata di un minimo: in corrispondenza di questo punto di equilibrio, caratterizzato da un valore V_g/V_t prossimo all'unità, si ha il minimo valore del rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD} e quindi la massima isotropia della carta; discostandosi da questo punto di equilibrio, sia in un senso che nell'altro, il TSI_{MD}/TSI_{CD} comincia ad aumentare e quindi la carta a diventare maggiormente anisotropa.

In generale, la formazione migliore e la minore tendenza all'imbarcamento sono ottenute con una differenza di velocità nulla ($V_g/V_t = 1$); spesso però si ri-

vela necessario impostare tale differenza ad un valore diverso da zero, per ottenere le caratteristiche meccaniche necessarie ed una migliore macchinabilità. I valori del TSI_{MD}/TSI_{CD} raccomandati per i vari tipi di carta sono i seguenti:

- carta per forocopiatrici e stampanti laser: 1.8 – 2.3
- carta per quotidiani: 3.0 – 5.5
- liner (caratteristiche di scoppio): 2.0 – 2.5
- liner (caratteristiche di trazione): 3.0 – 3.5
- cartone: 2.0 – 2.5
- carta per sacchi: 1.0 – 1.3

Si può quindi affermare che nella produzione della carta per quotidiani e di liner (soprattutto se si vogliono privilegiare le caratteristiche di resistenza alla trazione) si lavorerà lontano dal punto di equilibrio, mentre nella produzione della carta per sacchi si cercherà di lavorare in prossimità di tale punto.

Non è possibile identificare univocamente il valore del rapporto V_g/V_t corrispondente al punto di equilibrio, in quanto, nell'esecuzione di prove con carte e macchine continue differenti, tale valore ha presentato una dispersione notevole, risultando a volte maggiore e a volte minore dell'unità. Un contributo determinante a tale dispersione può essere determinato dal fatto che la velocità del getto non viene misurata direttamente, bensì viene ricavata dalla misura della pressione nella cassa d'afflusso, utilizzando l'equazione di Bernoulli, secondo la quale $V_g = K \cdot \sqrt{2gH}$, dove K è un coefficiente prossimo all'unità legato alle perdite di carico che si determinano nella cassa d'afflusso stessa, g è l'accelerazione di gravità ed H è il battente totale nella cassa d'afflusso. Questo valore, ricavato per via indiretta, deve essere considerato come un'indicazione della velocità del getto, che si può discostare anche in modo sensibile dal valore vero.

È infine opportuno sottolineare che la grandezza più corretta per regolare il grado di anisotropia della carta non è il rapporto fra la velocità del getto e quella della tela, ma la loro differenza; infatti ciò che influenza la disposizione delle fibre è certamente la velocità relativa V_r del getto rispetto alla tela, della quale $V_g - V_t$ è una misura diretta ($V_r = V_g - V_t$); invece V_g/V_t permette di ricavare V_r solo in funzione di V_t : $V_r = (V_g/V_t - 1) \cdot V_t$. In altre parole, su una macchina continua soggetta a cambi di produzione che determinino differenti velocità di esercizio, uno stesso valore di V_g/V_t può produrre situazioni differenti. A questo punto, può essere utile un esempio numerico: supponiamo che sia stato impostato un rapporto $V_g/V_t = 1.05$; se $V_t = 700$ m/min (per cui $V_g = 735$ m/min), si ha $V_r = (1.05 - 1) \cdot 700 = 35$ m/min; se invece $V_t = 400$ m/min (per cui $V_g = 420$ m/min), si ha $V_r = (1.05 - 1) \cdot 400 = 20$ m/min. Naturalmente il problema è meno importante se la velocità della continua è all'incirca sempre la stessa.

3. Caratteristiche della carta per il cartone ondulato

3.1 Il cartone ondulato

3.1.1 Introduzione

Il cartone ondulato è un materiale rigido composito, ottenuto dall'accoppiamento di tre o più fogli di carta, ad alcuni dei quali è stata precedentemente data una forma ondulata.

Il primo impiego della carta ondulata, priva di copertine, si ha negli Stati Uniti nel 1871: essa veniva utilizzata, in sostituzione della paglia e dei trucioli, come protezione di materiali fragili quali le bottiglie. Nel 1874 si cominciò ad incollare alla carta ondulata una copertina liscia, ottenendo un prodotto che viene tutt'oggi utilizzato (*caneté*) per avvolgere e proteggere oggetti di forma strana. Un anno dopo si ebbe la felice intuizione di aggiungere una seconda copertina, ottenendo così un prodotto rigido, per mezzo del quale potevano essere prodotti dei contenitori. Da allora l'impiego del cartone ondulato ha conosciuto una vastissima diffusione tanto che attualmente la stragrande maggioranza degli imballaggi da trasporto sono fabbricati con esso; infatti con il cartone ondulato si ottengono contenitori leggeri, facili da maneggiare, rigidi ma allo stesso tempo capaci di assorbire gli urti (grazie all'azione ammortizzatrice degli strati ondulati), che possono essere aperti, riempiti, richiusi e spostati meccanicamente.

3.1.2 Conformazione del cartone ondulato

Il cartone ondulato viene prodotto in Italia essenzialmente in due configurazioni:

- **cartone semplice** (o ad **onda semplice** o **ad una sola onda**): è costituito da due superfici di carta piane, distanziate tra di loro da uno strato di carta ondulata, al quale sono incollate;
- **cartone triplo** (o a **doppia onda** o **doppio – doppio**): è anch'esso costituito da due superfici piane esterne, al cui interno si trovano però due strati di carta ondulata, collegati fra loro da una terza superficie piana.

Le carte utilizzate come superfici esterne sono dette **copertine**: in base alla posizione che esse assumono nell'imballaggio, si distinguerà fra copertina esterna e copertina interna; questa distinzione ha la sua importanza pratica dato che sovente vengono utilizzati tipi di carta differente per realizzarle: in particolare, la

copertina esterna, visibile, dovrà, in generale, presentare buone caratteristiche di apparenza e magari di stampabilità.

Le carte piane intermedie, che hanno il compito di saldare fra loro gli starti ondulati, prendono il nome di **fogli tesi**.

Infine, le carte ondulate che distanziano le copertine l'una dall'altra, prendono il nome di **ondulazioni** o **onde**.

3.1.3 Le copertine

In base ai differenti tipi di sollecitazione ai quali sono sottoposti gli imballaggi, si possono delineare le caratteristiche che devono essere possedute dalla carta utilizzata per la produzione delle copertine:

- nelle fasi di movimentazione e stoccaggio, i contenitori sono sottoposti ad urti e pressioni sia dall'esterno, che dall'interno (determinati dal prodotto contenuto), per cui risultano necessarie caratteristiche di resistenza allo scoppio, alla perforazione e alla lacerazione;
- l'accatastamento degli imballaggi l'uno sull'altro determina notevoli sollecitazioni su quelli che stanno alla base, per cui risultano necessarie buone caratteristiche di rigidità e di resistenza alla compressione verticale;
- le variazioni climatiche e ambientali a cui sono soggetti gli imballaggi determinano variazioni nel contenuto di umidità della carta che incidono sulle prestazioni degli stessi, per cui risulta necessaria una buona resistenza all'assorbimento di umidità;
- nei sistemi automatici di assemblaggio delle scatole, è diffuso l'utilizzo di ventose, per cui risulta necessario un grado di permeabilità all'aria non troppo elevato;
- negli imballaggi che devono, oltre che trasportare, anche identificare e reclamizzare un prodotto, la carta utilizzata per la copertina esterna deve avere buone caratteristiche di stampabilità.

3.1.4 Le ondulazioni

Le caratteristiche che la carta per onda deve possedere in base ai compiti che deve svolgere ed alle sollecitazioni alle quali è sottoposta sono le seguenti:

- come detto in precedenza, le ondulazioni hanno il compito di distanziare fra loro le copertine, determinando lo spessore del cartone; affinché tale spessore rimanga inalterato nel tempo il più a lungo possibile, è necessario che la carta per onda abbia buone caratteristiche di rigidità e di resistenza alla compressione in piano;
- l'accatastamento degli imballaggi richiede, anche alla carta per onda, buone caratteristiche di resistenza alla compressione verticale; si può anzi dire che il

contributo delle ondulazioni alla resistenza all'accatastamento dell'imballaggio sia essenziale, dato che ogni onda agisce come un pilastro e che il numero di onde è elevato;

È opportuno ribadire che la struttura delle ondulazioni consente di sfruttare al meglio le caratteristiche di resistenza delle carte impiegate, dato che ogni onda assume il ruolo di una nervatura (effetto colonna); inoltre, la forma delle ondulazioni assicura una certa elasticità che consente di ammortizzare i colpi ricevuti, proteggendo in questo modo il prodotto contenuto.

3.1.5 Tipi di onda

La forma ideale delle ondulazioni sarebbe quella a **V**, dato che in questo modo si otterrebbe il miglior compromesso fra la quantità di carta consumata e le caratteristiche di resistenza; la tecnologia non consente però, fino ad ora, la realizzazione di angoli acuti o retti per cui i profili delle onde, sagomati dai denti di ingranaggi meccanici, sono caratterizzati da un arrotondamento del vertice della **V**; la forma delle ondulazioni deve anche consentire l'applicazione sul loro vertice della quantità di collante sufficiente ad assicurare la perfetta adesione delle stesse alle copertine.

Il profilo delle ondulazioni è caratterizzato da quattro parametri:

- **l'altezza**: è la distanza fra la sommità e la cavità dell'onda; la somma totale delle altezze delle onde, degli spessori delle copertine e degli spessori dei fogli tesi, determina lo spessore del cartone;
- **il passo**: è la distanza fra le sommità di due onde contigue;
- **il numero**: è la quantità di ondulazioni contenute in un metro lineare di cartone;
- **il coefficiente di ondulazione**: è il rapporto che intercorre fra la lunghezza della carta da ondulare impiegata per ottenere la lunghezza della copertina e la lunghezza della copertina stessa; tale coefficiente indica il consumo di carta da ondulare.

I principali tipi di profili utilizzati sono i seguenti:

- **onda alta (A)**: ha un'altezza di circa 4.5 mm, un passo di circa 8.8 mm, un numero di circa 113 ed un coefficiente di ondulazione di circa 1.5; rispetto agli altri tipi di onda, ha una maggiore resistenza alla compressione verticale, un maggiore potere ammortizzante ed una minore resistenza alla compressione in piano; presenta una non buona stampabilità;
- **onda media (C)**: ha un'altezza di circa 3.6 mm, un passo di circa 7.6 mm, un numero di circa 128 ed un coefficiente di ondulazione di circa 1.43; rappresenta un ottimo compromesso tra consumo di carta (prezzo) e qualità delle prestazioni di resistenza;
- **onda bassa (B)**: ha un'altezza di circa 2.4 mm, un passo di circa 6.4 mm, un numero di circa 155 ed un coefficiente di ondulazione di circa 1.34; le caratteri-

stiche di resistenza alla compressione in piano e di stampabilità sono buone, mentre quelle di resistenza alla compressione in colonna non sono favorite dall'altezza ridotta.

3.2 La resistenza alla compressione

Nei paragrafi precedenti si è visto come la carta utilizzata per il cartone ondulato debba essere dotata, in generale, di buone caratteristiche meccaniche per opporsi alle sollecitazioni a cui sono sottoposti gli imballaggi. Poiché questo lavoro di tesi si occupa della carta per le ondulazioni, la cui caratteristica essenziale è la resistenza alla compressione, nei prossimi paragrafi verranno approfonditi gli aspetti teorici ad essa legati.

3.2.1 Influenze dalle dimensioni relative della struttura.

Gli imballaggi, soggetti alle varie situazioni di carico quali lo stoccaggio e la pressione interna generata dal contenuto, sono sottoposti a sforzi di trazione e di compressione. Quando avviene un cedimento, questo è determinato soprattutto dalla compressione, anche se gli sforzi di trazione possono essere più grandi. Ciò è determinato dal fatto che la carta ed il cartone hanno caratteristiche di resistenza alla compressione inferiori di un 30% - 40% rispetto a quelle alla trazione.

Il cedimento dovuto alla compressione, al contrario di quello determinato dalla trazione, dipende dalle dimensioni relative della struttura. Nella Fig. 8 è rappresentato lo sforzo massimo di compressione che una striscia di carta o di cartone (di lunghezza L , larghezza B e spessore H) può sopportare in funzione del rapporto di esilità $S = 2\sqrt{3} \frac{L}{H} = \frac{3.46L}{H}$. L'esilità esprime il "grado di debolezza" del materiale che viene utilizzato. Un valore basso di esilità esprime dunque un'alta resistenza alla compressione.

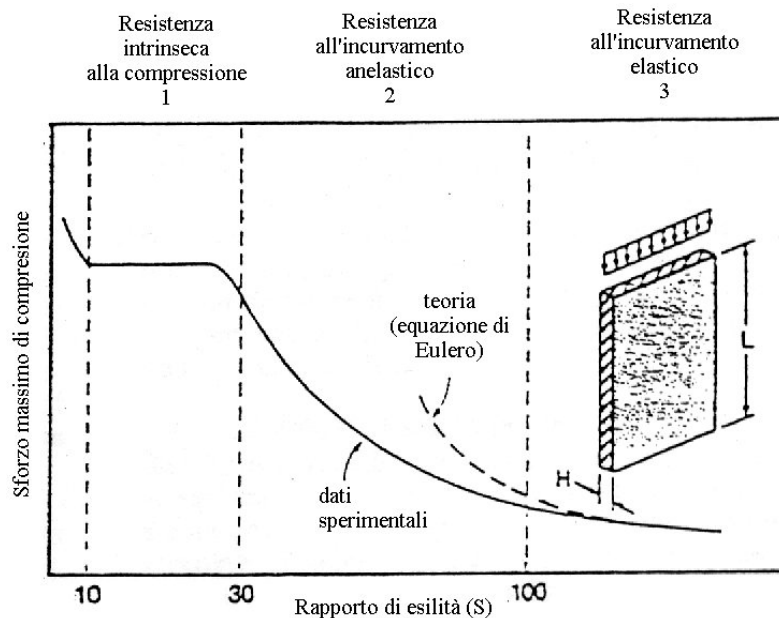
In base al valore di tale rapporto, si possono identificare tre regioni:

Regione 1 (basso rapporto di esilità): $0 < S < 30$

Regione 2 (medio rapporto di esilità): $30 < S < 100$

Regione 3 (alto rapporto di esilità): $100 < S$

Fig. 8



Nella regione 3 il campione diviene instabile e si deforma molto prima che venga raggiunto il limite della resistenza intrinseca alla compressione del supporto fibroso: il cedimento avviene a causa di una delle deformazioni che si vengono a sviluppare nel foglio, il quale, piegandosi all'infuori elasticamente, trova una configurazione di equilibrio alternativa che minimizza la sua energia potenziale; basti pensare a ciò che succede quando si spingono l'uno verso l'altro i bordi di un foglio da fotocopie (il quale presenta un rapporto di esilità non inferiore a 6000): è sufficiente una piccola forza perché il foglio si incurvi, presentando così una resistenza minima; lo sforzo massimo $F_{\max}$ che il campione può sopportare nella regione 3 può essere descritto dall'equazione di Eulero
$$F_{\max} = \frac{K\pi^2 EH^2}{L^2}$$

dove E è il modulo di elasticità e K una costante che dipende dalle condizioni al contorno e che normalmente ha un valore pari all'incirca a 4; tale sforzo massimo risulta quindi una funzione della geometria e della rigidità (l'inverso della esilità) del campione più che della resistenza intrinseca della carta, e si parlerà di resistenza all'inflessione elastica.

Le stesse considerazioni rimangono valide per il comportamento osservato nella regione 2: qui si parlerà però di resistenza all'inflessione anelastica (o plastica) dato che la struttura non riprende la forma originale quando il carico viene rimosso. In questa regione, per rappresentare correttamente i risultati sperimentali, l'equazione di Eulero deve essere modificata per tenere conto degli sforzi di taglio a cui risulta soggetta la struttura.

Come si può osservare nel grafico, nelle regioni 2 e 3 lo sforzo massimo sopportato dal campione aumenta in modo monotono con il diminuire del rapporto di esilità.

Quando tale rapporto diviene sufficientemente basso ($S < 30$), si entra nella regione 1: qui il massimo sforzo di compressione sopportato dal campione non dipende più dal rapporto di esilità (la curva diviene una retta orizzontale) in quanto entra in gioco la resistenza intrinseca della carta alla compressione; perciò, non si parlerà più di resistenza all'inflessione, ma di resistenza intrinseca alla compressione. Per avere un'idea delle dimensioni in gioco, si tenga conto che, per misurare la resistenza intrinseca alla compressione di un campione di carta di spessore 0.1 mm, è necessario applicare il carico di compressione a due zone distanti l'una dall'altra non più di 1 mm. Nella regione 1, il cedimento del campione è caratterizzato da una deformazione ben definita, che si viene a determinare, una volta raggiunto il massimo carico attraverso tutto lo spessore. Al contrario di quanto accade sotto trazione, il cedimento sotto compressione non genera una rottura del foglio, il quale rimane invece tutto intero; sebbene il campione non possa più sopportare un carico di compressione elevato, la sua resistenza alla trazione ammonta ancora ad un 80% del valore originale.

La resistenza alla compressione è influenzata da molte variabili di processo (la natura dell'impasto fibroso, il processo di spappolamento, la densità del foglio, ecc.), però risulta indipendente tanto dallo spessore del campione, quanto dalla lunghezza delle fibre.

Concludendo, si può dire che il cedimento della carta e del cartone sottoposti a sforzi di compressione sia determinato da due tipi di meccanismi: l'inflessione elastica o anelastica del campione da una parte e il cedimento della struttura fibrosa dall'altra; quest'ultimo meccanismo è meno frequente anche se può diventare importante nel caso di strutture vincolate a rimanere su di un piano durante il carico di compressione.

3.2.2 L'equazione generale del modulo di elasticità

Il modulo elastico della carta è un parametro essenziale che determina la resistenza alla compressione della stessa. L'equazione generale del modulo di elasticità è rappresentata dalla

$$E_p = \frac{1}{3} E_f \left\{ 1 - \left[\frac{W(N_k + 1)}{L \cdot RBA} \right] \left[\frac{E_f}{2G_f} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

dove:

E_f è il modulo elastico medio delle fibre, nella valutazione del quale si tiene conto del fatto che le fibre possono essere dritte, microcompresse o leggermente incurvate fuori dal foglio; in altre parole è una funzione della struttura della parete fibrosa, in particolare dell'orientamento delle microfibrille nei vari strati e dello spessore degli stessi;

G_f è il modulo di taglio delle fibre;

L è la lunghezza delle fibre;

W è il diametro delle fibre;

RBA rappresenta l'area relativa interessata dai legami;

N_k è il numero di piegature lungo la parete delle fibre, attraverso le quali non può essere trasmesso il carico assiale.

Dall'equazione sopra è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- il modulo di elasticità della fibre contribuisce in gran parte al modulo di elasticità del foglio;
- maggiore è l'area relativa di legame e minore è il numero di piegature nelle fibre, più resistente è il foglio. Vari studi hanno mostrato che le piegature delle fibre rappresentano il principale fattore responsabile di un basso modulo di elasticità del supporto. È stato calcolato che l'inflessione naturale delle fibre riduce la resistenza della carta anche di un 40% rispetto a quella determinata dalla resistenza intrinseca delle fibre;
- più lunghe sono le fibre e più resistente è il foglio;

Le caratteristiche di resistenza del foglio sono influenzate anche dalla distribuzione dei fini nello stesso: se i fini sono immobilizzati entro le fibre essi sono in grado di promuovere i legami inter fibra al contrario di quanto accade se invece riempiono semplicemente gli interstizi fra le fibre.

3.2.3 Modalità di cedimento della struttura fibrosa

Vari studi suggeriscono che il cedimento della struttura fibrosa in seguito ad uno sforzo di compressione sia il risultato di uno stato di carico reso instabile da due principali meccanismi: l'inflessione delle fibre, predominante nei fogli a bassa densità, e la dislocazione di taglio delle pareti delle fibre causata dal movimento delle microfibrille e predominante nei fogli ad alta densità. In entrambi i casi la dislocazione delle fibre aumenta con la compressione fino a che l'intero foglio diviene instabile e collassa: questa dislocazione macroscopica ha l'apparenza di uno slittamento di taglio, in cui si è verificata anche delaminazione.

La resistenza alla compressione appare più sensibile alle instabilità nella struttura rispetto a quella alla trazione. Di conseguenza, riducendo le instabilità delle microfibrille, in particolare il numero delle zone amorfe nella parete fibrosa e delle zone di confine fra aree interessate da legami e non, la resistenza alla

compressione dovrebbe risultare aumentata. Benefici vengono apportati anche da una migliore formazione (speratura) e dall'utilizzo di additivi che riempiano gli interstizi fra le fibre: ciò è in accordo con il fatto che additivi come l'amido aumentino la resistenza alla compressione più di quella alla trazione, senza modificare la densità apparente del foglio.

In generale, non sembra esistere una buona correlazione fra le caratteristiche di resistenza alla compressione e quelle di resistenza alla trazione della carta; come detto in precedenza, la resistenza alla compressione è soltanto un 30% di quella alla trazione, ed una volta che la struttura ha ceduto ad uno sforzo di compressione, mantiene ancora praticamente inalterata la capacità di opporsi ad uno sforzo di trazione. Inoltre, il rapporto fra le caratteristiche lungo la direzione macchina e lungo la direzione trasversale è maggiore nel caso della trazione (per il cartone, valori tipici sono compresi fra 1.5 e 3.2) rispetto a quello della compressione (si riscontrano valori compresi fra 1.4 e 2.0).

Un altro elemento che differenzia le due proprietà di resistenza è la presenza della lignina (che determina la resa dell'impasto fibroso): essa favorisce la resistenza alla compressione in quanto impedisce il movimento delle microfibrille sulla parete delle fibre, diminuendo la tendenza all'instabilità nella parete stessa; per lo stesso motivo la resistenza alla trazione ne risulta diminuita, in quanto la possibilità di movimento delle microfibrille avrebbe permesso una distribuzione uniforme dello sforzo.

Infine, cambiamenti nel contenuto di umidità del foglio influenzano maggiormente la resistenza alla compressione, la quale viene notevolmente ridotta da un elevato contenuto della stessa.

3.3 Prove di compressione sulla carta

Dopo aver illustrato gli aspetti teorici riguardo le caratteristiche di resistenza alla compressione della carta, nei prossimi paragrafi saranno descritte le modalità secondo le quali vengono eseguite le prove di laboratorio in grado di quantificarle. Le prove di cui ci occuperemo sono le seguenti:

- RCT (Ring Crush Test o prova di compressione ad anello): si comprime l'orlo di una provetta liscia, disposta verticalmente e ad anello;
- CCT (Corrugated Crush Test o prova di compressione a colonna delle onde): si comprime l'orlo di una provetta ondulata, disposta verticalmente;
- CMT (Concora Medium Test o prova di compressione in piano delle onde): la compressione viene applicata sulla provetta ondulata disposta in piano;
- SCT (Short-span Compression Test o prova di compressione a breve distanza): la compressione viene applicata ad una zona ristretta della provetta liscia, nel piano della stessa.

Nei primi tre tipi di prove si utilizza, come campione, una provetta rettango-

lare di carta di dimensioni 152.4 mm x 12.7 mm ottenuta con una fustella; la compressione è realizzata per mezzo di una pressa, costituita da due piastre, delle quali una fissa e l'altra mobile: la provetta viene posta fra le due piastre, dopo di che quella mobile comincia ad avanzare verso quella fissa, esercitando sulla provetta un carico crescente. Quando avviene il cedimento della provetta, il carico applicato diminuisce rapidamente: la resistenza alla compressione della provetta coincide con il carico massimo, esercitato su di essa al momento della rottura; le prove di compressione utilizzate nello studio qui descritto sono state eseguite con una pressa elettronica, dotata di cella di carico.

Per ottenere le ondulazioni sulle provette, si utilizza un ondulatore da laboratorio, dotato di due rulli ondulatori aventi il profilo dell'onda A. Tali rulli, premuti l'uno contro l'altro con una forza di 100 N (con una tolleranza di 10 N), sono mantenuti ad una temperatura di 177 °C (con una tolleranza di 5 °C). La funzione di questa temperatura elevata è essenziale affinché la provetta mantenga il profilo ondulato: è noto infatti il principio secondo il quale una struttura fibrosa (come il legno o la carta) possa assumere e conservare una forma diversa da quella originale se, prima di essere sottoposta ad una determinata pressione, viene riscaldata e umidificata.

Nella prova di SCT si utilizza una provetta rettangolare di lunghezza non inferiore a 70 mm e di larghezza pari a 15 mm, ricavata per mezzo di una taglierina; lo strumento che esegue la prova è una pressa un po' particolare che verrà descritta nel paragrafo dedicato a tale prova.

Prima di passare a descrivere in modo più approfondito le varie prove, è opportuno definire il significato di ripetibilità e di riproducibilità di una prova.

La ripetibilità si riferisce al confronto fra i risultati ottenuti nell'ambito di uno stesso laboratorio, sullo stesso materiale, dallo stesso operatore, con le stesse apparecchiature, nelle stesse condizioni ambientali; essa è definita come l'intervallo entro il quale sono contenute il 95% delle differenze fra due risultati ottenuti nello stesso laboratorio.

La riproducibilità si riferisce invece al confronto dei risultati ottenuti sullo stesso materiale da laboratori diversi; essa è definita come l'intervallo entro il quale sono contenute il 95% delle differenze fra due risultati ottenuti in laboratori differenti.

Per valutare la ripetibilità, si effettuano diverse misure sullo stesso campione, cercando di mantenere costanti tutte le condizioni, si calcolano le differenze fra le varie coppie di misure e si calcola infine il 2σ della distribuzione di tali differenze, che diviso per il valore medio delle misure e moltiplicato per 100, coincide con la ripetibilità espressa in percentuale.

La riproducibilità viene valutata in modo analogo: le differenze sono però calcolate fra coppie di misure prese in due laboratori differenti.

La riproducibilità è molto importante in quanto permette di valutare l'approssimazione con la quale un laboratorio può stabilire se i risultati ottenuti

sono conformi ad una specifica o ad un capitolato; le tolleranze stabilite in un capitolato devono infatti avere come punto di partenza la riproducibilità dei risultati nei laboratori del venditore e dell'acquirente.

3.3.1 La prova RCT

Come detto in precedenza, la provetta deve essere disposta ad anello: ciò è realizzato per mezzo di un supporto particolare, dotato di una fessura circolare, il cui spessore può essere variato in modo da potersi adattare a quello del campione introdotto in essa (comunque, deve essere da 1.5 a 1.75 volte maggiore di quello della provetta); la fessura è profonda 6.4 mm per cui la striscia di carta sporge da essa per circa 6.3 mm: questo valore determina il rapporto di esilità (la parte di striscia dentro la fessura è infatti vincolata a rimanere piana), che, considerando uno spessore di 0.1 mm – 0.2 mm proprio di grammature comprese fra i 100 g/m² e i 200 g/m², può essere valutato rispettivamente in 200 – 100 (3.46 x 6.3 : spessore); ricordando quanto detto in precedenza, tale valore è troppo elevato per poter permettere la misura della resistenza intrinseca della carta; questo è proprio il motivo per il quale si utilizza una striscia disposta ad anello: questa forma conferisce infatti alla provetta una notevole stabilità nei confronti della tendenza all'inflessione.

I limiti della prova RCT sono i seguenti:

- non è adatta per grammature pesanti: nel sagomare ad anello la provetta si possono formare degli spigoli che falsano il risultato; inoltre è difficile ottenere con la fustella un bordo non deformato;
- non è adatta per grammature leggere: nonostante la maggiore stabilità conferita dalla forma ad anello, nella provetta si manifestano più o meno accentuate deformazioni anelastiche che provocano una sotto stima del carico massimo;
- la zona di discontinuità dell'anello genera una non uniformità nella distribuzione del carico, che falsa la misura.

Tutti questi fattori fanno sì che la prova RCT fornisca un valore di resistenza alla compressione compreso fra un 30% e un 60% di quello intrinseco della carta.

La ripetibilità della prova RCT è pari a circa il 5%, quindi molto buona, mentre la riproducibilità è scarsa, dell'ordine del 30%.

Il risultato della prova è espresso in kiloNewton al metro: considerando che la provetta è lunga 152.4 mm, il carico massimo in Newton e in kilogrammiforza che ha agito sulla stessa è pari rispettivamente a $RCT(kN/m) \cdot 152.4$ N e $RCT(kN/m) \cdot 15.5$ kgf. Per confrontare fra loro carte dello stesso tipo aventi grammature simili, può essere utile utilizzare l'indice di RCT, dato dal rapporto fra il valore di RCT e la grammatura:

$$I_{RCT} = RCT(N/m)/Gr(g/m^2) \text{ per cui } [I_{RCT}] = Nm/g .$$

3.3.2 La prova CCT

Nella prova CCT si utilizza una provetta ondulata, che viene mantenuta in posizione verticale per mezzo di un particolare dispositivo di serraggio munito di denti che si adattano al profilo dell'onda. Il profilo ondulato della provetta le conferisce una notevole stabilità all'inflessione, permettendo di ottenere valori della resistenza alla compressione più vicini a quelli intrinseci della carta. Per questo motivo tale prova viene spesso utilizzata con la carta per copertina al posto di quella di RCT.

La limitazione principale è lo schiacciamento dell'orlo della provetta che si viene a formare, il quale riduce la validità della prova.

La ripetibilità è di circa il 5% mentre la riproducibilità, molto buona, di circa il 6%.

Esistono due differenti norme riguardo alla durata del periodo di condizionamento della provetta fuoriuscita dall'ondulatore: una prescrive un periodo di tempo di 6s – 8s, alla quale ci si riferisce con il termine di prova di CCT istantaneo (CCT_{ist}), l'altra un periodo non inferiore a 30 minuti e non superiore a 4 ore, alla quale ci si riferisce con il termine di prova di CCT condizionato (CCT_{30}); i risultati ottenuti nel CCT_{ist} sono maggiori di quelli ottenuti nel CCT_{30} .

Anche la prova di CCT viene espressa in kN/m ed avendo la provetta le medesime dimensioni di quella utilizzata nella prova di RCT, valgono le stesse considerazioni fatte nel paragrafo precedente riguardo la valutazione del carico massimo in N sopportato dalla provetta e la valutazione dell'indice di CCT.

3.3.3 La prova CMT

In questa prova si utilizza una provetta ondulata identica a quella utilizzata nella prova di CCT. Sulle creste delle ondulazioni si applica una striscia di nastro adesivo (le cui caratteristiche sono fissate dalle norme), dopo di che la provetta viene posta sulla piastra della pressa, con le onde parallele al piano della piastra, senza l'ausilio di alcun supporto (il nastro adesivo viene posto a contatto con la piastra fissa). L'applicazione del nastro adesivo è eseguita per mezzo di uno speciale dispositivo, costituito da una cremagliera e da un pettine, per impedire deformazioni delle ondulazioni durante l'operazione stessa.

Il risultato della prova è espresso direttamente in Newton per cui l'indice di CMT viene espresso in Nm^2/g .

La ripetibilità è di circa il 4.5% mentre la riproducibilità di circa il 6.5%.

Poiché anche nel caso della prova di CMT la provetta ha dovuto attraversare l'ondulatore, che con la sua elevata temperatura l'ha resa quasi completamente secca, le norme hanno provveduto a fissare la durata del periodo di condiziona-

mento all'ambiente prima dell'effettuazione della prova; le norme valide per il CMT sono le stesse di quelle descritte in precedenza per il CCT per cui si parlerà di CMT_{ist} e di CMT_{30} . Entrambe queste prove sono significative, in quanto con il CMT_{ist} si ha un risultato corrispondente alle condizioni in cui si trova l'onda al momento della fabbricazione, mentre con il CMT_{30} si ha un risultato che più si avvicina alle caratteristiche del prodotto finito. In genere, i valori di CMT_{30} sono inferiori di un 15% - 25% rispetto a quelli del CMT_{ist} .

Nella Fig. 9 è mostrato il diagramma carico – deformazione rilevato durante una prova di CMT.

Fig. 9

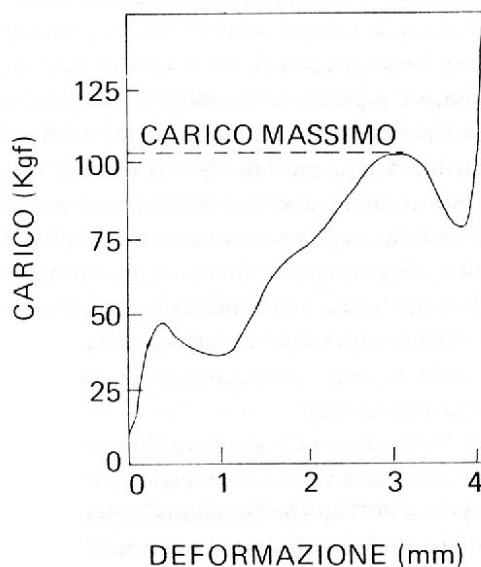


Diagramma carico-deformazione della prova CMT.

La prima parte della curva, fino al primo massimo, corrisponde al comportamento elastico della provetta: se il carico viene rimosso, le ondulazioni acquistano di nuovo la forma iniziale. Successivamente al primo massimo si ha una diminuzione temporanea del carico in quanto si verifica un primo cedimento della struttura, caratterizzato da una deformazione anelastica delle onde, la cui parte intermedia si dispone verticalmente, consentendo così a tutta la struttura di sopportare di nuovo un carico crescente.

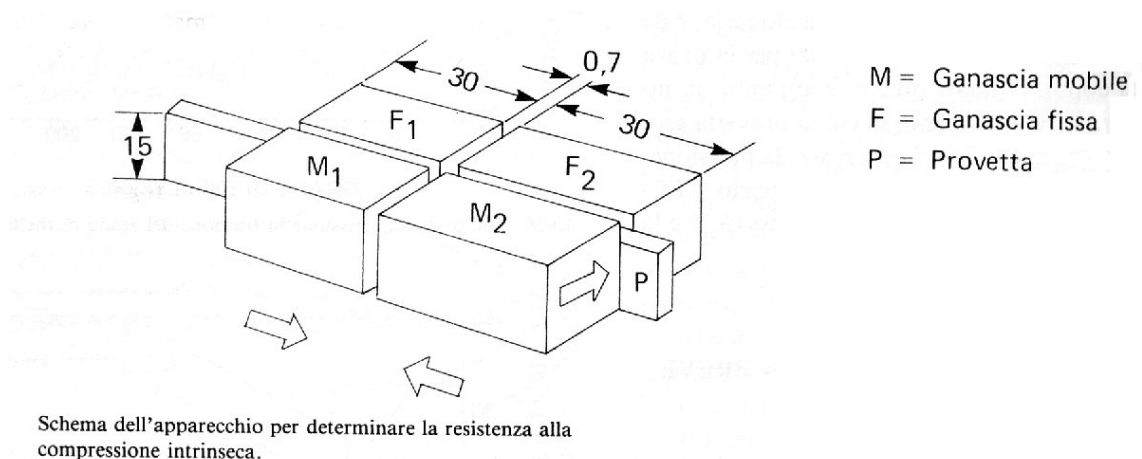
Nel secondo massimo avviene il cedimento definitivo della struttura ed il carico corrispondente rappresenta il valore del CMT. L'ultima parte molto ripida della curva non ha significato, in quanto corrisponde alla provetta completamente appiattita.

3.3.4 La prova di SCT

Nessuna delle prove descritte fino ad ora è in grado di quantificare la resistenza intrinseca della struttura fibrosa costituente la carta, essenzialmente a causa della tendenza alle inflessioni ed allo schiacciamento ai bordi della provetta; in assenza di questi fenomeni, il cedimento avviene lungo una linea ristretta, entro la quale la struttura risulta scompaginata.

Allo scopo di misurare tale resistenza intrinseca si utilizzano apparecchiature particolari, dotate di due morsetti, ciascuno con una ganascia fissa ed una mobile, come illustrato nella Fig. 10.

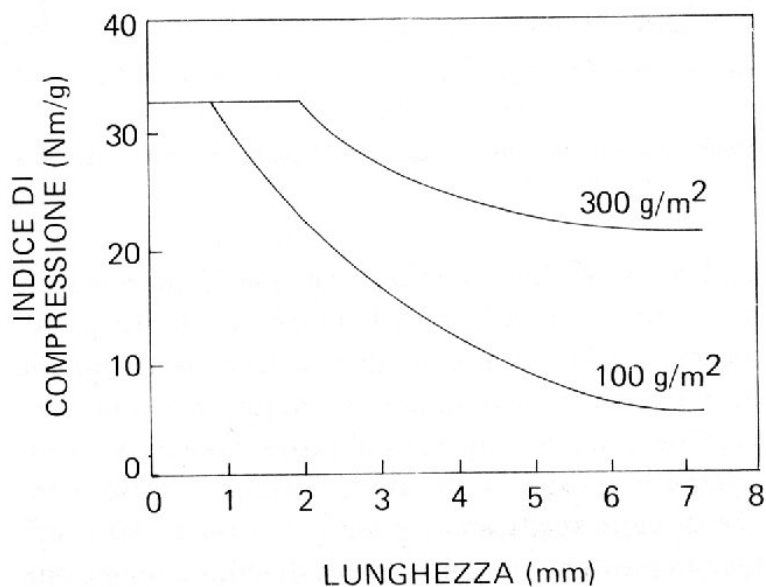
Fig. 10



Il morsetto 1 è fisso mentre il morsetto 2 è mobile ed in grado di avvicinarsi al primo. La striscia di carta viene inserita fra le ganasce dei due morsetti; durante la prova, le ganasce mobili M₁ e M₂ si avvicinano a quelle fisse F₁ e F₂, serrando così la provetta, dopo di che il morsetto mobile comincia a muoversi verso quello fisso, esercitando una forza di compressione crescente sulla provetta, che viene misurata da una cella di carico collegata con il morsetto fisso; tale forza agisce lungo l'asse della striscia e sul suo piano. Lo sforzo massimo esercitato sulla provetta quando questa cede, rappresenta il valore della prova SCT ed è espressa in kN/m. La particolarità di questo strumento è quella di vincolare la striscia a rimanere distesa su di un piano, impedendo eventuali inflessioni, e di eser-

citare lo sforzo di compressione su una distanza molto breve (la distanza iniziale dei due morsetti è di soli 0.7mm) di modo che il rapporto di esilità che ne risulta è sufficientemente piccolo (inferiore a 30) anche per basse grammature. Nel grafico seguente, è mostrato l'indice di compressione ottenuto, per due diverse grammature, variando la distanza iniziale fra i due morsetti.

F g. 11i



Indice di compressione in funzione della lunghezza di prova.

Si noti come la zona costante (corrispondente alla misura della resistenza intrinseca alla compressione della carta) venga raggiunta prima dal campione di grammatura più elevata, il quale ha uno spessore maggiore e quindi un rapporto di esilità inferiore a parità di distanza fra i morsetti (la lunghezza di prova). A conferma di quanto detto in precedenza, una distanza iniziale fra i morsetti inferiore ad 1 mm assicura misure affidabili anche per basse grammature.

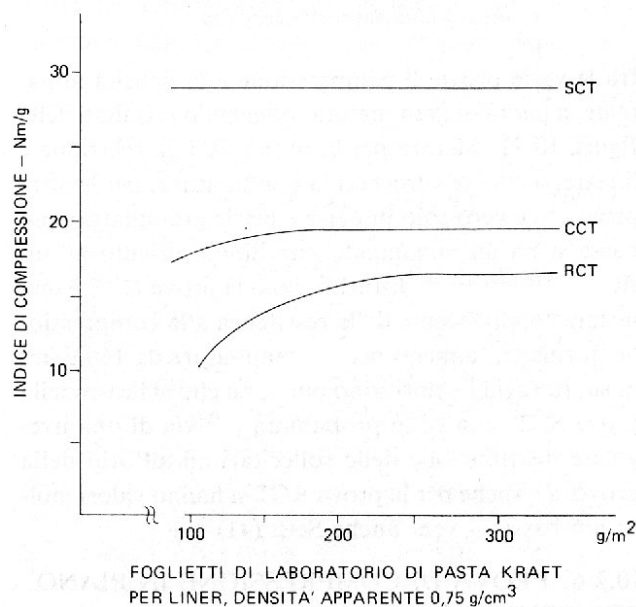
D'altra parte, la piccolezza dell'area di misura introduce una certa variabilità nei risultati, della quale si può tenere conto effettuando diverse misure (la norma suggerisce almeno 20) sullo stesso campione.

Poiché la compressione viene esercitata lungo tutta la larghezza della provetta, pari a 15 mm, per ricavare il carico massimo in Newton e in kilogrammiforza è necessario moltiplicare il valore di SCT, espresso in kN/m, rispettivamente per

15 e per 1.53; analogamente alle altre prove, dividendo il valore di SCT, espresso in N/m, per la grammatura della carta costituente la provetta, si trova l'indice di SCT espresso in N/m/g.

Nella figura seguente è mostrato l'indice di compressione, misurato per mezzo delle varie prove descritte fino ad ora, di carte kraft per copertina di differenti grammature.

Fig. 12



Diciamo subito che un andamento orizzontale significa che la prova sta misurando la resistenza intrinseca della carta alla compressione, senza essere influenzata dalle inflessioni della provetta; quando tali inflessioni diventano significative, disturbando la misura, l'andamento diviene curvilineo e l'indice di compressione decresce. Si vede allora come la prova di SCT risulti valida per tutte le grammature al di sopra dei 100 g/m², mentre la prova di CCT e quella di RCT danno valori significativi soltanto per grammature rispettivamente maggiori di 150 g/m² e 250 g/m².

3.4 Le prove di compressione della carta e le proprietà del cartone ondulato

Bisogna innanzi tutto precisare che nella carta ondulata, la direzione di macchina è parallela al profilo dell'onda, ovvero perpendicolare alla direzione delle creste e delle valli. Inoltre, nel cartone ondulato, la direzione macchina delle copertine e delle ondulazioni coincidono

Una scatola di cartone ondulato è un parallelepipedo costituito da facce verticali e facce orizzontali. Tutte le facce sono soggette a pressioni (dall'interno o dall'esterno) che tendono a schiacciare l'onda e ad avvicinare le copertine: a queste pressioni la struttura si oppone soltanto tramite la resistenza dell'onda alla compressione in piano, per cui la prova significativa in questo caso è quella di CMT in direzione longitudinale (asse della provetta coincidente con la direzione macchina).

Durante l'impilamento, le facce verticali sono soggette anche a carichi determinati dal peso delle scatole sovrastanti, alle quali la struttura si oppone per mezzo della resistenza alla compressione in colonna delle copertine e delle ondulazioni; le scatole sono costruite in modo che nelle facce verticali, le ondulazioni agiscano come pilastri, per cui il profilo delle onde, e quindi la direzione macchina, sono orizzontali; perciò le prove significative in questo caso, sono quelle di RCT, CCT e SCT, valutate in direzione trasversale (per la prova di RCT e CCT l'asse della provetta deve coincidere con la direzione macchina mentre per la prova di SCT deve coincidere con quella trasversale).

Diversi studi hanno mostrato che è possibile determinare, per mezzo di formule empiriche, le caratteristiche di resistenza alla compressione del cartone ondulato e delle scatole, conoscendo quelle delle carte che ne compongono la struttura. Di seguito sono riportati alcuni esempi di tali relazioni empiriche.

La prova FCT fornisce la forza massima perpendicolare alla superficie che un foglio di cartone ondulato è in grado di sopportare: il valore di FCT è legato a quello di CMT da una relazione lineare, quindi del tipo $FCT = a \cdot CMT + b$, dove a e b sono delle costanti. Per esempio, nel caso di onda A si è trovato, $FCT = 0.642 \cdot CMT + 30.93$, con l'FCT espresso in kilopascal e il CMT in newton.

La prova ECT indica la resistenza alla compressione in colonna di una provetta di cartone ondulato; dette CL e CM rispettivamente le caratteristiche di compressione in colonna nella direzione trasversale delle copertine e delle ondulazioni, si è trovato che $ECT = a \cdot (CL_1 + CL_2 + f \cdot CM) + b$, dove a e b sono delle costanti che dipendono dal tipo di prova considerata mentre f rappresenta il coefficiente di ondulazione. In particolare, utilizzando la prova di SCT, si ha che (unità di misura kN/m) $ECT = 0.71 \cdot (SCT_1 + SCT_2 + f \cdot SCT_m)$.

4. Risultati delle prove eseguite

4.1 La produzione di carta per onda presso la Cartiera Cardella di Lucca

Lo stabilimento di S. Pietro a Vico delle Cartiere Cardella di Lucca produce, attualmente, soltanto carta per ondulazione. Come materia prima, viene utilizzata esclusivamente fibra di recupero ricavata da macero di categoria A (macero misto). I tipi di carta prodotti sono tre: fluting, medium e uso-semichimica, in ordine di caratteristiche meccaniche crescenti. Passando dal fluting all'uso-semichimica si utilizza una percentuale sempre maggiore di cartone, dato che esso rappresenta la fonte principale di fibre lunghe, le quali determinano le proprietà di resistenza meccanica della carta. Anche nell'ambito del macero esistono le ricette di produzione: in questo caso non si parlerà di pasta legno, CTMP, pasta kraft, ecc., ma di macero di categoria A2 (contenente poco cartone), di categoria A4 (con almeno il 60% di cartone), di categoria A5 (100% cartone), ecc.

Le caratteristiche meccaniche superiori del medium e dell'uso-semichimica sono ottenute, oltre che utilizzando una quantità maggiore di fibra lunga, anche nobilitando la carta per mezzo di additivi: nella produzione di medium si utilizza amido cationico in massa, mentre nella produzione di uso-semichimica viene effettuato, per mezzo della size press, un trattamento superficiale della carta a base di amido e black liquor. Quest'ultimo, sostanzialmente, è il liscivio nero che si ottiene nella produzione della pasta chimica con processo acido, contenente la lignina disciolta e allontanata dalle fibre. L'amido cationico in massa aumenta il numero di legami fra le fibre, e quindi in generale tutte le proprietà di resistenza della carta, mentre il trattamento superficiale con amido e black liquor genera una struttura più omogenea, andando a riempire gli interstizi fra le fibre e rendendo più difficile l'inflessione delle stesse, aumentando così la resistenza alla compressione del foglio, come si è visto nel precedente capitolo.

Per avere un'idea della differenza nelle proprietà di resistenza alla compressione fra i tre tipi di carta, si consideri che la tabella di riferimento redatta dal Comitato Tecnico Congiunto Assocarta e dal GIFCO (Gruppo Italiano Fabbricanti Cartone Ondulato) richiede per il Fluting da 127 g/m² un CMT₃₀ pari a 140 N e un CCT₃₀ pari a 1.00 kN/m (il fatto che non ci siano indicazioni in merito significa che si tratta del CMT longitudinale e del CCT trasversale), mentre per il medium e per l'uso-semichimica della stessa grammatura sono richiesti, rispettivamente, un CMT₃₀ di 185 N e di 230 N ed un CCT₃₀ di 1.4 kN/m e di 1.75 kN/m.

La convenzione che verrà adottata nel seguito per indicare i vari tipi di produzione è la seguente: la prima lettera indica il tipo di carta (F sta per Fluting, M per Medium ed U per Uso-semichimica), mentre i numeri successivi indicano la grammatura; quindi, per esempio, con M127 si indicherà una carta medium da 127 g/m².

4.2 Breve descrizione degli impianti della cartiera

Lo spappolamento del macero viene eseguito in un pulper a bassa densità (circa il 3.5% - 4%) da 32 m³ con girante ad asse verticale (la cartiera è dotata di un altro pulper da 18 m³ con girante ad asse orizzontale che viene azionato solo in casi di emergenza dato che da solo non è in grado di supplire alle richieste delle macchine continue), il quale lavora in continuo; il pulper è dotato di un sistema di pulizia che preleva l'impasto dalla periferia (in cui, a causa del moto vorticoso, si accumulano i contaminanti più grossolani e pesanti) ripulendolo dalle impurità per mezzo di un assortitore a fori che lavora a cicli.

L'impasto che passa dalla piastra forata del pulper viene inviato ad una tina di stoccaggio; da tale tina partono due linee di epurazione, dotate di particolari assortitori a fori, detti turboseparatori, dotati di un corpo cilindrico relativamente grande e di una girante ad asse orizzontale. La prima linea è dotata di tre turboseparatori mentre la seconda di due; i turboseparatori lavorano in serie: il non accettato di un turboseparatore (cioè l'impasto che non è passato attraverso la griglia forata dello stesso) va ad alimentare il turboseparatore successivo; oltre ad effettuare la pulizia dell'impasto, i turboseparatori svolgono altre due importanti funzioni: continuano l'opera di apertura delle fibre iniziata nel pulper (la dimensione del corpo è tale che l'impasto vi rimane all'interno per un tempo non trascurabile di modo che le forze di taglio generate dai flussi riescono ad aprire i grumi non aperti dal pulper) ed effettuano il frazionamento dell'impasto sfruttando il fatto che le fibre corte e i fini passano più facilmente (e quindi per prime) attraverso i fori della griglia rispetto a quelle lunghe; l'accettato del primo turboseparatore di ciascuna delle due linee viene perciò inviato alla tina della frazione corta, l'accettato del secondo turboseparatore può essere inviato sia alla tina della frazione corta che a quella della frazione lunga (a seconda delle esigenze di produzione), l'accettato del terzo turboseparatore viene inviato alla frazione lunga. La differenza fra i due tipi di impasto risulta evidente nella misura dei gradi Schopper-Riegel: tipicamente la frazione lunga ha una scolantezza pari a circa 30 – 35 °SR, mentre la frazione corta ha una scolantezza di 40 – 45 °SR. Ciascun turboseparatore è dotato di un epuratore centrifugo a pasta densa, il quale provvede a ripulire la vasca dai contaminanti pesanti che si accumulano nella periferia della stessa.

Il non accettato degli ultimi turboseparatori di ciascuna delle due linee viene inviato alla tina degli scarti; anche se la percentuale di contaminanti presenti in questo impasto è elevata, è molto importante recuperare da esso la maggiore quantità di fibra possibile dato che si tratta in prevalenza di preziosa fibra lunga: per questo motivo dalla tina degli scarti parte un'altra linea di assortitori che invia l'impasto epurato alla tina della frazione lunga.

L'impasto prelevato dalle tine della frazione lunga e corta viene mescolato nelle proporzioni richieste dal tipo di produzione e poi inviato alle tine di mac-

china delle due continue (la linea in uscita dalla tina della frazione lunga è dotata anche di un raffinatore che però non viene quasi mai utilizzato).

I circuiti di testa macchina delle due continue sono sostanzialmente identici: l'impasto prelevato dalla tina di macchina passa attraverso una serie di epuratori centrifughi ad alta densità, che svolgono soprattutto la funzione di protezione da contaminanti grossolani residui, e da qui viene inviato al vaschino a livello costante; da uno dei cassettei del vaschino parte una tubazione che porta l'impasto al raffinatore di testa macchina e poi di nuovo al vaschino; dall'altro cassetto parte invece la tubazione, dotata della valvola di grammatura, che porta l'impasto all'aspirazione della fan pump; prima di arrivare alla cassa d'afflusso, l'impasto viene fatto passare attraverso un assortitore a fori, con griglia cilindrica a fori, che funge da ultima protezione per la continua. Naturalmente, poiché la macchina 3 è dotata di due casse d'afflusso, tutta la parte di circuito dopo il vaschino a livello costante è doppia.

La macchina 3 ha un formato utile di circa 2400 mm ed una velocità per basse grammature (120 g/m^2) dell'ordine di 400 - 450 m/min. Come detto, è dotata di due casse d'afflusso a cuscino d'aria e rulli forati, per cui produce in genere carta doppio strato. La funzione di drenaggio alla fine della tavola piana della tela principale non è svolta da un cilindro aspirante, bensì da una pressa, detta pressa manicotto, monofeltrata. La zona presse è costituita da due presse tipo "ventanip", entrambe monofeltrate. La macchina è dotata di una size press di tipo tradizionale; la preseccheria ha 24 cilindri essiccatori mentre la post seccheria è fornita di 12 cilindri, con una pressione di vapore massima di 3.5 bar. Sulla macchina 3 si produce attualmente medium e uso-semichimica.

La macchina 4 ha un formato utile di circa 2500 mm ed una velocità per basse grammature (112 g/m^2) di circa 700 m/min. È dotata di un'unica cassa d'afflusso a cuscino d'aria e rulli forati, e di un duoformer della Voith tipo D, che aumenta notevolmente il drenaggio sulla tavola piana, permettendo così di poter avere una maggiore quantità d'acqua sulla stessa. Anche la macchina 4 non ha cilindro aspirante alla fine della tela, sostituito da una pressa manicotto, monofeltrata. La zona presse è costituita da due presse scarpa della Voith, tipo "nipcoflex", con la scarpa nella posizione superiore. La prima pressa è doppiofeltrata mentre la seconda è monofeltrata. I rivestimenti della scarpa sono entrambi del tipo a fori ciechi. Anche la macchina 4 è dotata di una size press di tipo tradizionale: la preseccheria è formata da 25 cilindri e la postseccheria da 12 cilindri, con una pressione di vapore massima di 5 bar. Alla macchina 4 sono prodotti fluting, medium e uso-semichimica. Entrambe le macchine sono dotate di una cassa a vapore "devronizer", posizionata sulla tavola piana, prima della pressa manicotto, la cui funzione principale è quella di regolare il profilo trasversale di umidità.

4.3 Analisi dei risultati ottenuti con lo strumento ad ultrasuoni

Lo strumento ad ultrasuoni è stato utilizzato alla Cartiera Cardella nel periodo compreso fra novembre 1998 e febbraio 1999. Nel corso di questo periodo sono state effettuate diverse prove sui vari tipi di carta prodotti con un duplice scopo: da una parte cercare di ottimizzare le due macchine continue, in particolare analizzando le influenze sull'orientamento delle fibre e sulle caratteristiche meccaniche della carta determinate dalla differenza di velocità fra il getto e la tela (alla quale nel seguito ci si riferirà con il termine di bias), dall'altra studiare le eventuali correlazioni fra le misure del TSI ottenute con lo strumento ad ultrasuoni e quelle della resistenza alla compressione (CMT, CCT, SCT) ottenute con gli strumenti classici.

L'ottimizzazione delle due continue avrebbe dovuto determinare, per ogni tipo di produzione, il valore del bias in grado di fornire l'orientamento delle fibre più uniforme assieme alle migliori caratteristiche meccaniche; l'analisi delle correlazioni avrebbe dovuto fornire indicazioni riguardo alla possibilità di utilizzare lo strumento ad ultrasuoni anche per valutare, per mezzo di opportune curve di correlazione, i valori di CMT, CCT, SCT, con tutti i vantaggi operativi che ne sarebbero derivati.

Per ogni tipo di produzione sono state effettuate più prove in modo da poter stimare l'entità delle variazioni delle grandezze misurate; i risultati che verranno presentati si basano sui valori medi ottenuti in quattro prove per l'F112, l'M120-M127, l'U120-U127 prodotti alla macchina 4 (vista la piccola differenza nella grammatura, si è preferito accomunare assieme i risultati ottenuti per la carta da 120 g/m² con quelli ottenuti per la carta da 127 g/m²), in tre prove per l'M120 prodotto alla macchina 3, in due prove per l'M140 prodotto alla macchina 4. Naturalmente, è stata posta attenzione affinché i parametri di produzione, nel corso delle prove effettuate sullo stesso tipo di carta, fossero gli stessi, con particolare riguardo alla velocità della macchina, al bilanciamento della cassa d'afflusso, all'apertura e all'avanzamento del labbro, alla consistenza dell'im-pasto in cassa d'afflusso, al numero di giri della fan pump (e quindi alla quantità di acqua sulla tela).

La distanza fra le zone da misurare lungo la striscia campione è stata scelta pari a 16 cm, per cui con i formati tipici della macchina 4 e della macchina 3 sono state ottenute, in genere, rispettivamente 15 e 13 misure per striscia.

Una volta effettuata la misura con lo strumento ad ultrasuoni, la striscia è stata suddivisa in più campioni rettangolari, ricavati in corrispondenza delle zone su cui si era poggiata la testa di misura; di ciascuno di questi campioni è stata misurata la grammatura, dopo di che sul campione posto al centro del formato e su quelli posti al bordo lato comandi e al bordo lato servizi sono state effettuate le prove di CMT, CCT e SCT; la conoscenza della grammatura ha consentito il calcolo dell'indice di ciascuna di queste grandezze.

Da ogni campione rettangolare sono state ricavate 10 provette: quattro per la misura del CMT, quattro per la misura del CCT e due per la misura del SCT; le provette per il CMT e il CCT sono state ricavate con l'asse diretto lungo la direzione macchina in modo da ottenere la misura del CMT longitudinale e del CCT trasversale, le più significative per la carta per ondulazione; l'avere a disposizione quattro misure per prova ha consentito di fare un po' di statistica, valutando valore medio e dispersione.

Per la misura di SCT si è ricavata una provetta con l'asse longitudinale ed una con l'asse trasversale in modo da poter valutare il valore di SCT in entrambe le direzioni (si ricordi che nella prova di SCT la direzione della compressione coincide con l'asse della provetta, mentre nella prove di CCT direzione e asse sono tra loro perpendicolari); nella prova di SCT, lo strumento calcola automaticamente valore medio e dispersione: è sufficiente una singola provetta per direzione dato che su ognuna si possono effettuare almeno una decina di misure.

4.4 TSO, TSI_{MD} , TSI_{CD} e TSI_{MD}/TSI_{CD} in funzione del bias

Nei paragrafi seguenti verranno esaminati, per ognuna delle grandezze più importanti misurate dallo strumento ad ultrasuoni (TSO, TSI_{MD} , TSI_{CD} e TSI_{MD}/TSI_{CD}):

- i profili trasversali per differenti valori del bias;
- l'andamento del valore medio, calcolato lungo il profilo trasversale, in funzione del bias.

Le barre di errore sul valore medio V_m , indicate nei grafici corrispondenti, rappresentano la dispersione dei valori ottenuti nelle differenti prove attorno al valore medio stesso, valutata come 1.5σ , dove σ è la deviazione standard del campione: quindi, nei limiti dell'esiguità del nostro campione, si può prevedere che, eseguendo una prova ulteriore, il valore medio ottenuto cada entro l'intervallo $[V_m - 1.5\sigma ; V_m + 1.5\sigma]$ con una probabilità di circa l'86%.

Prima della serie di grafici, è riportata, per ogni tipo di produzione, una tabella riassuntiva nella quale sono indicati i valori più significativi della grandezza presa in esame:

- MEDIO: rappresenta il valore medio della grandezza, calcolato lungo il profilo trasversale, per il valore di bias corrispondente;
- DISPERS. (%): rappresenta il rapporto percentuale fra 1.5σ (come detto in precedenza, σ è la deviazione standard del campione) e il valore medio della grandezza; per il TSO tale grandezza non ha significato ed al suo posto viene rappresentata la differenza fra il valore massimo e quello minimo rilevati lungo il profilo trasversale (VARIAZ. (°)), che determina l'intervallo di variazione del TSO;

- MASSIMO e MINIMO: rappresentano, rispettivamente, il valore massimo e quello minimo della grandezza lungo il profilo trasversale;
- LATO SERVIZI, CENTRO, LATO COMANDI: indicati solo per il TSO, rappresentano, rispettivamente, il valore della grandezza misurato in prossimità del bordo lato servizi (zona di misura n. 2), del centro del formato (zona di misura n. 8) e del bordo lato comandi (zona di misura n. 14 per la M4 e n. 13 per la M3);
- MEDIA BORDI, CENTRO, VARIAZ. (%): al posto dei tre valori descritti in precedenza, per il TSI si è preferito indicare, rispettivamente, il valore medio ai bordi (utilizzando, anche in questo caso, i dati rilevati in prossimità del lato comandi e del lato servizi), il valore al centro (zona di misura n. 8) e la variazione, calcolata come il rapporto percentuale della differenza tra il valore al centro e quello ai bordi con il valore ai bordi stesso:

$$\text{variazione}(\%) = \frac{TSI_{\text{centro}} - TSI_{\text{bordi}}}{TSI_{\text{bordi}}} * 100.$$

L'ultimo valore riportato nelle tabelle è l'incremento medio, che rappresenta il rapporto percentuale della differenza tra il valore medio massimo e quello minimo con il valore medio minimo stesso: questo valore indica l'incremento percentuale nel valore medio della grandezza passando dal valore del bias in cui si è ottenuto il valore medio minimo a quello in cui si è ottenuto valore medio massimo (non ha significato nel caso del TSO).

4.4.1 L'angolo TSO

Ricordiamo che una cassa d'afflusso ben bilanciata dovrebbe fornire profili trasversali simmetrici rispetto al centro del formato, quindi caratterizzati da un valore medio del TSO pari a 0° e con valori locali compresi fra +5° e -5°.

Per l'F112 (Gra. 1 e 2), si osservano profili accettabili per i bias compresi fra -50 e +15, mentre a +30 e +50 si hanno andamenti notevolmente asimmetrici (il valore medio del TSO è per entrambi prossimo a -6°), caratterizzati da un intervallo di variazione del TSO prossimo o addirittura superiore a quello accettabile (rispettivamente 11° e 9.3° contro valori inferiori a 8° per gli altri bias). Il profilo migliore è stato ottenuto con un bias pari a -15: valore medio pari a -0.21° e intervallo di variazione pari a 5.7°.

Per il medium con grammature comprese fra 120 e 127 g/m², si hanno profili pessimi per tutti i valori positivi del bias (quindi rispetto all'F112 si osserva un notevole peggioramento a +15) mentre il profilo migliore risulta quello a -30, con un valore medio del TSO di +0.52° e un intervallo di variazione inferiore di 5.4°.

Il medium con grammatura superiore (140 g/m^2) presenta come unico profilo pessimo quello a +50 (TSO medio pari a -3° e intervallo di variazione superiore a 20°); considerando però che non è stato possibile effettuare misure con un bias impostato a -50 per l'impossibilità di controllare i profili di grammatura e umidità, si può dedurre che anche esso fornisca caratteristiche negative. Il profilo migliore si ha con la velocità del getto uguale a quella della tela: valore medio pari a -0.5° e intervallo di variazione pari a 6.1° .

L'uso-semichimica con grammatura compresa fra 120 e 127 g/m^2 mostra buoni profili per i valori del bias compresi fra -15 e $+30$ (valore medio del TSO compreso fra -1.3° e -0.5° e intervallo di variazione compreso fra 4° e 7°); il profilo a -50 è simmetrico (TSO medio pari a 0°) ma l'intervallo di variazione è superiore ai 12° ; il profilo a -30 è accettabile mentre quello a +50 è invece pessimo.

Il medium con grammatura di 120 g/m^2 prodotto dalla macchina 3 presenta buoni profili per i valori del bias compresi fra -30 a $+30$: il valore del TSO è compreso fra -0.9° e -0.1° , mentre l'intervallo di variazione è sempre inferiore a 10° . Anche il profilo relativo a -50 è comunque accettabile mentre a +50 non è stato possibile effettuare misure per problemi di regolazione del profilo di grammatura e umidità.

In base a questi risultati si può concludere che, per quanto riguarda l'orientamento delle fibre, alla macchina 4 i migliori risultati si ottengono impostando valori del bias compresi fra -30 e $+15 \text{ m/min}$ mentre alla macchina 3 si hanno buoni profili fra -30 e $+30 \text{ m/min}$.

A carattere generale si può notare come i profili trasversali del TSO abbiano un andamento tendenzialmente monotono (crescente andando dal lato servizi a quello comandi), compatibile con quello determinato da un flusso dell'impasto in uscita dal labbro della cassa d'afflusso che presenti, ai bordi, componenti di velocità trasversali, dirette verso l'esterno; nel Gra. 11 è mostrata la pendenza (mediata sui bias compresi fra -15 e $+15$ ed espressa come gradi di variazione del TSO per ogni metro di formato) per i vari tipi di produzione: si può osservare come tale pendenza, compresa fra 2.5 e $3.5 \text{ }^\circ/\text{m}$, sia responsabile di una variazione positiva dell'angolo TSO (calcolata come prodotto fra la pendenza e la larghezza del formato campionato) compresa fra 6 e 8 gradi; nella Fig. 12 sono confrontate, per i vari tipi di produzione, le variazioni nel TSO misurate e mediate sui bias compresi fra -15 e $+15$, con quelle calcolate secondo quanto descritto in precedenza: la quasi coincidenza fra le due curve mostra come le variazioni nel TSO risultino determinate soprattutto dall'andamento crescente (andando dal lato servizi a quello comandi) più che dalle variazioni locali, che comunque si osservano lungo i profili e che sono generate, in gran parte, dal sistema di regolazione del profilo trasversale di grammatura e umidità, che determina differenti gradi di apertura locale del labbro.

4.4.2 Il TSI_{MD}

L’F112 mostra un profilo trasversale del TSI_{MD} in media costante per tutti i valori del bias (si calcola un intervallo di variazione mediato sui bias pari a circa $\pm 3\%$) ed il valore medio calcolato lungo il profilo trasversale non mostra sensibili variazioni con il bias: l’incremento medio che si osserva (vedi tabella di riepilogo) è pari soltanto al 2.8%, un valore inferiore alla dispersione media; il valore più elevato si ottiene a bias -15 .

È opportuno sottolineare che il Gra. 13 (come del resto quelli analoghi riferiti ad altre produzioni) può trarre in inganno: sembra infatti di osservare notevoli variazioni locali lungo il profilo del TSI_{MD} e differenze sostanziali fra i vari valori del bias; in realtà l’inganno è determinato dalla scala dell’asse delle ordinate, la quale è stata scelta piccola (l’origine vale 7.0 kNm/g) allo scopo di visualizzare con maggiore chiarezza l’andamento delle curve (le quali altrimenti si sovrapporrebbero l’una sull’altra).

Anche nel caso dell’M120-M127 si è ottenuto un andamento relativamente costante del profilo trasversale per tutti i valori del bias (intervallo di variazione mediato sui bias di circa $\pm 3\%$) ed un valore medio abbastanza costante: l’incremento è stato del 5.3%, all’incirca uguale a quello della dispersione media; comunque, i bias $+30$ e $+50$ sono senz’altro quelli che hanno fornito risultati peggiori, mentre il valore maggiore si è ottenuto a -15 .

Con l’M140 i profili trasversali rimangono in media costanti lungo il formato (intervallo di variazione mediato sui bias di circa $\pm 4\%$) ma si osservano variazioni più sensibili nell’andamento del valore medio in funzione del bias: l’incremento è pari al 7.3% e la situazione peggiore si ha con bias pari a -30 , mentre il valore più elevato è stato ottenuto a $+30$. Bisogna però considerare che i risultati mostrati si basano soltanto su due prove, per cui la loro valenza statistica lascia a desiderare: in effetti l’incremento continua ad essere all’incirca pari alla dispersione.

Risulta notevole di attenzione il fatto che i valori del TSI_{MD} misurati per l’M140 risultano sensibilmente inferiori a quelli misurati per l’M120-M127; nel Gra. 23 è mostrato l’andamento del TSI_{MD} (mediato sui bias da -15 a $+15$) in funzione della grammatura per il medium da cui si osserva evidente la diminuzione dei valori di TSI_{MD} misurati con l’aumentare della grammatura: il valore del TSI_{MD} a 140g/m^2 risulta un 7.5% inferiore rispetto a quello a 120g/m^2 , mentre la differenza fra l’M127 e l’M120 è sensibilmente minore (1.5%), il che giustifica il fatto di avere accomunato assieme i risultati ottenuti per le due grammature. Naturalmente è opportuno sottolineare che tali risultati vanno considerati con la dovuta cautela, dato che si basano su due sole prove per grammatura: certamente la variazione osservata è dello stesso ordine di grandezza della dispersione dei dati. Comunque, dato che, per la macchina 4, avevamo a disposizione

dei dati relativi ad una prova sia per l'U140 che per l'U150, abbiamo costruito l'andamento del TSI_{MD} in funzione della grammatura anche per l'uso-semichimica, che può essere osservato nel Gra. 24: tenendo sempre bene a mente l'esiguità del campione statistico a disposizione (due sole prove per l'U120 e l'U127 e, come detto, addirittura una sola per l'U140 e l'U150) si osserva un sensibile aumento del TSI_{MD} passando da 120 g/m^2 a 127 g/m^2 (circa il 4%, valore che comunque dovrebbe consentire ancora di accomunare i risultati per le due grammature, come del resto è stato fatto) e poi una ancora più sensibile diminuzione (circa il 7.3% e l'8.8% rispettivamente per l'U140 e per l'U150 relativamente all'U127), il che confermerebbe parzialmente i risultati ottenuti con il medium. D'altra parte, come descritto nel primo capitolo, il TSI è dato dal rapporto fra il modulo di elasticità (o di Young) e la densità del materiale, a meno di una costante di proporzionalità. Considerando che la densità della carta è data dal rapporto fra la grammatura del foglio e il suo spessore e supponendo costante il modulo di Young, che d'altra parte è una costante tipica del materiale, una diminuzione del TSI con la grammatura potrebbe essere spiegata se ad un aumento relativo $\Delta G/G$ della grammatura corrispondesse un aumento relativo $\Delta d/d$ della densità inferiore, ipotesi tutt'altro che campata in aria.

Anche con l'U120-U127 si osservano profili trasversali in media costanti (intervallo di variazione mediato sui bias di circa $\pm 3.5\%$), e l'incremento risulta elevato e pari al 13.7%; considerando però che i risultati ottenuti a -50 (dove si ha il minimo valore del TSI_{MD} medio) si basano su una singola prova, essi vanno considerati con grande cautela (da notare che quando nella casella della dispersione si osserva il valore 0.00, ciò non significa che la misura sia esatta, bensì che si basa su una singola prova); anche il risultato a $+50$ è poco significativo, vista la dispersione percentuale molto elevata (circa l'11% che corrisponde ad una dispersione assoluta pari a $\pm 0.9 \text{ kNm/g}$). Il valore migliore si osserva a $+15$ e comunque tutti i bias, da -30 a $+30$, forniscono risultati fra loro vicini, mentre sono da evitare i valori di bias estremi.

L'M120 prodotto alla macchina 3 ha fornito profili trasversali in media costanti (intervallo di variazione mediato sui bias di circa il 3.5%) e valori medi del TSI_{MD} tra loro vicini per i bias compresi fra -15 e $+30$ (il risultato migliore si ha a bias=0); il TSI_{MD} medio diminuisce sensibilmente a -30 e -50 , dove si ha il valore medio minimo che fornisce un incremento pari a 11.4%.

Il valore del TSI massimo misurato dallo strumento corrisponde, per definizione, alla direzione determinata dall'angolo TSO. Da ciò deriva che, in una zona in cui il TSO sia sensibilmente diverso da zero, il valore del TSI in direzione macchina risulta altrettanto sensibilmente inferiore al TSI massimo. Ci si può allora chiedere se i valori del TSI_{MD} misurati in corrispondenza a bias estremi (-50 e $+50$), in genere sensibilmente inferiori rispetto a quelli misurati a bias compresi fra -15 e $+15$, siano determinati soltanto dall'orientamento delle fibre diverso

dalla direzione di macchina, nel qual caso il TSI massimo dovrebbe risultare all'incirca invariato, oppure se oltre a questo effetto, comunque senz'altro presente, si abbia anche una peggiore formazione che determina una struttura meccanicamente più debole, nel qual caso anche il TSI massimo dovrebbe diminuire. Nei grafici 25,26 e 27 è rappresentato l'andamento del TSI_{MAX} e del TSI_{MD} in funzione dell'angolo TSO per tre differenti tipi di produzione; in pratica le coordinate di ogni punto coincidono, rispettivamente, con l'angolo TSO e con il valore del TSI_{MAX} (o del TSI_{MD}) misurato in una zona. Per ogni tipo di produzione si è considerata una prova completa, per cui i punti rappresentano i valori misurati per tutti i bias, da -50 a $+50$. Risulta evidente innanzi tutto come, a mano, a mano che il TSO si allontana dalla direzione macchina, aumenti la differenza fra il TSI_{MAX} e il corrispondente TSI_{MD} ; comunque, è altrettanto evidente che, per angoli minori di -7° o maggiori di $+7^\circ$, anche il TSI_{MAX} subisce una diminuzione sensibile. Si può anzi affermare che tale diminuzione sia dominante; per esempio, osservando il grafico relativo all'F112, si deduce che anche a valori estremi del TSO (circa -11°), il TSI_{MD} risulta inferiore al corrispondente TSI_{MAX} per un 3.5% al massimo, mentre la differenza con il TSI_{MD} misurato ad angoli TSO circa uguali a 0° ammonta al 12%, per cui la diminuzione del TSI_{MAX} ha contribuito per oltre l'8% (più del doppio). Dai risultati ottenuti appare quindi probabile che le zone del foglio in cui l'orientamento delle fibre è notevolmente diverso dalla direzione macchina, siano intrinsecamente più deboli dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche.

In base ai risultati ottenuti, si può affermare che i valori del bias in cui si ottengono i valori del TSI_{MD} più elevati sono quelli compresi fra -15 e $+15$, mentre è senz'altro opportuno evitare di lavorare a bias estremi (-50 o $+50$). Comunque i profili trasversali si sono rivelati sufficientemente uniformi per tutti i valori del bias dato che l'intervallo di variazione è sempre stato inferiore al 5%.

4.4.3 Il TSI_{CD}

Osservando i profili trasversali del TSI_{CD} per i vari tipi di carta, risulta evidente una sostanziale differenza con quelli relativi al TSI_{MD} : infatti, a parte le variazioni locali, l'andamento generale di questi ultimi è sostanzialmente costante andando da un bordo all'altro, mentre il TSI_{CD} mostra ai bordi valori sensibilmente inferiori rispetto a quelli delle zone centrali; non staremo qui a spiegare le cause che determinano tale situazione dato che esse sono state ampiamente descritte nel capitolo 1. La valutazione quantitativa di questo fenomeno è indicata nelle tabelle sotto la voce "VARAZ." la quale, come detto in precedenza, rappresenta il rapporto percentuale della differenza del TSI misurato al centro e ai bordi con il valore misurato ai bordi. Si può osservare come, nel caso del TSI_{MD} , tale rapporto risulti sempre inferiore al 5% (tranne un'unica eccezione) ed inoltre

come esso assuma valori talvolta positivi (il TSI ai bordi è inferiore rispetto a quello al centro), talvolta negativi (il TSI ai bordi è superiore di quello al centro); invece, nel caso del TSI_{CD} , i valori che assume il rapporto sono sempre positivi, uguali o maggiori al 7% - 8%. L'unica eccezione si ha con il medium prodotto alla macchina 3, in cui si riscontrano valori in media attorno al 4%. Le variazioni maggiori si hanno nel caso del fluting prodotto alla macchina 4 (pari anche al 14%), in cui si osserva anche una sensibile diminuzione a bias +30 e +50; per gli altri tipi di carta non si riscontra invece una sensibile dipendenza dal bias.

Per quanto riguarda il valore medio del TSI_{CD} in funzione del bias, l'andamento che si osserva nei grafici è sostanzialmente uniforme.

Nel caso dell'F112, si ottiene il valore massimo a bias +15 e l'incremento è di circa l'8 %, maggiore della dispersione media.

Nel caso dell'M120-M127 prodotto alla macchina 4, il valore massimo (con una dispersione elevata, pari a circa il 10%) si è ottenuto a bias +50 e l'incremento è stato di circa l'11%.

Nel caso dell'M140, il valore massimo si è ottenuto a bias +30 e l'incremento è stato di circa il 7%.

Nel caso dell'U120-U127, il valore massimo si è ottenuto a bias +50 e l'incremento è stato di circa il 18%; bisogna però considerare che la dispersione del TSI_{CD} medio a +50 è veramente elevata, pari a circa il 15 %, ed essa è senz'altro responsabile di un incremento così grande.

Infine, nel caso dell'M120 prodotto alla macchina 3, il valore più elevato si è ottenuto a bias +30, con un incremento pari soltanto al 3%, inferiore alla dispersione media.

Nei grafici n. 39 e n. 40 è riportato l'andamento del TSI_{CD} in funzione della grammatura, rispettivamente nel caso del medium e dell'uso-semichimica; con il medium si riscontra una diminuzione, anche se limitata al 5%, del TSI_{CD} all'aumentare della grammatura, che conferma i risultati ottenuti nel caso del TSI_{MD} ; invece nel caso dell'uso-semichimica l'andamento non appare decrescente, bensì piuttosto altalenante (è comunque opportuno ricordare l'esiguità del numero di prove a disposizione per lo studio di questa relazione).

4.4.4 Il TSI_{MD}/TSI_{CD}

Abbiamo visto in precedenza che i profili trasversali del TSI_{MD} risultano sostanzialmente uniformi mentre quelli del TSI_{CD} mostrano un andamento caratterizzato da valori inferiori ai bordi rispetto al centro: è naturale allora attendersi che l'andamento del rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD} sia influenzato soprattutto da quello del TSI_{CD} ; in effetti dai grafici risulta evidente un andamento trasversale del TSI_{MD}/TSI_{CD} strettamente collegato con quello del TSI_{CD} , con valori ai bordi più

elevati di quelli al centro. A conferma di ciò, i valori della variazione percentuale calcolati risultano sempre negativi e generalmente compresi fra -3% e -10% .

Per quanto riguarda l'andamento del rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD} in funzione del bias, l'andamento osservato non si accorda con quello atteso: l'F112, l'M140 e l'M120 prodotto alla macchina 3, mostrano curve sostanzialmente costanti, mentre l'M120-M127 e l'U120-U127 mostrano una sensibile diminuzione dei valori a bias positivi, ma non un aumento a quelli negativi; quindi, non si è ottenuto né un andamento caratterizzato da un valore minimo del TSI_{MD}/TSI_{CD} in corrispondenza a bias 0, né un andamento decrescente in corrispondenza di bias crescenti, come descritto dalla classica regola dei cartai.

4.5 La resistenza alla compressione in funzione del bias

Nei prossimi paragrafi verranno brevemente commentati i risultati ottenuti riguardo l'andamento della resistenza alla compressione della carta (valutata per mezzo delle prove di CMT, CCT e SCT) in funzione del bias.

I dati più significativi sono stati raccolti in tabelle, le cui voci hanno il seguente significato:

- MINIMO: rappresenta il minimo valore misurato nella prova corrispondente; il valore del bias a cui è stato ottenuto tale valore minimo è riportato nella colonna adiacente;
- MASSIMO: rappresenta il massimo valore misurato nella prova corrispondente; nella colonna adiacente è indicato il valore del bias a cui tale valore è stato ottenuto;
- INCREMENTO(%): rappresenta il rapporto percentuale fra la differenza tra valore massimo e valore minimo, con il valore minimo stesso ed indica l'incremento relativo della resistenza alla compressione della carta, valore che comunque va sempre confrontato con quello indicato nella colonna successiva per poterne valutare il grado di significatività;
- DISPERSIONE(%): rappresenta la dispersione dei valori ottenuti nelle varie prove attorno al valore medio indicato, valutata come 1.5σ , in modo analogo a quanto fatto in precedenza per le prove di TSI e TSO; le barre di errore indicate nei grafici rappresentano i valori di tale dispersione ed il valore dell'incremento può essere considerato significativo soltanto se è ad essa superiore.

Per ragioni di convenienza, si è preferito rappresentare nello stesso grafico l'ICMT assieme all'ICCT e l'ISCT_{MD} assieme all'ISCT_{CD}; occorre perciò porre attenzione al fatto che in questi grafici si sono dovute utilizzare due scale differenti per l'asse verticale, le cui unità di misura sono rappresentate una a destra e l'altra a sinistra del piano cartesiano.

4.5.1 L'indice di CMT

- F112: il massimo valore dell'indice di CMT (nel seguito indicato con ICMT) è stato ottenuto a bias 0 mentre quello minimo a bias -50, con un incremento significativo, pari all'11% (quasi doppio della dispersione).
- M120-M127: è stato ottenuto un andamento in funzione del bias praticamente costante, dato che l'incremento risulta pari soltanto al 2% (un quarto della dispersione).
- M140: il valore massimo è stato ottenuto a bias +15 mentre quello minimo a bias 0; la differenza di bias pari soltanto a 15 m/min fra i due valori porta a pensare che sia stato prevalente l'effetto della dispersione delle misure, dato che le

condizioni di lavoro non possono essere variate di molto: in effetti l'incremento (7%) è confrontabile con la dispersione (5%).

- U120-U127: il valore massimo è stato ottenuto a bias +15 mentre quello minimo a bias -50; l'incremento è stato notevole (22%) e significativo (più del doppio della dispersione);
- M120 prodotto alla macchina 3: il valore massimo è stato ottenuto a +30, mentre il valore minimo a -50 con un incremento anche in questo caso notevole e significativo (15% contro una dispersione del 7%).

Ricapitolando, possiamo concludere che si sono riscontrate variazioni significative dell'indice di CMT al variare del bias soltanto con l'F112, l'U120-U127 e l'M120 prodotto alla macchina 3 e che le migliori condizioni di lavoro si hanno a bias positivi, compresi fra 0 e +30.

4.5.2 L'indice di CCT

- F112: il valore massimo è stato ottenuto a bias +50 mentre quello minimo a bias -50 con un incremento abbastanza significativo del 9% (la dispersione è stata del 6%).
- M120-M127: la differenza fra valore massimo (ottenuto a -15) e valore minimo (ottenuto a +50) ha determinato un incremento del 5%, inferiore alla dispersione e quindi, come nel caso dell'ICMT, poco significativo.
- M140: anche in questo caso è stato ottenuto un incremento, pari al 5%, inferiore alla dispersione.
- U120-U127: il valore massimo è stato ottenuto a bias +50 mentre quello minimo a bias -50, con un incremento notevole, pari al 19% e più che doppio della dispersione.
- M120 prodotto alla macchina 3: il valore massimo è stato ottenuto a bias +15 mentre quello minimo a bias -50, con un incremento del 12%, pari al doppio della dispersione.

Si può quindi concludere che, anche per l'indice di CCT come per quello di CMT, si sono ottenute variazioni significative soltanto per l'F112, l'U120-U127 e l'M120 prodotto alla macchina 3; le migliori condizioni di lavoro sono a bias compresi fra +15 e +50.

4.5.3 L'indice di SCT in direzione macchina

Per l'F112, l'M120-M127 e l'M140 si sono ottenuti valori dell'incremento inferiori a quelli della dispersione e quindi poco significativi per cui, come del

resto si può osservare nei grafici corrispondenti, l'andamento dell' $ISCT_{MD}$ in funzione del bias può essere considerato costante.

- U120-U127: il valore massimo è stato ottenuto a bias +15 mentre quello minimo a bias -50 con un incremento del 17%, quasi doppio della dispersione.
- M120 prodotto alla macchina 3: il valore massimo è stato ottenuto a bias +15 mentre quello minimo a bias -50 con un incremento notevole, pari al 21% e quasi tre volte maggiore della dispersione.

4.5.4 L'indice di SCT in direzione trasversale

Per l' $ISCT_{CD}$ non si sono ottenuti incrementi molto significativi per nessun tipo di carta: per l'U120-U127 l'incremento è stato dell'11%, uguale però alla dispersione; per l'M120 prodotto alla macchina 3, l'incremento è stato del 10%, di poco superiore alla dispersione (pari all'8%).

4.5.5 Il rapporto SCT_{MD}/SCT_{CD}

Il valore massimo del rapporto SCT_{MD}/SCT_{CD} è stato all'incirca uguale per tutti i tipi di carta e pari a 1.8 ed è stato ottenuto a bias compresi fra -15 e +15. Il valore minimo è stato un po' più variabile e comunque compreso fra 1.54, ottenuto con l'U120-U127, e 1.80, ottenuto con l'F112.

Con l'F112 si è ottenuta la minima variazione del rapporto SCT_{MD}/SCT_{CD} con il bias, pari soltanto ad un 4%: ciò sembra mostrare che, per questo tipo di carta, la differenza di velocità fra il getto e la tela non abbia molta influenza sul grado di anisotropia della carta. La massima variazione, pari al 15%, è stata ottenuta, inaspettatamente, con l'U120-U127; la ragione per la quale non ci si attendeva questo risultato è che si riteneva che il trattamento superficiale in size press avrebbe dovuto rendere più uniformi le caratteristiche della carta, diminuendone il grado di anisotropia indotto dall'orientamento direzionale delle fibre, mentre sembra che così non sia.

Il grafico xxx anticipa, in qualche modo, l'argomento delle correlazioni, che sarà affrontato nel paragrafo seguente; in esso è mostrata la correlazione fra il rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD} e quello SCT_{MD}/SCT_{CD} : le coordinate di ogni punto del grafico rappresentano, rispettivamente, il valore medio del TSI_{MD}/TSI_{CD} e quello del SCT_{MD}/SCT_{CD} calcolati per un determinato valore del bias. Il coefficiente di correlazione della retta di regressione è risultato pari a 0.84 il che conferma quanto già appare evidente ad occhio e cioè la buona correlazione fra i due valori, da cui si deduce che il grado di anisotropia della carta influenzi il modulo di elasticità e la resistenza alla compressione allo stesso modo.

Da notare, infine, come il rapporto TSI_{MD}/TSI_{CD} sia fra un 20% e un 40% più elevato del rapporto SCT_{MD}/SCT_{CD} .

4.6 Correlazioni fra modulo di elasticità e caratteristiche meccaniche

In questo paragrafo verrà esaminato il grado di correlazione fra il modulo di elasticità e le caratteristiche meccaniche dei vari tipi di carta. Le correlazioni prese in esame sono quelle fra l'ICMT e il TSI_{MD} , fra l'ICCT e il TSI_{CD} , fra l' $ISCT_{MD}$ e il TSI_{MD} e fra l' $ISCT_{CD}$ e il TSI_{CD} . Da sottolineare che le coordinate di ciascun punto rappresentano i risultati delle singole misure e non dei valori medi.

Di ciascun insieme di dati è stata fatta la regressione lineare che, ricordiamo, consiste nel determinare l'equazione della retta che meglio si adatta ai dati stessi e nel valutare quanto bene questa retta li rappresenti; i coefficienti più significativi delle regressioni sono stati raccolti in tabelle (una per ciascun tipo di carta) nelle quali, per ogni coppia di grandezze in esame, sono state indicate:

- la PENDENZA: rappresenta il coefficiente angolare della retta di regressione, il quale, come quello di ogni retta, è legato all'inclinazione della stessa; una retta orizzontale ha pendenza uguale a zero, una retta crescente ha coefficiente angolare positivo (tanto maggiore quanto più l'angolo con l'asse orizzontale si avvicina a 90°), una retta decrescente ha coefficiente angolare negativo (tanto più piccolo quanto più l'angolo con l'asse orizzontale si avvicina a 90°);
- l'INTERCETTA: rappresenta il valore, calcolato per mezzo dell'equazione della retta di regressione, della coordinata verticale (ordinata) quando quella orizzontale (ascissa) è zero; nel nostro caso, è pari al valore (estrapolato) della resistenza alla compressione della carta quando il modulo di elasticità vale zero; da sottolineare che questa grandezza ha un significato puramente matematico e non fisico;
- il COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE: è un parametro, calcolato per mezzo di una formula, che permette di valutare quanto buona sia la correlazione, cioè quanto bene la retta di regressione riproduca l'andamento descritto dai dati; il suo valore è sempre compreso fra 0 e 1; un valore pari ad 1 indica una perfetta correlazione, mentre quanto più i dati si discostano dalla retta di regressione, tanto più il coefficiente di correlazione si avvicina a zero;
- la PROBABILITA' DI NON CORRELAZIONE: rappresenta la probabilità che, nel caso le due grandezze in esame non siano correlate, esse abbiano un coefficiente di correlazione lineare maggiore o uguale a quello calcolato;
- l'ERRORE (%): rappresenta l'errore medio percentuale che si è commesso calcolando la resistenza alla compressione della carta per mezzo della retta di regressione lineare e del valore del modulo di elasticità:

$$\text{errore}(\%) = \frac{|V_{cal} - V_{mis}|}{V_{mis}} * 100 \text{ dove } V_{mis} \text{ è il valore misurato}$$

mentre

$$V_{cal} = \text{pendenza} * TSI + \text{intercetta} \text{ è il valore calcolato}$$

Nei grafici, oltre all'insieme dei punti, sono rappresentati anche il grafico della retta di regressione, l'equazione della stessa (nella forma $y = mx + q$ dove m = pendenza e q = intercetta) e il coefficiente di correlazione (R^2).

Sebbene i coefficienti di correlazione siano tutti quanti notevolmente inferiori ad uno, l'errore percentuale medio che si commette valutando la resistenza alla compressione per mezzo della curva di regressione e del TSI è piccolo, essendo per tutti i tipi di carta e di prove sempre compreso fra il 3% e il 4%. Considerando che la dispersione attorno al valore medio delle misure della resistenza alla compressione è compresa fra il 6% e il 10%, si può concludere che lo strumento ad ultrasuoni può essere efficacemente utilizzato per misurare CMT, CCT e SCT a partire dal valore del TSI, utilizzando opportune rette di taratura, valide ciascuna per un determinato tipo di produzione.

Da sottolineare comunque che i valori sensibilmente inferiori all'unità ottenuti per i coefficienti di correlazione non escludono il legame fra le grandezze considerate, anche perché la dispersione nei risultati indotta da svariati fattori difficilmente controllabili, primo fra tutti la variabilità nella qualità della materia prima, gioca certamente un ruolo dominante. Inoltre bisogna considerare che il valore minimo del coefficiente di correlazione in grado di garantire una correlazione significativa fra due grandezze dipende anche dal numero di coppie di valori a disposizione. Una correlazione è considerata significativa se la probabilità (che noi abbiamo definito di non correlazione) che due grandezze incorrelate fra di loro forniscano un coefficiente di correlazione r maggiore o uguale a quello calcolato r_0 è inferiore al 5%; se si hanno a disposizione 5 coppie di valori, per avere una correlazione significativa, r_0 dovrebbe essere pari circa a 0.9, mentre se si hanno a disposizione 50 coppie di valori, r_0 può assumere un valore molto inferiore, pari a circa 0.3. Dai valori della probabilità di non correlazione tabulati nelle tabelle, si ricava che almeno nel 50% dei casi si hanno correlazioni abbastanza significative (probabilità di non correlazione inferiore al 10%).

TABELLA DI RIEPILOGO TSO (°) F112 M4

	MEDIO	VARIAZ. (°)	MASSIMO	MINIMO	LATO SERVIZI	CENTRO	LATO COMANDI
-50	-2,11	7,1	1,69	-5,44	-4,22	-3,59	0,78
-30	-0,99	5,4	1,86	-3,50	-2,73	-1,51	1,86
-15	-0,21	5,7	2,71	-2,97	-1,98	-0,86	1,51
0	1,72	6,4	4,67	-1,70	-0,68	1,90	2,03
15	0,72	7,9	4,53	-3,32	-2,03	0,94	2,64
30	-5,63	10,9	1,25	-9,69	-9,32	-6,60	1,25
50	-5,45	9,3	0,47	-8,87	-8,75	-7,03	0,47

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)=

....

TABELLA DI RIEPILOGO TSO (°) M120-M127 M4

	MEDIO	VARIAZ. (°)	MASSIMO	MINIMO	LATO SERVIZI	CENTRO	LATO COMANDI
-50	-0,09	8,5	3,99	-4,53	-2,79	0,03	3,23
-30	0,52	5,4	3,18	-2,23	-1,33	-0,06	2,83
-15	2,26	5,4	4,77	-0,65	0,76	3,05	3,61
0	1,32	7,8	5,00	-2,77	-0,68	1,27	5,00
15	-4,19	9,8	1,54	-8,23	-5,23	-6,02	0,10
30	-3,29	10,6	2,42	-8,20	-5,80	-4,63	2,15
50	-7,60	15,3	1,88	-13,44	-12,58	-9,73	-1,13

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)=

....

TABELLA DI RIEPILOGO TSO (°) M140 M4

	MEDIO	VARIAZ. (°)	MASSIMO	MINIMO	LATO SERVIZI	CENTRO	LATO COMANDI
-50							
-30	-0,30	10,8	5,23	-5,55	-2,50	-0,94	2,89
-15	-1,07	8,4	3,01	-5,39	-3,59	-0,59	1,96
0	-0,53	6,1	2,54	-3,60	-1,64	0,20	-0,74
15	-1,70	5,1	0,86	-4,22	-2,93	-0,12	0,32
30	-1,32	6,0	1,49	-4,50	0,24	-3,13	-0,71
50	-2,97	20,4	9,18	-11,25	-5,51	-4,14	6,57

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)=

....

TABELLA DI RIEPILOGO TSO (°) U120-U127 M4

	MEDIO	VARIAZ. (°)	MASSIMO	MINIMO	LATO SERVIZI	CENTRO	LATO COMANDI
-50	0,08	12,9	6,41	-6,48	-2,19	-0,31	3,67
-30	-1,96	9,4	2,52	-6,84	-2,89	-1,96	1,00
-15	-1,11	6,9	2,48	-4,42	-2,75	-1,47	2,48
0	-1,29	5,7	1,54	-4,16	-3,26	-1,27	1,47
15	-0,61	4,1	1,43	-2,70	-2,23	-0,98	0,76
30	-0,51	5,4	2,46	-2,97	-1,09	-0,57	0,47
50	-4,37	19,8	7,19	-12,58	-8,38	-8,10	4,67

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)=

....

TABELLA DI RIEPILOGO TSO (°) M120 M3

	MEDIO	VARIAZ. (°)	MASSIMO	MINIMO	LATO SERVIZI	CENTRO	LATO COMANDI
-50	1,55	8,2	5,55	-2,66	-1,80	2,73	5,55
-30	-0,41	6,6	2,82	-3,83	-3,05	0,08	2,82
-15	-0,90	6,0	3,05	-3,00	-2,37	-1,10	3,05
0	-0,12	6,3	3,22	-3,07	-3,07	0,96	3,13
15	-0,37	8,6	4,42	-4,22	-1,45	-0,04	3,79
30	-0,57	9,8	3,71	-6,13	-3,63	0,47	3,52
50							

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)=

....

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd (kNm/g) F112 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	7,54	2,3	7,67	7,40	7,59	7,50	-1
-30	7,64	3,1	7,85	7,44	7,63	7,85	3
-15	7,75	4,7	7,99	7,46	7,68	7,89	3
0	7,67	5,6	7,83	7,45	7,66	7,82	2
15	7,56	3,5	7,88	7,23	7,58	7,71	2
30	7,57	4,4	7,77	7,36	7,50	7,77	4
50	7,64	4,9	7,77	7,27	7,62	7,67	1

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)= 2,8

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd (kNm/g) M120-M127 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	8,21	4,1	8,45	7,86	8,07	8,21	2
-30	8,43	4,2	8,71	8,15	8,33	8,54	3
-15	8,43	3,8	8,70	8,19	8,32	8,54	3
0	8,30	5,6	8,63	8,03	8,32	8,32	0
15	8,37	3,9	8,50	8,15	8,32	8,38	1
30	8,12	3,5	8,27	8,00	8,10	8,06	0
50	8,01	4,6	8,29	7,57	7,90	8,03	2

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)= 5,3

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd (kNm/g) M140 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50							
-30	7,38	0,0	7,67	6,96	7,36	7,35	0
-15	7,74	7,2	7,97	7,49	7,72	7,65	-1
0	7,81	7,2	8,06	7,53	7,76	7,70	-1
15	7,91	6,3	8,21	7,63	7,85	7,82	0
30	7,92	3,6	8,16	7,29	7,79	8,14	5
50	7,79	6,1	8,03	7,48	7,58	7,97	5

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)= 7,3

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd (kNm/g) U120-U127 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	8,10	0,0	8,63	7,96	8,04	8,15	1
-30	8,80	8,7	9,03	8,57	8,70	8,86	2
-15	8,88	8,3	9,08	8,67	8,77	8,95	2
0	9,03	5,5	9,26	8,72	8,88	9,15	3
15	9,21	5,8	9,41	8,98	9,14	9,17	0
30	9,18	4,1	9,28	9,07	9,13	9,22	1
50	8,43	11,0	9,59	7,96	9,08	8,17	-10

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)= 13,7

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd (kNm/g) M120 M3

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	7,95	0,0	8,24	7,57	8,17	7,98	-2
-30	8,55	4,9	8,80	8,28	8,36	8,58	3
-15	8,81	5,1	9,03	8,56	8,61	9,03	5
0	8,85	6,0	9,27	8,55	8,80	8,55	-3
15	8,57	2,9	8,76	8,26	8,75	8,48	-3
30	8,79	9,7	9,06	8,49	8,60	8,80	2
50							

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)= 11,4

TABELLA DI RIEPILOGO TS_{Icd} (kNm/g) F112 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	3,05	5,0	3,30	2,75	2,88	3,27	13
-30	3,01	4,9	3,30	2,74	2,86	3,16	11
-15	3,03	5,3	3,23	2,72	2,86	3,23	13
0	2,98	5,7	3,24	2,69	2,83	3,24	14
15	3,21	6,3	3,51	2,82	2,99	3,38	13
30	3,06	5,9	3,23	2,87	2,98	3,18	7
50	3,02	9,4	3,19	2,80	2,90	3,13	8

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)= 7,9TABELLA DI RIEPILOGO TS_{Icd} (kNm/g) M120-M127 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	3,57	5,5	3,76	3,30	3,41	3,74	10
-30	3,56	4,0	3,75	3,27	3,44	3,74	9
-15	3,59	4,8	3,80	3,33	3,45	3,80	10
0	3,76	10,2	3,99	3,45	3,57	3,95	10
15	3,74	2,9	3,95	3,46	3,58	3,94	10
30	3,80	10,7	4,00	3,43	3,68	4,00	9
50	3,96	9,9	4,23	3,55	3,69	4,13	12

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)= 11,2TABELLA DI RIEPILOGO TS_{Icd} (kNm/g) M140 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50							
-30	3,57	0,0	3,81	3,22	3,34	3,75	12
-15	3,57	6,8	3,75	3,36	3,40	3,71	9
0	3,52	5,4	3,71	3,31	3,42	3,63	6
15	3,55	4,5	3,71	3,40	3,40	3,71	9
30	3,76	8,2	3,96	3,51	3,56	3,81	7
50	3,69	3,1	3,89	3,46	3,51	3,78	8

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)= 6,7TABELLA DI RIEPILOGO TS_{Icd} (kNm/g) U120-U127 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	3,97	0,0	4,24	3,39	3,92	4,23	8
-30	4,21	8,8	4,38	3,94	4,00	4,26	6
-15	4,13	7,2	4,34	3,89	3,95	4,28	8
0	4,15	5,7	4,39	3,96	3,98	4,29	8
15	4,17	6,6	4,36	3,98	4,05	4,32	7
30	4,23	5,3	4,39	4,07	4,14	4,31	4
50	4,68	14,7	4,94	4,40	4,49	4,84	8

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)= 18,0TABELLA DI RIEPILOGO TS_{Icd} (kNm/g) M120 M3

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	3,57	0,0	3,73	3,39	3,54	3,59	2
-30	3,64	4,0	3,79	3,37	3,51	3,77	7
-15	3,60	6,4	3,79	3,30	3,52	3,74	6
0	3,66	3,0	3,86	3,47	3,54	3,66	4
15	3,67	3,3	3,81	3,47	3,53	3,78	7
30	3,68	7,5	3,84	3,47	3,63	3,81	5
50							

INCREMENTO MEDIO ((MEDIO_{max}-MEDIO_{min})/MEDIO_{min}*100 %)= 3,0

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd / TSId (kNm/g) F112 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	2,48	5,9	2,77	2,28	2,64	2,30	-13
-30	2,55	5,2	2,75	2,34	2,67	2,49	-7
-15	2,57	3,5	2,78	2,44	2,68	2,45	-9
0	2,59	4,6	2,80	2,39	2,71	2,42	-11
15	2,37	7,3	2,70	2,14	2,55	2,29	-10
30	2,48	7,3	2,60	2,34	2,52	2,44	-3
50	2,54	10,3	2,73	2,38	2,64	2,45	-7

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)=

9,1

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd / TSId (kNm/g) M120-M127 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	2,31	7,5	2,54	2,20	2,37	2,20	-7
-30	2,37	6,2	2,57	2,29	2,42	2,29	-6
-15	2,35	5,0	2,49	2,22	2,42	2,26	-7
0	2,22	14,6	2,39	2,09	2,34	2,12	-9
15	2,24	4,3	2,39	2,11	2,33	2,13	-8
30	2,15	12,3	2,36	2,03	2,21	2,03	-8
50	2,03	14,0	2,30	1,86	2,16	1,95	-10

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)=

17,0

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd / TSId (kNm/g) M140 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50							
-30	2,07	0,0	2,29	1,94	2,21	1,96	-11
-15	2,20	7,8	2,29	2,05	2,27	2,07	-9
0	2,22	4,3	2,31	2,10	2,27	2,12	-7
15	2,23	4,4	2,32	2,11	2,31	2,11	-9
30	2,15	9,8	2,27	1,84	2,20	2,14	-3
50	2,12	8,0	2,21	2,02	2,17	2,11	-3

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)=

7,7

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd / TSId (kNm/g) U120-U127 M4

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	2,05	0,0	2,35	1,88	2,05	1,92	-6
-30	2,12	6,2	2,22	2,01	2,17	2,09	-4
-15	2,15	4,8	2,28	2,05	2,22	2,09	-6
0	2,18	5,4	2,28	2,09	2,23	2,14	-4
15	2,21	5,4	2,35	2,13	2,26	2,13	-6
30	2,17	5,9	2,24	2,11	2,21	2,15	-3
50	1,82	24,8	2,21	1,66	2,05	1,71	-17

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)=

21,4

TABELLA DI RIEPILOGO TSImd / TSId (kNm/g) M120 M3

	MEDIO	DISPERS. (%)	MASSIMO	MINIMO	MEDIA BORDI	CENTRO	VARIAZ. (%)
-50	2,23	0,0	2,29	2,14	2,29	2,23	-3
-30	2,36	6,7	2,51	2,24	2,40	2,28	-5
-15	2,45	6,1	2,59	2,34	2,47	2,41	-2
0	2,42	7,1	2,65	2,33	2,49	2,33	-6
15	2,34	6,0	2,53	2,25	2,49	2,25	-10
30	2,41	16,1	2,62	2,27	2,36	2,33	-1
50							

INCREMENTO MEDIO ((MEDIOmax-MEDIOmin)/MEDIOmin*100 %)=

10,2

TABELLA DI RIEPILOGO DATI PROVE DI COMPRESSIONE F112 M4

	MINIMO	BIAS (m/min)	MASSIMO	BIAS (m/min)	INCREMENTO (%)	DISPERSIONE (%)
TSImd (kNm/g)	7,45	-50	7,72	-15	4	4
TSIcd (kNm/g)	2,87	-15	3,11	15	9	12
ICMT (Nm ² /g)	1,02	-50	1,13	0	11	6
ICCT (Nm ² /g)	1,15	-50	1,25	50	9	6
ISCTmd (Nm/g)	19,5	-50	20,5	-15	5	8
ISCTcd (Nm/g)	10,8	-50	11,1	15	3	9
ISCTcd/ISCTcd	1,80	15	1,87	-15	4	9

TABELLA DI RIEPILOGO DATI PROVE DI COMPRESSIONE M120-M127 M4

	MINIMO	BIAS (m/min)	MASSIMO	BIAS (m/min)	INCREMENTO (%)	DISPERSIONE (%)
TSImd (kNm/g)	7,89	50	8,40	-30	6	5
TSIcd (kNm/g)	3,47	-50	3,84	50	10	11
ICMT (Nm ² /g)	1,39	15	1,42	-30	2	8
ICCT (Nm ² /g)	1,65	-15	1,72	50	5	7
ISCTmd (Nm/g)	24,0	50	25,1	-50	5	8
ISCTcd (Nm/g)	13,6	-15	14,7	-50	8	10
ISCTcd/ISCTcd	1,66	50	1,83	-15	11	10

TABELLA DI RIEPILOGO DATI PROVE DI COMPRESSIONE M140 M4

	MINIMO	BIAS (m/min)	MASSIMO	BIAS (m/min)	INCREMENTO (%)	DISPERSIONE (%)
TSImd (kNm/g)	7,38	-30	7,96	30	8	6
TSIcd (kNm/g)	3,46	15	3,68	30	6	8
ICMT (Nm ² /g)	1,37	0	1,46	15	7	5
ICCT (Nm ² /g)	1,65	0	1,73	30	5	6
ISCTmd (Nm/g)	23,1	0	24,3	15	5	6
ISCTcd (Nm/g)	13,8	15	14,5	-30	5	7
ISCTcd/ISCTcd	1,63	30	1,75	15	7	8

TABELLA DI RIEPILOGO DATI PROVE DI COMPRESSIONE U120-U127 M4

	MINIMO	BIAS (m/min)	MASSIMO	BIAS (m/min)	INCREMENTO (%)	DISPERSIONE (%)
TSImd (kNm/g)	8,05	-50	9,31	30	16	6
TSIcd (kNm/g)	3,99	-50	4,47	50	12	8
ICMT (Nm ² /g)	1,52	-50	1,85	15	22	10
ICCT (Nm ² /g)	1,88	-50	2,24	50	19	8
ISCTmd (Nm/g)	26,0	-50	30,4	15	17	10
ISCTcd (Nm/g)	16,5	-50	18,3	50	11	11
ISCTcd/ISCTcd	1,54	50	1,78	15	15	11

TABELLA DI RIEPILOGO DATI PROVE DI COMPRESSIONE M120 M3

	MINIMO	BIAS (m/min)	MASSIMO	BIAS (m/min)	INCREMENTO (%)	DISPERSIONE (%)
TSImd (kNm/g)	8,19	-50	8,77	30	7	7
TSIcd (kNm/g)	3,42	-50	3,66	-30	7	8
ICMT (Nm ² /g)	1,32	-50	1,51	30	15	7
ICCT (Nm ² /g)	1,48	-50	1,66	15	12	6
ISCTmd (Nm/g)	22,6	-50	27,3	-15	21	8
ISCTcd (Nm/g)	13,4	-50	14,8	15	10	8
ISCTcd/ISCTcd	1,67	-50	1,82	-15	9	10

**TABELLA DI RIEPILOGO DATI CORRELAZIONI PROVE DI COMPRESSIONE - TSI
F112 M4**

	ICMT - TSImd	ICCT - TSId	ISCTmd - TSImd	ISCTcd - TSId
PENDENZA	0,079	0,104	1,136	1,078
INTERCETTA	0,486	0,902	11,480	7,718
COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	0,12	0,21	0,08	0,17
PROB.TA' DI NON CORRELAZIONE	41	16	38	8
ERRORE (%)	4	3	4	4

**TABELLA DI RIEPILOGO DATI CORRELAZIONI PROVE DI COMPRESSIONE - TSI
M120-M127 M4**

	ICMT - TSImd	ICCT - TSId	ISCTmd - TSImd	ISCTcd - TSId
PENDENZA	0,055	0,128	0,385	2,116
INTERCETTA	0,946	1,225	21,316	6,533
COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	0,04	0,22	0,01	0,45
PROB.TA' DI NON CORRELAZIONE	65	7	100	0
ERRORE (%)	4	3	4	4

**TABELLA DI RIEPILOGO DATI CORRELAZIONI PROVE DI COMPRESSIONE - TSI
M140 M4**

	ICMT - TSImd	ICCT - TSId	ISCTmd - TSImd	ISCTcd - TSId
PENDENZA	0,010	0,055	0,153	1,800
INTERCETTA	1,338	1,487	22,530	7,722
COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	0,003	0,037	0,002	0,260
PROB.TA' DI NON CORRELAZIONE	100	90	100	50
ERRORE (%)	3	3	4	3

**TABELLA DI RIEPILOGO DATI CORRELAZIONI PROVE DI COMPRESSIONE - TSI
U120-U127 M4**

	ICMT - TSImd	ICCT - TSId	ISCTmd - TSImd	ISCTcd - TSId
PENDENZA	0,257	0,321	2,492	2,100
INTERCETTA	-0,531	0,743	6,977	8,393
COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	0,61	0,39	0,36	0,35
PROB.TA' DI NON CORRELAZIONE	0	0	1	1
ERRORE (%)	4	4	4	3

**TABELLA DI RIEPILOGO DATI CORRELAZIONI PROVE DI COMPRESSIONE - TSI
M120 M3**

	ICMT - TSImd	ICCT - TSId	ISCTmd - TSImd	ISCTcd - TSId
PENDENZA	0,128	0,331	1,836	0,910
INTERCETTA	0,359	0,437	10,149	11,210
COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE	0,35	0,44	0,27	0,05
PROB.TA' DI NON CORRELAZIONE	1	0	10	75
ERRORE (%)	4	3	5	4

Bibliografia

- Monografia sulla fabbricazione del cartone ondulato
(*G.I.F.C.O.*)
 - “Introduzione alla fabbricazione della carta”
(*Aticelca*)
 - “Prove sulle materie fibrose, sulla carta e sul cartone”
(*Edoardo Grandis*)
 - “Compression resistance, strength: what they mean to the paper machines ”
(*Gunnar Lindblad, AB Lorentzen & Wettre, Kista, Sweden*)
 - “TSO measurements as a tool for profile control”
(*Gunnar Lindblad, AB Lorentzen & Wettre, Kista, Sweden*)
 - “The relationship between measurements made with an ultra sonic tester and other classic paper test methods”
(*Gunnar Lindblad, AB Lorentzen & Wettre, Kista, Sweden*)
 - “Ultrasonic testing – a major contribution in search for improved paper machine performance”
(*SCA research*)
 - “Appunti di tecnologia cartaria”
(*Paolo Zaninelli*)
-